

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده برق و رباتیک
رشته برق گرایش کنترل

پایان نامه کارشناسی ارشد

کنترل امیدانس تطبیقی مقاوم مدل مرجع بازوی رباتیک با راهبرد کنترل ولتاژ

نگارنده: غلامرضا نظم آرا

استاد راهنما:

پروفسور محمد مهدی فاتح

شهریور ۱۳۹۵

شماره: ۱۴۱۲ ر.ا.ت. پ
تاریخ: ۱۳۹۵/۰۶/۱۴

بسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

ویرایش: -----

فرم شماره ۷: صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد
خانم / آقای غلامرضا نظم آرا به شماره دانشجویی ۹۳۱۷۵۹۴ رشته مهندسی برق گرایش کنترل
که در تاریخ ۹۵/۰۶/۱۴ تحت عنوان:

کنترل امپدانس تطبیقی مقاوم مدل مرجع بازوی رباتیک با راهبرد کنترل ولتاژ

با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

<input type="checkbox"/> مردود	<input type="checkbox"/> دفاع مجدد	<input checked="" type="checkbox"/> قبول (با درجه: بسیار خوب امتیاز: ۱۸/۷۵)
		نوع تحقیق: <input checked="" type="checkbox"/> نظری <input type="checkbox"/> عملی

۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۸/۹۹)

۱- عالی (۱۹ - ۲۰)

۴- قابل قبول (۱۴ - ۱۵/۹۹)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	استاد	دکتر محمد مهدی کتانی	۱- استاد راهنمای اول
_____	_____	_____	۲- استاد راهنمای دوم
_____	_____	_____	۳- استاد مشاور
	دانشیار	دکتر محمد مهدی زعفرانی	۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
	استادیار	دکتر اکبر زارره	۵- استاد ممتحن اول
	استادیار	دکتر حبیب احمدی	۶- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



تقدیم بہ

پدر و مادر و سوزو، محترم ممبرانم

از استاد کرامی جناب آقای پروفور محمد مهدی فاتح به خاطر
راهنمایی‌های کراتقدرشان، کمال تشکر و قدردانی را دارم، همچنین از
افراد خانواده ام که همواره پشتیبان بزرگی برایم بوده‌اند و در تمام مسیر
بایه می‌تسلی خاطر و آرامشم کشته‌اند بسیار سپاسگزارم.

تعهد نامه

اینجانب غلامرضا نظم‌آرا دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق (گرایش کنترل) دانشکده برق دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه کنترل امپدانس تطبیقی مقاوم مدل مرجع بازوی رباتیک با راهبرد کنترل ولتاژ تحت راهنمایی پروفسور محمد مهدی فاتح متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در 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 می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) 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.

چکیده

در این پایان نامه، طرح کنترل کننده امیدانس تطبیقی مقاوم مدل مرجع، با راهبرد کنترل ولتاژ برای بازوی رباتیک جهت تطبیق پارامترهای مدل امیدانس ربات به پارامترهای امیدانس مطلوب، با حضور عدم قطعیت‌های ساختاری و غیر ساختاری ارائه می‌شود. به این صورت که رفتار دینامیکی مطلوب ربات در تعامل با محیط، به عنوان یک مدل مرجع در نظر گرفته شده است و از نیروی تماس بین ربات و محیط به عنوان سیگنال مرجع و یا ورودی سیستم استفاده شده است. سیستم دو حلقه کنترلی دارد. حلقه داخلی که یک حلقه پسخورد معمولی است و از کنترل کننده و ربات تشکیل شده است و حلقه پسخورد خارجی که پارامترهای کنترل کننده را تنظیم می‌کند، حلقه دوم را تشکیل می‌دهد. سیستم کنترل پیشنهاد شده در مقابل عدم قطعیت‌های پارامتری و غیر پارامتری نظیر اغتشاش خارجی و دینامیک‌های مدل نشده مقاوم بوده و ربات با وجود این نامعینی‌ها به خوبی مدل مرجع را دنبال می‌کند. در طرح پیشنهادی از روش لیاپانوف برای تضمین همگرایی خطای امیدانس به صفر و استخراج قوانین تطبیق استفاده شده است. طرح کنترل پیشنهادی با قانون کنترل امیدانس به روش خطی‌سازی پسخورد و با هر دو راهبرد کنترل گشتاور و کنترل ولتاژ مقایسه شده است. تحلیل و شبیه‌سازی روش‌های فوق بر روی یک ربات اسکارا با فرض قفل بودن مفصل چهارم انجام گرفته است. نتایج شبیه‌سازی کارایی روش پیشنهادی را نشان می‌دهند.

کلمات کلیدی: سیستم‌های تطبیقی مدل مرجع، کنترل امیدانس، راهبرد کنترل ولتاژ

فهرست

۱- فصل اول پیشگفتار.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- مروری بر تحقیقات پیشین.....	۲
۳-۱- اهداف تحقیق.....	۵
۴-۱- مروری بر ساختار پایان نامه.....	۶
۲- فصل دوم سینماتیک و دینامیک ربات.....	۷
۱-۲- مقدمه.....	۸
۲-۲- سینماتیک ربات.....	۸
۱-۲-۲- معادلات سینماتیک مستقیم ربات.....	۸
۲-۲-۲- سینماتیک معکوس ربات.....	۱۰
۳-۲- ژاکوبین بازوی ربات.....	۱۱
۴-۲- دینامیک ربات.....	۱۲
۱-۴-۲- انرژی جنبشی ربات.....	۱۲
۲-۴-۲- انرژی پتانسیل ربات.....	۱۳
۳-۴-۲- معادلات دینامیکی ربات.....	۱۴
۴-۴-۲- مدل سازی نیروی تماسی محیط.....	۱۶
۵-۴-۲- تکین ها.....	۱۶
۶-۴-۲- دینامیک موتورها.....	۱۷
۷-۴-۲- مدل فضای حالت ربات با در نظر گرفتن دینامیک محرکه.....	۱۷
۵-۲-۵- مدل سازی سینماتیکی و دینامیکی ربات اسکارا.....	۱۸
۱-۵-۲- معادلات سینماتیک مستقیم ربات اسکارا.....	۱۸
۲-۵-۲- معادلات سینماتیک معکوس ربات اسکارا.....	۲۱
۳-۵-۲- معادله دینامیکی ربات اسکارا با فرض قفل بودن مفصل چهارم.....	۲۲

۲۳	۲-۵-۴- ماتریس ژاکوبین ربات اسکارا
۲۳	۲-۶- جمع بندی
۲۵	۳- فصل سوم اصول اساسی کنترل امیدانس تطبیقی مقاوم مدل مرجع
۲۶	۳-۱- مقدمه
۲۶	۳-۲- کنترل تعامل دینامیکی ربات با محیط
۲۶	۳-۲-۱- کنترل ترکیبی موقعیت-نیرو
۲۷	۳-۲-۲- کنترل امیدانس
۳۴	۳-۳- کنترل مقاوم
۳۵	۳-۳-۱- کنترل حالت لغزشی
۳۹	۳-۴- کنترل تطبیقی
۳۹	۳-۴-۱- چرا کنترل تطبیقی؟
۴۰	۳-۴-۲- روش های کنترل تطبیقی
۴۱	۳-۵- اصول اساسی کنترل تطبیقی مدل مرجع
۴۲	۳-۵-۱- دسته بندی روش های طراحی سیستم های کنترل تطبیقی مدل مرجع
۴۳	۳-۶- مقایسه سیستم های MRAS و STR
۴۴	۳-۷- روش تخمین نامعینی های ربات با استفاده از روش تاخیر زمانی
۴۵	۳-۸- جمع بندی
۴۷	۴- فصل چهارم روش کنترل امیدانس به روش خطی سازی پسخورد
۴۸	۴-۱- مقدمه
۴۸	۴-۲- قانون کنترل امیدانس با راهبرد کنترل گشتاور
۴۹	۴-۲-۱- شبیه سازی
۵۲	۴-۳- قانون کنترل امیدانس با راهبرد کنترل ولتاژ
۵۳	۴-۳-۱- شبیه سازی
۵۵	۴-۴- جمع بندی
۵۷	۵- فصل پنجم روش پیشنهادی
۵۸	۵-۱- مقدمه
۵۸	۵-۲- روش کنترل پیشنهادی
۵۸	۵-۲-۱- مدل سازی
۶۰	۵-۲-۲- کنترل امیدانس تطبیقی مقاوم مدل مرجع بازوی رباتیک

۶۳	۳-۵- اثبات پایداری سیستم
۶۶	۴-۵- شبیه‌سازی روش پیشنهادی
۶۹	۵-۵- تحلیل، ارزیابی و مقایسه نتایج
۷۰	۵-۶- جمع‌بندی
۷۱	۶- فصل ششم نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۷۲	۶-۱- نتیجه‌گیری
۷۲	۶-۲- پیشنهادات
۷۳	مراجع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲- بازوی ربات اسکارا مدل E2L653S..... ۱۹
- شکل ۲-۲- پیکربندی بازوی ربات اسکارا..... ۱۹
- شکل ۳-۲- فضای کاری بازوی ربات اسکارا..... ۲۰
- شکل ۴-۲- پیکربندی بازوی ربات اسکارا از نمای دیگر..... ۲۱
- شکل ۱-۳- بلوک دیاگرام کنترل ترکیبی موقعیت-نیرو..... ۲۷
- شکل ۲-۳- شبکه تک قطبی..... ۲۷
- شکل ۳-۳- سیستم جرم-فنر-دمپر..... ۲۸
- شکل ۴-۳- تغییر امپدانس ظاهری جرم، از طریق اعمال نیرو..... ۲۹
- شکل ۵-۳- ربات و محیط در تعامل با یکدیگر..... ۳۱
- شکل ۶-۳- مدل تونن امپدانس مطلوب ربات..... ۳۱
- شکل ۷-۳- مدل تونن امپدانس محیط..... ۳۱
- شکل ۸-۳- ربات و محیط در تعامل با یکدیگر..... ۳۱
- شکل ۹-۳- سطح لغزشی در صفحه فاز دو بعدی..... ۳۷
- شکل ۱۰-۳- نوسان و لایه‌ی مرزی..... ۳۸
- شکل ۱۱-۳- سیستم کنترل تطبیقی خود تنظیم..... ۴۰
- شکل ۱۲-۳- سیستم کنترل تطبیقی مدل مرجع..... ۴۱
- شکل ۱-۴- گشتاور اعمالی به مفاصل ربات..... ۵۰
- شکل ۲-۴- نیروی تماسی ناشی از تعامل دینامیکی ربات با محیط..... ۵۱
- شکل ۳-۴- ردیابی ربات از مسیر مطلوب..... ۵۱
- شکل ۴-۴- مسیر مطلوب ربات در فضای کار..... ۵۲
- شکل ۵-۴- ولتاژ اعمالی به مفاصل ربات..... ۵۴
- شکل ۶-۴- نیروی تماسی ناشی از تعامل دینامیکی ربات با محیط..... ۵۴
- شکل ۷-۴- ردیابی ربات از مسیر مطلوب..... ۵۵
- شکل ۱-۵- بلوک دیاگرام کنترل امپدانس پیشنهادی..... ۶۰
- شکل ۲-۵- گشتاش اعمالی به موتورها..... ۶۷

- شکل ۳-۵- نیروی تماسی ناشی از تعامل دینامیکی ربات با محیط..... ۶۷
- شکل ۴-۵- ولتاژ اعمالی به مفاصل ربات..... ۶۸
- شکل ۵-۵- ردیابی مدل مرجع از مسیر مطلوب..... ۶۸
- شکل ۶-۵- خطای ردیابی ربات از خروجی مدل مرجع (خطای امپدانس)..... ۶۹

فهرست جداول

- جدول ۱-۲- پارامترهای دناویت هارتنبرگ ربات اسکارا..... ۱۹
- جدول ۱-۴- پارامترهای دینامیکی ربات اسکارا..... ۴۸
- جدول ۲-۴- مشخصات موتورهای DC جریان مستقیم..... ۴۸

فهرست علائم و اختصارات

s	متغیر لاپلاس
S	سطح لغزش
$G(s)$	تابع تبدیل

متغیرها و پارامترهای الکتریکی

v	ولتاژ الکتریکی
I	جریان الکتریکی
R	مقاومت
L	اندوکتانس

متغیرها و پارامترهای مکانیکی (فضای مفصلی)

θ	موقعیت زاویه‌ای
q	متغیر مفصلی
n	بعد فضای مفصل
τ	گشتاور
I	ماتریس لختی
r	ضریب کاهشی چرخنده
K_m	ضریب ثابت گشتاور
J_m	ماتریس اینرسی روتورها
B_m	ماتریس میرایی موتور
K_b	ضریب ضد محرکه
$D(q)$	ماتریس اینرسی
$C(q, \dot{q})\dot{q}$	بردار کوریولیس و گریز از مرکز
$G(q)$	بردار گرانش
$J(q)$	ماتریس ژاکوبین

متغیرها و پارامترهای مکانیکی (فضای کار)

m	بعد فضای کار
-----------	--------------

x	موقعیت
v	سرعت
F	نیرو
l	طول
m	جرم
g	ثابت جاذبه
$\bar{D}(x)$	ماتریس اینرسی
$\bar{C}(x, \dot{x})$	بردار کوریولیس و گریز از مرکز
$\bar{G}(x)$	بردار گرانش

زیرنویس‌ها

$(\cdot)_r$	مربوط به ربات
$(\cdot)_m$	مربوط به پارامترهای مدل مرجع
$(\cdot)_d$	مربوط به سیگنال مطلوب
$(\cdot)_c$	مربوط به سیگنال فرمان
$(\cdot)_R$	مربوط به مدل امیدانس مطلوب
$(\cdot)_e$	مربوط به مدل امیدانس محیط
$(\cdot)_r$	مربوط به ربات
$(\cdot)_m$	مربوط به موتور
$(\cdot)_a$	مربوط به آرمیچر
$(\cdot)_i$	عنصر i -ام از بردار یا ماتریس قطری $(i = 1, \dots, n)$
$(\cdot)_j$	عنصر j -ام از بردار یا ماتریس قطری $(j = 1, \dots, m)$
$(\cdot)_k$	عنصر k -ام از بردار یا ماتریس قطری $(k = 1, \dots, n)$

بالانویس‌ها

$(\cdot)^T$	ترانپوز
$(\cdot)^{-1}$	معکوس ماتریس
$(\cdot)^*$	معکوس مجازی

فصل اول پیشگفتار

امروزه بشر شاهد گسترش روزافزون استفاده از ربات‌ها در عرصه‌های مختلف صنعت، پزشکی، عملیات اکتشاف، سرگرمی و خدمات می‌باشد. در حالت کلی کارهایی که ربات انجام می‌دهد به دو دسته کارهای غیر تماسی و کارهای تماسی تقسیم می‌گردد. کارهایی نظیر رنگ‌آمیزی، در دسته کارهایی غیر تماسی جای می‌گیرد و هدف اساسی در این دسته که سهم اندکی را به خود اختصاص می‌دهند، صرفاً کنترل موقعیت محض ربات در یک مسیر از پیش تعیین شده و مطلوب می‌باشد. اما ربات‌ها در انجام بسیاری از امور نظیر سوراخ کاری، جوشکاری، سنباده کاری و جازدن قطعات، بصورت اجتناب‌ناپذیری با محیط خود تعامل دارند. طبیعی است که در اثر این نوع تعامل نیروهایی به ربات و محیط اثر کند. در حالتی که ربات در تعامل با محیط قرار دارد، با کنترل موقعیت محض نمی‌توان به عملکرد مطلوب دست یافت، زیرا وجود خطاهای کوچک در ردیابی موقعیت، می‌تواند باعث بوجود آمدن نیروهای عکس العمل بسیار بزرگ بین ربات و محیط‌های سخت شده و نتایج فاجعه‌آمیز و مخاطره‌آمیزی را سبب شود. وجود این نیروها می‌تواند به ربات و محیط صدمات جدی وارد کند. بنابراین لازم است که در طراحی کنترل‌کننده‌ها به اندازه این نیروها توجه کافی شود و به نحوی از محدود ماندن این نیروهای تماسی اطمینان حاصل نمود. در کنترل تعامل ربات با محیط، تلاش می‌شود که ربات رفتار انعطاف‌پذیر و سازگاری با محیط، از خود نشان دهد. انعطاف‌پذیری ربات با محیط را می‌توان به دو روش غیرفعال و فعال کنترل نمود. در روش غیرفعال، ساختار مکانیکی ربات به عناصر غیرفعال نظیر فنر مجهز شده و از تغییر این عناصر، انعطاف‌پذیری ربات کنترل می‌شود. واضح است این روش به دلیل متغیر بودن محیط، کارایی چندانی نخواهد داشت. اما در روش فعال، کنترل انعطاف‌پذیری بصورت نرم‌افزاری و بدون نیاز به دست‌کاری‌های سخت‌افزاری صورت می‌پذیرد.

۲۱ مروری بر تحقیقات پیشین

تاکنون روش‌های کنترل فعال متعددی برای تنظیم انعطاف‌پذیری ربات در تعامل با محیط ارائه شده که عموماً در دو دسته اصلی کنترل ترکیبی موقعیت-نیرو^۱ و کنترل امپدانس^۲ جای می‌گیرند. در [۱-۲] یک روش کنترل ترکیبی موقعیت-نیرو با قابلیت کنترل موقعیت و نیرو ارائه شده است. ولی این روش دارای این مشکل است که کنترل همزمان موقعیت و نیرو امکان‌پذیر نیست بنابراین سیگنال کنترل مدام پرش خواهد کرد و تولید سیگنال کنترل موقعیت و نیروی نرم ممکن نخواهد بود.

^۱ Hybrid position/force control

^۲Hybrid impedance control

روش کنترل موقعیت-نیرو را می‌توان از نخستین روش‌های کنترلی دانست که به کنترل تعامل دینامیکی ربات با محیط می‌پردازد. در این روش، کنترل همزمان موقعیت و نیرو امکان پذیر نیست. بنابراین فضای کاری ربات به دو زیر فضای مجزا و متعامد کنترل نیرو و کنترل موقعیت تقسیم می‌شود و کنترل کننده در هر لحظه با توجه به زیر فضایی که در آن قرار دارد به کنترل نیرو و یا کنترل موقعیت می‌پردازد. کنترل کننده زمانی که ربات با محیط خود تماس ندارد (حرکت غیر مقید)، در زیر فضای کنترل موقعیت قرار دارد، بنابراین کنترل موقعیت انجام می‌دهد و در هنگامی که ربات با محیط خود در تماس و تعامل قرار دارد (حرکت مقید)، کنترل نیرو انجام می‌دهد.

مفهوم و اصول اساسی کنترل امیدانس برای نخستین بار در [۳] مطرح شد. بطوریکه طرح ارائه شده، از یک روش کنترل امیدانس برای کنترل رفتار دینامیکی ربات در تعامل با محیط با قابلیت کنترل یکپارچه موقعیت و نیرو استفاده می‌کرد. در این روش رفتار دینامیکی ربات با محیط بر اساس یک رابطه دینامیکی بین نیروهای تماس و موقعیت انجام می‌گیرد. در این روش، کنترل رفتار ربات بدون نیاز به کلید زنی، در حرکت‌های مقید و غیرمقید امکان پذیر می‌باشد. بنابراین در این روش تولید سیگنال کنترل و موقعیت نرم و یکپارچه امکان پذیر خواهد بود.

ربات‌ها عموماً دارای تزویج، دینامیک‌های غیرخطی و چند متغیره می‌باشند و از طرفی از آن جایی که در سیستم‌های واقعی ربات‌ها نمی‌توان از عدم قطعیت‌های پارامتری و یا دینامیک‌های مدل نشده و اغتشاش‌های خارجی صرف نظر نمود، ارائه روش‌هایی که بتواند بر این عدم قطعیت‌ها و نامعینی‌ها غلبه کند و در عین حال بر روی سیستم واقعی و پیچیده ربات قابل پیاده‌سازی باشد و رفتار دینامیکی مناسبی را برای ربات در برخورد با محیط سبب شود، همواره به عنوان یک چالش کنترلی مطرح می‌شود. اصول کنترل تطبیقی^۳ برای نخستین بار در [۴] برای سیستم‌های ربات ارائه شد بطوریکه در روش ارائه شده توسط اسلوتین و لی، به بسیاری از تحقیقات در حوزه کنترل تطبیقی بازوهای ربات توجه شد. ولی این روش در مواجهه با تغییرات سریع پارامترها و دینامیک‌های مدل نشده و نامعینی‌های ساختار نیافته نظیر اغتشاش‌های خارجی و دینامیک مدل نشده دارای عملکرد مناسبی نیست. در مقابل برای غلبه بر این نوع از عدم قطعیت‌ها، کنترل مقاوم^۴ ارائه شده است. روش کنترل مقاوم ارائه شده در [۵] برای غلبه بر عدم قطعیت‌های غیرپارامتری و دینامیک‌های مدل نشده مفید است ولی روش کنترل مقاوم پیشنهاد شده یک قانون کنترل ثابت بر مبنای تغییرات مشخص پارامترها بر مبنای مدل نامی ارائه می‌دهد. بنابراین روش مذکور برای غلبه بر عدم قطعیت‌های ساختاریافته نظیر اضافه بار یا تغییرات اینرسی نمی‌تواند خیلی مناسب باشد. از طرف دیگر یافتن یک مدل دقیق برای ربات با وجود این نامعینی‌ها عموماً مشکل است.

روش کنترل گشتاور محاسباتی به روش خطی‌سازی پس‌خورد در [۶-۷] ارائه شده است. یک اشکال اساسی روش خطی‌سازی پس‌خورد این است که برای پیاده‌سازی آن، باید مقدار دقیق پارامترهای ربات معین باشد. چرا که اگر مقدار دقیق آن‌ها مشخص نباشد هیچ تضمینی برای از بین

³ Adaptive control

⁴ Robust control

رفتن مولفه‌های غیرخطی توسط قانون پسخورد وجود ندارد. در [۸]، یک روش کنترل امیدانس ترکیبی از نوع تطبیقی ارائه شده است، بطوریکه روش ارائه شده قابلیت کنترل نیرو و موقعیت را با فرض وجود نامعینی در مدل محیط، در هر زیر فضای کنترلی بصورت همزمان دارا می‌باشد. با این توضیح که روش مذکور در طرح کنترلی خود تنها عدم قطعیت پارامتری را لحاظ کرده و برای غلبه بر عدم قطعیت‌های غیرساختاری نظیر اغتشاش خارجی و دینامیک مدل نشده روشی ارائه نکرده است. از طرفی طراحان در این روش از راهبرد کنترل گشتاور استفاده کرده‌اند، بنابراین استفاده از سیستم‌های واسط پیچیده در مسیر محرکه‌ها برای پیاده‌سازی و اعمال قانون کنترل ارائه شده، الزامی است.

بسیاری از روش‌های کنترل مقاوم و تطبیقی نظیر آنچه در [۹-۱۴] ارائه شده‌اند بر مبنای راهبرد کنترل گشتاور طراحی شده‌اند. اما در این راهبرد از دینامیک محرکه‌ها صرف‌نظر شده است و از طرفی قانون کنترل طراحی شده نمی‌تواند مستقیماً به ربات اعمال شود و حتماً دینامیک ربات باید در اختیار باشد. برای رفع این مشکل راهبرد کنترل ولتاژ در [۱۵] ارائه شده است که نسبت به کنترل گشتاور ساده‌تر بوده و از طرفی در این روش دینامیک محرکه‌ها نیز در طراحی لحاظ شده است و قانون کنترل، مستقیماً به موتورها که گشتاور اصلی ربات را فراهم می‌کنند، قابل اعمال هستند.

تحقیقات بسیار متنوع و ارزشمندی با راهبرد کنترل ولتاژ از نوع مقاوم و تطبیقی در [۱۶-۱۹] ارائه شده‌اند. در [۲۰] روش کنترل امیدانس برای بازوی رباتیک با استفاده از راهبرد کنترل ولتاژ، ارائه شده است و ضمن اثبات پایداری سیستم کنترل، به برتری روش کنترل ولتاژ نسبت به روش کنترل گشتاور اشاره می‌کند. با این توضیح که راهبرد کنترل ولتاژ در مقایسه با کنترل بر مبنای گشتاور ساده‌تر بوده و دارای محاسبات کمتر و عملکرد بهتر در اجرای قانون امیدانس می‌باشد.

در روش کنترل امیدانس با راهبرد کنترل ولتاژ بحث غلبه بر عدم قطعیت‌های ساختاریافته و یا دینامیک‌های مدل نشده و اغتشاش‌های خارجی به عنوان یک چالش مطرح می‌شود، برای غلبه بر این عدم قطعیت‌ها، استفاده از یک کنترل ترکیبی تطبیقی-مقاوم می‌تواند بسیار مناسب باشد، چرا که روش‌های کنترل تطبیقی از نظر مقابله با عدم قطعیت‌ها، در پارامترهای ثابت یا پارامترهای متغیر با نرخ تغییرات آهسته و دارا بودن قابلیت بهبود عملکرد در حین تطبیق نسبت به کنترل مقاوم ارجحیت دارند. از طرفی کنترل تطبیقی نیاز کمی به اطلاعات پیش‌بینی شده، در بازه پارامترها دارد و یا اینکه اصلاً نیازی به این اطلاعات ندارد. در صورتی که معمولاً در یک کنترل‌کننده مقاوم لازم است تخمین‌های معقولی در محدوده تغییرات پارامترها مهیا باشد. برعکس کنترل‌کننده مقاوم دارای این مزیت نسبت به کنترل تطبیقی است که در مقابل آشفتگی‌ها و یا پارامترهایی که سریع تغییر می‌کنند و یا دینامیک‌های مدل نشده می‌توانند عملکرد بهتری نشان دهند. [۲۱].

در [۲۲] از روش کنترل مقاوم با راهبرد کنترل ولتاژ برای ربات‌های بدون قید استفاده شده و کنترل‌کننده پیشنهادی مستقل از مدل ربات بوده و در مقایسه‌ای که با کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی-انتگرالی و همین‌طور کنترل‌کننده تطبیقی با خطی‌سازی پسخورد انجام گرفته، عملکرد بهتری از لحاظ سادگی، پیاده‌سازی و دقت داشته است.

روش کنترل ساختار متغیر که در [۲۳] استفاده شده، یکی از روش‌های کنترل مقاوم برای جبران عدم قطعیت‌ها در دینامیک ربات می‌باشد. در این روش، کنترل مقاوم یک قانون کنترل مشخص و ثابت منطبق بر میزان تغییرات پیشین عدم قطعیت‌ها برای جبران اثرات نامعینی‌های سیستم ارائه می‌دهد. با این حال فرضیات اتخاذ شده در این روش در عین محدود بودن، شرایط را برای ارزیابی نیز مشکل‌تر نموده است.

از روش‌های کنترل دیگری که برای سیستم‌های ربات ارائه شده، می‌توان به کنترل عصبی [۲۴]- [۲۶] و کنترل فازی [۲۷-۲۸] اشاره کرد. به طور کلی اثبات پایداری در سیستم‌های هوشمند بسیار مشکل است و در واقع یک ایراد این روش‌ها این است تضمین پایداری ندارند و معمولاً نیاز به استفاده از روش‌های کنترلی دیگر در ترکیب با خود دارند. در [۲۹] یک کنترل ساختار متغیر و کنترل لغزشی به عنوان یکی از روش‌های کنترل مقاوم، برای کنترل سیستم‌های غیرخطی نظیر بازوهای ربات در حضور عدم قطعیت‌های ساختاریافته و عدم قطعیت‌های ساختار نیافته و در معرض اغتشاش خارجی، معرفی شد.

در میان روش‌های کنترل تطبیقی روش کنترل تطبیقی مدل مرجع بسیار مورد توجه است. از علل توجه به این نوع کنترل می‌توان به سادگی در طراحی و اینکه لازم نیست مدل مرجع یک مدل واقعی باشد و یا سیگنال ورودی مرجع غنی باشد، اشاره کرد. همینطور قابلیت استفاده از این نوع کنترل برای پس‌خورد حالت و هم پس‌خورد خروجی به محبوبیت بیشتر آن در کنار آزادی انتخاب زیادی که به طراح می‌دهد، افزوده است [۳۰]. از طرفی با توجه به کنترل امیدانس با راهبرد کنترل ولتاژ که در صورت غلبه بر عدم قطعیت‌ها، طبیعتی خطی و معین پیدا می‌کند، روش کنترل تطبیقی مدل مرجع به عنوان یکی از روش‌های توانمند کنترل تطبیقی می‌تواند بسیار مناسب باشد.

۳-۱ اهداف تحقیق

در این پایان‌نامه، کنترل‌کننده تطبیقی مقاوم مدل مرجع بازوی رباتیک با راهبرد کنترل ولتاژ جهت تطبیق پارامترهای مدل امیدانس ربات به پارامترهای امیدانس مطلوب و همین‌طور غلبه بر عدم قطعیت‌های پارامتری و دینامیک‌های مدل نشده و اغتشاش‌های خارجی، پیشنهاد می‌شود. به این صورت که از یک مدل امیدانس مطلوب به عنوان مدل مرجع سیستم تطبیق بازوهای ربات با راهبرد کنترل ولتاژ استفاده خواهد شد و تلاش می‌شود سیستم را توسط روش‌های کنترل مقاوم، در مقابل نامعینی‌هایی نظیر دینامیک مدل نشده و اغتشاش‌های خارجی قوام بخشید. این طرح کنترلی تاکنون ارائه نشده است.

۴۱ مروری بر ساختار پایان نامه

در این نوشتار، در فصل دوم مدل سازی سینماتیکی و دینامیکی ربات اسکارا ارائه خواهد شد. در فصل سوم اصول اساسی کنترل امپدانس، کنترل تطبیقی مدل مرجع، کنترل مقاوم به همراه مفاهیم پایه‌ای و قضایای لازم ارائه می‌گردد. در فصل چهارم روش کنترل امپدانس با راهبرد کنترل ولتاژ و کنترل گشتاور به روش خطی سازی پس‌خورد به همراه شبیه سازی ارائه می‌گردد. در فصل پنجم روش کنترل امپدانس تطبیقی مقاوم مدل مرجع پیشنهادی به همراه اثبات پایداری و نتایج شبیه سازی ارائه می‌گردد و نتایج با روش کنترل امپدانس ارائه شده در فصل پنجم مقایسه می‌گردد. در فصل ششم نتیجه گیری و پیشنهادات برای تحقیقات آینده ارائه می‌گردد.

فصل دوم سینماتیک و دینامیک ربات

سینماتیک علمی است که حرکت را بدون در نظر گرفتن نیروها و گشتاورهای ایجادکننده آن مورد مطالعه قرار می‌دهد. از طرفی رابطه بین این حرکت‌ها با نیروها و گشتاورهای بوجود آورنده آنها بوسیله علم دینامیک مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این فصل برای بدست آوردن معادلات سینماتیکی ربات، اصول اساسی انتخاب دستگاه‌های مختصات متصل به مفاصل و تشکیل جدول و تحلیل قوانین دناویت هارتنبرگ ارائه شده است. در ادامه با محاسبه انرژی جنبشی و پتانسیل ربات، لاگرانژین ربات بدست آمده و نهایتاً معادلات دینامیکی ربات، استخراج شده است. در ادامه دینامیک محرکه‌ها که عموماً از نوع موتورهای مغناطیس دائم‌اند، در معادلات لحاظ شده و مدل فضای حالت کلی سیستم ربات با در نظر گرفتن نیروهای تماسی، ارائه شده است. در پایان نیز محاسبات لازم برای مدل‌سازی سینماتیکی و دینامیکی ربات اسکارا با فرض قفل بودن مفصل چهارم انجام گرفته است.

۲۲ سینماتیک ربات

سینماتیک علم حرکت است. این علم، حرکت را بدون در نظر گرفتن نیروها یا گشتاورهای ایجادکننده آن مورد مطالعه قرار می‌دهد. در محدوده علم سینماتیک، مکان و همه مشتق‌های بالاتر از مکان نظیر سرعت و شتاب مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین ترتیب سینماتیک بازوهای مکانیکی ربات همه ویژگی‌های هندسی و وابسته به زمان حرکت ربات را در بر می‌گیرد. [۷].

۲-۱-۲- معادلات سینماتیک مستقیم ربات

با استفاده از سینماتیک مستقیم، موقعیت و جهت مجری نهایی به ازای متغیرهای مفاصل ربات، تعیین می‌شود. متغیرهای مفاصل همان زوایای رابطها در مفاصل لولایی و یا افزایش طول در مفاصل کشویی می‌باشند. جهت تحلیل سینماتیک مستقیم بصورت مجموعه‌ای از رابط‌های به هم متصل در مفاصل مختلف در نظر گرفته می‌شود. این مفاصل می‌توانند یک مفصل ساده مثل لولایی یا کشویی و یا مفصل پیچیده مثل توپی یا سوکتی باشند. [۶].

هدف سینماتیک مستقیم، تعیین اثر تجمعی مجموعه ورودی از متغیرهای مفاصل است. فرض کنید یک ربات $n+1$ رابط با شماره‌گذاری از صفر تا n دارد که از پایه ربات به عنوان رابط صفر شروع می‌شود. مفاصل از ۱ تا n شماره‌گذاری می‌شوند. متغیر مفصل i -ام با q_i نشان داده می‌شود. در مفصل لولایی q_i زاویه دوران و در مفصل کشویی q_i جابجایی طول مفصل می‌باشد. سپس به هر رابط یک دستگاه مختصات بصورت صلب متصل می‌شود. اولین دستگاه به پایه وصل می‌شود، که دستگاه صفر نامیده می‌شود. سپس به هر مفصل ربات یک دستگاه مختصات متصل می‌شود و برای تعیین جهت محورهای آن از روش دناویت هارتنبرگ به شرح زیر استفاده می‌شود:

پس از شناسایی مفاصل ربات، باید به هر یک از مفاصل، یک دستگاه مختصات متصل شود بطوریکه محور Z هر دستگاه در جهت محور همان مفصل باشد.

جهت محور X_0 بصورت اختیاری انتخاب می‌شود. جهت محور X_i بگونه‌ای تعیین می‌شود که بر محور Z_{i-1} عمود و متقاطع باشد.

جهت محور Y_i بگونه‌ای اختیار می‌شود که همه دستگاه‌ها راستگرد باشند. جدول دناویت هارتنبرگ از پارامترهای $a_i, d_i, \alpha_i, \theta_i$ ، که به ترتیب طول رابط، انحراف رابط، پیچش رابط و زاویه مفصل می‌باشند، تشکیل می‌شود. تعریف هر یک از پارامترهای ربات به شرح زیر می‌باشد:

a_i : فاصله از Z_{i-1} تا Z_i در جهت X_i است.

d_i : فاصله از X_{i-1} تا X_i در جهت Z_{i-1} است.

α_i : زاویه از Z_{i-1} تا Z_i حول X_i است.

θ_i : زاویه از X_{i-1} تا X_i حول Z_{i-1} است.

ماتریس A_i از هر سر سطر جدول دناویت هارتنبرگ بصورت رابطه (۱-۲) بدست می‌آید.

$$A_i = Rot_{z,\theta_i} Trans_{z,d_i} Trans_{x,a_i} Rot_{x,\alpha_i} \quad (1-2)$$

در رابطه (۱-۲)، Rot_{z,θ_i} ، $Trans_{z,d_i}$ ، $Trans_{x,a_i}$ و Rot_{x,α_i} به ترتیب دوران حول محور Z دستگاه i -ام به اندازه θ_i ، انتقال در راستای محور Z دستگاه i -ام به اندازه d_i ، انتقال در راستای محور X دستگاه i -ام به اندازه a_i و دوران حول محور X دستگاه i -ام به اندازه α_i هستند که به ترتیب توسط روابط (۲-۲) تا (۵-۲) محاسبه می‌شوند.

$$Rot_{z,\theta_i} = \begin{bmatrix} C(\theta_i) & -S(\theta_i) & 0 & 0 \\ S(\theta_i) & C(\theta_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

$$Trans_{z,d_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

$$Trans_{x,a_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

$$Rot_{x,\alpha_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C(\alpha_i) & -S(\alpha_i) & 0 \\ 0 & S(\alpha_i) & C(\alpha_i) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5-2)$$

بنابراین با جایگذاری روابط (۲-۲) تا (۵-۲) در رابطه (۱-۲) و ساده‌سازی، رابطه (۶-۲) حاصل می‌گردد.

$$A_i = \begin{bmatrix} C(\theta_i) & -S(\theta_i)C(\alpha_i) & S(\theta_i)S(\alpha_i) & a_i C(\theta_i) \\ S(\theta_i) & C(\theta_i)C(\alpha_i) & -C(\theta_i)S(\alpha_i) & a_i S(\theta_i) \\ 0 & S(\alpha_i) & C(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6-2)$$

نمادهای S و C در رابطه (۶-۲) توابع Sin و Cos می‌باشند که به اختصار بیان شده‌اند. موقعیت و جهت دستگاه مختصات n -ام نسبت به دستگاه مختصات مبنا از ماتریس تبدیل با رابطه (۷-۲) بدست می‌آید.

$$T_0^n = A_1 A_2 \cdots A_{n-1} A_n = \begin{bmatrix} R_0^n(q) & d_0^n(q) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7-2)$$

در رابطه (۷-۲)، $d_0^n(q) \in R^3$ و $R_0^n(q) \in R^{3 \times 3}$ به ترتیب بردار انتقال و ماتریس دورانی هستند که موقعیت و جهت مجری نهایی را در دستگاه مختصات مبنا نشان می‌دهند. و $q = (q_1, \dots, q_n)^T$ بردار موقعیت‌های مفاصل است.

۲-۲-۲ سینماتیک معکوس ربات

در بخش قبل نشان داده شد که چگونه می‌توان موقعیت و جهت مجری نهایی را برحسب متغیرهای مفاصل تعیین نمود. در مسئله وارون به یافتن متغیرهای مفاصل برحسب موقعیت و جهت مجری نهایی می‌پردازیم. این مسئله سینماتیک وارون است و به طور کلی مشکل‌تر از مسئله سینماتیک مستقیم است و برخلاف مسئله سینماتیک مستقیم که همیشه یک حل یگانه دارد، ممکن است جواب یگانه یا غیر یگانه و یا اصلاً جواب نداشته باشد. در قسمت (۲-۷-۲) از یک روش هندسی و روابط مثلثاتی برای بدست آوردن معادلات سینماتیک وارون ربات اسکارا استفاده شده است. بطور کلی روش‌های بدست آوردن معادلات سینماتیک معکوس در [۶] توضیح داده شده‌اند.

۳۲ ژاکوبین بازوی ربات

در قسمت قبل معادلات سینماتیک مستقیم موقعیت برای موقعیت مفاصل، جهت‌ها و موقعیت مجری نهایی بدست آمد. در این قسمت روابط سرعت، ارتباط سرعت‌های خطی و زاویه‌ای مجری نهایی (یا هر نقطه دیگر روی بازوی ربات) با سرعت‌های مفاصل ربات بدست می‌آید. از دیدگاه ریاضی، معادلات سینماتیک مستقیم یک تابع بین فضای جهت‌ها و موقعیت‌های دکارتی و فضای موقعیت‌های مفاصل تعریف می‌کند بطوریکه روابط سرعت به وسیله ژاکوبین این تابع تعیین می‌شود. [۶]. فرض می‌شود w_0^n بردار سرعت زاویه‌ای مجری نهایی ربات و v_0^n بردار سرعت خطی مجری نهایی باشد بطوریکه توسط روابط (۸-۲) و (۹-۲) با بردار سرعت‌های مفاصل $\dot{q}(t)$ ارتباط پیدا کند.

$$v_0^n = J_v \dot{q} \quad (۸-۲)$$

$$w_0^n = J_w \dot{q} \quad (۹-۲)$$

که J_w و J_v به ترتیب ماتریس‌های ژاکوبین مربوط به سرعت‌های خطی و زاویه‌ای هستند. روابط (۸-۲) و (۹-۲) می‌توانند بصورت رابطه (۱۰-۲) نوشته شوند.

$$\begin{bmatrix} v_0^n \\ w_0^n \end{bmatrix} = J_0^n \dot{q} \quad (۱۰-۲)$$

بطوریکه J_0^n در رابطه (۱۰-۲) ماتریس ژاکوبین بازوی ربات است و در حالت کلی بصورت رابطه (۱۱-۲) تعریف می‌شود.

$$J_0^n = \begin{bmatrix} J_v \\ J_w \end{bmatrix} \quad (۱۱-۲)$$

ستون i -ام از ماتریس ژاکوبین برای مفصل لولایی از رابطه (۱۲-۲) و برای مفصل کشویی از رابطه (۱۳-۲) بدست می‌آید.

$$J_i = \begin{bmatrix} z_{i-1} \times (d_0^n - d_0^{i-1}) \\ z_{i-1} \end{bmatrix} \quad (۱۲-۲)$$

$$J_i = \begin{bmatrix} z_{i-1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (۱۳-۲)$$

بطوریکه Z_i در روابط فوق، از اولین سه عضو در ستون سوم از ماتریس تبدیل T_0^i و یا ستون سوم از ماتریس دوران R_0^i بدست می‌آید.

در معادلات حرکت ربات، وجود معکوس ماتریس ژاکوبین اهمیت ویژه‌ای دارد. در مورد معکوس ماتریس ژاکوبین ربات باید به دو نکته مهم توجه کرد:

۱. معکوس ماتریس ژاکوبین همواره باید ناتکین باشد. برای ناتکین شدن کافیت که مسیر مطلوب در فضای کار به گونه‌ای طراحی گردد که حالت تکین در ماتریس ژاکوبین رخ ندهد.

۲. با توجه به ابعاد ماتریس ژاکوبین که در حالت کلی بصورت $m \times n$ است اگر $m \neq n$ باشد محاسبه ماتریس معکوس ژاکوبین ممکن نیست. برای رفع این مشکل باید از ماتریس معکوس مجازی (شبه معکوس) که بصورت رابطه (۱۴-۲) تعریف می‌شود، استفاده شود.

$$J^*(q) = (J^T(q)J(q))^{-1}J^T(q) \quad (۱۴-۲)$$

۴ ۲ دینامیک ربات

در این بخش به بررسی دینامیک بازوهای ربات پرداخته می‌شود. در حالی که معادلات سینماتیک، حرکت ربات را بدون در نظر گرفتن نیروها و گشتاورهای بوجود آورنده حرکت، توصیف می‌کنند، معادلات دینامیکی صریحا به ارتباط بین نیرو و حرکت ربات می‌پردازند. این معادله‌ها، چگونگی ایجاد حرکت در ربات را به وسیله گشتاورهای اعمال شده توسط محرکه‌ها یا اعمال نیروهای خارجی به ربات نشان می‌دهد.

در نظر گرفتن معادلات حرکت در طراحی ربات‌ها، شبیه‌سازی حرکت ربات‌ها و همچنین در طراحی روش کنترل بسیار مهم است. [۶].

۱-۴-۲ انرژی جنبشی ربات

انرژی جنبشی ربات از مجموع انرژی جنبشی هر یک از رابط‌های آن بدست می‌آید. انرژی جنبشی هر رابطه نیز از مجموع انرژی جنبشی هر یک از ذرات تشکیل‌دهنده آن بدست می‌آید. بنابراین انرژی جنبشی یک ربات با n رابط از رابطه (۱۵-۲) بدست می‌آید.

$$K = \frac{1}{2} \dot{q}^T \sum_{i=1}^n [m_i J_{v_i}(q)^T J_{v_i}(q) + J_{w_i}(q)^T R_i(q) I_i R_i(q)^T J_{w_i}(q)] \dot{q} \quad (۱۵-۲)$$

J_{v_i}

و J_{w_i} به ترتیب از روابط (۱۲-۲) و (۱۳-۲) با توجه به نوع مفصل i-ام بدست می‌آیند و R_i ماتریس دوران دستگاه مختصات i-ام نسبت به دستگاه پایه و m_i جرم رابط i-ام می‌باشند. و I_i ماتریس لختی رابط i-ام می‌باشد که از رابطه (۱۶-۲) بدست می‌آید.

$$I = \begin{bmatrix} \int (y^2 + z^2) dm & - \int xy dm & - \int xz dm \\ - \int xy dm & \int (x^2 + z^2) dm & - \int yz dm \\ - \int xz dm & - \int yz dm & \int (x^2 + y^2) dm \end{bmatrix} \quad (۱۶-۲)$$

در رابطه (۱۶-۲)، x ، y ، و z مختصات نقطه‌ای در دستگاه مختصات متصل به مرکز جرم رابط i-ام ربات می‌باشند.

رابطه (۱۵-۲) می‌تواند بصورت ماتریسی نظیر رابطه (۱۷-۲) نوشته شود.

$$K = \frac{1}{2} \dot{q}^T D(q) \dot{q} \quad (۱۷-۲)$$

$D(q)$ در رابطه (۱۷-۲) یک ماتریس $n \times n$ متقارن از نوع اینرسی است که بصورت رابطه (۱۸-۲) تعریف می‌شود.

$$D(q) = \sum_{i=1}^n [m_i J_{v_i}(q)^T J_{v_i}(q) + J_{w_i}(q)^T R_i(q) I_i R_i(q)^T J_{w_i}(q)] \quad (۱۸-۲)$$

۲-۴-۲ - انرژی پتانسیل ربات

انرژی پتانسیل ربات از مجموع انرژی پتانسیل رابط‌های آن بدست می‌آید. انرژی پتانسیل هر رابط نیز از مجموع انرژی پتانسیل تمام نقاط آن بدست می‌آید. بنابراین انرژی پتانسیل برای یک رابط n با رابط از رابطه (۱۹-۲) بدست می‌آید.

$$P = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n g^T r_{ci} m_i \quad (۱۹-۲)$$

در رابطه (۱۹-۲)، g ، r_{ci} و m_i به ترتیب بردار شتاب جاذبه در دستگاه مبنا، مرکز جرم رابط i-ام و جرم رابط i-ام می‌باشند. r_{ci} در رابطه (۱۹-۲) از طریق رابطه (۲۰-۲) محاسبه می‌شود.

$$r_{ci} = d_0^i + R_0^i d_i^{ci} \quad (20-2)$$

بطوریکه d_i^{ci} در رابطه (20-2) موقعیت مرکز جرم رابط i -ام نسبت به مبدا دستگاه i -ام می‌باشد.

۲-۴-۳ - معادلات دینامیکی ربات

معادلات لاگرانژ حرکت ربات، روشی اصولی برای بدست آوردن معادلات دینامیکی ربات ارائه می‌دهد. برای تعیین معادلات اوپلر- لاگرانژ در یک موقعیت و وضعیت مشخص، لاگرانژین سیستم باید تشکیل شود، که بصورت اختلاف بین انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل ربات تعریف می‌شود. [۶].

$$L = K - P \quad (21-2)$$

معادله اوپلر- لاگرانژ ربات بصورت رابطه (22-2) تعریف می‌شود.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (22-2)$$

در رابطه (22-2)، q بردار n بعدی از مختصات تعمیم یافته q_i هستند و τ بردار n بعدی از نیروهای تعمیم یافته τ_i می‌باشند.

۲-۴-۳-۱ - معادلات دینامیکی ربات در فضای مفصلی

معادلات حرکت یک ربات با n رابط با بازوهای سری با جایگذاری رابطه لاگرانژین (21-2) در معادله اوپلر- لاگرانژ (22-2) و انجام محاسبات لازم می‌تواند بصورت رابطه (23-2) نوشته شود.

$$\sum_j d_{kj}(q) \ddot{q}_j + \sum_{i,j} \left\{ \frac{\partial d_{kj}}{\partial q_i} - \frac{1}{2} \frac{\partial d_{ij}}{\partial q_k} \right\} \dot{q}_i \dot{q}_j - \frac{\partial P}{\partial q_k} = \tau_k, k = 1, \dots, n \quad (23-2)$$

رابطه (23-2) معمولاً بصورت ماتریسی و به فرم رابطه (24-2) نوشته می‌شود.

$$D(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) = \tau \quad (24-2)$$

از طرفی بردار نیروهای تعمیم یافته τ بصورت رابطه (25-2) نوشته می‌شود.

$$\tau = \tau_r - J^T F_{en} \quad (25-2)$$

τ_r در رابطه (۲۵-۲) نیروی محرکه مفاصل ربات می‌باشد و بردار نیروی خارجی اعمالی به مجری نهایی ربات F_{en} می‌تواند از جنس نیرو یا گشتاور نظیر رابطه (۲۶-۲) باشد.

$$F_{en} = [F_e^T \quad T_e^T]^T \quad (۲۶-۲)$$

در رابطه (۲۶-۲)، F_e^T و T_e^T به ترتیب نیرو و گشتاور اعمالی به مجری نهایی ربات از طرف محیط می‌باشند.

بطوریکه $J(q) \in R^{m \times n}$ در رابطه (۲۵-۲) ماتریس ژاکوبین ربات است و از طریق رابطه (۲۷-۲) بردار فضای مفاصل را به بردار فضای کار تبدیل می‌کند.

$$\dot{x} = J(q)\dot{q} \quad (۲۷-۲)$$

بطوریکه $x \in R^m$ بردار موقعیت مجری نهایی است. با مشتق گرفتن از رابطه (۲۷-۲)، رابطه (۲۸-۲) حاصل می‌شود.

$$\ddot{x} = \dot{J}(q)\dot{q} + J(q)\ddot{q} \quad (۲۸-۲)$$

بنابراین بردار شتاب مفاصل \ddot{q} از رابطه (۲۹-۲) قابل محاسبه است.

$$\ddot{q} = J(q)^{-1}(\ddot{x} - \dot{J}(q)\dot{q}) \quad (۲۹-۲)$$

۲-۴-۳-۲ معادلات دینامیکی ربات در فضای کار

با جایگذاری روابط (۲۷-۲) و (۲۹-۲) در معادله (۲۴-۲)، معادله حرکت ربات در فضای کار و با فرض $T_e^T = 0$ بصورت رابطه (۳۰-۲) بدست می‌آید.

$$\bar{D}(x)\ddot{x} + \bar{C}(x, \dot{x})\dot{x} + \bar{G}(x) = J^{-T}\tau_r - F_e \quad (۳۰-۲)$$

که $\bar{D}(x)$ ، $\bar{C}(x, \dot{x})$ و $\bar{G}(x)$ به ترتیب با روابط (۳۱-۲)، (۳۲-۲) و (۳۳-۲) تعریف می‌شوند.

$$\bar{D}(x) = D(q)J(q)^{-1} \quad (۳۱-۲)$$

$$\bar{C}(x, \dot{x}) = (C(q, \dot{q})J(q)^{-1} - D(q)J(q)^{-1}\dot{J}(q)J(q)^{-1}) \quad (۳۲-۲)$$

$$\bar{G}(x) = G(q) \quad (۳۳-۲)$$

۲-۴-۴ - مدل سازی نیروی تماسی محیط

بردار نیروهای تماسی F_e می تواند بصورت رابطه (۲-۳۴) توصیف شود. [۲۰].

$$F_e = M_e \ddot{x} + B_e \dot{x} + K_e(x - x_e) \quad (۲-۳۴)$$

بطوریکه M_e ، B_e و K_e به ترتیب ماتریس های اینرسی، میرایی و سختی محیط نامیده می شوند و دارای ابعاد $n \times n$ می باشند. و بردار ثابت $x_e \in R^m$ ، موقعیت تعادل محیط در نبود نیروی تماسی، نامیده می شود.

۲-۴-۵ - تکین ها

از آنجا که ژاکوبین تابعی از q است، ترکیب های آن برای وقتی که مرتبه J کاهش می یابد، اهمیت خاص دارند. چنین ترکیب هایی تکین ها نامیده می شوند. شناسایی تکین های بازوی ربات به دلایل زیر مهم می باشند. [۶]

۱. تکین ها، ترکیب هایی را نشان می دهند که در جهت های معینی از حرکت، ممکن است غیر قابل اجرا باشد.
۲. در تکین ها ممکن است سرعت های محدود مجری نهایی به سرعت های نامحدود مفاصل مربوط شود.
۳. در تکین ها ممکن است نیروها و گشتاورهای محدود مجری نهایی به گشتاورهای نامحدود مفاصل مربوط شود.
۴. تکین ها معمولاً به نقاط مرزی فضای کاری بازوی ربات مربوط می شوند، که نقاط ماکزیمم دسترسی بازوی ربات هستند.
۵. تکین ها به نقاطی در فضای کاری مربوط می شوند، که ممکن است، در اثر مقدار کوچکی تغییر در پارامترهای رابط نظیر طول، انحراف و غیره، غیر قابل دسترس باشند.
۶. نزدیک تکین ها، راه حل یگانه ای برای سینماتیک وارون وجود نخواهد داشت. در این حالت ممکن است هیچ پاسخی وجود نداشته باشد یا ممکن است تعداد بینهایت پاسخ وجود داشته باشد.

در رابطه (۲-۲۴) عضو (k,j) -ام از ماتریس $C(q, \dot{q})$ بصورت رابطه (۲-۳۵) نوشته می شود.

$$C_{kj} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial d_{kj}}{\partial q_i} + \frac{\partial d_{ki}}{\partial q_i} - \frac{\partial d_{ij}}{\partial q_k} \right\} \dot{q}_i \quad (۲-۳۵)$$

$G(q)$ و $C(q, \dot{q})\dot{q}$ در رابطه (۲-۲۴) به ترتیب بردار گرانش و بردار کوریولیس و گریز از مرکز نامیده می‌شوند و دارای ابعاد $n \times 1$ می‌باشند.

۲-۴-۶- دینامیک موتورها

گشتاور لازم برای به حرکت در آوردن مفاصل ربات، توسط محرکه‌ها که عموماً از نوع موتورهای الکتریکی هستند، فراهم می‌شود. موتورها، گشتاور مورد نیاز هر مفصل ربات را توسط رابطه (۲-۳۶) در اختیار ربات قرار می‌دهند. [۶].

$$J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + r\tau_r = \tau_m \quad (۲-۳۶)$$

در رابطه (۲-۳۶)، τ_m بردار گشتاور تولیدی موتورها، τ_r بردار گشتاور بار موتورها یا گشتاور اعمالی به مفاصل ربات، θ_m بردار سرعت زاویه‌ای موتورها، $r \in R^{n \times n}$ ضریب کاهش چرخنده، $J_m \in R^{n \times n}$ ماتریس اینرسی روتورها و $B_m \in R^{n \times n}$ ماتریس میرایی هستند. بردار سرعت زاویه‌ای موتورها و بردار سرعت زاویه‌ای مفاصل ربات، اگر ربات انعطاف نداشته باشد توسط رابطه (۲-۳۷) به هم مرتبط می‌شوند.

$$\dot{q} = r\dot{\theta}_m \quad (۲-۳۷)$$

معادله الکتریکی موتورهای مغناطیس دائم بصورت رابطه (۲-۳۸) نوشته می‌شود در این رابطه، ولتاژ ورودی موتورها به عنوان ورودی سیستم ربات در نظر گرفته می‌شود.

$$RI_a + L\dot{I}_a + K_b\dot{\theta}_m = v \quad (۲-۳۸)$$

در رابطه (۲-۳۸)، R ، L و K_b ماتریس‌های قطری هستند و به ترتیب مقاومت، اندوکتانس سیم پیچ‌ها و ضریب ضد محرکه نامیده می‌شوند.

از طرفی گشتاور تولیدی موتورها ضریبی از جریان آرمیچر است بنابراین می‌توان رابطه (۲-۳۹) را نتیجه گرفت.

$$\tau_m = K_m I_a \quad (۲-۳۹)$$

بطوریکه K_m در رابطه (۲-۳۹) ضریب ثابت گشتاور بوده و یک ماتریس $n \times n$ است.

۲-۴-۷- مدل فضای حالت ربات با در نظر گرفتن دینامیک محرکه

معادله دینامیکی ربات در تماس با محیط می‌تواند بصورت رابطه (۲-۴۰) نوشته شود. [۲۰].

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + J^T(q)F_e = \tau_r \quad (40-2)$$

در رابطه (40-2)، $F_e \in R^m$ نیروی وارده به محیط است و m بعد فضای کاری مجری نهایی ربات است.

مدل فضای حالت ربات با در نظر گرفتن دینامیک محرکه‌ها از نوع موتورهای مغناطیس دائم می‌تواند بصورت رابطه (41-2) نوشته شود.

$$\dot{z} = f(z) + bw \quad (41-2)$$

بطوریکه، $w^T = [F_e \quad v]$ بردار متغیرهای ورودی و $z^T = [q \quad \dot{q} \quad I_a]$ بردار حالت سیستم است. ماتریس‌های b و $f(z)$ نیز توسط روابط (42-2) و (43-2) قابل محاسبه‌اند.

$$f(z) = \begin{bmatrix} z_2 \\ (J_m r^{-1} + rD(z_1))^{-1} (- (B_m r^{-1} + rC(z_1, z_2)) z_2 - r g(z_1) + k_m z_3) \\ -L^{-1} (k_b r^{-1} z_2 + R z_3) \end{bmatrix} \quad (42-2)$$

$$b = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -(J_m r^{-1} + rD(z_1))^{-1} r J^T(z_1) & 0 \\ 0 & L^{-1} \end{bmatrix} \quad (43-2)$$

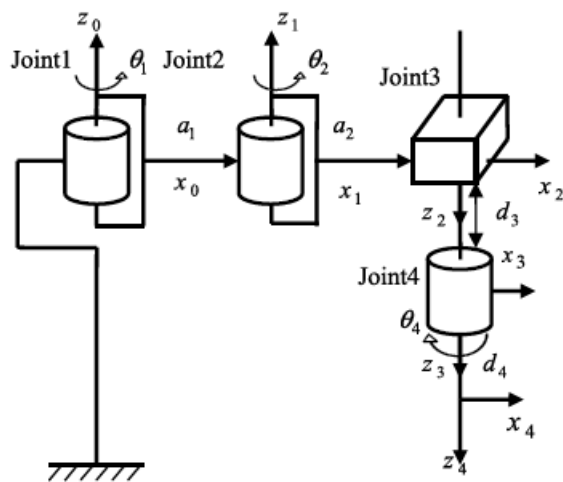
۲-۵ مدل‌سازی سینماتیکی و دینامیکی ربات اسکارا

۲-۵-۱- معادلات سینماتیک مستقیم ربات اسکارا

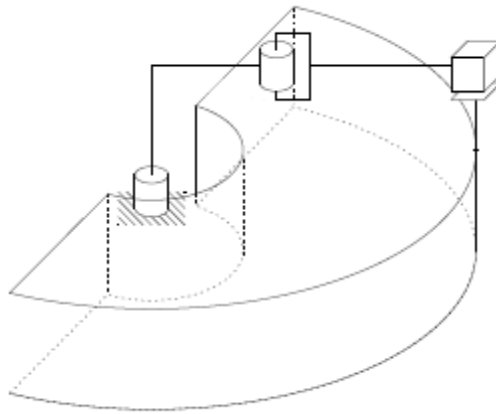
برای مدل‌سازی سینماتیکی ربات، ابتدا دستگاه‌های مختصات با توجه به دستورالعمل ارائه شده در قسمت (2-4-1) به هر یک از رابط‌های ربات اسکارا بصورت شکل (2-2) متصل می‌شود. شکل (2-3) فضای کاری یا اصطلاحاً فضای دسترسی بازوی اسکارا را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲ بازوی ربات اسکارا مدل E2L653S. [۶]



شکل ۲-۲ پیکربندی بازوی ربات اسکارا [۶]



شکل ۳-۲ فضای کاری بازوی ربات اسکارا. [۶]

با استفاده از دستورالعمل ارائه شده در قسمت (۲-۴-۱) جدول دناویت هارتنبرگ (۲-۱) تشکیل می‌شود.

جدول ۱-۲ پارامترهای دناویت هارتنبرگ ربات اسکارا [۲۰]

شماره لینک	θ_i (rad)	d_i (m)	a_i (m)	α_i (m)
۱	θ_1	0	$a_1 = 0.621$	0
۲	θ_2	0	$a_2 = 1.064$	π
۳	0	d_3	0	0
۴	θ_4	$d_4 = 0.05$	0	0

ماتریس‌های همگن A_1 تا A_4 ، با استفاده از رابطه (۲-۶) و به ترتیب از هر سطر جدول دناویت هارتنبرگ بصورت زیر محاسبه می‌گردند.

$$A_1 = \begin{bmatrix} C(\theta_1) & -S(\theta_1) & 0 & a_1 C(\theta_1) \\ S(\theta_1) & C(\theta_1) & 0 & a_1 S(\theta_1) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۴۴-۲)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} C(\theta_2) & S(\theta_2) & 0 & a_2 C(\theta_2) \\ S(\theta_2) & -C(\theta_2) & 0 & a_2 S(\theta_2) \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۴۵-۲)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۴۶-۲)$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} C(\theta_4) & -S(\theta_4) & 0 & 0 \\ S(\theta_4) & C(\theta_4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۴۷-۲)$$

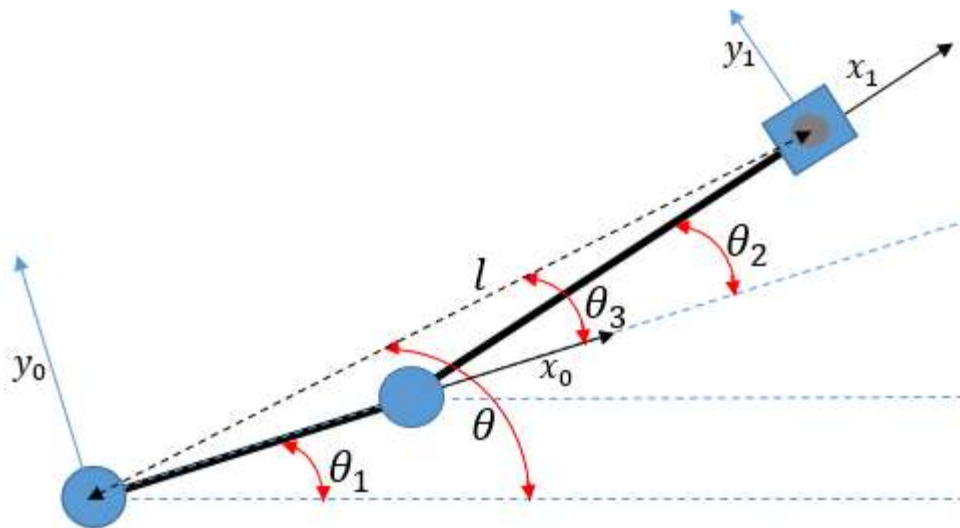
ماتریس تبدیلی که موقعیت و جهت دستگاه مختصات متصل به رابط چهارم را در دستگاه مختصات مبنا نشان می‌دهد از رابطه (۴۸-۲) بصورت زیر محاسبه می‌گردد. [۶].

$$T_0^4 = \begin{bmatrix} C(\theta_1 + \theta_2)C(\theta_4) + S(\theta_1 + \theta_2)S(\theta_4) & -C(\theta_1 + \theta_2)S(\theta_4) + S(\theta_1 + \theta_2)C(\theta_4) & 0 & a_1C(\theta_1) + a_2C(\theta_1 + \theta_2) \\ S(\theta_1 + \theta_2)C(\theta_4) - C(\theta_1 + \theta_2)S(\theta_4) & -S(\theta_1 + \theta_2)S(\theta_4) - C(\theta_1 + \theta_2)C(\theta_4) & 0 & a_1S(\theta_1) + a_2S(\theta_1 + \theta_2) \\ 0 & 0 & -1 & -d_3 - d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (48-2)$$

بطوریکه C و S به ترتیب مبین توابع \cos و \sin می‌باشند که به اختصار بیان شده‌اند.

۲-۵-۲ - معادلات سینماتیک معکوس ربات اسکارا

برای بدست آوردن معادلات سینماتیک وارون روش مشخصی در دست نیست. در این قسمت از روش هندسی برای بدست آوردن معادلات سینماتیک معکوس ربات اسکارا استفاده شده است.



شکل ۲-۴ پیکربندی بازوی ربات اسکارا از نمای دیگر

در سینماتیک معکوس بازوی ربات اسکارا، بردار موقعیت مفاصل ربات $q = [q_1 \ q_2 \ q_3]^T$ بر حسب بردار موقعیت مجری نهایی ربات در فضای کار $x = [x \ y \ z]^T$ ، با استفاده از روابط هندسی و مثلثاتی (۴۹-۲) تا (۵۵-۲) و با فرض قفل بودن مفصل چهارم، بدست می‌آیند. به این صورت که l از رابطه (۴۹-۲) بدست می‌آید و با جایگذاری آن در معادله (۵۰-۲) متغیر مفصلی θ_2 محاسبه می‌شود و سپس از معادله های (۵۱-۲) و (۵۲-۲)، به ترتیب متغیرهای θ و θ_3 بدست می‌آیند. با این توضیحات اکنون متغیرهای مفاصل $q = [q_1 \ q_2 \ q_3]^T$ از روابط (۵۳-۲) تا (۵۵-۲) قابل محاسبه‌اند.

$$l^2 = x^2 + y^2 \quad (49-2)$$

$$l^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2\cos(\theta_2) \quad (50-2)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (51-2)$$

$$\tan(\theta_3) = \frac{a_2\sin(\theta_2)}{a_1 + a_2\cos(\theta_2)} \quad (52-2)$$

$$q_1 = \theta_1 = \theta - \theta_3 \quad (53-2)$$

$$q_2 = \theta_2 \quad (54-2)$$

$$q_3 = -z - 0.05 \quad (55-2)$$

۲-۵-۳ - معادله دینامیکی ربات اسکارا با فرض قفل بودن مفصل چهارم

در این پایان نامه معادله دینامیکی ربات اسکارا با استفاده از روش مدل سازی پیشنهاد شده در کتاب اسپانگ بدست آمده است. لازم به ذکر است مفصل چهارم ربات اسکارا قفل شده و فقط دینامیک سه مفصل اول ربات در نظر گرفته می شوند.

$$D(q) = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix} \quad (56-2)$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \quad (57-2)$$

$$G(q) = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix} \quad (58-2)$$

هر یک از مولفه های ماتریس های فوق بصورت زیر تعریف می شوند.

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

$$+ \cos(\theta_2)[2a_1m_2(a_2 + x_{c2}) + 2a_1a_2(m_3 + m_4)]$$

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

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

$$D_{12} = D_{21} = I_{zz2} + I_{zz3} + I_{zz4} + m_2(a_2 + x_{c2})^2 + a_2^2(m_3 + m_4) \\ + \cos(\theta_2)[a_1m_2(a_2 + x_{c2}) + a_1a_2(m_3 + m_4)]$$

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

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

$$\begin{aligned}
C_{11} &= -[a_1 m_2 (a_2 + x_{c2}) + a_1 a_2 (m_3 + m_4)] \sin(\theta_2) \dot{\theta}_2 \\
C_{12} &= -[a_1 m_2 (a_2 + x_{c2}) + a_1 a_2 (m_3 + m_4)] \sin(\theta_2) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \\
C_{21} &= [a_1 m_2 (a_2 + x_{c2}) + a_1 a_2 (m_3 + m_4)] \sin(\theta_2) \dot{\theta}_1 \\
C_{13} = C_{14} = C_{22} = C_{23} = C_{24} = C_{31} = C_{32} = C_{33} = C_{34} = C_{41} = C_{42} = C_{43} = C_{44} \\
&= 0 \\
G_1 = G_2 = G_4 = 0, G_3 &= -9.81(m_3 + m_4)
\end{aligned}$$

۴-۵-۲ ماتریس ژاکوبین ربات اسکارا

ماتریس ژاکوبین ربات با فرض قفل شدن مفصل چهارم ربات با استفاده از روابط (۱۲-۲) و (۱۳-۲) بصورت رابطه (۵۹-۲) محاسبه می‌گردد.

$$J = \begin{bmatrix} -a_1 \sin(\theta_1) - a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & 0 \\ a_1 \cos(\theta_1) + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (59-2)$$

لازم به ذکر است که در محاسبه ماتریس ژاکوبین فقط سرعت‌های خطی در نظر گرفته شده‌اند.

۶۲ جمع‌بندی

در این فصل ابتدا به استخراج معادلات سینماتیکی حرکت ربات با استفاده از دستورالعمل دناویت هارتنبرگ جهت تحلیل ویژگی‌های هندسی و وابسته به زمان حرکت ربات پرداخته شد و سپس با تشکیل ماتریس ژاکوبین، به ارتباط بین سرعت خطی مجری نهایی و سرعت مفاصل ربات پرداخته شد. در ادامه نیز معادلات دینامیکی حرکت ربات با در نظر گرفتن دینامیک محرکه‌ها و نحوه بدست آوردن آنها، مورد بررسی قرار گرفت و سپس مدل فضای حالت ربات ارائه شد. در پایان نیز معادلات سینماتیک و دینامیک ربات اسکارا با فرضیات و مشخصات ارائه شده در فصل دوم، محاسبه گردید. در فصل بعد اصول اساسی و مفاهیم پایه‌ای از کنترل تعامل دینامیکی ربات با محیط و همینطور روش‌های کنترلی مناسب جهت کنترل این رفتار مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

فصل سوم اصول اساسی کنترل امپدانس

تطبیقی مقاوم مدل مرجع

ربات‌ها عموماً دارای دینامیک‌های غیرخطی و چند متغیره می‌باشند. از آنجایی که در سیستم‌های واقعی ربات‌ها، نمی‌توان از عدم قطعیت‌های پارامتری یا دینامیک‌های مدل نشده و اغتشاش‌های خارجی صرف‌نظر نمود، ارائه روش‌هایی که بتواند بر این عدم قطعیت‌ها و نامعینی‌ها غلبه کند و در عین حال بر روی سیستم واقعی و پیچیده ربات قابل پیاده‌سازی باشد و رفتار دینامیکی مناسبی را برای ربات در تعامل با محیط سبب شود، همواره به عنوان یک چالش کنترلی مطرح می‌شود. [۶]. نکته اصلی در کنترل این تعامل، یافتن مدلی است که بتواند رفتار دینامیکی برخورد ربات با محیط را در بر گیرد و از طرفی قابل تنظیم باشد.

یک روش پیشرو در جهت توصیف این رفتار دینامیکی، کنترل امپدانس است. نکته اساسی در کنترل امپدانس یافتن مدل امپدانس مطلوبی است که بتواند تعامل دینامیکی مطلوب بین ربات و محیط را سبب شود و از طرفی قابل تغییر یا تنظیم باشد و در عین حال به نامعینی‌ها و یا تغییرات مدل غلبه کند. در این فصل اصول اساسی کنترل مقاوم، کنترل تطبیقی، کنترل امپدانس به همراه قضایای مرتبط، برای طراحی سیستم کنترل امپدانس تطبیقی مقاوم مدل مرجع ارائه می‌گردد. در پایان نیز یک روش مبتنی بر منطق تاخیر زمانی برای تخمین عدم قطعیت غیر ساختاری ربات ارائه می‌گردد.

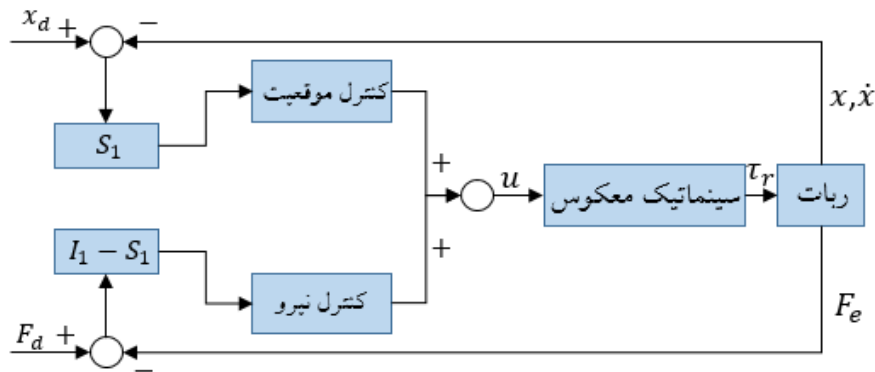
۲-۳ کنترل تعامل دینامیکی ربات با محیط

به طور کلی کارهایی که ربات انجام می‌دهد، در دو دسته کارهای غیرتماسی و کارهای تماسی جای می‌گیرند. در کارهای غیرتماسی چون ربات با محیط خود در تماس نیست، با کنترل موقعیت محض می‌توان اهداف را برآورده نمود ولی در کارهای تماسی، چون در اثر تعامل ربات با محیط، نیروهایی بین محیط و ربات بوجود می‌آید دیگر با کنترل موقعیت محض نمی‌توان عملکرد مناسب را برای ربات تضمین نمود. بنابراین کنترل تعامل دینامیکی ربات با محیط برای کنترل مناسب این رفتار و جلوگیری از آسیب دیدن محیط و انسان امری ضروری است. به طور کلی روش‌های کنترل تعامل دینامیکی ربات با محیط در دو دسته کنترل ترکیبی موقعیت-نیرو و کنترل امپدانس جای می‌گیرند. [۶].

۳-۲-۱- کنترل ترکیبی موقعیت-نیرو

در این روش فضای کنترل به دو زیر فضای کنترل موقعیت و کنترل نیرو تقسیم می‌شود. عموماً برای اجرای قانون کنترل موقعیت-نیرو از یک ماتریس قطری انتخاب استفاده می‌شود. در زیر فضاهایی که به کنترل نیرو اختصاص داده شده است، فرمان‌های موقعیت فیلتر می‌شوند و در زیر فضاهایی که

جهت کنترل موقعیت در نظر گرفته شده‌اند، فرمان‌های نیرو فیلتر می‌شوند. بنابراین کنترل کننده مدام بین زیرفضاهای کنترلی پرش می‌کند و این کلید زنی‌ها و پرش‌ها، تولید سیگنال کنترل موقعیت و نیروی نرم را غیرممکن می‌سازد. بلوک دیاگرام طرح کنترلی موقعیت-نیرو در شکل (۱۲-۳) نشان داده شده است. بطوریکه u, I_1, x_d, F_d, S_1 به ترتیب تلاش کنترلی، ماتریس یکپه، بردار موقعیت مطلوب در فضای کار، نیروی مطلوب و ماتریس انتخاب با درایه‌های یک روی قطر اصلی می‌باشند. [۶].

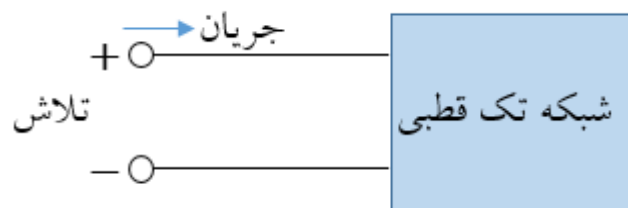


شکل ۱-۳ بلوک دیاگرام کنترل ترکیبی موقعیت-نیرو

۲-۲-۳- کنترل امپدانس

۱-۲-۲-۳- مفهوم امپدانس مکانیکی

امپدانس نگاشتی است از فضای جریان به فضای تلاش که میزان مقاومت سیستم را در برابر حرکت نشان می‌دهد. متغیر جریان بیان‌گر حرکت در سیستم است و متغیر تلاش عامل این حرکت را توصیف می‌کند. [۶].

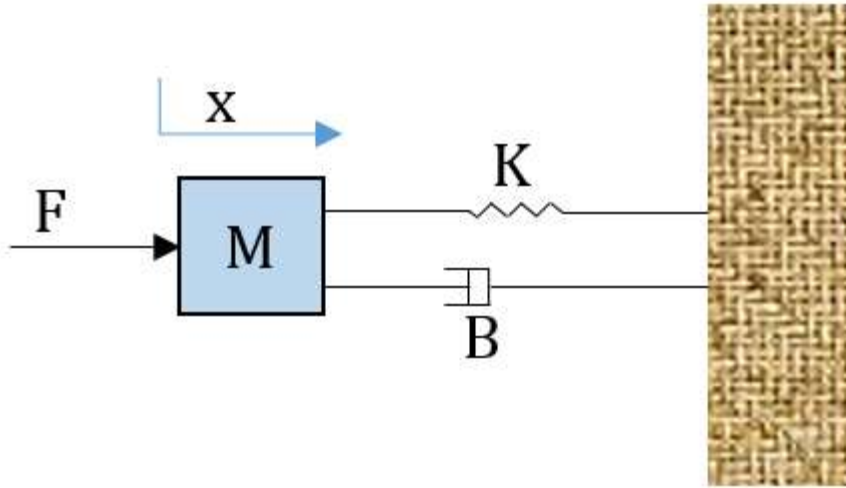


شکل ۲-۳ شبکه تک قطبی

به عنوان مثال در یک سیستم مکانیکی، نیرو در نقش متغیر تلاش و سرعت در نقش متغیر جریان ظاهر می‌شود. معادله دینامیکی یک سیستم جرم- فنر- دمپر مطابق قانون دوم نیوتن بصورت رابطه (۱-۳) توصیف می‌شود.

$$F = M\ddot{x} + B\dot{x} + Kx = M\dot{v} + Bv + K \int v dt \quad (1-3)$$

که در آن F, M, B, K, x و v به ترتیب نیروی اعمالی به جرم، جرم جسم، ضریب اصطکاک، ضریب سختی فنر، موقعیت جرم و سرعت جرم انتقالی می‌باشند.



شکل ۳-۳ سیستم جرم-فنر-دمپر

امپدانس مکانیکی $Z_m(s)$ این سیستم در حوزه لاپلاس بصورت نسبت تبدیل لاپلاس نیرو به تبدیل لاپلاس سرعت تعریف شده و بصورت رابطه (۲-۳) توصیف می‌گردد. [۶].

$$Z_m(s) \triangleq \frac{F(s)}{v(s)} = Ms + B + \frac{K}{s} \quad (2-3)$$

۳-۲-۲-۲-۲ دسته بندی امپدانس

امپدانس $Z(s)$ در حوزه لاپلاس با در نظر گرفتن اندازه امپدانس در فرکانس صفر در سه دسته اصلی جای می‌گیرند:

۱. جرمی است اگر و تنها اگر $|Z(s)| = 0$ مانند $Z(s) = Ms$
 ۲. مقاومتی است اگر و تنها اگر $|Z(0)| = B$ به ازای $0 < B < +\infty$ مانند $Z(s) = Ms + B$
 ۳. خازنی است اگر و تنها اگر $|Z(0)| = +\infty$ مانند $Z(s) = \frac{K}{s}$
- با توجه به دسته‌بندی فوق مشخص است که امپدانس محیط‌های جرمی و خازنی، دوگان یکدیگرند. دوگان به این مفهوم که معکوس یک سیستم جرمی، سیستم خازنی است و معکوس یک سیستم خازنی، بصورت یک سیستم جرمی است. دوگان یک سیستم مقاومتی نیز یک سیستم مقاومتی است. به عبارت دیگر سیستم مقاومتی خود دوگان می‌باشد. [۳۵].
- در [۳۵] نشان داده می‌شود که برای داشتن خطای حالت دائم صفر موقعیت یا نیرو به ازای ورودی پله، کنترل امپدانس باید بر مبنای اصل دوگانی طراحی شود.

۳-۲-۲-۳- اصل دوگانی برای سیستم ربات

کنترل ربات باید به گونه‌ای انجام شود که امپدانس ربات به همراه کنترل‌کننده خود بصورت دوگان امپدانس محیط عمل کند. به عنوان مثال هنگامی که ربات در تعامل با محیط قرار ندارد و نیروی تماسی صفر است، امپدانس محیط از نوع جرمی است. پس طبق اصل دوگانی برای تحقق ردیابی مسیر مطلوب، امپدانس ربات باید در این محیط از نوع غیرجرمی و به طور کلی بصورت رابطه (۳-۳) در نظر گرفته شود. در حالتی که محیط بصورت یک فنر خطی با ضریب سختی بالا مدل می‌شود دارای امپدانس خازنی است. بنابراین برای تنظیم نیروی مطلوب، ربات و کنترل‌کننده باید امپدانس غیرخازنی و بصورت رابطه (۳-۳) از خود نشان دهند.

$$Z_m(s) = Ms + B \quad (3-3)$$

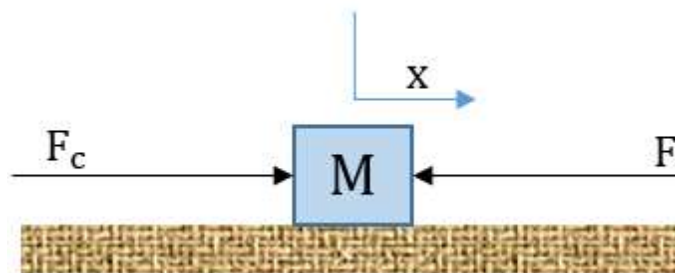
تعریف امپدانس در حوزه لاپلاس تنها به سیستم‌های خطی و تغییر ناپذیر با زمان محدود نمی‌شود. بنابراین لازم است تعریف جامع‌تری از مفهوم امپدانس، که کلیه سیستم‌های مکانیکی را در بر گیرد، ارائه شود.

تعریف امپدانس و ادمیتانس: امپدانس مکانیکی که از قطب یک شبکه دیده می‌شود عملگری دینامیکی است که در آن سرعت به عنوان ورودی و نیرو به عنوان خروجی ظاهر می‌شود. بدین ترتیب ادمیتانس نیز به عنوان یک عملگر دینامیکی با ورودی نیرو و خروجی سرعت تعریف می‌شود.

۳-۲-۲-۴- مفهوم کنترل امپدانس

کنترل و تنظیم امپدانس یک سیستم، با استفاده از عناصر غیرفعال نظیر فنر و دمپر، محدودیت‌ها و پیچیدگی‌های بسیاری دارد. این محدودیت‌ها، بیش از بیش طراحان را به استفاده از روش‌های فعال برای تغییر دینامیک‌های سیستم و کنترل امپدانس ظاهری سیستم ترغیب می‌کند. [۶].
مثال ۳-۱

جرمی مطابق شکل (۴-۳) را در نظر بگیرید. معادله حرکت جسم بر مبنای قانون دوم نیوتن بصورت رابطه (۴-۳) داده می‌شود.



شکل ۴-۳ تغییر امپدانس ظاهری جرم، از طریق اعمال نیرو

$$F_c - F = M\ddot{x} \quad (4-3)$$

با گرفتن تبدیل لاپلاس از معادل (4-3) و تعریف امپدانس واقعی بصورت $G(s) = Ms^2$ ، معادله (5-3) حاصل می‌شود.

$$F_c(s) = F(s) + G(s)x(s) \quad (5-3)$$

چنانچه نیروی کنترل F_c متناسب با برآیند نیروهای اعمالی به جرم F و بصورت رابطه (6-3) به سیستم اعمال شود، معادله حرکت با رابطه (7-3) حاصل می‌شود.

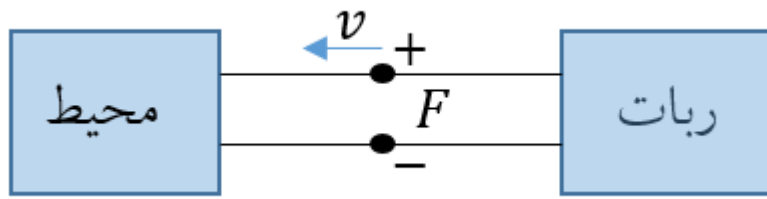
$$F_c(s) = -\alpha F(s) \quad (6-3)$$

$$\left(\frac{M}{\alpha + 1}\right)\ddot{x} = -F(s) \quad (7-3)$$

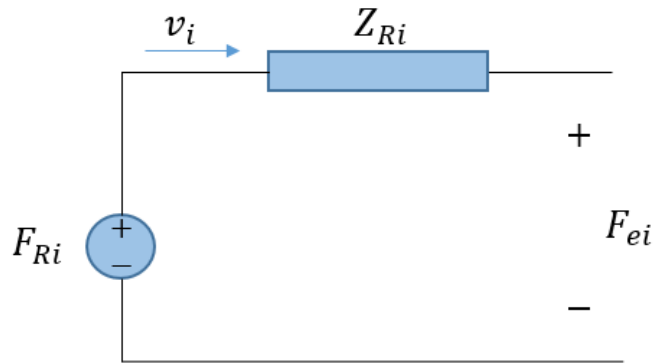
که α در رابطه (7-3)، یک ضریب ثابت است. رابطه (7-3) گویای این مطلب است که جرم ظاهری سیستم از دید ناظر خارجی از مقدار M به مقدار $\frac{M}{\alpha+1}$ تغییر کرده است. بنابراین توسط پس‌خورد از جنس نیرو می‌توان امپدانس ظاهری سیستم را کنترل کرد. [6].

۳-۲-۲-۵- کنترل امپدانس بازوی ربات

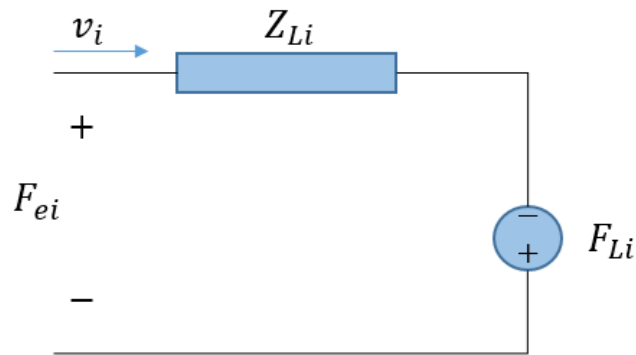
در بخش ۳-۲-۲-۴ روابط لازم برای کنترل امپدانس یک جرم ساده ارائه شد. کنترل امپدانس برای ربات که دارای دینامیک‌های پیچیده، غیرخطی و حجیم است، نیز قابل تعمیم است. تعامل ربات و محیط خود را می‌توان بصورت دو شبکه جفت شده مطابق شکل ۳-۵ در نظر گرفت. هدف از کنترل امپدانس این است که سیستم ربات در تعامل با محیط رفتار دینامیکی مطلوبی را از خود نشان دهد. رفتار دینامیکی مطلوب ربات در تعامل با محیط خود، امپدانس مطلوب نامیده می‌شود که مدل تونن این امپدانس در شکل (6-3) نشان داده شده است. از طرفی محیط نیز دارای مدل امپدانس است که مدل تونن نمایش امپدانس محیط در شکل (7-3) نشان داده شده است. هنگامی که ربات در تعامل با محیط خود قرار دارد، نیرو به محیط وارد می‌کند و عکس‌العمل این نیرو نیز در مفاصل خود ربات احساس می‌شود. مدل امپدانس ربات و محیط در تعامل با یکدیگر در شکل (8-3) نشان داده شده است. [20].



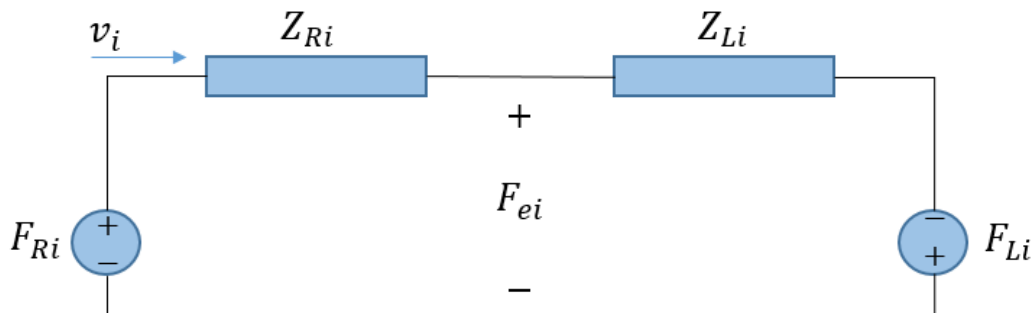
شکل ۳-۵ ربات و محیط در تعامل با یکدیگر



شکل ۳-۶ مدل تونن امپدانس مطلوب ربات



شکل ۳-۷ مدل تونن امپدانس محیط



شکل ۳-۸ ربات و محیط در تعامل با یکدیگر

با گرفتن تبدیل لاپلاس از طرفین رابطه (۲-۳۴)، مدل امپدانس محیط بصورت رابطه (۳-۸) نوشته می‌شود.

$$(M_e s^2 + B_e s + K_e)x(s) - K_e x_e(s) = F_e(s) \quad (۳-۸)$$

از آن جایی که ماتریس‌های M_e ، B_e و K_e در رابطه (۳-۸) قطری‌اند، می‌توان صورت اسکالر آن را بصورت رابطه (۳-۹) نوشت.

$$(M_{ei} s^2 + B_{ei} s + K_{ei})x_i(s) - K_e x_e(s) = F_e(s) \quad (۳-۹)$$

که در آن M_{ei} ، B_{ei} و K_{ei} به ترتیب i -امین عنصر از ماتریس‌های قطری M_e ، B_e و K_e می‌باشند. مدل امپدانس محیط با رابطه (۳-۹) می‌تواند بصورت رابطه (۳-۱۰) نوشته شود.

$$F_{ei}(s) = v_i(s)Z_{Li}(s) - F_{Li}(s) \quad (۳-۱۰)$$

نمایش تونن رابطه (۳-۱۰) در شکل (۳-۷) نشان داده شده‌است. $v_{ei}(s)$ ، $F_{Li}(s)$ ، $Z_{Li}(s)$ و $v_i(s)$ بترتیب بصورت روابط (۳-۱۱) تا (۳-۱۴) تعریف می‌شوند.

$$Z_{Li}(s) = M_{ei}s + B_{ei} + \frac{K_{ei}(s)}{s} \quad (۳-۱۱)$$

$$F_{Li}(s) = \frac{K_{ei}}{s} v_{ei}(s) \quad (۳-۱۲)$$

$$v_{ei}(s) = s x_e(s) \quad (۳-۱۳)$$

$$v_i(s) = s x(s) \quad (۳-۱۴)$$

رفتار دینامیکی مطلوب ربات در تعامل با محیط در قالب امپدانس مطلوب تعبیر شده و می‌تواند بصورت رابطه (۳-۱۵) نشان داده شود. نمایش تونن رابطه (۳-۱۵) در شکل (۳-۶) نشان داده شده‌است.

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

بطوریکه $F_{Ri}(s)$ نیروی مطلوب ربات بوده و $Z_{Ri}(s)$ امپدانس مطلوب است که بصورت رابطه (۳-۱۶) تعریف می‌شود.

$$Z_{Ri}(s) = M_{Ri}s + B_{Ri} + \frac{K_{Ri}(s)}{s} \quad (۳-۱۶)$$

که در آن M_{Ri} ، B_{Ri} و K_{Ri} به ترتیب i -امین عنصر از ماتریس‌های قطری M_R ، B_R و K_R می‌باشند و M_R ، B_R و K_R نیز به ترتیب ماتریس‌های اینرسی، میرایی و سختی مطلوب می‌باشند. با جایگذاری رابطه (۳-۱۵) در (۳-۱۰)، $v_i(s)$ بصورت رابطه (۳-۱۷) محاسبه می‌گردد.

$$v_i(s) = \frac{F_{Ri}(s) + F_{Li}(s)}{Z_{Li}(s) + Z_{Ri}(s)} \quad (17-3)$$

با جایگذاری رابطه (17-3) در (10-3) می توان رابطه (18-3) را نتیجه گرفت.

$$F_{ei}(s) = \frac{Z_{Li}(s)F_{Ri}(s) - Z_{Ri}(s)F_{Li}(s)}{Z_{Li}(s) + Z_{Ri}(s)} \quad (18-3)$$

نیروی مرجع $F_{Ri}(s)$ بصورت رابطه (19-3) تعریف می شود.

$$F_{Ri}(s) = Z_{Ri}(s)v_{di}(s) \quad (19-3)$$

که $v_{di}(s)$ سرعت مطلوب مجری نهایی ربات نامیده می شود. حال با جایگذاری رابطه (19-3) در رابطه (18-3)، رابطه (20-3) حاصل می شود.

$$F_{ei}(s) = Z_{Ri}(s)(v_{di}(s) - v_i(s)) \quad (20-3)$$

از جایگذاری رابطه (14-3) در (20-3)، می توان رابطه (21-3) را نتیجه گرفت.

$$F_{ei}(s) = s Z_{Ri}(s)(x_{di}(s) - x_i(s)) \quad (21-3)$$

بطوریکه $x_{di}(s)$ مسیر مطلوب ربات در فضای کار است. زمانی که $F_{ei}(s) = 0$ است رابطه (21-3) بصورت رابطه (22-3) در می آید.

$$s Z_{Ri}(s)(x_{di}(s) - x_i(s)) = 0 \quad (22-3)$$

از جایگذاری رابطه (16-3) در (22-3) می توان رابطه (23-3) را نتیجه گرفت.

$$(M_{Ri}s^2 + B_{Ri}s + K_{Ri})(x_{di}(s) - x_i(s)) = 0 \quad (23-3)$$

اکنون پارامترهای طراحی M_{Ri} ، $B_{Ri}(s)$ و K_{Ri} به گونه ای انتخاب می شوند که ردیابی مناسب محقق شود و این کار مستلزم این است که ریشه های معادله $M_{Ri}s^2 + B_{Ri}s + K_{Ri}$ همگی در سمت چپ محور موهومی واقع گردند. در این صورت زمانی که t به سمت بینهایت میل می کند، $x_i(s)$ به سمت

$x_{di}(s)$ میل خواهد کرد. بنابراین زمانی که نیروی تماسی صفر است کنترل امیدانس نظیر یک کنترل موقعیت محض عمل می‌کند. نیروی تماس، در زمانی که ربات در تعامل با محیط نظیر شکل (۳-۸) قرار دارد از رابطه (۳-۱۸) محاسبه می‌گردد. با استفاده از روابط (۳-۱۱)، (۳-۱۲)، (۳-۱۳)، (۳-۱۴)، (۳-۱۶) و (۳-۱۸) مقدار نهایی $F_{ei}(s)$ بصورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$F_{ei}(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} sF_{ei}(s) = \frac{K_{ei}K_{Ri}}{K_{ei} + K_{Ri}} (x_{di}(\infty) - x_{ei}(\infty)) \quad (3-24)$$

اگر K_{Ri} خیلی کوچکتر از K_{ei} باشد آنگاه مقدار نهایی $F_{ei}(s)$ بصورت رابطه (۳-۲۵) محاسبه می‌گردد.

$$F_{ei}(\infty) \approx K_{Ri}(x_{di} - x_{ei}) \quad (3-25)$$

بنابراین اندازه نیروی تماسی با انتخاب مناسب ضریب سختی K_{Ri} و مسیر مطلوب $x_{di}(s)$ قابل تنظیم خواهد بود.

اگر K_{Ri} خیلی بزرگتر از K_{ei} باشد آنگاه مقدار نهایی $F_{ei}(s)$ بصورت رابطه (۳-۲۶) محاسبه می‌گردد.

$$F_{ei}(\infty) \approx K_{ei}(x_{di} - x_{ei}) \quad (3-26)$$

رابطه (۳-۶۱) بیانگر این موضوع است که نیروی تماس به سختی محیط و مسیر مطلوب مجری نهایی وابسته است و از تغییر این دو می‌تواند تنظیم شود. [۲۰].

۳۳ کنترل مقاوم

کنترل مقاوم یکی از روش‌های طراحی سیستم‌های کنترل است، که در آن بر روی ثبات و مقاومت عملکرد سیستم کنترلی در مقابل تغییرات و عدم قطعیت‌ها، تاکید می‌شود. هدف از طراحی، ایجاد یک سیستم کنترلی است که تغییرات در شرایط سیستم، کمترین اثر را در خروجی داشته باشد. به عبارت دیگر، افزایش قابلیت اطمینان سیستم، مهم‌ترین هدفی است که در طراحی کنترل مقاوم مد نظر قرار می‌گیرد، بویژه، تامین عملکرد مناسب و یا پایداری در حضور عوامل نامعین، دینامیک‌های مدل نشده و یا عوامل مزاحم مانند اغتشاش و ورودی‌های ناخواسته، از جمله اصلی‌ترین اهداف در طراحی سیستم‌های کنترل مقاوم است. مفهوم مقاومت^۵ یک مفهوم مطلق نیست و هر ساختار کنترل کننده‌ای،

⁵ Robustness

تا حدودی مقاوم است و از این رو، بسیاری از روش‌های کنترل شناخته شده، مانند کنترل کننده PID و یا کنترل حالت لغزشی^۶ یا (به اختصار SMC)، تا حدودی مفهوم مقاوم بودن را در خود دارند. [۳۰]

۳-۳-۱- کنترل حالت لغزشی

کنترل لغزشی یک رهیافت قدرتمند در جهت کنترل سیستم‌های غیرخطی و غیرقطعی می‌باشد. [۳۰]. کنترل لغزشی یک روش کنترل مقاوم است و می‌تواند با داشتن مدل عدم قطعیت‌ها و اغتشاش‌ها بکار رود، به شرطی که محدوده این عدم قطعیت‌ها و اغتشاش‌ها معلوم باشد.

۳-۳-۱-۱- اصول اساسی کنترل لغزشی

سیستم غیرخطی بصورت رابطه (۲۷-۳) را در نظر گرفته می‌شود. [۳۲]

$$\dot{x}^{(n)} = f(X) + u \quad (27-3)$$

$u \in R$ ورودی کنترل، $x \in R$ خروجی و $X = (x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)})^T$ بردار حالت می‌باشد. در رابطه (۲۷-۳)، $f(X)$ دقیقاً معلوم نمی‌باشد، اما عدم قطعیت $f(X)$ محدود به یک تابع معلوم از y است. یعنی می‌توان روابط (۲۸-۳) و (۲۹-۳) را نتیجه گرفت.

$$f(X) = \hat{f}(X) + \Delta f(X) \quad (28-3)$$

$$|\Delta f(X)| \leq F(X) \quad (29-3)$$

در رابطه (۲۹-۳) نامعلوم بوده ولی $\hat{f}(X)$ و $F(X)$ معلوم می‌باشند. هدف کنترل عبارت است از تعیین یک کنترل پس‌خورد $u = u(X)$ به نحوی که حالت X در سیستم حلقه بسته قادر به ردگیری حالت مطلوب $X_d = (x_d, \dot{x}_d, \dots, x_d^{(n-1)})^T$ باشد. یعنی خطای ردیابی که بصورت رابطه (۳۰-۳) تعریف می‌شود، به سمت صفر همگرا گردد.

$$e = X - X_d = (e, \dot{e}, \dots, e^{(n-1)})^T \quad (30-3)$$

اساس روش کنترل لغزشی به این صورت است که تابع اسکالر بصورت رابطه (۳۱-۳) تعریف می‌شود.

$$S(X, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} e = e^{(n-1)} + c_{n-1}^1 \lambda e^{(n-2)} + c_{n-1}^2 \lambda^2 e^{(n-3)} + \dots + \lambda^{n-1} e \quad (31-3)$$

که λ در رابطه (۳۱-۳) یک ثابت مثبت است. آنگاه

$$S(X, t) = 0 \quad (32-3)$$

⁶ Sliding mode control

رابطه (۳-۳۱) یک سطح وابسته به زمان $S(t)$ را در فضای R^n تعریف می‌کند. به عنوان مثال اگر $n=2$ باشد، آنگاه سطح $S(t)$ عبارت است از:

$$S(X, t) = \dot{e} + \lambda e = \dot{x} + \lambda x - \dot{x}_d - \lambda x_d = 0 \quad (۳-۳۳)$$

که یک خط مستقیم در صفحه فاز $x - \dot{x}$ می‌باشد که در شکل (۳-۹) نمایش داده شده است. از آنجایی که \dot{x}_d و x_d معمولاً توابع متغیر با زمان می‌باشند، لذا $S(t)$ نیز متغیر با زمان خواهد بود. اگر حالت اولیه $X(0)$ با حالت اولیه مطلوب $X_d(0)$ مساوی باشد، یعنی اگر $e(0) = 0$ باشد، آنگاه از روابط (۳-۳۲) و (۳-۳۳) نتیجه می‌شود که در صورتی که بردار حال X روی سطح $S(t)$ برای تمامی $t \geq 0$ باقی بماند، آنگاه $e(t) = 0$ برای تمامی $t \geq 0$ خواهد بود. در حقیقت $S(X, t) = 0$ یک معادله دیفرانسیل خطی را نشان می‌دهد که پاسخ یکتای آن $e(t) = 0$ برای شرایط اولیه $e(0) = 0$ می‌باشد. بنابراین مساله کنترل ردیابی ما معادل با قرار دادن تابع اسکالر $S(X, t)$ در صفر خواهد بود. برای رسیدن به این هدف، می‌توان کنترل u را چنان انتخاب نمود که رابطه (۳-۳۴) برقرار گردد.

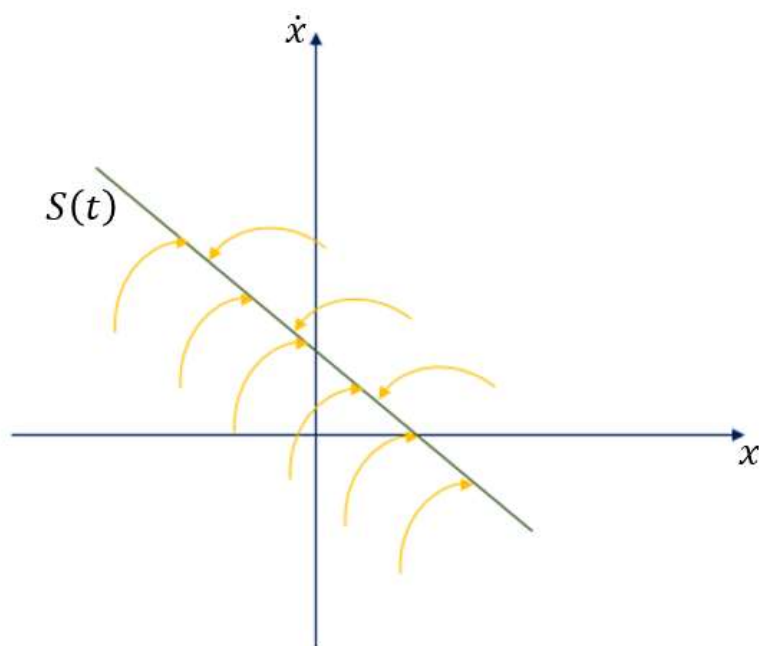
$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} S^2 \leq -\eta |S| \quad (۳-۳۴)$$

اگر حالت خارج از $S(t)$ باشد، که η یک ثابت مثبت می‌باشد، رابطه (۳-۳۴) به عنوان شرایط لغزشی نامیده می‌شود و این شرط کاهش $|S(X, t)|$ را در صورتی که X روی سطح $S(t)$ نباشد تضمین می‌نماید یعنی مسیر حالت به سمت سطح $S(t)$ انتقال خواهد یافت، که در شکل (۳-۹) نمایش داده شده است. سطح $S(t)$ سطح لغزشی، سیستم روی سطح، حالت لغزشی و کنترلی که عبارت (۳-۳۴) را تضمین می‌نماید، کنترل حالت لغزشی یا کنترل لغزشی نامیده می‌شود. [۳۲].

قضیه ۳-۱

سیستم غیرخطی مطابق رابطه (۳-۲۷) در اختیار است، فرض می‌شود که $S(X, t)$ مطابق رابطه (۳-۳۱) تعریف می‌شود. [۳۲]

اگر کنترل کننده u به گونه‌ای که شرط لغزشی با رابطه (۳-۳۴) را برآورده کند، طراحی شود آنگاه: حالت به سطح لغزشی $S(t)$ در مدت زمان محدودی خواهد رسید. هنگامی که حالت روی سطح لغزشی قرار گیرد، بر روی آن باقی خواهد ماند. اگر حالت بر روی سطح لغزشی باقی بماند، خطای ردیابی $e(t)$ به سمت صفر همگرا خواهد شد.



شکل ۳-۹ سطح لغزشی در صفحه فاز دو بعدی

در این قسمت جزئیات کنترل لغزشی برای یک سیستم مرتبه دوم بررسی می‌شود. یعنی سیستم (۳-۲۷) از مرتبه ۲ مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این حالت رابطه (۳-۳۴) بصورت رابطه (۳-۳۵) نوشته می‌شود.

$$S[f(X) + u - \ddot{x}_d + \lambda \dot{e}] \leq -\eta |S| \quad (۳-۳۵)$$

با استفاده از روابط (۳-۲۷) و (۳-۳۵) سیگنال کنترل را می‌توان بصورت رابطه (۳-۳۶) انتخاب نمود.

$$u = -\hat{f}(X) + \ddot{x}_d - \lambda \dot{e} - k(x, \dot{x}) \operatorname{sgn}(S) \quad (۳-۳۶)$$

با جایگذاری رابطه (۳-۳۶) در رابطه (۳-۳۵) شرط لغزشی بصورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$\operatorname{sgn}(S)[f(X) - \hat{f}(X) - k(x, \dot{x}) \operatorname{sgn}(S)] \leq -\eta \quad (۳-۳۷)$$

$$k(x, \dot{x}) \geq \eta + \operatorname{sgn}(s)[\Delta f(X)] \quad (۳-۳۸)$$

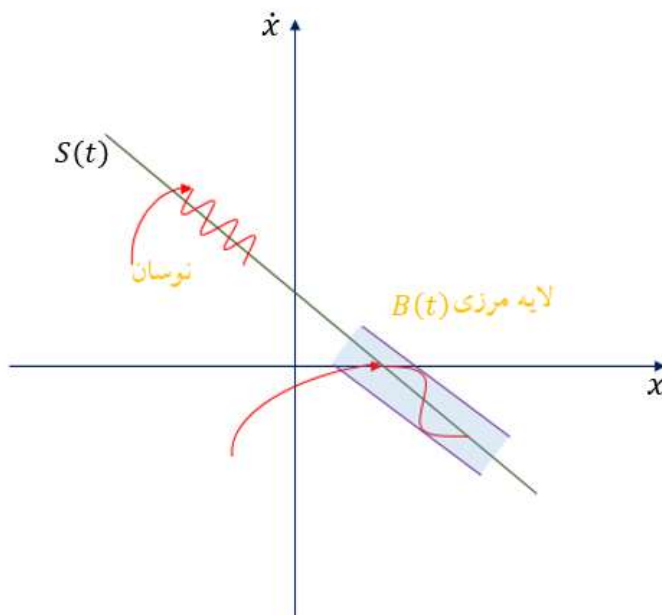
$$k(x, \dot{x}) = \eta + F(X) \quad (۳-۳۹)$$

مشاهده می‌گردد که برقراری شرط (۳-۳۸) تضمین شده است، در این حالت شرط لغزش (۳-۳۴) برآورده می‌شود.

۳-۳-۱-۲- تقریب پیوسته از قاعده کنترل لغزشی

از قسمت قبل مشاهده گردید که قاعده لغزشی در طول سطح لغزش $S(t)$ گسستگی دارد. از آنجایی که پیاده‌سازی کلیدزنی^۷ سیگنال کنترل نمی‌تواند کامل باشد و در سیستم‌های کنترل دیجیتالی باید از سیگنال‌ها نمونه‌برداری شود این موضوع مطابق شکل (۳-۱۰) باعث نوسان^۸ خواهد شد. نوسان به دلیل این که مستلزم فعالیت کنترل سریع بوده و می‌تواند دینامیک فرکانس بالایی ایجاد کند، نامطلوب است. یک راه جلوگیری از نوسان ایجاد یک لایه مرزی نازک در همسایگی سطح لغزش بصورت رابطه (۳-۴۰) است.

$$B(t) = \{x: |S(x, t)| \leq \phi\} \quad (۳-۴۰)$$



شکل ۳-۱۰ نوسان و لایه‌ی مرزی

بطوریکه که کنترل به طور پیوسته در میان این لایه مرزی تغییر نماید. در شکل (۳-۱۰)، ϕ ضخامت لایه مرزی و $\varepsilon = \frac{\phi}{\lambda^{n-1}}$ پهناى لایه مرزی نامیده می‌شود. اگر شرط لغزشی (۳-۳۴) خارج از لایه مرزی $B(t)$ با رابطه (۳-۴۰) قرار گیرد آنگاه تضمین می‌شود که بعد از مدت زمان محدودی اندازه انحراف کمتر از ε خواهد شد. [۳۲]

$$|e(t)| \leq \varepsilon \quad (۳-۴۱)$$

که این مسئله نشان می‌دهد، که اگر از ردیابی‌کننده کامل $e(t) = 0$ به ردیابی‌کننده با دقتی حدود $|e(t)| \leq \varepsilon$ گام برداشته شود، لازم خواهد بود تا قاعده کنترل به جای شرط لغزشی (۳-۳۴) در همه

⁷ Switching

⁸ chattering

زمان‌ها، تنها وقتی که $X(t)$ خارج از لایه مرزی $B(t)$ قرار دارد شرط لغزشی را ارضا نماید. در نتیجه طراحی یک کنترل‌کننده هموار که احتیاجی به کلید زدن گسسته در میان سطح لغزشی نداشته باشد، ممکن خواهد بود در حالت خاص، برای سیستم مرتبه دو قاعده کنترل (۳-۳۶) به قاعده کنترل با رابطه (۳-۴۲) تغییر می‌کند. [۳۲].

$$u = -\hat{f}(X) + \dot{X}_d - \lambda \dot{e} - k(x, \dot{x}) \operatorname{sat} \left[\frac{S}{\phi} \right] \quad (۳-۴۲)$$

۴۳ کنترل تطبیقی

بسیاری از سیستم‌های دینامیکی که باید کنترل شوند، پارامترهای نامعلوم دارند که یا ثابت‌اند و یا به آهستگی تغییر می‌کنند. برای مثال، ربات‌ها ممکن است اجسام بزرگی را با پارامترهای اینرسی نامعلوم حمل کنند. سیستم‌های قدرت ممکن است با شرایطی مواجه باشند که تغییرات زیادی در بار صورت پذیرد. هواپیماهای آتش‌نشانی، مادامی که مقادیر زیادی آب را با خود حمل و تخلیه می‌کنند، با تغییرات وزنی وسیع رو به رو هستند. کنترل تطبیقی یک روش برای کنترل این چنین سیستم‌هایی است. ایده اصلی در کنترل تطبیقی این است که پارامترهای نامعلوم سیستم (و یا پارامترهای کنترل‌کننده آن) براساس سیگنال‌های اندازه‌گیری شده بصورت بهنگام، تخمین زده شوند و در انجام محاسبات ورودی کنترل از پارامترهای تخمین زده شده استفاده شوند. بنابراین می‌توان از سیستم کنترل تطبیقی، هم در سیستم‌های خطی و هم در سیستم‌های غیرخطی استفاده کرد. [۳۰]

۳-۴-۱- چرا کنترل تطبیقی؟

بعضی از وظایف کنترل، مثل جابجایی به وسیله ربات، سیستمی که باید کنترل شود ممکن است در ابتدای کار کنترل عدم قطعیت پارامتری داشته باشند. اگر میزان نامعلومی این پارامترها با یک مکانیزم تطبیق و یا تخمین بصورت بهنگام تقلیل داده نشوند، ممکن است باعث عدم دقت و یا ناپایداری در سیستم کنترل شوند. در بسیاری از مواقع دیگر، مثل کنترل سیستم‌های قدرت، ممکن است دینامیک سیستم در ابتدای کار کاملاً معلوم باشد ولی در حین انجام فرآیند کنترل پارامترهای آن با تغییرات غیرقابل پیش‌بینی مواجه شوند. لذا بدون طراحی مجدد کنترل‌کننده، ممکن است کنترل‌کننده طراحی شده اولیه که در ابتدای کار مناسب بود قادر نباشد سیستم در حال تغییر را کنترل کند. به طور کلی، هدف اصلی کنترل تطبیقی این است که عملکرد سیستم را در مقابل عدم قطعیت و یا تغییرات نامشخص پارامترها، به طور سازگار حفظ کند. از آنجا که این چنین عدم قطعیت‌های پارامتری و یا تغییرات آن‌ها می‌تواند در بسیاری از مسائل کاربردی صورت پذیرد، کنترل تطبیقی در بسیاری از وضعیت‌های صنعتی مفید است. [۳۰]. کنترل‌کننده تطبیقی با یک کنترل‌کننده معمولی از این جهت فرق دارد که در آن، متغیرهای کنترل‌کننده قابل تغییر است.

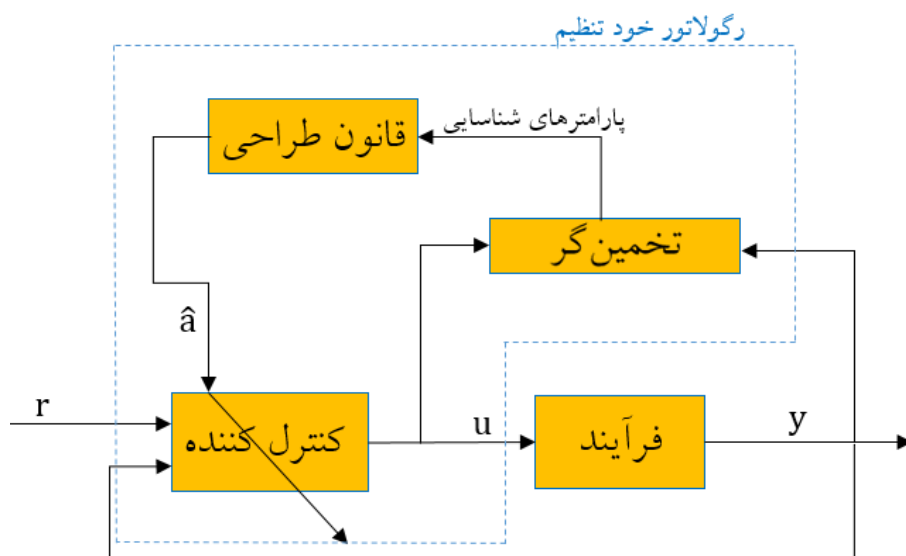
۳-۴-۲- روش‌های کنترل تطبیقی

از روش‌های کنترل تطبیقی می‌توان به سیستم‌های تطبیقی خود نوسان‌ساز، جدول‌بندی بهره، سیستم‌های تطبیقی غیرمستقیم و سیستم‌های تطبیقی مستقیم اشاره کرد. [۳۳].
امروزه روش‌های تطبیقی خود نوسان‌ساز و جدول‌بندی بهره به دلیل نداشتن تضمین پایداری و همین‌طور خارج خط بودن و وابسته به مدل بودن کمتر مورد توجه قرار می‌گیرند، بنابراین عموماً روش‌های کنترل تطبیقی در دو دسته اصلی غیرمستقیم و مستقیم جای می‌گیرند.

- سیستم‌های تطبیقی غیرمستقیم
- سیستم‌های تطبیقی مستقیم

۳-۴-۲-۱- سیستم‌های تطبیقی غیرمستقیم

در سیستم‌های تطبیقی غیرمستقیم واحد شناسایی پارامترهای فرآیند وجود دارد و تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده از روی پارامترهای شناسایی شده انجام می‌گیرد. به عنوان مثال روش رگولاتورهای خود تنظیم^۹ (STR)، یکی از اصلی‌ترین روش‌های تطبیق غیرمستقیم است. ساختار سیستم تطبیقی خود تنظیم در شکل (۳-۱۱) نمایش داده شده‌است.



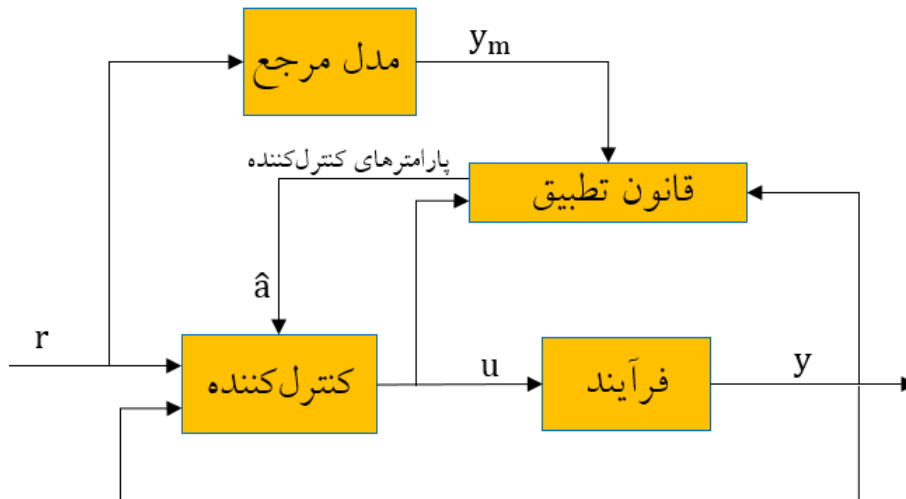
شکل ۳-۱۱ سیستم کنترل تطبیقی خود تنظیم

بطوریکه در شکل (۳-۱۱)، \hat{a} پارامترهای کنترل‌کننده، y و u به ترتیب خروجی و ورودی فرآیند و r ورودی مرجع می‌باشند.

^۹ Self Tuning Regulator

سیستم‌های تطبیقی مستقیم ۳-۴-۲-۲-۲

در روش تطبیق مستقیم واحد شناسایی فرآیند وجود ندارد و تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده از روی خروجی فرآیند و مدل مرجع انجام می‌شود. از سیستم‌های تطبیقی مدل مرجع^{۱۰} (MRAS) به عنوان یکی از اصلی‌ترین روش‌های تطبیق مستقیم یاد می‌شود. ساختار کلی سیستم‌های تطبیقی مدل مرجع در شکل (۳-۱۲) نمایش داده شده است.



شکل ۳-۱۲ سیستم کنترل تطبیقی مدل مرجع

بطوریکه در شکل (۳-۱۲)، \hat{a} پارامترهای کنترل‌کننده، y و u به ترتیب خروجی و ورودی فرآیند، r ورودی مرجع و y_m خروجی مدل مرجع می‌باشند. در سیستم‌های MRAS پارامترها به طریقی به هنگام می‌شوند که خطای ردیابی بین خروجی فرآیند و خروجی مدل مرجع حداقل شود.

۳ ۵ اصول اساسی کنترل تطبیقی مدل مرجع

در روش کنترل تطبیقی مدل مرجع فرض می‌شود که فرآیند، ساختار معلوم داشته باشد ولی پارامترهای آن نامشخص باشد. این فرض در دستگاه‌های خطی به مفهوم معین بودن تعداد قطب‌ها و صفرها و نامعین بودن محل دقیق قطب و صفرهای دستگاه می‌باشد. در فرآیندهای غیرخطی نظیر معادلات حرکت ربات، فرض ارائه شده به مفهوم معلوم بودن ساختار معادلات دینامیکی و نامشخص بودن بعضی از پارامترهای آن می‌باشد.

¹⁰ Model Reference Adaptive System

۳-۵-۱- دسته‌بندی روش‌های طراحی سیستم‌های کنترل تطبیقی مدل

مرجع

۱. براساس گرادیان
۲. بر اساس قضیه غیرفعال بودن
۳. بر اساس تئوری پایداری لیاپانوف

۳-۵-۱-۱- روش گرادیان

این روش به MIT-Rule معروف است و امروزه به دلیل نداشتن تضمین پایداری کمتر مورد توجه قرار گرفته و دستورالعملی که در ابتدا مطرح شد امروزه اصلاً کاربردی ندارد. [۳۳].

۳-۵-۱-۲- استفاده از قضیه غیرفعالی

در این روش، طراحان با استفاده از قضایای غیرفعالی، به طراحی سیستم‌های تطبیقی مدل مرجع می‌پردازند. پایداری با استناد به قضیه غیرفعالی اثبات می‌شود و معمولاً از خواص سیگنالی و سیستمی استفاده می‌شود. به این قضایا و مفاهیم لازم برای طراحی در [۳۳] بصورت کامل پرداخته شده است.

۳-۵-۱-۳- استفاده از پایداری لیاپانوف

این روش با استفاده از تئوری قوی پایداری لیاپانوف به طراحی سیستم تطبیقی مدل مرجع می‌پردازد. این روش پایداری تضمینی دارد و به همین دلیل امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته است. [۳۳].

قضایای پایداری

تعریف ۱-۳

به حالت تعادل $x = 0$ پایدار گفته می‌شود اگر، برای هر مقدار $R > 0$ ، یک $r > 0$ وجود داشته باشد، بطوریکه اگر $\|x(0)\| < r$ باشد، آن‌گاه برای هر مقدار $\|x(t)\| < R$ ، $t \geq 0$ باشد. در غیر اینصورت نقطه تعادل ناپایدار است. [۳۰].

اساساً، پایداری (که پایداری از دیدگاه لیاپانوف، یا پایداری لیاپانوف نیز نامیده می‌شود) به این معنی است که با شروع فعالیت سیستم از محلی که به اندازه کافی به مبدا نزدیک است، مسیر سیستم را بتوان در نزدیکی مبدا باقی نگاه داشت.

تعریف ۲-۳

نقطه تعادل صفر بصورت مجانبی پایدار است اگر پایدار باشد و و مضاف بر این که اگر $r > 0$ وجود داشته باشد بگونه‌ای که $\|x(0)\| < r$ نتیجه دهد که هنگامی که $t \rightarrow \infty$ میل می‌کند، $x(t) \rightarrow 0$ میل کند. [۳۰].

تعریف ۳-۳

نقطه تعادل صفر بصورت نمایی پایدار است اگر دو عدد کاملاً مثبت α و λ وجود داشته باشند،
گونه‌ای که رابطه زیر در گویی در اطراف مبدا، برقرار باشد. [۳۰].

$$\forall t > 0, \|x(t)\| \leq \alpha \|x(0)\| e^{-\lambda t} \quad (۳-۳)$$

تعریف ۴-۳

اگر پایداری مجانبی (یا نمایی) در هر حالت اولیه‌ای حفظ شود، نقطه تعادل را در مقیاس وسیع،
بصورت مجانبی (یا نمایی) پایدار می‌نامند. همچنین آن را بصورت مجانبی (یا نمایی) پایدار کلی نیز
می‌نامند. [۳۰].

قضیه لیاپانوف برای پایداری موضعی

قضیه ۳-۲ (پایداری موضعی) اگر تابع اسکالر $V(x)$ با مشتقات جزئی مرتبه اول پیوسته در گویی به
شعاع B_R در اطراف مبدا وجود داشته باشد به گونه‌ای که $V(x)$ معین مثبت و $\dot{V}(x)$ نیمه معین منفی
باشد، آنگاه نقطه تعادل صفر پایدار است. در واقع اگر $\dot{V}(x)$ بصورت موضعی معین منفی باشد، آنگاه
پایداری، از نوع مجانبی است. [۳۰].

قضیه فوق برای تحلیل پایداری موضعی به کار می‌رود. جهت اظهار نظر درباره پایداری مجانبی و کلی
یک سیستم، طبیعتاً ممکن است این انتظار وجود داشته باشد که گوی مورد نظر با شعاع B_R در اطراف
مبدا در قضیه پایداری موضعی، به تمام فضای حالت گسترش یابد. این موضوع یک شرط لازم است ولی
کافی نمی‌باشد.

قضیه ۳-۳ (پایداری کلی) فرض کنید که تابع اسکالری مانند $V(x)$ که تابعی از حالت‌های سیستم و با
مشتق‌های مرتبه اول پیوسته است، وجود داشته باشد به گونه‌ای که

$$V(x) \text{ معین مثبت باشد؛}$$

$$\dot{V}(x) \text{ معین منفی باشد؛}$$

$$\text{هنگامی که } \|x\| \rightarrow \infty \text{ میل می‌کند، } V(x) \rightarrow \infty \text{ میل کند؛}$$

آنگاه نقطه تعادل مبدا بصورت مجانبی و کلی پایدار است. [۳۰].

۳ ۶ مقایسه سیستم‌های STR و MRAS

تضمین پایداری و همگرایی کنترل‌کننده‌های STR خیلی مشکل است و برای همگرایی
پارامترهای تخمین زده شده با پارامترهای واقعی، غالباً لازم است که سیگنال مرجع به اندازه کافی غنی
باشد. اگر سیگنال مرجع به اندازه کافی غنی نباشد (به عنوان مثال اگر سیگنال مرجع صفر یا ثابت

باشد)، پارامترهای تخمین زده شده ممکن است به پارامترهای واقعی نزدیک نبوده و تضمین پایداری و همگرایی سیستم کنترل حاصل امکان پذیر نباشد. در چنین مواقعی، یا باید سیگنال دیگری به عنوان ورودی مرجع امتحان شود که بتواند همه حالات سیستم را تحریک کند تا تخمین بهتر انجام گیرد و یا به طریقی قانون کنترل تغییر داده شود. ولی در سیستم های MRAS، معمولاً بدون توجه به غنی بودن سیگنال ها، پایداری و همگرایی خطای ردیابی به صفر تضمین می شود. [۳۰]. روش STR در حالت گسسته راحت تر پیاده سازی می شود در حالی که روش MRAS در اکثر موارد، در فرم پیوسته زمانی بکار می رود. [۳۳].

۷۳ روش تخمین نامعینی های ربات با استفاده از روش تاخیر زمانی

در [۳۴] یک روش کنترل مقاوم برای تخمین نامعینی های ربات پیشنهاد شده است، بطوریکه از روش تخمین تاخیر زمانی بهره می جوید.

معادله الکتریکی موتورها بطور کلی توسط رابطه (۳-۴۴) تعریف می شود.

$$v = RI_a + L\dot{I}_a + K_b\dot{\theta}_m + \varphi(t) \quad (۳-۴۴)$$

که در رابطه (۳-۴۴)، $\varphi(t)$ اغتشاش اعمالی به سیستم است و فرض می شود که بصورت رابطه (۳-۴۵) محدود باشد. حاصل جمع $L\dot{I}_a$ و $\varphi(t)$ ، به عنوان عدم قطعیت مجتمع در نظر گرفته شده است. با این توضیح، رابطه (۳-۴۴) بصورت رابطه (۳-۴۶) بازنویسی می شود.

$$|\varphi(t)| \leq \varphi_{max} \quad (۳-۴۵)$$

$$v = RI_a + k_b\dot{\theta}_m + \zeta \quad (۳-۴۶)$$

ζ بصورت رابطه (۳-۴۷) تعریف می شود.

$$\zeta = L\dot{I}_a + \varphi(t) \quad (۳-۴۷)$$

بطوریکه $L\dot{I}_a$ در رابطه (۳-۴۷)، دینامیک مدل نشده است. $\zeta(t)$ در رابطه (۳-۴۷) بصورت هدفمند $L\dot{I}_a$ را در بر گرفته، چرا که اندازه گیری \dot{I}_a در عمل متداول نیست و ممکن است که وجود این بخش مشتق گیر، باعث بروز مشکلاتی نظیر تقویت نویز شود.

چنانچه از مقادیر نامی \hat{R} و \hat{K}_b ، به ترتیب به جای مقادیر واقعی R و K_b استفاده شود، معادله (۳-۴۶) بصورت رابطه (۳-۴۸) نوشته می شود.

$$v = \hat{R}I_a + \hat{K}_b\dot{\theta}_m + \zeta \quad (۳-۴۸)$$

از تساوی دو رابطه (۳-۴۶) و رابطه (۳-۴۸)، رابطه (۳-۴۹) نتیجه می شود.

$$\zeta = (R - \hat{R})I_a + L\dot{I}_a + (K_b - \hat{K}_b)\dot{\theta}_m + \varphi(t) \quad (49-3)$$

از آنجایی که ζ نامعلوم است مقدار تقریبی و تخمینی آن $\hat{\zeta}$ در هر لحظه بصورت رابطه (3-50) قابل محاسبه است.

$$\hat{\zeta} = v(t - \varepsilon) - \hat{R}I_a(t) - \hat{K}_b\dot{\theta}_m(t) \quad (50-3)$$

در رابطه (3-50)، ε یک عدد مثبت کوچک است و $v(t - \varepsilon)$ مقدار سیگنال کنترل در یک لحظه قبل می‌باشد.

از طرفی لازم است که موتور در برابر اضافه ولتاژ محافظت شود تا آسیب نبیند. این محافظت که بصورت الکتریکی انجام می‌شود تضمین می‌نماید که ولتاژ موتور v محدود است. بنابراین در این پایان‌نامه فرض می‌شود که ولتاژ v بصورت رابطه (3-51) محدود است.

$$|v(t)| \leq v_{max} \quad (51-3)$$

بطوریکه v_{max} در رابطه (3-51)، حداکثر ولتاژ مجاز هر مفصل می‌باشد.

۸-۳ جمع‌بندی

در این فصل ابتدا مفاهیم لازم در خصوص درک کنترل رفتار یا تعامل دینامیکی ربات با محیط اطراف خود و ضرورت اجرای آن مطرح شد و سپس با مقایسه روش‌های مرسوم کنترل این رفتار، به برتری روش کنترل امپدانس اذعان شد. سپس به مبحث مدل‌سازی ربات و محیط و چگونگی عملکرد کنترل امپدانس در کنترل یکپارچه موقعیت و نیرو از طریق معادلات ریاضی پرداخته شد و در ادامه نیز اصول اساسی کنترل تطبیقی مدل مرجع بیان شد. در پایان نیز یک روش تخمین نامعینی‌های غیر ساختاری ربات ارائه شد.

در فصل بعد روش کنترل امپدانس بازوی رباتیک با راهبرد کنترل گشتاور و ولتاژ تشریح می‌گردد. در پایان نیز روش‌های مطرح شده بر روی ربات اسکارا با فرضیات و مشخصات ارائه شده در فصل دوم پیاده‌سازی خواهند شد.

فصل چهارم روش کنترل امپدانس به روش

خطی سازی پسخورد

در این فصل ابتدا روش کنترل امیدانس به روش خطی‌سازی پس‌خورد ارائه شده در [۲۰] مورد بررسی قرار می‌گیرد. با این توضیح که روش ارائه شده قانون کنترل امیدانس را بر مبنای هر دو راهبرد کنترل گشتاور و راهبرد کنترل ولتاژ طراحی می‌نماید. در ادامه هر دو روش بصورت جداگانه بر روی ربات اسکارا با مشخصات ارائه شده در فصل دوم، مورد بررسی تحلیل و شبیه‌سازی قرار گرفته است.

۲۴ قانون کنترل امیدانس با راهبرد کنترل گشتاور

امیدانس مطلوب ربات در تعامل با محیط با تعریف نیروی مطلوب F_{Ri} در رابطه (۱-۴)، می‌تواند در فرم لاپلاس و اسکالر، برای $i = 1, \dots, n$ بصورت رابطه (۲-۴) بازنویسی شود.

$$F_{Ri}(s) = (M_{Ri}s^2 + B_{Ri}s + K_{Ri})x_{di}(s) \quad (۱-۴)$$

$$F_{Ri}(s) - F_{ei}(s) = (M_{Ri}s^2 + B_{Ri}s + K_{Ri})x_i(s) \quad (۲-۴)$$

رابطه (۲-۴) در حوزه زمان بصورت رابطه (۳-۴) نوشته می‌شود.

$$\ddot{x}_i = -M_{Ri}^{-1}B_{Ri}\dot{x}_i - M_{Ri}^{-1}K_{Ri}x_i - M_{Ri}^{-1}F_{ei} + M_{Ri}^{-1}F_{Ri} \quad (۳-۴)$$

معادله (۳-۴) در فرم ماتریسی بصورت رابطه (۴-۴) نوشته می‌شود.

$$\ddot{x} = -M_R^{-1}B_R\dot{x} - M_R^{-1}K_Rx - M_R^{-1}F_e + M_R^{-1}F_R \quad (۴-۴)$$

در ادامه معادله حرکت ربات در فضای کار با فرض کامل بودن رتبه ماتریس ژاکوبین، با استفاده از روابط (۲۷-۲) و (۲۸-۲) در (۲-۴۰)، بصورت رابطه (۵-۴) تعریف می‌شود.

$$D(q)J(q)^{-1}\ddot{x} + h(q, \dot{q}) + J^T(q)F_e = \tau_r \quad (۵-۴)$$

بطوریکه $h(q, \dot{q})$ در رابطه (۵-۴) بصورت رابطه (۶-۴) تعریف می‌شود.

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

با جایگذاری رابطه (۴-۴) در معادله (۵-۴)، قانون کنترل امیدانس با راهبرد کنترل گشتاور بصورت رابطه (۷-۴) بدست می آید.

از طرفی رابطه (۱-۴) در حوزه زمان بصورت رابطه (۸-۴) نوشته می شود.

$$\tau_r = -D(q)J(q)^{-1}(M_R^{-1}B_R\dot{x} + M_R^{-1}K_Rx) + (J^T(q) - D(q)J(q)^{-1}M_R^{-1})F_e + D(q)J(q)^{-1}M_R^{-1}F_R + h(q, \dot{q}) \quad (۷-۴)$$

$$F_R = M_R\ddot{x}_d + B_R\dot{x}_d + K_Rx_d \quad (۸-۴)$$

با جایگذاری رابطه (۸-۴) در رابطه (۷-۴)، قانون کنترل گشتاور نهایی بصورت رابطه (۹-۴) در می آید.

$$\tau_r = D(q)J(q)^{-1}M_R^{-1}(M_R\ddot{x}_d + B_R(\dot{x}_d - \dot{x}) + K_R(x_d - x)) + (J^T(q) - D(q)J(q)^{-1}M_R^{-1})F_e + h(q, \dot{q}) \quad (۹-۴)$$

در قانون کنترل (۹-۴)، به این نکته توجه می شود که سیگنال کنترل به محاسبه سیگنال های \dot{q} ، q و x و همین طور ماتریس های $D(q)$ ، $C(q, \dot{q})$ و بردار گرانش $G(q)$ ، نیاز دارد. به عبارت دیگر مدل ربات باید کاملاً معلوم باشد.

۴-۲-۱- شبیه سازی

شبیه سازی های این فصل بر روی ربات اسکارا با مشخصات و فرضیات ارائه شده در قسمت (۲-۲) انجام گرفته است. مسیر مطلوب ربات $x_d = [x_{d1} \ x_{d2} \ x_{d3}]^T$ در فضای کار بصورت رابطه (۴-۱۰) داده شده و در شکل (۴-۴) نمایش داده شده است. در تمامی شبیه سازی های این پایان نامه، فرض می شود که ربات در حرکت غیرمقید و در فضای آزاد اقدام به ردیابی از مسیر مطلوب نماید و سپس برخورد مجری نهایی ربات با محیط، در راستای محور z اتفاق افتد.

$$x_{d1} = \begin{cases} 0.85 - 0.15 \cos(\pi t/3) & 0 \leq t < 3 \\ 1 & 3 \leq t < 6 \end{cases} \quad (۱۰-۴)$$

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

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

در شبیه سازی قانون کنترل (۹-۴) ماتریس های M_R ، B_R و K_R به ترتیب بصورت $M_R = I_3$

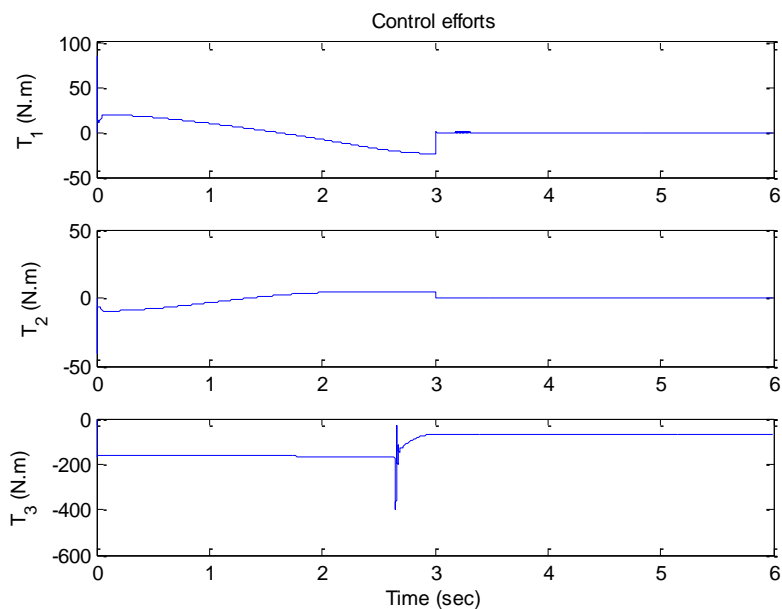
جدول پارامترهای ربات و محرکه‌ها در زیر داده شده‌اند. در تمامی شبیه‌سازی‌ها از مقادیر داده شده در جدول دناویت هارتنبرگ ارائه شده در قسمت (۲-۷-۱) استفاده شده است. ولتاژ اعمالی به موتورها، نیروی تماسی و خطای ردیابی به ترتیب در شکل‌های (۴-۱)، (۴-۲) و (۴-۳) نمایش داده شده‌اند.

جدول ۴-۱ پارامترهای دینامیکی ربات اسکارا [۲۰]

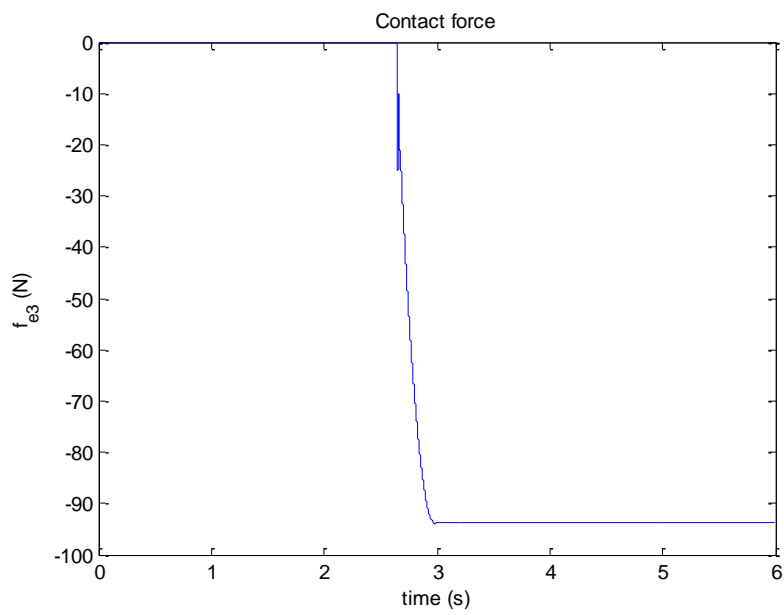
i	$x_i (m)$	$y_i (m)$	$z_i (m)$	$m_i (kg)$	$I_{xxi} (kg m^2)$	$I_{yyi} (kg m^2)$	$I_{zz_i} (kg m^2)$	$I_{xyi} (kg m^2)$	$I_{xz_i} (mkg m^2)$	$I_{yzi} (kg m^2)$
۱	-۰/۳۰۸۲	-۰/۰۰۱۴	-۰/۱۴۴۶	۹۵/۲۳۱۵	۱/۶۲۱۶	۷/۳۱۰۷	۷/۶۰۰۶	۰/۰۲۶۸	-۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۰۱
۲	-۰/۶۷۳۹	۰/۰۰۱۱	-۰/۱۹۵۶	۱۵۸/۰۸۶۶	۳/۷۴۵۲	۲۲/۶۴۳۶	۲۱/۶۸۲۵	۰/۰۱۳۵	۲/۰۹۹۶	-۰/۰۰۱۵
۳	۰	۰	-۰/۵۴۰۳	۱۶/۶۱۷۱	۱/۶۳۳۹	۱/۶۳۳۹	۰/۰۴۰۷	۰	-۰/۰۰۰۴	۰
۴	۰	۰	-۰/۰۲۵	۰/۱۰۶	۰/۰۰۰۲۶۴	۰/۰۰۰۲۶۴	۰/۰۰۰۴۸۳۸	۰	۰	۰

جدول ۴-۲ مشخصات موتورهای DC جریان مستقیم [۲۰]

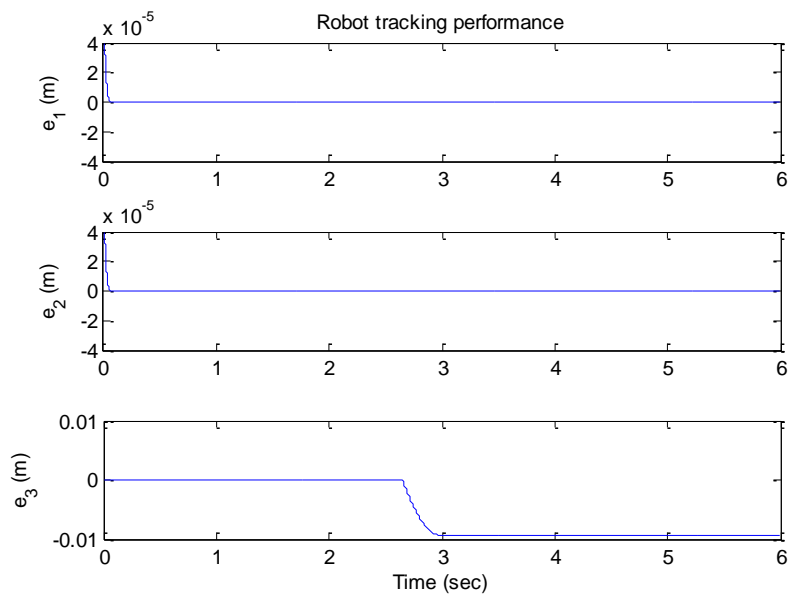
$u_{max} (V)$	$R (\Omega)$	$K_b \left(\frac{Vs}{rad}\right)$	$L (H)$	$J_m \left(\frac{Nm s^2}{rad}\right)$	$B_m \left(\frac{Nm s}{rad}\right)$	r
۴۰	۱/۶	۰/۲۶	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۲



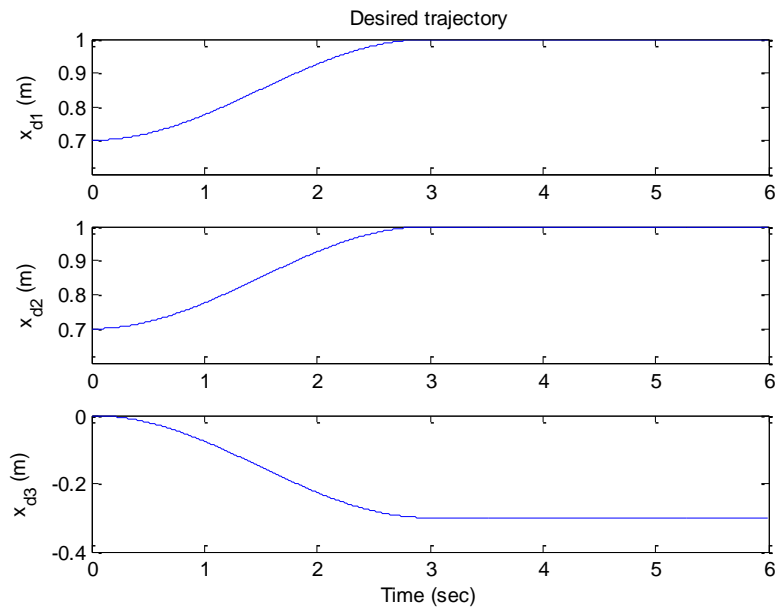
شکل ۴-۱ گشتاور اعمالی به مفاصل ربات



شکل ۲-۴ نیروی تماسی ناشی از تعامل دینامیکی ربات با محیط



شکل ۳-۴ خطای ردیابی ربات از مسیر مطلوب



شکل ۴-۴ مسیر مطلوب ربات در فضای کار

۳-۴ قانون کنترل امیدانس با راهبرد کنترل ولتاژ

با جایگذاری روابط (۲۷-۲) و (۳۷-۲) در رابطه (۳۸-۲)، معادله دینامیکی حرکت ربات بصورت رابطه (۱۱-۴) در می‌آید.

$$RI_a + L\dot{I}_a + K_b r^{-1} J^{-1} \dot{x} = v \quad (11-4)$$

مدل امیدانس مطلوب (۲-۴) با فرض $M_{Ri} = 0$ بصورت رابطه (۱۲-۴) نوشته می‌شود.

$$F_{Ri}(s) - F_{ei}(s) = (B_{Ri}s + K_{Ri})x_i(s) \quad (12-4)$$

در حوزه زمان رابطه (۱۲-۴) بصورت رابطه (۱۳-۴) نوشته می‌شود.

$$\dot{x}_i = -B_{Ri}^{-1}K_{Ri}x_i - B_{Ri}^{-1}F_{ei} + B_{Ri}^{-1}F_{Ri} \quad (13-4)$$

معادله فوق در فرم ماتریسی می‌تواند بصورت معادله (۱۴-۴) نوشته شود.

$$\dot{x} = -B_R^{-1}K_R x - B_R^{-1}F_e + B_R^{-1}F_R \quad (14-4)$$

با جایگذاری رابطه (۱۴-۴) در (۱۱-۴) قانون کنترل امیدانس بصورت رابطه (۱۵-۴) بدست می‌آید.

$$RI_a + L\dot{I}_a + K_b r^{-1} J^{-1}(q)(-B_R^{-1} K_R x - B_R^{-1} F_e + B_R^{-1} F_R) = v \quad (15-4)$$

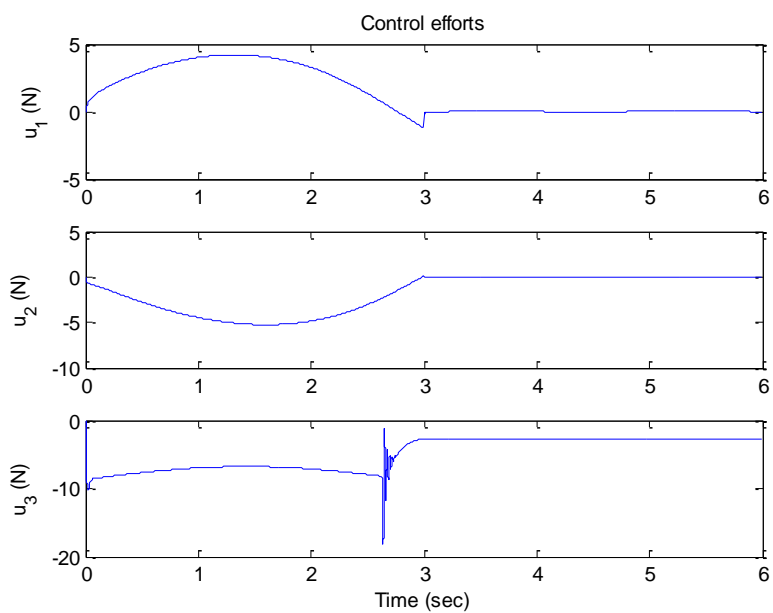
با جایگذاری رابطه (1-4) و با فرض $M_R = 0$ در رابطه (15-4)، قانون کنترل امپدانس نهایی با راهبرد کنترل ولتاژ با رابطه (16-4)، نتیجه می‌شود.

$$RI_a + L\dot{I}_a + K_b r^{-1} J^{-1}(q)(\dot{x}_d + B_R^{-1} K_R (x_d - x) - B_R^{-1} F_e) = v \quad (16-4)$$

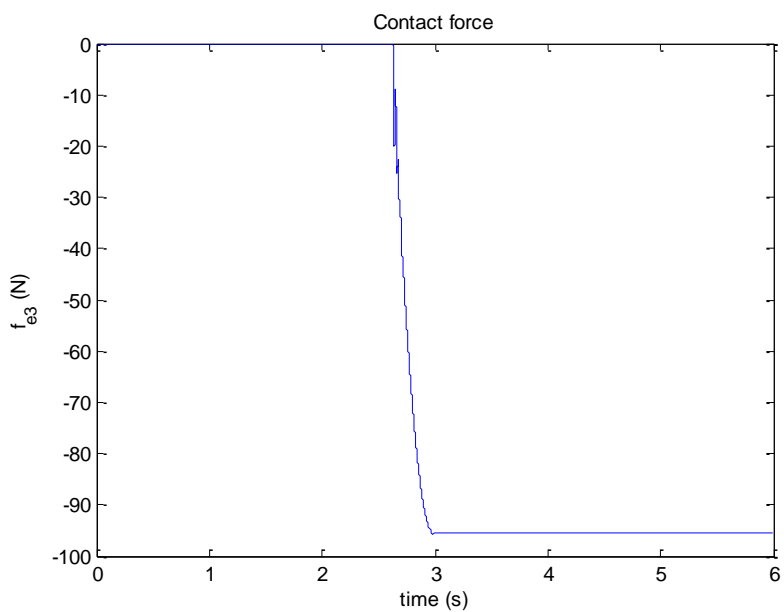
با توجه قانون کنترل (15-4)، مشخص است که سیگنال کنترل مستقل از مدل ربات بوده و تنها به x و q نیاز دارد که این امر بیش از پیش به برتری روش کنترل ولتاژ، نسبت به راهبرد کنترل گشتاور صحنه می‌گذارد.

۴-۳-۱- شبیه‌سازی

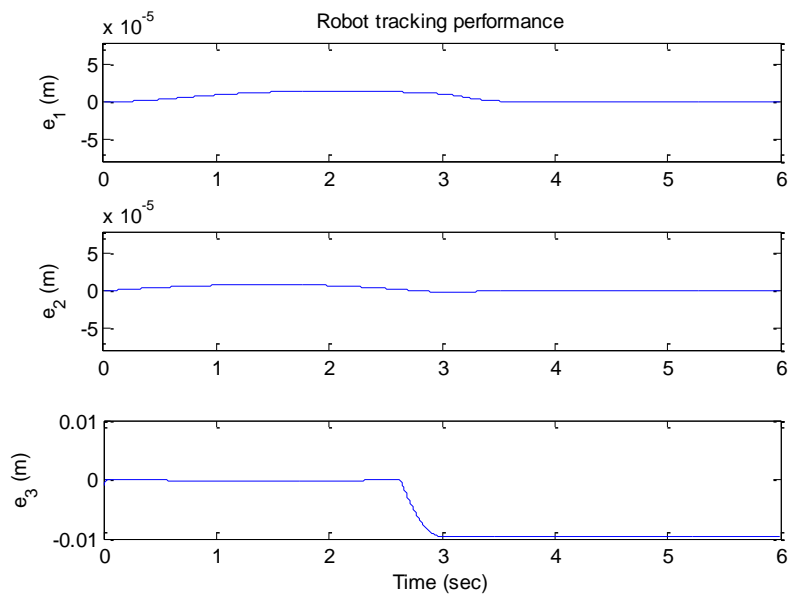
در شبیه‌سازی قانون کنترل (16-4) ماتریس‌های M_R ، B_R و K_R به ترتیب بصورت $M_R = 0$ ،
 $K_R = \begin{bmatrix} 900 & 0 & 0 \\ 0 & 900 & 0 \\ 0 & 0 & 12600 \end{bmatrix}$ و $B_R = \begin{bmatrix} 200 & 0 & 0 \\ 0 & 200 & 0 \\ 0 & 0 & 170 \end{bmatrix}$ در نظر گرفته می‌شوند. و مسیر مطلوب نیز بصورت رابطه (10-4) در نظر گرفته شده است. ولتاژ اعمالی به موتورها، نیروی تماسی و خطای ردیابی به ترتیب در شکل‌های (4-5)، (4-6) و (4-7) نمایش داده شده‌اند.



شکل ۴-۵ ولتاژ اعمالی به مفاصل ربات



شکل ۴-۶ نیروی تماسی ناشی از تعامل دینامیکی ربات با محیط



شکل ۷-۴ ردیابی ربات از مسیر مطلوب

۴۴ جمع‌بندی

در این فصل ابتدا روش کنترل امپدانس به روش خطی‌سازی پس‌خورد و با هر دو راهبرد کنترل گشتاور و کنترل ولتاژ، تشریح گردید و سپس قوانین کنترل بر روی ربات اسکارا با فرضیات و مشخصات ارائه شده در فصل دوم پیاده‌سازی شد. در فصل بعد روش کنترل پیشنهادی جهت کنترل امپدانس بازوی ربات به همراه پیاده‌سازی و ارزیابی و مقایسه نتایج، ارائه می‌گردد.

فصل پنجم روش پیشنهادی

مقاوم بودن یکی از اساسی‌ترین موضوعات طراحی در یک سیستم کنترلی است، زیرا سیستم‌های کنترلی در عمل علاوه بر آنکه در معرض اغتشاش‌های خارجی و خطاهای اندازه‌گیری هستند، بر اساس مدل‌های ریاضی طراحی می‌شوند، که با سیستم واقعی اختلاف دارند. عموماً یک مهندس کنترل باید کنترل‌کننده‌ای طراحی نماید که ضمن پایدارسازی سیستم، سطحی از کارایی را در حضور اغتشاش، تداخلات و دینامیک‌های مدل نشده و تغییرات پارامترهای سیستم فراهم آورد.

برای تحقق این اهداف در این پایان‌نامه، کنترل‌کننده تطبیقی مقاوم مدل مرجع^{۱۱} جهت تطبیق پارامترهای مدل امپدانس ربات به پارامترهای امپدانس مطلوب و همین‌طور غلبه بر عدم قطعیت‌های پارامتری و دینامیک‌های مدل نشده و اغتشاشات خارجی، پیشنهاد می‌شود. با این توضیح که برای استخراج قوانین تطبیق از روش لیاپانوف، که پایداری تضمینی دارد، استفاده شده است. مساله اصلی در کنترل تطبیقی مدل مرجع این است که باید اختلاف بین خروجی/حالت‌های مدل مرجع با خروجی/حالت‌های مدل واقعی تا حد ممکن و تا میزانی که اهداف طراحی برآورده شود، کوچک شود. از طرفی راهبرد کنترل ولتاژ به دلیل سادگی و مستقل از مدل بودن، در تحقیقات امروزه بسیار مورد توجه بوده است. چالش اساسی در راهبرد کنترل ولتاژ، مدل کردن گشتاور بار بصورت اغتشاش خارجی و غلبه بر آن جهت دستیابی به یک مشخصه خطی برای کنترل است. و در ادامه نیز روش پیشنهادی بر روی ربات اسکارا با مشخصات ارائه شده در فصل دوم شبیه‌سازی شده است. در پایان نیز نتایج با روش کنترل امپدانس ارائه شده در فصل چهارم مقایسه گردیده است.

۲۵ روش کنترل پیشنهادی

۵-۲-۱- مدل‌سازی

چنانچه در رابطه (۳-۴۴)، حاصل جمع $L\dot{I}_a$ و $\varphi(t)$ ، به عنوان عدم قطعیت مجتمع در نظر گرفته شود، جریان موتورها می‌تواند توسط رابطه (۵-۱) بدست آید.

$$I_a = R^{-1}(v - k_b \dot{\theta}_m - \zeta) \quad (۱-۵)$$

بطوریکه ζ بصورت رابطه (۳-۴۷) تعریف می‌شود. با جایگذاری روابط (۲-۴۰)، (۵-۱) و (۲-۳۹) در رابطه (۲-۳۶) و استفاده از روابط (۲-۲۷)، (۲-۲۸) و (۲-۳۷)، معادله دینامیک حرکت ربات می‌تواند بصورت رابطه (۵-۲) نوشته شود.

$$D_x \ddot{x} + C_x \dot{x} + G_x + F_{e_x} = v - \zeta \quad (۲-۵)$$

^{۱۱} Model Reference Robust Adaptive Control

بطوریکه در رابطه (۲-۵)، ماتریس های D_x ، C_x ، G_x و F_{ex} توسط روابط (۳-۵) تا (۶-۵) تعریف می شوند.

$$D_x = Rk_m^{-1}(j_m r^{-1} + rD(q))J^{-1} \quad (۳-۵)$$

$$C_x = Rk_m^{-1}(B_m r^{-1} + rC(q, \dot{q}) + k_m R^{-1} k_b r^{-1} - (j_m r^{-1} + rD(q))J^{-1} j)J^{-1} \quad (۴-۵)$$

$$G_x = Rk_m^{-1} rG(q) \quad (۵-۵)$$

$$F_{ex} = Rk_m^{-1} rJ^T F_e \quad (۶-۵)$$

خاصیت ۱-۵: ماتریس $\dot{D}(q) - 2C(q, \dot{q})$ یک ماتریس پادمتقارن است. این خاصیت به راحتی با استفاده از معادله حرکت ربات و رابطه (۷-۵) قابل اثبات است. [۶].

$$y^T \dot{D}(q)y = 2y^T C(q, \dot{q})y, \quad \forall y, q, \dot{q} \in R^n \quad (۷-۵)$$

ماتریس های $D(q)$ و $C(q, \dot{q})$ در رابطه (۲-۴۰) تعریف شده اند. خاصیت ۲-۵: معادله دینامیکی ربات می تواند بصورت حاصلضرب یک ماتریس معلوم از توابع و یک بردار ثابت از پارامترها نظیر رابطه (۵-۸) تجزیه شود.

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = Y(q, \dot{q}, \ddot{q})P \quad (۸-۵)$$

که در آن $Y(q, \dot{q}, \ddot{q})$ یک ماتریس $n \times l$ از توابع معلوم و P یک بردار l عضوی از پارامترها می باشد. [۶].

خاصیت ۳-۵: خاصیت پادمتقارن بودن برای ماتریس $\dot{\bar{D}}(x) - 2\bar{C}(x)$ نیز برقرار است. بطوریکه ماتریس های $\bar{D}(x)$ و $\bar{C}(x)$ در معادله حرکت ربات در فضای کار با رابطه (۲-۳۰) تعریف می شوند. [۶].

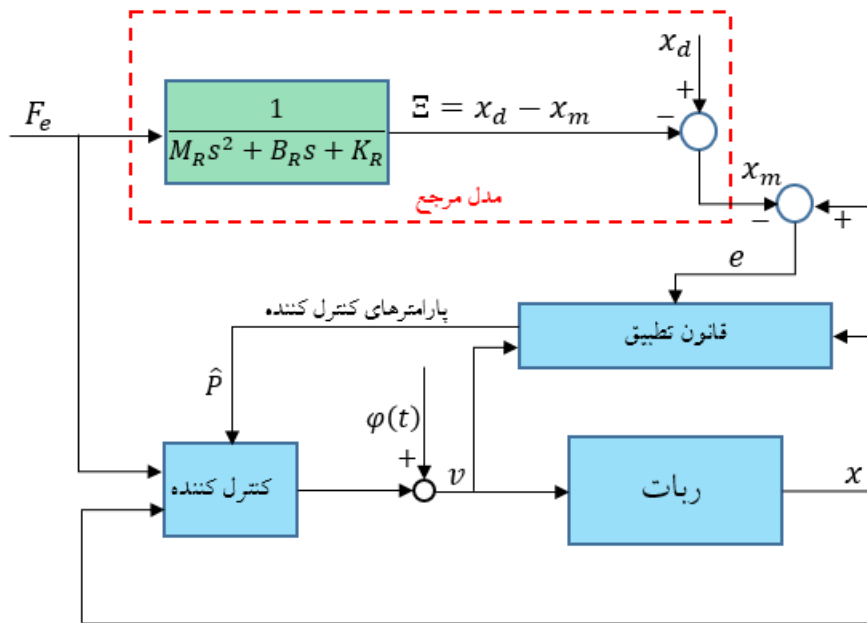
خاصیت ۴-۵: معادله حرکت ربات در فضای کار با رابطه (۲-۳۰) نیز می تواند بصورت خطی پارامتری شود و بصورت حاصلضرب یک ماتریس معلوم از توابع و یک بردار ثابت از پارامترها نظیر رابطه (۵-۹) تجزیه شود.

$$\bar{D}(x)\ddot{x} + \bar{C}(x, \dot{x})\dot{x} + \bar{G}(x) = \bar{Y}(x, \dot{x}, \ddot{x})\bar{P} \quad (۹-۵)$$

که در آن $\bar{Y}(q, \dot{q}, \ddot{q})$ یک ماتریس $n \times l$ از توابع معلوم و \bar{P} یک بردار l عضوی از پارامترها می باشد. [۶].

۵-۲-۲- کنترل امپدانس تطبیقی مقاوم مدل مرجع بازوی رباتیک

در این پایان نامه رفتار دینامیکی مطلوب ربات در تعامل با محیط، به عنوان یک مدل مرجع در نظر گرفته شده است. مدل مرجع نسبت به سیگنال ورودی مرجع خود پاسخی مطلوب نشان می‌دهد. نیروی تماس بین ربات و محیط به عنوان سیگنال مرجع و یا ورودی سیستم در نظر گرفته شده است. بلوک دیاگرام طرح کنترلی، در شکل (۵-۱) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۵-۱) مشخص است که سیستم دو حلقه کنترلی دارد. حلقه داخلی که یک حلقه پسخورد معمولی است، از کنترل کننده ربات تشکیل شده است و حلقه پسخورد خارجی که پارامترهای کنترل کننده را تنظیم می‌کند، حلقه دوم را تشکیل می‌دهد. پارامترهای کنترل کننده با استفاده از سیگنال پسخورد خطای امپدانس تنظیم می‌شوند. خطای امپدانس به اختلاف بین خروجی مدل مرجع و خروجی ربات اطلاق می‌شود. هدف نهایی در سیستم تطبیقی مدل مرجع این است که این اختلاف به صفر کاهش داده شود. در این پایان نامه از روش لیاپانوف برای تضمین همگرایی خطای امپدانس به صفر استفاده شده است.



شکل ۵-۱ بلوک دیاگرام کنترل امپدانس پیشنهادی

رفتار دینامیکی مطلوب ربات در تعامل با محیط (امپدانس مطلوب) توسط رابطه (۵-۱۰) داده می‌شود.

$$(M_R s^2 + B_R s + K_R) \Xi = F_e \quad (۵-۱۰)$$

بطوریکه Ξ خطای ردیابی مدل مرجع است و بصورت رابطه (۵-۱۱) و مشتق آن بصورت رابطه (۵-۱۲) تعریف می‌شود.

$$\Xi = x_d - x_m \quad (۵-۱۱)$$

$$\dot{E} = \dot{x}_d - \dot{x}_m \quad (12-5)$$

که x_d و x_m در رابطه (11-5)، بردارهای m بعدی هستند و به ترتیب خروجی مدل مرجع و مسیر مطلوب ربات در فضای کار نامیده می‌شوند. و M_R ، B_R و K_R ماتریس‌های قطری‌اند و دارای ابعاد $n \times n$ می‌باشند و به ترتیب ماتریس‌های اینرسی، میرایی و سختی مدل مرجع نامیده می‌شوند. خطای امپدانس که از تفاضل خروجی مدل مرجع و خروجی ربات در فضای مفاصل بدست می‌آید، بصورت رابطه (13-5) تعریف می‌شود.

$$e = x - x_m \quad (13-5)$$

مشتق اول و دوم از رابطه (13-5) بصورت روابط (14-5) و (15-5) تعریف می‌شوند.

$$\dot{e} = \dot{x} - \dot{x}_m \quad (14-5)$$

$$\ddot{e} = \ddot{x} - \ddot{x}_m \quad (15-5)$$

اکنون سطح لغزش S و مشتق آن را بصورت روابط (16-5) و (17-5) تعریف می‌شوند.

$$S = \dot{e} + k_p e \quad (16-5)$$

$$\dot{S} = \ddot{e} + k_p \dot{e} \quad (17-5)$$

تابع مثبت و معین و اسکالر V به عنوان تابع منتخب لیاپانوف در نظر گرفته می‌شود.

$$V = \frac{1}{2} s^T D_x s + \frac{1}{2} \tilde{p}^T \Gamma^{-1} \tilde{p} \quad (18-5)$$

که \tilde{p} در رابطه (18-5)، خطای تخمین پارامتر است و بصورت رابطه (19-5) تعریف می‌شود.

$$\tilde{p} = \hat{p} - p \quad (19-5)$$

که \hat{p} برداری متغیر با زمان است و در واقع تخمینی از بردار نامی p می‌باشد.

با مشتق گرفتن از رابطه (18-5) و استفاده از روابط (2-5)، (16-5)، (17-5) و (19-5)، رابطه (20-5) نتیجه گرفته می‌شود.

$$\dot{V} = \frac{1}{2} s^T (\dot{D}_x - 2C_x) s + s^T [v - \zeta - C_x(\dot{x}_m - k_p e) - G_x - F_{ex} - D_x(\dot{x}_m - k_p \dot{e})] + \dot{\tilde{p}}^T \Gamma^{-1} \tilde{p} \quad (20-5)$$

اکنون \dot{x}_r و \ddot{x}_r بصورت روابط (21-5) و (22-5) تعریف می‌شوند.

$$\dot{x}_r = \dot{x}_m - k_p e \quad (21-5)$$

$$\ddot{x}_r = \ddot{x}_m - k_p \dot{e} \quad (22-5)$$

با جایگذاری روابط (21-5) و (22-5) در (20-5)، رابطه (23-5) را می‌توان نتیجه گرفت.

$$\dot{V} = \frac{1}{2} s^T (\dot{D}_x - 2C_x) s + s^T [v - \zeta - C_x \dot{x}_r - G_x - F_{ex} - D_x \ddot{x}_r] + \dot{p}^T \Gamma^{-1} \tilde{p} \quad (23-5)$$

با استفاده از خاصیت (۴-۵) می‌توان رابطه (۲۴-۵) را نتیجه گرفت.

$$D_x \ddot{x}_r + C_x \dot{x}_r + G_x + F_{ex} = Y^T(x, \dot{x}, \dot{x}_r, \ddot{x}_r, F_e) P \quad (24-5)$$

با جایگذاری رابطه (۲۴-۵) در رابطه (۲۳-۵) و استفاده از خاصیت (۳-۵)، رابطه (۲۵-۵) بدست می‌آید.

$$\dot{V} = s^T [v - \zeta - Y^T(x, \dot{x}, \dot{x}_r, \ddot{x}_r, F_e) P] + \dot{p}^T \Gamma^{-1} \tilde{p} \quad (25-5)$$

اکنون، قانون کنترل بصورت رابطه (۲۶-۵) پیشنهاد داده می‌شود.

$$v = \hat{D}_x \ddot{x}_r + \hat{C}_x \dot{x}_r + \hat{G}_x + \hat{F}_{ex} - u_r - k_d s \quad (26-5)$$

بطوریکه ماتریس‌های \hat{D}_x ، \hat{C}_x ، \hat{G}_x و \hat{F}_{ex} به ترتیب از جایگذاری بردار \hat{P} به جای P در ماتریس‌های D_x ، C_x ، G_x و F_{ex} بدست می‌آیند.

با استفاده از خاصیت (۴-۵)، می‌توان قانون کنترل (۲۶-۵) را بصورت رابطه (۲۷-۵) بازنویسی نمود.

$$v = Y^T(x, \dot{x}, \dot{x}_r, \ddot{x}_r, F_e) \hat{p} - u_r - k_d s \quad (27-5)$$

بطوریکه u_r در رابطه (۲۷-۵)، یک کنترل مقاوم است که این قانون بصورت رابطه (۲۸-۵) تعریف می‌شود.

$$u_r = -\hat{\zeta} \quad (28-5)$$

از آنجایی که ζ نامعلوم است مقدار تقریبی و تخمینی آن در هر لحظه با استفاده از روش ارائه شده در [۳۴]، بصورت رابطه (۲۹-۵) پیشنهاد داده می‌شود.

$$\hat{\zeta} = v(t - \varepsilon) - \hat{R} I_a(t) - \hat{K}_b r^{-1} \dot{q}(t) \quad (29-5)$$

که \hat{R} و \hat{K}_b مقادیر نامی از پارامترهای واقعی R و K_b می‌باشند.

با جایگذاری رابطه (۲۹-۵) در رابطه (۲۸-۵) و استفاده از رابطه (۲۷-۵) می توان قانون کنترل را بصورت رابطه (۳۰-۵) نوشت.

$$v = Y^T(x, \dot{x}, \dot{x}_r, \ddot{x}_r, F_e) \hat{p} - v(t - \varepsilon) + \hat{R}I_a + \hat{K}_b r^{-1} \dot{q} - k_d S \quad (۳۰-۵)$$

با جایگذاری رابطه (۳۰-۵) در رابطه (۲۵-۵)، می توان قانون تطبیق را بصورت رابطه (۳۱-۵) استخراج نمود.

$$\dot{P} = -\Gamma Y(x, \dot{x}, \dot{x}_r, \ddot{x}_r, F_e) S \quad (۳۱-۵)$$

عموماً، محاسبه و پیاده سازی معادلات حرکت ربات در فضای کار پیچیدگی های بسیاری دارد که برای رفع این مشکل، بهتر است معادلات را به فضای مفصلی تبدیل نمود. توابع تبدیل از فضای کار به فضای مفاصل بصورت روابط (۳۲-۵) و (۳۳-۵) تعریف می شوند.

$$\dot{q}_r = J^{-1} \dot{x}_r \quad (۳۲-۵)$$

$$\ddot{q}_r = J^{-1} (\ddot{x}_r - \dot{J} J^{-1} \dot{x}_r) \quad (۳۳-۵)$$

با استفاده از تبدیلات (۳۲-۵) و (۳۳-۵)، قانون کنترل و قانون تطبیق به ترتیب بصورت روابط (۳۴-۵) و (۳۵-۵) نوشته می شوند.

$$v(t) = Y^T(q, \dot{q}, \dot{q}_r, \ddot{q}_r, F_e) \hat{p} - v(t - \varepsilon) + \hat{R}I_a + \hat{K}_b r^{-1} \dot{q} - k_d J (\dot{q} - \dot{q}_r) \quad (۳۴-۵)$$

$$\dot{p} = -\Gamma Y(q, \dot{q}, \dot{q}_r, \ddot{q}_r, F_e) (\dot{q} - \dot{q}_r) \quad (۳۵-۵)$$

۳ ۵ اثبات پایداری سیستم

با اعمال قانون کنترل مقاوم u_r بصورت رابطه (۲۸-۵) و قانون تطبیق (۳۱-۵)، رابطه (۲۵-۵) بصورت رابطه (۳۶-۵) خلاصه می شود.

$$\dot{V} = S^T (-K_d S + \hat{\zeta} - \zeta) \quad (۳۶-۵)$$

در رابطه (۳۶-۵)، حاصل $\hat{\zeta} - \zeta$ بصورت رابطه (۳۷-۵) در نظر گرفته می شود.

$$\gamma = \hat{\zeta} - \zeta \quad (۳۷-۵)$$

با جایگذاری رابطه (۳۷-۵) در رابطه (۳۶-۵)، رابطه (۳۸-۵) حاصل می شود.

$$\dot{V} = -S^T K_d S + S^T \gamma \quad (۳۸-۵)$$

برای پیشنهاد شرط کافی برای منفی نیمه معین شدن رابطه (۳۸-۵)، ابتدا لازم است که محدود بودن γ اثبات شود. با استفاده از روابط (۳۷-۵)، (۳-۳)، (۴۹-۳) و (۵۰-۳)، γ بصورت رابطه (۳۹-۵) محاسبه می‌گردد.

$$\gamma = v(t - \varepsilon) - v(t) + RI_a(t) - \hat{R}I_a(t) + K_b \dot{\theta}_m(t) - \hat{K}_b \dot{\theta}_m(t) \quad (39-5)$$

اگر طرفین رابطه (۳-۴۴) در I_a ضرب شود و از آن انتگرال گرفته شود، رابطه (۵-۴۰) حاصل می‌شود.

$$\int_0^t (v - \varphi(t)) I_a dt = \int_0^t RI_a^2 dt + \int_0^t LI_a I_a dt + \int_0^t K_b \dot{\theta}_m I_a dt \quad (40-5)$$

از آنجایی که در رابطه (۵-۴۰)، دو انتگرال $\int_0^t LI_a I_a dt$ و $\int_0^t RI_a^2 dt$ مثبت می‌باشند، رابطه (۵-۴۱) نتیجه می‌شود.

$$\int_0^t K_b \dot{\theta}_m I_a dt \leq \int_0^t (v - \varphi(t)) I_a dt \quad (41-5)$$

با استفاده از رابطه (۵-۴۱) و همینطور روابط (۳-۴۵) و (۳-۵۱)، سرعت موتور بصورت رابطه (۵-۴۲) دارای یک حد بالا می‌باشد.

$$|\dot{\theta}_m| \leq (v_{max} + \varphi_{max})/K_b \quad (42-5)$$

از طرف دیگر اگر $w(t)$ بصورت رابطه (۵-۴۳) تعریف شود، رابطه (۳-۴۴) بصورت رابطه (۵-۴۴) نوشته می‌شود.

$$RI_a(t) + LI_a(t) = w(t) \quad (43-5)$$

$$w(t) = v(t) - K_b \dot{\theta}_m(t) - \varphi(t) \quad (44-5)$$

با استفاده از روابط (۳-۵۱)، (۵-۴۲) و (۳-۴۵)، چون $v(t)$ ، $\dot{\theta}_m(t)$ و $\varphi(t)$ همگی محدود می‌باشند، طبق رابطه (۵-۴۴)، $w(t)$ که خود بعنوان ورودی رابطه (۵-۴۳) تلقی می‌شود، محدود خواهد بود. از طرف دیگر طبق رابطه خطی مرتبه اول (۵-۴۳)، محدود بودن $w(t)$ با توجه به معیار روث هورویتز، محدود بودن I_a را نتیجه می‌دهد. با این توضیحات محدود بودن $w(t)$ و I_a طبق رابطه (۵-۴۳)، محدود بودن \dot{I}_a را باعث می‌شود.

محدود بودن $v(t)$ ، I_a ، $\dot{\theta}_m$ و $v(t - \varepsilon)$ ، محدود بودن γ را طبق رابطه (۵-۳۹) اثبات می‌کند. با توجه به رابطه (۵-۳۸)، شرط کافی برای منفی نیمه معین شدن \dot{V} بصورت رابطه (۵-۴۵) ارائه می‌شود.

$$S^T \gamma \leq S^T K_d S \quad (45-5)$$

از طرف دیگر با توجه به مثبت معین بودن ماتریس K_d ، طرف راست رابطه (45-5) بصورت رابطه (46-5) محدود می‌باشد. بطوریکه که λ_{min} و λ_{max} به ترتیب کوچکترین و بزرگترین مقادیر ویژه ماتریس K_d می‌باشند.

$$\lambda_{min}(K_d) \|S\|^2 \leq S^T K_d S \leq \lambda_{max}(K_d) \|S\|^2 \quad (46-5)$$

با استفاده از رابطه (45-5) و (46-5)، رابطه (47-5) بعنوان یک شرط کافی برای منفی نیمه معین شدن \dot{V} بدست می‌آید.

$$\frac{|\gamma|}{\lambda_{min}(K_d)} \leq \|S\| \quad (47-5)$$

برقراری شرط (47-5) تضمین می‌کند که سطح لغزش در سطح توپی به شعاع $\frac{|\gamma|}{\lambda_{min}(K_d)}$ جای گیرد و این امر رابطه (48-5) را نتیجه می‌دهد.

$$\frac{|\gamma|}{\lambda_{min}(K_d)} \leq \|S\| \leq S(0) \quad (48-5)$$

بطوریکه $S(0)$ در رابطه (48-5)، مقدار اولیه سطح لغزش است. با توجه به رابطه (48-5) محدود بودن S اثبات می‌شود. از سوی دیگر ماتریس‌های M_R ، B_R و K_R به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که چند جمله‌ای (5-10) هورویتر باشد، این امر محدود بودن \dot{e} و \ddot{e} را نتیجه می‌دهد. محدود بودن \dot{e} ، \ddot{e} و \dot{x}_d و x_d محدود بودن x_m و \dot{x}_m را طبق روابط (5-11) و (5-12) نتیجه می‌دهد. محدود بودن S با توجه به رابطه (5-16) و همینطور محدود بودن x_m و \dot{x}_m ، محدود بودن x و \dot{x} را اثبات می‌کند. با این توضیحات چنانچه ماتریس ژاکوبین شامل نقاط تکین نباشد و معکوس آن همواره موجود باشد، طبق رابطه (2-27)، محدود بودن x و \dot{x} ، محدود بودن q و \dot{q} را نتیجه می‌دهد. از طرف دیگر محدود بودن e ، \dot{e} ، x_m و \dot{x}_m طبق روابط (5-21) و (5-22)، محدود بودن \dot{x}_r و \ddot{x}_r را اثبات می‌کند.

با توجه فرض محدود بودن نیروی تماسی F_e ، ماتریس رگر سور $Y^T(x, \dot{x}, \ddot{x}_r, \ddot{x}_r, f_e)$ بدلیل محدود بودن x ، \dot{x} ، \ddot{x}_r و \ddot{x}_r ، محدود می‌باشد. با توجه به قانون کنترل (5-30)، چون s ، θ_m ، I_a و $v(t)$ و $Y^T(x, \dot{x}, \ddot{x}_r, \ddot{x}_r, f_e)$ محدود می‌باشند، بنابراین محدود بودن \hat{P} نیز اثبات می‌گردد.

با توجه به توضیحات داده شده و در نظر گرفتن مدل فضای حالت سیستم با رابطه (2-41)، ثابت شد که به ازای محدود بودن بردار ورودی‌ها $w^T = [F_e \quad v]$ ، بردار متغیرهای حالت $z^T = [q, \dot{q}, I_a]$ محدود می‌باشند. بنابراین پایداری سیستم از نوع ورودی محدود- خروجی محدود اثبات می‌شود.

۴۵ شبیه‌سازی روش پیشنهادی

طرح کنترل پیشنهاد شده در این پایان‌نامه بر روی یک ربات اسکارا شبیه‌سازی شده است. لازم به ذکر است که فقط سه مفصل اول ربات در نظر گرفته شده‌اند و مفصل چهارم قفل شده است. برای اطمینان از آسیب ندیدن موتورها، حداکثر ولتاژ مجاز هر موتور روی ۴۰ ولت تنظیم شده است. مسیر مطلوب ربات $x_d = [x_{d1} \ x_{d2} \ x_{d3}]^T$ در فضای کار بصورت رابطه (۴-۱۰) داده شده است. سطح تماس ربات و محیط بصورت هموار در نظر گرفته شده است. بنابراین می‌توان رابطه (۵-۴۹) را نتیجه گرفت.

$$\dot{x}_e = 0, \ddot{x}_e = 0 \quad (۴۹-۵)$$

با توجه به برقراری رابطه (۵-۴۹)، امیدانس محیط بصورت رابطه (۵-۵۰) مدل می‌شود.

$$K_e(x_m - x_e) = F_e \quad (۵۰-۵)$$

بطوریکه بردار تعادل و ماتریس سختی محیط بصورت $x_e = [1 \ 1 \ -0.29]^T m$

$$K_e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 150000 \end{bmatrix} \frac{N \cdot s^2}{m}$$

در نظر گرفته شده‌اند.

به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامتری بردار پارامترها \hat{P} ، ۹۰٪ مقدار نامی P در نظر گرفته شده است و به مقادیر نامی \hat{K}_b و \hat{R} به ترتیب ۸۰٪ و ۹۰٪ مقادیر واقعی خود اختصاص داده شده است. نرخ آموزش نیز بصورت $\Gamma = \text{diag}(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$ با مقادیر $\gamma_1 = 100I_{18}$ ، $\gamma_2 = 20000I_{18}$ و $\gamma_3 = 0.1I_3$ در نظر گرفته شده است.

$$B_R = 1000I_3, M_R = \begin{bmatrix} 0.6 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6 & 0 \\ 0 & 0 & 5 \end{bmatrix}$$

ماتریس‌های K_R و B_R ، M_R نیز بصورت

$$K_R = \begin{bmatrix} 50000 & 0 & 0 \\ 0 & 50000 & 0 \\ 0 & 0 & 875 \end{bmatrix}$$

و ماتریس‌های K_D و K_P نیز بصورت

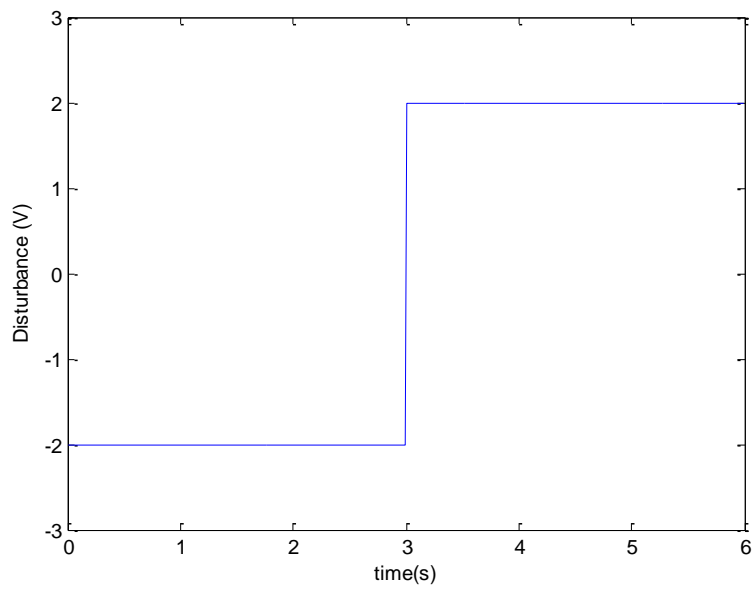
$$K_D = 0.16I_3 \text{ و } K_P = \begin{bmatrix} 800 & 0 & 0 \\ 0 & 800 & 0 \\ 0 & 0 & 350 \end{bmatrix}$$

در شبیه‌سازی لحاظ شده‌اند. مقاومت آرمیچر بصورت

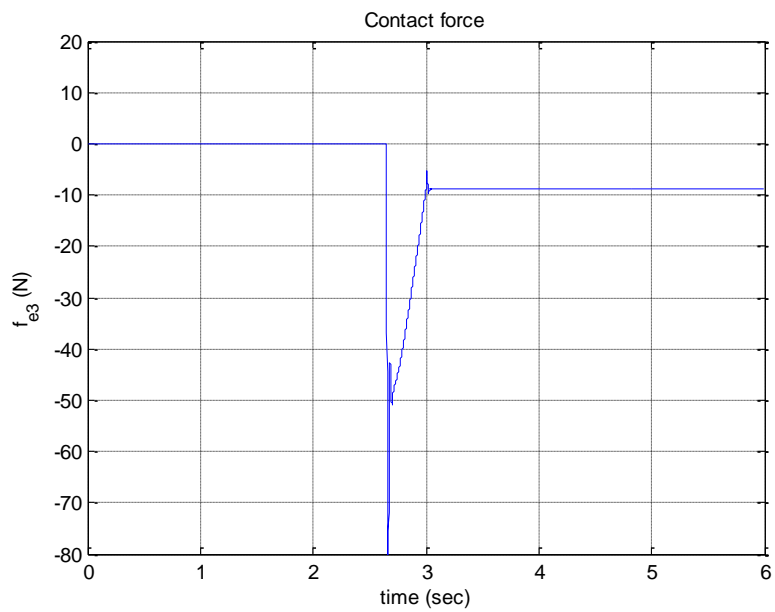
$$R = [2 \ 2 \ 0.7]$$

در نظر گرفته شده است و مقدار تاخیر زمانی نیز به میزان $\varepsilon = 0.01$ ثانیه در

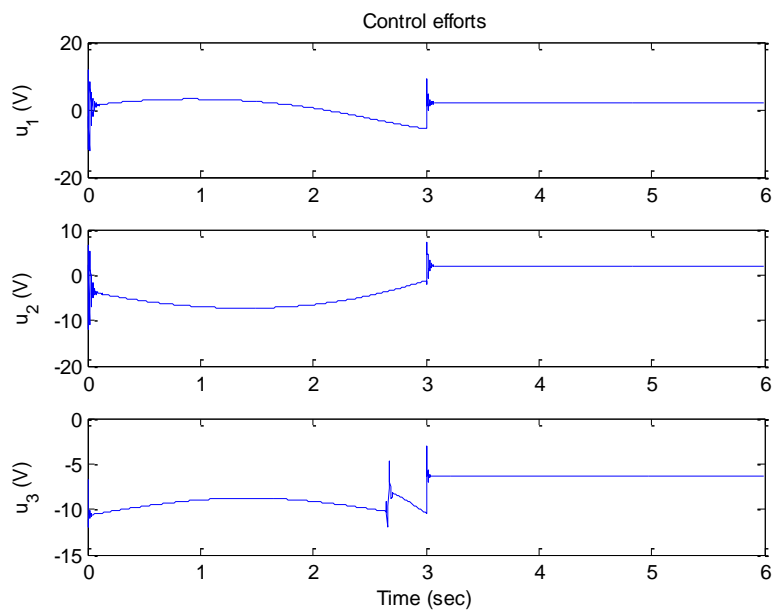
نظر گرفته شده است. اغتشاش خارجی بصورت یک سیگنال مربعی با دوره تناوب ۳ ثانیه و دامنه ۲ ولت به سیستم اعمال شده است.



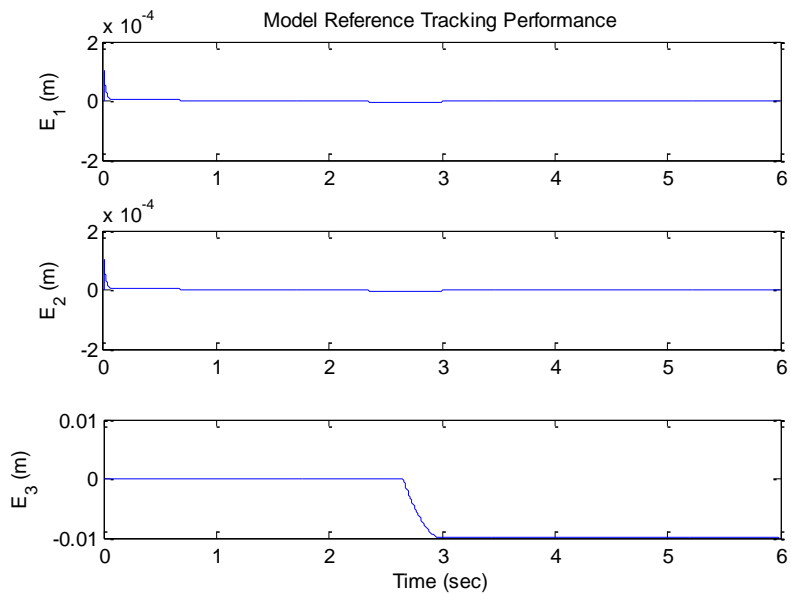
شکل ۲-۵ اغتشاش اعمالی به موتورها



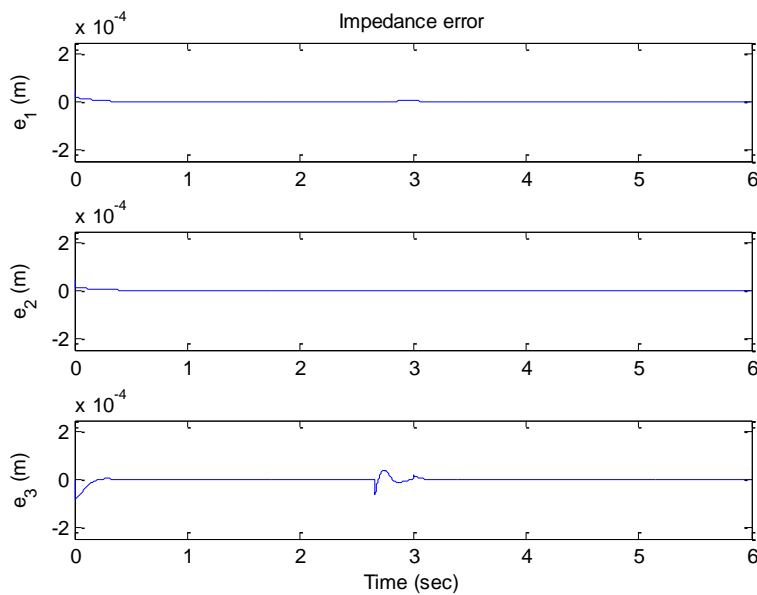
شکل ۳-۵ نیروی تماسی ناشی از تعامل دینامیکی ربات با محیط



شکل ۴-۵ ولتاژ اعمالی به مفاصل ربات



شکل ۵-۵ ردیابی مدل مرجع از مسیر مطلوب



شکل ۵-۶ خطای ردیابی ربات از خروجی مدل مرجع (خطای امپدانس)

۵ تحلیل، ارزیابی و مقایسه نتایج

نیروی حاصل از تعامل و برخورد ربات با محیط برای مفصل کشویی ربات اسکارا در شکل (۳-۵) نمایش داده شده است. با توجه به این شکل مشخص است که برخورد در لحظه $2/64$ ثانیه اتفاق افتاده و پس از برخورد نیروی حاصل از تماس به مقدار محدود $8/72$ نیوتن تقلیل یافته و برای زمان‌های بعدی در این سطح، بدون تغییر باقی مانده است.

شکل (۵-۵) خطای ردیابی مدل مرجع از مسیر مطلوب و از قبل تعیین شده x_d می‌باشد. انحراف از مسیر مطلوب در لحظه برخورد توسط مدل مرجع به خوبی در خطای ردیابی سوم برای کاهش نیروی تماسی دیده می‌شود. خطای ردیابی ربات از خروجی مدل مرجع (خطای امپدانس) در شکل (۶-۵) نشان داده شده است. با توجه به این خطا نیز مشخص است که برخورد در لحظه $2/64$ ثانیه اتفاق افتاده و ربات پس از برخورد به خوبی توانسته خطای امپدانس را در زمان کوتاه و در حد بسیار مطلوبی کاهش دهد. از طرفی با توجه به شکل (۲-۵) مشاهده می‌شود که دامنه اغتشاش اعمالی به سیستم در لحظه 3 ثانیه از مقدار -2 بصورت ناگهانی به مقدار $+2$ افزایش یافته است. با توجه به شکل (۴-۵) و شکل (۶-۵) مشخص است که سیستم کنترل به خوبی اثر اغتشاش اعمالی را دفع نموده است. از طرفی با توجه به شکل ۴-۵ ولتاژ اعمالی به موتورها در محدوده قابل قبول قرار دارند و سیگنال تلاش کنترلی بدون لرزش بوده و قابل اعمال به موتورها جهت کنترل ربات می‌باشد.

قانون کنترل پیشنهادی، نسبت به قانون کنترل امپدانس با راهبرد کنترل گشتاور، دارای این مزیت است که از راهبرد کنترل ولتاژ استفاده کرده و بنابراین قانون کنترل مستقیماً قابل اعمال به مفاصل ربات است، از طرف دیگر قانون کنترل (۴-۹) یک قانون کنترل به روش خطی‌سازی پس‌خورد

ارائه داده که در آن معین بودن مقادیر دقیق ماتریس‌های اینرسی و بردارهای کوریولیس و گرانش برای از بین رفتن قسمت‌های غیرخطی، الزامی است. این در حالی است که در اکثر سیستم‌های واقعی، این مقادیر نه تنها مشخص نیستند بلکه پیوسته در حال تغییر نیز هستند. بنابراین قانون کنترل امپدانس به روش خطی‌سازی پس‌خورد و راهبرد کنترل گشتاور، در مقابل نامعینی‌هایی نظیر عدم قطعیت‌های پارامتری و غیر ساختاری نظیر اغتشاش‌ها و دینامیک‌های مدل نشده مقاوم نبوده و نمی‌تواند پایداری سیستم را تضمین نماید. روش کنترل پیشنهادی می‌تواند تعمیم مناسبی از روش سودمند کنترل امپدانس با راهبرد کنترل ولتاژ برای سیستم‌هایی که دارای عدم قطعیت هستند و با راهبرد کنترل ولتاژ، رفتار دینامیکی ربات را کنترل می‌نمایند، تلقی شود. در طرح پیشنهادی از روش پایداری لیاپانوف که پایداری تضمینی دارد استفاده شده است. قانون کنترل پیشنهادی نیازی به محاسبه سیگنال مشتق جریان آرمیچر در قانون پس‌خورد ندارد، چرا که وجود این مشتق‌گیر ممکن در کنار پیچیدگی، سیستم را با مشکلاتی نظیر تقویت نویز روبرو کند. بنابراین طرح پیشنهادی برای پرهیز از محاسبه سیگنال مشتق جریان آرمیچر در قانون کنترل، حاصلضرب اندوکتانس در سیگنال مشتق جریان را بعنوان دینامیک مدل نشده در نظر گرفته است. از طرف دیگر، قانون کنترل پیشنهادی کنترل در فضای مفاصل ربات را ممکن می‌سازد، که پیاده‌سازی آن به مراتب از کنترل در فضای کار آسان‌تر است.

در این پایان‌نامه از روش کنترل تطبیقی مدل مرجع لیاپانوفی برای کنترل امپدانس بازوی ربات استفاده شده که پیش از این، از این نوع کنترل تطبیقی، برای بازوی ربات استفاده نشده است. در طرح پیشنهادی بدلیل استفاده از سیستم مدل مرجع، این امکان بوجود آمده که از نیروی تماسی به عنوان سیگنال مرجع استفاده شود، که در حالت کلی ممکن است غنی نباشد و هر شکلی به خود بگیرد.

۶۵ جمع‌بندی

در این فصل روش پیشنهادی کنترل امپدانس تطبیقی مقاوم مدل مرجع بازوی رباتیک با راهبرد کنترل ولتاژ جهت کنترل تعامل دینامیکی ربات با محیط و با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های ساختاری و غیر ساختاری ارائه گشت و در ادامه نیز نتایج بر روی ربات اسکارا با فرضیات و مشخصات ارائه شده در فصل دوم پیاده‌سازی شد. در پایان نیز به ارزیابی و مقایسه نتایج بدست آمده از روش پیشنهادی با روش کنترل امپدانس با راهبرد کنترل گشتاور پرداخته شد. در فصل بعد نتیجه‌گیری از تحقیق صورت گرفته و ارائه پیشنهادات ارائه خواهد شد.

فصل ششم نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه روش کنترل امیدانس تطبیقی مقاوم مدل مرجع با راهبرد کنترل ولتاژ برای نخستین بار برای بازوی رباتیک ارائه شد، بطوریکه روش ارائه شده در مقابل عدم قطعیت ساختاری و عدم قطعیت‌های غیر ساختاری نظیر دینامیک‌های مدل‌نشده و اغتشاش‌های خارجی مقاوم بوده و عملکرد مناسبی را برای بازوی ربات در تعامل با محیط سبب می‌شود. با اعمال این قانون کنترل، سیستم ربات با وجود نامعینی‌ها به خوبی پارامترهای کنترل‌کننده را جهت ردیابی خروجی مدل مرجع، تنظیم نمود. در طراحی سیستم تطبیقی مدل مرجع از سیگنال نیروی تماسی به عنوان سیگنال مرجع استفاده شده است.

۶ پیشنهادات

پیشنهاد می‌شود که ماتریس رگرسیون ربات توسط یک سیستم فازی تخمین زده شود و در مدل امیدانس نیز از مدل امیدانس تعمیم‌یافته، به عنوان مدل مرجع برای کنترل دقیق نیرو، استفاده گردد.

مراجع

- [1] Raibert M.H. and Craig J.J. (1981) "Hybrid position and force control of robot manipulators", *J. Dyn. Syst. Meas. Control* **102**, pp. 126–133.
- [2] Khatib O. (1987) "A unified approach for motion and force control of robot manipulators: the operation-space formulation", *IEEE Trans. Robot. Autom.* **3(1)**, pp. 43–53.
- [3] Hogan N. (1985) "Impedance control: an approach to manipulator", **Parts I, II, III. J. Dyn. Syst. Meas. Control** **3**, pp. 1–24.
- [4] Slotine J.J.E. and Li W. (1987) "Adaptive strategies in constrained manipulation", *IEEE J. Robot. Autom.* **4**, no., pp. 595–601.
- [5] Haifa M. and Olfa B. (2012) "Robust Tracking Control for Constrained Robots", *Procedia Engineering* **41**, pp. 1292 – 1297.
- [6] Spong M. W. and Vidyasagar M. (1989) "**Robot Dynamics and control**", Wiley, New York.
- [7] Craig J. J. (1989) "**Introduction to Robotics**", second ed., Addison-Wisley, Reading.
- [8] Li J., Liu L., Wang Y. and Liang W. (2015) "Adaptive hybrid impedance control of robot manipulators with robustness against environment's uncertainties", *IEEE J. Robot. Autom.*, pp. 1846–1851.
- [9] Colgate J.E. and Hogan N. (1988) "Robust control of dynamically interacting systems", *Int. J. Control* **48(1)**, pp. 65–88.
- [10] Colbaugh R., Seraji H. and Glass K. (1993) "Direct adaptive impedance control of robot manipulators", *J. Robot. Syst.* **10**, pp. 217–248.
- [11] 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(1)**, pp. 133–144.
- [12] Kazerooni H., Sheridan T. B. and Houpt P. K. (1986) "Robust compliant motion for manipulators", **Part 2: Design method. IEEE J. Robot. Autom.** **2(2)**, pp. 93–105.
- [13] Kazerooni H., Sheridan T. B. and Houpt P. K. (1986) "Robust compliant motion for manipulators", **Part 1: The fundamental concepts of compliant motion. IEEE J. Robot. Autom.** **2(2)**, pp. 83–92.
- [14] Chan S. P., Yao B., Gao W. B. and Cheng M. (1991) "Robust impedance control of robot manipulator", *Int. J. Robot. Autom.* **6(4)**, pp. 220–227.
- [15] Fateh M. M. (2008) "On the voltage-based control of robot manipulators", *Int. J. Control. Autom.* **6(5)**, pp. 702–712.
- [16] Fateh M. M. and Khorashadizadeh S. (2012) "Optimal robust voltage control of electrically driven robot manipulators", *Nonlinear Dyn.* **70(2)**, pp. 1445–1458.
- [17] Fateh M. M. and Fateh S. (2012) "Decentralized direct adaptive fuzzy control of robots using voltage control strategy", *Nonlinear Dyn.* **70**, pp. 1919–1930.
- [18] Fateh M. M. and Khorashadizadeh S. (2012) "Robust control of electrically driven robots by adaptive fuzzy estimation of uncertainty", *Nonlinear Dyn.* **69(3)**, pp. 1465–1477.

- [19] Fateh M. M. (2010) “Robust fuzzy control of electrical manipulators”, **J. Intell. Robot. Syst**, **60(3–4)**, pp. 415–434.
- [20] Fateh M. M. and Babaghasabha R. (2013) “Impedance control of robots using voltage control strategy”, **Nonlinear Dyn**, **Vol. 74**, pp. 277–286.
- [21] Doyle J., Francis B. and Tannenbaum A. (1990) “**Feedback Control Theory**”, Macmillan Publishing.
- [22] Fateh M. M. and Arab A. A. (2015) “Robust control of a wheeled mobile robot by voltage control strategy”, **Nonlinear Dyn**, **VOL. 79**, pp. 335-348.
- [23] Stepanenko Y. and Su C. Y. (1993) “Variable structure control of robust manipulators with nonlinear sliding manifolds”, **Int. J. Control**, **Vol. 58**, pp. 285–300.
- [24] Chang Y. C. and Chen B. S. (1997) “A nonlinear adaptive H1 tracking control design in robotic systems via neural networks”, **IEEE Trans. Contr.Syst. Technol**, **Vol. 5**, pp. 13–29.
- [25] Barambones O. and Etxebarria V. (2002) “Robust neural control for robotic manipulators”, **Automatica**, **Vol. 38**, pp. 235–242.
- [26] Ge S. S., Hang C. C. and Woon L. C. (1997) “Adaptive neural network control of robot manipulators in task space”, **IEEE Trans. Ind. Electron**, **Vol. 44**, pp. 746–752.
- [27] Liu Z., Chen Ci., Zhang Y. and Chen C. L. Ph. (2015) “Coordinated fuzzy control of robotic arms with actuator nonlinearities and motion constraints”, **Information Sciences**, **Vol. 296**, pp. 1–13.
- [28] Jasim I. F., Plapper P. W. and Voos. H. (2015) “Adaptive sliding mode fuzzy control for unknown robots with arbitrarily-switched constraints”, **Mechatronics**, pp. 1-13.
- [29] Khalal O., Mellit A., Rahim M., Salhi H. and Guessoum A. (2007) “Robust Control of Manipulator Robot by using the Variable Structure Control with Sliding Mode”, **IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation**, pp. 9-15.
- [30] Slotine J. E. and Li W. (1991) “**Nonlinear Control, Prentice-Hall**”, Englewood Cliffs (NJ).
- [31] Niku S. B. (2001) “**Introduction to robotics: Analysis, systems, Applications**”, Prentice Hall.
- [32] Wang L. x. (1997) “**A Course in Fuzzy System and Control**”, Prentice-Hall, Englewood Cliffs (NJ).
- [33] Astrom K. J. and Wittenmark B. (1989) “**Adaptive Control**”, Addison-Wesley.
- [34] Fateh, M. M. (2012) “Robust control of flexible-joint robots using voltage control strategy”, **Nonlinear Dyn**, **Vol. 67**, pp. 1525–1537.
- [35] Anderson R. J. and Spong M. W. (1988) “Hybrid Impedance Control of Robotic Manipulators” **IEEE Journal of Robotics and Automation**, **Vol. 4, No. 5**, pp. 549-556.

Abstract:

In this thesis, the design of model reference robust adaptive impedance control of robot manipulator based on voltage control strategy for adaption the robot's impedance parameters to the parameters of the desired impedance model in the presence of parametric and non-parametric uncertainties is provided. The dynamical behavior of the robotic system in response to environment is defined as a reference model and the contact force between the robot and the environment is defined as the reference signal or the input signal. The system has two loops; the inner loop is an ordinary feedback loop which composed of the process and the controller and the outer loop that adjust the controller's parameters is the second feedback loop. The proposed control system is aimed to be robust against the parametric and non-parametric uncertainties such as external disturbance and un-model dynamic. Robot can track the reference model perfectly in the face of this kind of uncertainties. The mechanism for obtaining the adaption laws is obtained by applying lyapunov theory that can guarantee the convergence of the impedance error to zero. The proposed control scheme then has been simulated and compared by both feedback linearization impedance control based on voltage and torque control strategies. An SCARA robot has been utilized for simulation with the consideration that the fourth joint is locked. The simulation results demonstrates a considerable advantage of the proposed method over the control methods.

Keywords: Model reference adaptive system, Impedance control, Voltage control strategy



Shahrood University of Technology

Faculty of Electrical Engineering and Robotics

MSc Thesis in Control

**Model Reference Robust Adaptive Impedance Control of a
Robot Manipulator Using Voltage Control Strategy**

By: Gholamreza Nazmara

Supervisor:
Prof Mohammad Mehdi Fateh

September 2016