

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی کنترل

تشخیص خطای محرک ربات با استفاده از مشاهده گر تطبیقی

نگارنده :

مرتضی عسگری

استاد راهنما:

دکتر محمد حداد ظریف

شهریور ۹۷

شماره ۱۵۸۷، ۲۰۱۶
تاریخ: ۹۷، ۲، ۵

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای مرتضی عسگری با شماره دانشجویی ۹۴۱۲۳۴۴ رشته مهندسی برق - کنترل گرایش کنترل تحت عنوان: تشخیص خطای محرک ربات با استفاده از مشاهده گر تطبیقی که در تاریخ ۱۳۹۷/۰۶/۰۵ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه:)	<input type="checkbox"/>	مردود	<input type="checkbox"/>
نوع تحقیق:	<input checked="" type="checkbox"/> نظری	<input type="checkbox"/> عملی	

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	محمد علی لاریجانی	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم	---	---	---
۳- استاد مشاور	---	---	---
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	سعید ابزراده ملات	دانشیار	
۵- استاد ممتحن اول	علیرضا الهی	دانشیار	
۶- استاد ممتحن دوم	محمد علی صدرنیا	دانشیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:
تاریخ و امضاء و مهر دانشکده مهندسی برق و الکترونیک

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم بہ:

روح پاک پدرم و مادر مہربان و عزیزتر از جانم...

تقدیر و تشکر

از پدر و مادر عزیزم که در عرصه‌های مختلف زندگی همواره مشوق و تکیه‌گاه من بودند و صبورانه و فداکارانه در طول این سالیان زحمات زیادی برایم کشیدند که قطعاً جبران لحظه‌ای از آن برایم امکان پذیر نیست، صمیمانه کمال تشکر و سپاس را دارم.

و تقدیر و تشکر شایسته از استاد گرانقدر جناب آقای دکتر حداد ظریف دارم که با سعه صدر و با حسن خلق همواره راهنما و راه‌گشای من در تمام مراحل این پایان‌نامه بوده‌اند. برای ایشان آرزوی سلامتی و سربلندی روزافزون را دارم.

در پایان از زحمات برادر عزیز و مهربانم و از دوستان عزیزم که در تدوین این پایان‌نامه من را یاری نمودند سپاسگزارم و از خداوند متعال سلامتی و سربلندی ایشان را خواستارم.

مرتضی عسگری

شهریور ۹۷

تعهد نامه

اینجانب مرتضی عسگری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق-کنترل دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تشخیص خطای محرک ربات با استفاده از مشاهده گر تطبیقی تحت راهنمایی آقای دکتر محمد حداد ظریف متعهد می شوم .

تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .

در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .

مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .

کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج بانام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .

حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.

در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .

در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

در این پایان نامه سیستم تشخیص خطا با استفاده از رویکرد تطبیقی طراحی می شود تا در صورت بروز خرابی در عملگرهای ربات خطا را تشخیص داده و اخطار بروز خطا در سیستم را فعال نماید. سیستم تشخیص خطا برای ربات های بازویی صلب و انعطاف پذیر با محرک موتور DC به صورتی طراحی می شود که سیگنال باقی مانده نسبت به اغتشاشاتی نظیر تغییر بار بازوی ربات و یا نامعینی های مدل سازی کمترین حساسیت را داشته و نسبت به خطای عملگر، حداکثر حساسیت را داشته باشد. به منظور ساده سازی روابط غیرخطی و پیچیده ربات، از ایده استراتژی ولتاژ استفاده می شود و عملکرد رویکرد تطبیقی از نظر سرعت و دقت در تشخیص خطای محرک مورد بررسی قرار می گیرد. نتایج شبیه سازی کارایی موثر این روش را نشان می دهد.

کلمات کلیدی: تشخیص خطا-ربات-رویتگر تطبیقی-تشخیص خطای مقاوم

فهرست مطالب

فصل اول مقدمه و مفاهیم اصلی

۲-----	۱-۱- پیشگفتار
۲-----	۲-۱- مفاهیم عیب‌یابی و تشخیص خطا
۶-----	۳-۱- مروری بر تاریخچه کارهای انجام شده
۷-----	۴-۱- اهمیت موضوع و نوآوری پژوهش
۹-----	۵-۱- طرح کلی پایان‌نامه

فصل دوم اصطلاحات و روش‌های تشخیص خطا

۱۲-----	۱-۲- اصطلاحات در حوزه تشخیص خطا
۱۴-----	۲-۲- دسته‌بندی خطا
۱۹-----	۳-۲- روش‌های تشخیص خطا
۲۲-----	۴-۲- روش‌های تولید سیگنال باقی‌مانده
۲۶-----	۵-۲- مساله مقاوم بودن روش تشخیص خطای مبتنی بر مدل
۲۶-----	۶-۲- طراحی آستانه برای سیگنال باقیمانده
۲۸-----	۷-۲- تشخیص خطای مبتنی بر مدل با استفاده از روینگر

فصل سوم تعریف سیستم

۳۶-----	۱-۳- ربات
۳۹-----	۲-۳- انواع محرک‌های ربات
۴۰-----	۳-۳- موتور الکتریکی به عنوان محرک ربات و دلایل خرابی آن
۴۲-----	۴-۳- مدل‌سازی دینامیکی ربات

فصل چهارم طراحی سیستم تشخیص خطای محرک ربات با استفاده از روینگر تطبیقی

۵۴-----	۱-۴- مقدمه
۵۴-----	۲-۴- ساده‌سازی روابط ربات صلب بر اساس رویکرد استراتژی ولتاژ
۵۶-----	۳-۴- ساده‌سازی روابط ربات انعطاف‌پذیر بر اساس رویکرد استراتژی ولتاژ
۵۸-----	۴-۴- تشخیص خطای مبتنی بر روینگر تطبیقی

فصل پنجم نتایج شبیه‌سازی

- ۶۶----- ۱-۵- تعریف مدل مورد نظر جهت شبیه‌سازی
- ۶۸----- ۲-۵- شبیه‌سازی ربات دولینکی صلب و رویتگر تطبیقی اول
- ۷۲----- ۳-۵- شبیه‌سازی ربات سه لینکی صلب و رویتگر تطبیقی اول
- ۷۴----- ۴-۵- شبیه‌سازی ربات دولینکی صلب و رویتگر تطبیقی دوم
- ۷۷----- ۵-۵- شبیه‌سازی ربات سه لینکی صلب و رویتگر تطبیقی دوم
- ۷۹----- ۶-۵- مقایسه رویتگر تطبیقی اول و دوم بر روی ربات صلب دولینکی
- ۸۰----- ۷-۵- شبیه‌سازی ربات دولینکی انعطاف‌پذیر و رویتگر تطبیقی اول
- ۸۳----- ۸-۵- شبیه‌سازی ربات دولینکی انعطاف‌پذیر و رویتگر تطبیقی دوم

فصل ششم نتیجه‌گیری و پیشنهادات

- ۸۸----- ۱-۶- نتیجه‌گیری
- ۸۹----- ۲-۶- پیشنهادات

۹۱

مراجع

فهرست شکل ها

- شکل ۱-۱ : شماتیک افزونگی سخت افزاری ۳
- شکل ۲-۱: شماتیک روش تشخیص خطای مبتنی بر مدل به وسیله تولید سیگنال باقی مانده ۴
- شکل ۳-۱: تشخیص خطا مبتنی بر افزونگی سخت افزاری در مقایسه با تشخیص خطا مبتنی بر افزونگی تحلیلی ۴
- شکل ۴-۱: شماتیک روش های تشخیص خطا مبتنی بر داده ۵
- شکل ۵-۱: شماتیک روش های تشخیص خطا مبتنی بر سیگنال ۵
- شکل ۶-۱: روش های تشخیص خطا ۶
- شکل ۱-۲: خطاهای وارد شده بر سیستم بر مبنای فرم وارد شدن خطا به سیستم ۱۴
- شکل ۲-۲: انواع خطاهای محرک ۱۶
- شکل ۳-۲: انواع خطاهای سنسور ۱۷
- شکل ۴-۲: خطای عملگر-خطای سیستم -خطای سنسور ۱۷
- شکل ۵-۲: دسته بندی خطا بر اساس مشخصه زمانی ۱۸
- شکل ۶-۲: روش تشخیص خطا مبتنی بر مدل -تولید سیگنال باقی مانده ۲۲
- شکل ۷-۲: روش تخمین پارامتر ۲۳
- شکل ۸-۲: روش رویتر حالت ۲۴
- شکل ۹-۲: تشخیص خطای مبتنی بر رویتر ۲۵
- شکل ۱۰-۲: روش معادلات برابری ۲۵
- شکل ۱۱-۲: اعلام اخطار اشتباه به دلیل استفاده از آستانه ثابت نامناسب ۲۷
- شکل ۱۲-۲: طراحی آستانه تطبیقی جهت تشخیص خطا ۲۸
- شکل ۱-۳: ربات های بازویی به نام های ABB IRB1400 و Motoman SK16 ۳۶
- شکل ۲-۳: مفصل های کشویی و لولایی ۳۷
- شکل ۱-۵: موقعیت مفصل های ربات دولینکی صلب در مقایسه با مسیرهای مطلوب ۶۸
- شکل ۲-۵: تلاش کنترلی برای هر یک از موتورهای ربات دولینکی صلب ۶۹
- شکل ۳-۵: تخمین خروجی سیستم توسط رویتر تطبیقی اول در مقایسه با خروجی واقعی سیستم ربات دولینک ۶۹
- شکل ۴-۵: سیگنال باقی مانده رویتر اول در شرایط عدم حضور خطای محرک در سیستم ربات دولینک ۷۰
- شکل ۵-۵: سیگنال باقی مانده رویتر اول در حضور خطای ناگهانی محرک در سیستم ربات دولینک ۷۱
- شکل ۶-۵: سیگنال باقی مانده رویتر اول در حضور خطای متناوب محرک در سیستم ربات دولینک ۷۱
- شکل ۷-۵: موقعیت مفصل های ربات سه لینکی صلب در مقایسه با مسیر های مطلوب ۷۲
- شکل ۸-۵: تخمین خروجی سیستم توسط رویتر تطبیقی اول در مقایسه با خروجی واقعی سیستم ربات سه لینک ۷۳
- شکل ۹-۵: سیگنال باقی مانده رویتر اول در شرایط عدم حضور خطای محرک در سیستم ربات سه لینک ۷۳
- شکل ۱۰-۵: سیگنال باقی مانده رویتر اول در حضور خطای ناگهانی محرک در سیستم ربات سه لینک ۷۴
- شکل ۱۱-۵: سیگنال باقی مانده رویتر اول در حضور خطای متناوب محرک در سیستم ربات سه لینک ۷۴

- شکل ۵-۱۲ : تخمین خروجی سیستم توسط رویتر تطبیقی دوم در مقایسه با خروجی واقعی سیستم ربات دولینک ۷۵
- شکل ۵-۱۳ : سیگنال باقی مانده رویتر دوم در شرایط عدم حضور خطای محرک در سیستم ربات دولینک ۷۵.....
- شکل ۵-۱۴ : سیگنال باقی مانده رویتر دوم در حضور خطای ناگهانی محرک در سیستم ربات دولینک ۷۶.....
- شکل ۵-۱۵ : سیگنال باقی مانده رویتر دوم در حضور خطای متناوب محرک در سیستم ربات دولینک ۷۶.....
- شکل ۵-۱۶ : تخمین خروجی سیستم توسط رویتر تطبیقی دوم در مقایسه با خروجی واقعی سیستم ربات سه لینک ۷۷
- شکل ۵-۱۷ : سیگنال باقی مانده رویتر دوم در شرایط عدم حضور خطای محرک در سیستم ربات سه لینک ۷۷.....
- شکل ۵-۱۸ : سیگنال باقی مانده رویتر دوم در حضور خطای ناگهانی محرک در سیستم ربات سه لینک ۷۸.....
- شکل ۵-۱۹ : سیگنال باقی مانده رویتر دوم در حضور خطای متناوب محرک در سیستم ربات سه لینک ۷۸.....
- شکل ۵-۲۰ : سیگنال باقی مانده رویتر اول و دوم در شرایط عدم حضور خطای محرک در سیستم ربات دولینکی صلب ۷۹
- شکل ۵-۲۱ : سیگنال باقی مانده رویتر اول و دوم در حضور خطای ناگهانی محرک در سیستم ربات دولینکی صلب ۸۰
- شکل ۵-۲۲ : سیگنال باقی مانده رویتر اول و دوم در حضور خطای متناوب محرک در سیستم ربات دولینک ۸۰.....
- شکل ۵-۲۳ : موقعیت مفصل ربات دولینکی انعطاف پذیر در مقایسه با مسیر مطلوب ۸۱.....
- شکل ۵-۲۴ : تلاش کنترلی و جریان هر یک از موتور های ربات دولینکی انعطاف پذیر ۸۱.....
- شکل ۵-۲۵ : تخمین زاویه موتور توسط رویتر اول در مقایسه با خروجی واقعی سیستم ربات انعطاف پذیر ۸۲.....
- شکل ۵-۲۶ : سیگنال باقی مانده رویتر اول در شرایط عدم حضور خطای محرک در سیستم ربات انعطاف پذیر ۸۲.....
- شکل ۵-۲۷ : سیگنال باقی مانده رویتر اول در حضور خطای ناگهانی محرک در سیستم ربات دولینک انعطاف پذیر ۸۳.
- شکل ۵-۲۸ : سیگنال باقی مانده رویتر اول در حضور خطای متناوب محرک در سیستم ربات دولینک انعطاف پذیر ۸۳.
- شکل ۵-۲۹ : تخمین خروجی سیستم توسط رویتر دوم در مقایسه با خروجی واقعی سیستم ربات انعطاف پذیر ۸۴.....
- شکل ۵-۳۰ : سیگنال باقی مانده رویتر دوم در شرایط عدم حضور خطای محرک در سیستم ربات انعطاف پذیر ۸۴.....
- شکل ۵-۳۱ : سیگنال باقی مانده رویتر دوم در حضور خطای ناگهانی محرک در سیستم ربات دولینک انعطاف پذیر ۸۵.
- شکل ۵-۳۲ : سیگنال باقی مانده رویتر دوم در حضور خطای متناوب محرک در سیستم ربات دو لینک انعطاف پذیر ۸۵

فهرست جدول ها

- جدول ۱-۵: پارامترهای دینامیکی بازوهای ربات دولینکی ۶۶
- جدول ۲-۵ : پارامترهای موتور DC های ربات دولینکی ۶۶
- جدول ۳-۵ : پارامترهای دناویت-هارتنبرگ برای ربات سه لینکی..... ۶۶
- جدول ۴-۵ : پارامترهای دینامیکی بازوهای ربات سه لینکی ۶۷
- جدول ۵-۵ : پارامترهای موتور DC های ربات سه لینکی ۶۷
- جدول ۶-۵ : مسیره‌های حرکتی مطلوب ربات ها برای شبیه‌سازی در متلب ۶۷
- جدول ۷-۵ : پارامترهای طراحی برای رویتنگر تطبیقی اول ۶۷
- جدول ۸-۵ : پارامترهای طراحی برای رویتنگر تطبیقی دوم..... ۶۸

۱- فصل اول

مقدمه و مفاهیم اصلی

۱-۱- پیشگفتار

با گسترش روزافزون تکنولوژی و هرچه بیشتر صنعتی شدن جوامع، لزوم استفاده از سیستم های کنترلی و محول کردن امور به این سیستم ها بیشتر احساس می شود بطوری که از این سیستم ها، اجرای وظایف دشوارتر و پیچیده تری نسبت به گذشته انتظار می رود. با وجود اینکه سیستم های کنترلی امروزی دقت و سرعت قابل قبولی در اجرای وظایف دارند ولی باز هم بنابر دلایل مختلفی ممکن است به خوبی عمل نکنند. این دلایل می توانند ناشی از اغتشاشات خارجی یا مستهلک شدن سیستم کنترلی، عملگرها، سنسورها به مرور زمان و یا آسیب های فیزیکی ای باشد که به دلیل آب و هوای بد، سیستم را دچار مشکل کرده است. چنانچه سیستم کنترلی که در صنعت مورد استفاده قرار می گیرد دچار نقص در عملکرد گردد می تواند خسارات مالی و جانی متعددی به وجود آورد. مطالعاتی که بر روی تجهیزات صنعتی انجام گرفته است نشان دهنده خرابی ها و بدعمل کردن های متعددی است که چنانچه به موقع تشخیص داده نشوند می توانند موجب ضررهای اقتصادی سنگین و در معرض خطر قرار گرفتن نیروهای انسانی گردند. در چنین شرایطی برای افزایش ایمنی و قابلیت اطمینان سیستم، بخشی تحت عنوان ناظر سیستم پیشنهاد می شود تا با تشخیص به موقع بدعمل کردن سیستم، باعث جلوگیری از رخ دادن خسارات اساسی و گاهی غیر قابل جبران شود.

۱-۲- مفاهیم عیب یابی و تشخیص خطا

جهت تشخیص خطا سه رویکرد کلی وجود دارد: تشخیص خطای مبتنی بر مدل^۱ و تشخیص خطا مبتنی بر داده^۲ و تشخیص خطا مبتنی بر افزونگی سخت افزاری^۳ که روشی قدیمی است [۱] و [۲].

^۱ Model-based Fault Detection

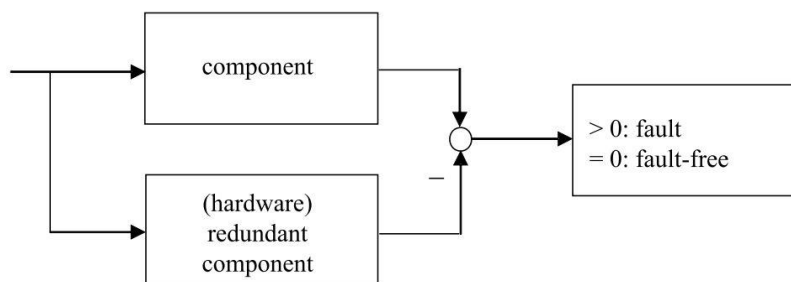
^۲ Data-based Fault Detection

^۳ hardware redundancy

لازم به توضیح است که به روش تشخیص خطای مبتنی بر مدل، روش تشخیص خطای مبتنی بر افزونگی تحلیلی^۴ نیز می‌گویند [۳].

۱-۲-۱- افزونگی سخت افزاری

تشخیص خطا بر اساس روش افزونگی سخت افزاری روشی قدیمی است که با استفاده از اضافه نمودن سخت افزارهای اضافی و تکراری، اجزای فرآیند را بازسازی می‌کند. تشخیص خطا در این روش به این صورت است که چنانچه خروجی فرآیند با یکی از افزونگی‌ها متفاوت باشد رخ دادن خطا را اعلام می‌کند. قابلیت اطمینان بالا و همینطور جداسازی مستقیم خطا از جمله مزیت‌های این روش است. جهت اجرای این روش نیاز به استفاده از سخت افزارهای متعدد و تکراری می‌باشد که موجب می‌گردد این روش از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نباشد [۱].



شکل ۱-۱: شماتیک افزونگی سخت افزاری [۱].

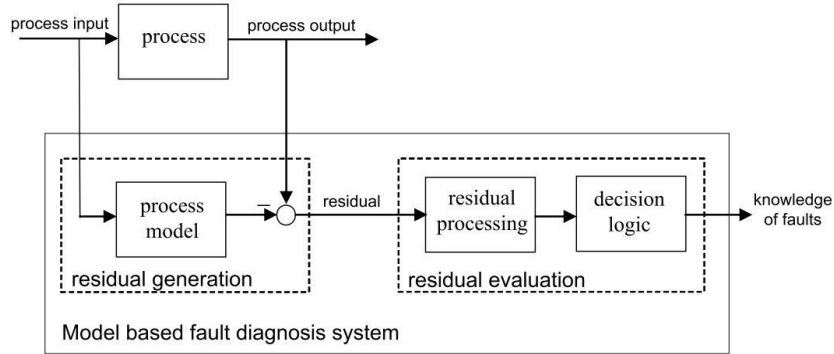
۱-۲-۲- روش تشخیص خطای مبتنی بر مدل

روش تشخیص خطای مبتنی بر مدل یکی از مهمترین روشهای حال حاضر در حوزه تشخیص خطا است. ویژگی روش مبتنی بر مدل، سرعت و دقت بالاتر نسبت به روش بدون مدل است. در این روش با تولید سیگنال باقی‌مانده که از تفاوت بین رفتار واقعی و رفتار تخمین زده شده‌ی سیستم بدست می‌آید،

⁴ Analytical Redundancy

تشخیص خطا انجام می‌گیرد [۴]. جهت تولید سیگنال باقی مانده روشهای مختلفی وجود دارد که از

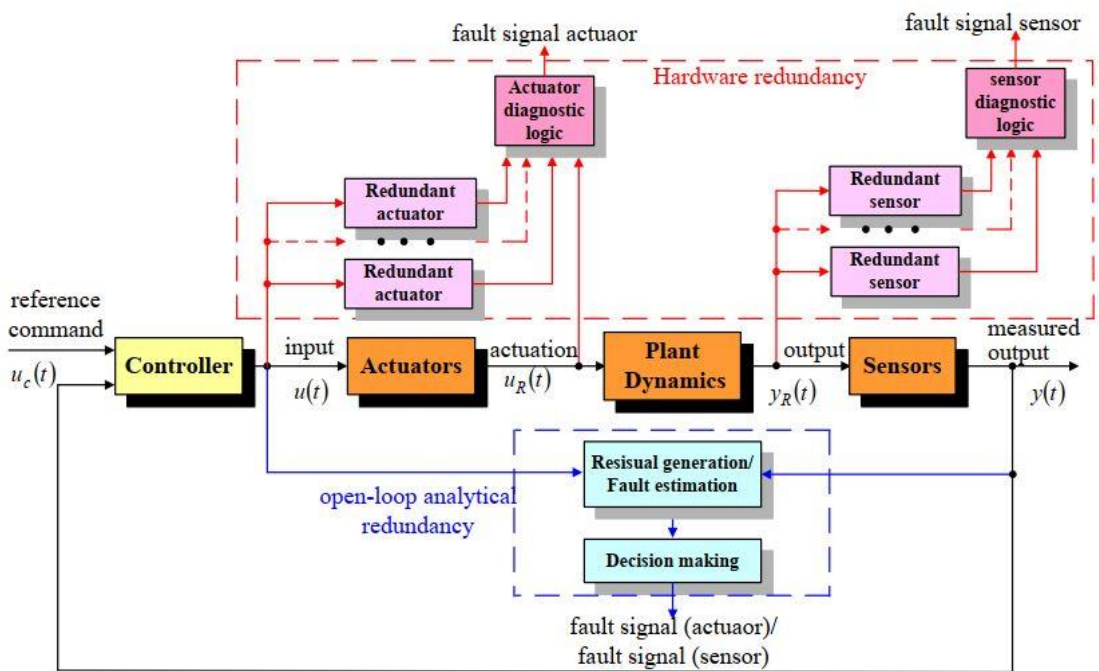
جمله آنها می‌توان به روش مبتنی بر رویکرد، معادلات پربیتی، تخمین پارامتر اشاره نمود [۴].



شکل ۱-۲: شماتیک روش تشخیص خطای مبتنی بر مدل بوسیله تولید سیگنال باقی مانده [۱]

به جهت درک بهتر تفاوت های تشخیص خطای مبتنی بر افزونگی سخت افزاری و افزونگی تحلیلی،

شماتیکی در شکل (۱-۳) آورده شده است.

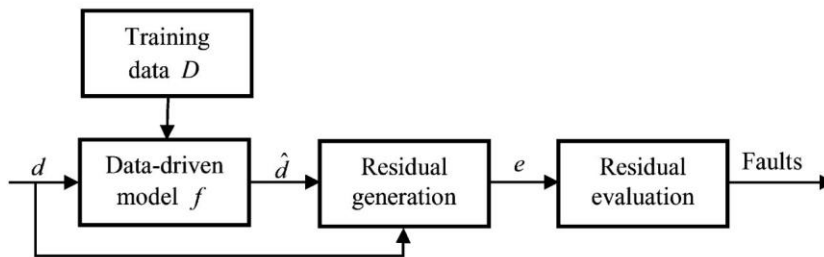


شکل ۱-۳: تشخیص خطا مبتنی بر افزونگی سخت افزاری در مقایسه با تشخیص خطا مبتنی بر افزونگی تحلیلی [۳]

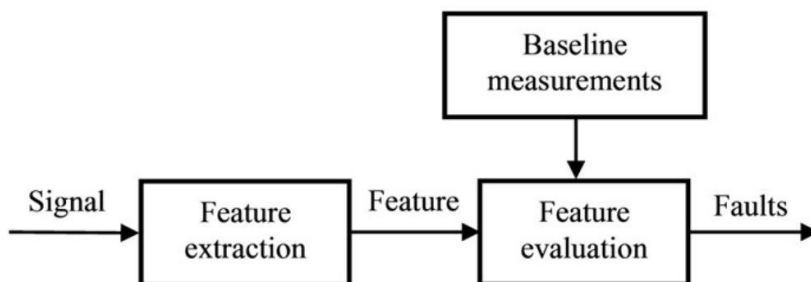
۱-۲-۳- روش مدل آزاد(بدون مدل)

روش‌های بدون مدل نیازی به مدل دینامیکی سیستم برای تشخیص خطا ندارند [۵]. چنین روش‌هایی زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرند که بدست آوردن مدل سیستم دشوار است یا پیچیدگی‌های محاسباتی زیادی دارد. در این روش از الگوریتم‌های هوشمند استفاده می‌شود. از ویژگی‌های این روش می‌توان به حجم بالای اندازه‌گیری‌های سیستمی اشاره کرد. این روش عموماً به دو دسته مبتنی بر داده و مبتنی بر سیگنال تقسیم بندی می‌شوند [۵].

روش‌های مدل آزاد مبتنی بر داده از روش‌های آماری چند متغیره و ابزارهای یادگیری ماشین برای تشخیص خطا استفاده می‌کنند. این در حالی است که روش‌های تشخیص خطای مدل آزاد مبتنی بر سیگنال، با مقایسه ویژگی‌های استخراج شده از یک سیگنال با ویژگی‌های پایه‌ای که برای آن سیگنال به نظر عادی می‌رسد، تصمیم می‌گیرند [۵]. برای درک بهتر این مطلب شماتیک روش‌ها در شکل (۱-۳) و (۱-۴) آورده شده است.

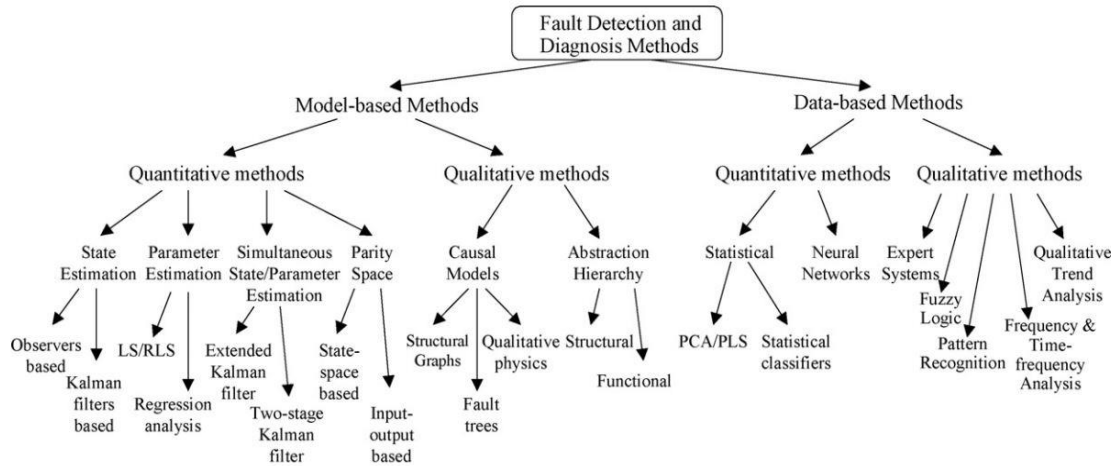


شکل ۱-۴: شماتیک روش‌های تشخیص خطا مبتنی بر داده [۵].



شکل ۱-۵: شماتیک روش‌های تشخیص خطا مبتنی بر سیگنال [۵]

روش‌های موجود جهت تشخیص خطا و کنترل تحمل پذیرخطا در چهارچوبی کلی، مطابق با معیارهای مختلف در شکل (۶-۱) ارائه شده است.



Note: LS/RLS: Least Squares/Recursive Least Squares; PCA: Principal Component Analysis; PLS: Partial Least Squares.

شکل ۶-۱: روش‌های تشخیص خطا [۶]

۱-۳- مروری بر تاریخچه کارهای انجام شده

در پنج دهه اخیر روش‌های گوناگونی در حوزه تشخیص و جداسازی خطا به کار گرفته شده است.

یکی از پرکاربردترین روشها، تشخیص خطا مبتنی بر رویکردی است که ببرد اولین گامها را در این راستا برداشت [۷].

استفاده از فیلتر کالمن جهت تشخیص خطا به وسیله تولید سیگنال باقی‌مانده در سال 1971 انجام شد [۸].

ایزرمین روشهای مبتنی بر مدل مانند تخمین حالت و تخمین پارامتر را توسعه داده است [۹].

تشخیص خطا مبتنی بر معادلات پربیتی ابتدا توسط ادوارد پیشنهاد داده شد [۱۰].

وانبرگ و فرانک برای اولین بار روش تولید سیگنال باقی مانده با استفاده از رویتر و ورودی نامعلوم را در سال ۱۹۸۷ پیشنهاد دادند [۱۱]. این روش به دلیل توانایی تخمین حالت مقاوم و کنترل مقاوم مبتنی بر رویتر بسیار مورد توجه قرار گرفت به طوری که تاکنون در حال توسعه و استفاده است.

تولید سیگنال باقی مانده مبتنی بر رویتر با استفاده از روش مقاوم پیشرفته برای اولین بار در [۱] پیشنهاد شد.

روش مبتنی بر رویتر تطبیقی یکی از دقیق ترین روشهای تشخیص خطا است و در اوایل دهه ۷۰ میلادی رویتر تطبیقی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت [۱۲].

در سال ۱۹۹۰ برای اولین بار بحث و بررسی پیرامون طراحی رویتر غیرخطی با در نظر گرفتن پارامترهای مدل سازی نشده در مدل فضای حالت سیستم های غیرخطی صورت گرفت. در این راستا آقای باستین در [۱۳] نتایج اولیه در مورد استفاده از رویترهای تطبیقی جهت بدست آوردن بردار حالت سیستم برای پارامترهای ناشناخته را بدست آورد.

در مرجع [۱۴] مروری بر برخی از روش های طراحی رویتر تطبیقی برای سیستم های غیرخطی صورت گرفته است.

۱-۴- اهمیت موضوع و نوآوری پژوهش

گسترش روزافزون تکنولوژی و سیستم های کنترلی موجب شده است که استفاده از سیستم های الکتریکی و الکترونیکی در عصر حاضر بیشتر از هر وقت دیگر مشاهده شود. در این بین استفاده از ربات ها توجه بسیاری را به خود جلب کرده به طوری که در اکثر زمینه های پزشکی، صنعتی، اداری و خدماتی ردپایی از ربات ها با ابعاد فیزیکی مختلف و توانایی های گوناگون به چشم می خورد. پیشرفت های وسیع در حوزه سیستم های کنترلی و افزایش دقت و کارایی این سیستم ها در عصر حاضر موجب شده است که ربات ها با دقت و سرعت مناسب وظیفه ی محول شده را به خوبی انجام دهند. اما مطلبی

که در این بین از اهمیت بالایی برخوردار است قابلیت اطمینان سیستم است. به این معنا که در صورت بروز شرایط محیطی نامساعد یا تغییر رفتار فیزیکی عملگرهای سیستم به مرور زمان، ربات بتواند وظیفه‌ی محوله را با دقت به انجام برساند و چنین امری محقق نمی‌گردد مگر با نظارت مداوم سیستمی تحت عنوان سیستم تشخیص خطا؛ چرا که بروز خطا در تمام سیستم‌ها محتمل بوده و مسئله‌ای اجتناب‌ناپذیر است.

بروز خطا در هر سیستم کنترلی موجب بدعمل کردن سیستم و نقص در انجام وظایف محول شده‌ی آن می‌گردد. در چنین شرایطی در صورتی که خطا به موقع و دقیق تشخیص داده نشود می‌تواند باعث از کارافتادن کامل سیستم و ادوات مرتبط با آن گردد که موجب تحمیل خسارات مالی و حتی جانی سنگینی می‌شود لذا بحث تشخیص خطا مسئله‌ای ضروری و مهم در بحث کنترل سیستم‌ها به خصوص ربات‌ها است.

در این پایان‌نامه سیستم تشخیص خطا مبتنی بر رویکرد تطبیقی طراحی می‌گردد که در صورت بروز خطا در عملگرهای ربات سریعاً خطا را تشخیص داده و اخطار بروز خطا در سیستم را فعال نماید. با توجه به استفاده وسیع و متداول از موتور DC در ربات به عنوان عملگر، سیستم تشخیص خطا را برای ربات با محرک موتور DC در نظر گرفته و سیستم تشخیص خطا طوری طراحی می‌گردد که سیگنال باقی‌مانده نسبت به اغتشاشاتی نظیر تغییر بار بر روی بازو کمترین حساسیت را داشته و نسبت به خطای عملگر حداکثر حساسیت را داشته باشد. روش تشخیص خطا با استفاده از رویکرد تطبیقی به‌خاطر سرعت و دقت بالا در تشخیص خطا از عملکرد مطلوبی برخوردار خواهد بود.

با توجه به اینکه ربات‌ها معادلات غیرخطی سنگینی دارند، محققان تاکنون درمورد کنترل و تشخیص خطای ربات‌ها در حوزه‌ی سیستم‌های دینامیکی غیرخطی از روش‌های پیچیده با محاسبات سنگینی استفاده کرده‌اند که موجب شده پیچیدگی سیستم طراحی شده بسیار زیاد باشد. اما در این پایان‌نامه برای بررسی ربات از رویکرد جدیدی که در سال‌های اخیر مطرح گردیده است، تحت عنوان رویکرد

کنترل ولتاژ استفاده می‌شود که موجب می‌گردد محاسبات و طراحی سیستم تشخیص خطا برای ربات به سادگی انجام پذیرد.

۱-۵- طرح کلی پایان‌نامه

در ادامه در فصل دوم به بیان تعاریف و مفاهیم پایه در حوزه تشخیص خطا و معرفی روش‌های تشخیص خطا پرداخته می‌شود. در این فصل تمرکز بر روی مفاهیم مورد نیاز جهت معرفی و طراحی رویتگر برای تولید سیگنال باقی‌مانده است.

در فصل سوم، ابتدا به معرفی انواع ربات‌ها و ساختار فیزیکی آنها و همین‌طور به بیان معادلات ریاضی جهت مدل‌سازی ربات پرداخته می‌شود. سپس به معرفی انواع محرک‌های مورد استفاده در ربات‌ها و دلایل خرابی و بدعمل کردن آنها پرداخته می‌شود.

در فصل چهارم رویکرد پیشنهادی جهت پیاده‌سازی رویتگر تطبیقی ارائه می‌شود و سیستم تشخیص خطای مبتنی بر رویتگر تطبیقی معرفی می‌گردد.

در فصل پنجم نتایج پیاده‌سازی سیستم تشخیص خطا بر روی ربات‌های بازویی صلب و انعطاف‌پذیر ارائه می‌شود و در نهایت در فصل ششم به جمع‌بندی و پیشنهادات جهت ادامه کار در این حوزه پرداخته خواهد شد.

۲- فصل دوم

اصطلاحات و روش‌های تشخیص خطا

۲-۱- اصطلاحات در حوزه تشخیص خطا

به دلیل یکپارچگی مجموعه تعاریف و اصطلاحات بکاربرده شده در حوزه تشخیص خطا، کمیته فنی فرآیندهای ایمن^۵ تعاریف و اصطلاحاتی را پیشنهاد داده است [۲] که قسمتی از این اصطلاحات که مرتبط با موضوع این پایان نامه است ارائه می شود.

۲-۱-۱- سیگنال ها و حالت ها

خطا^۶: انحراف رفتار حداقل یکی از اجزای سیستم از رفتار استاندارد و یا قابل قبول یا عادی خود.

خرابی^۷: یک وقفه دائمی در قابلیت سیستم برای انجام عملکرد مورد نیاز تحت شرایط عملکردی خاص.

بدعمل کردن^۸: بی نظمی متناوب در انجام عملکرد مطلوب سیستم.

اشتباه^۹: انحراف در یک مقدار اندازه گیری شده یا محاسبه شده از یک متغیر خروجی .

اغتشاش^{۱۰}: ورودی ناشناخته و غیر قابل کنترل که بر سیستم تاثیر می گذارد.

باقیمانده^{۱۱}: نشان دهنده خطا ای است که مبتنی بر اختلاف اندازه گیری پارامترهای واقعی سیستم و اندازه گیری پارامترهای مبتنی بر مدل سیستم است.

⁵ The SAFEPROCESS Technical Committee

⁶ Fault

⁷ Failure

⁸ Malfunction

⁹ Error

¹⁰ Disturbance

¹¹ Residual

۲-۱-۲- توابع^{۱۲}

تشخیص خطا^{۱۳}: تعیین خطاهای موجود در یک سیستم و زمان تشخیص آنها.

جداسازی خطا^{۱۴}: تعیین نوع، مکان و زمان تشخیص خطا. جداسازی خطا در ادامه‌ی تشخیص خطا است.

شناسایی خطا^{۱۵}: تعیین اندازه و رفتار متغیر با زمان خطا. شناسایی خطا در ادامه‌ی جداسازی خطا است.

تشخیص و شناسایی خطا^{۱۶}: تعیین نوع، اندازه، مکان و زمان تشخیص یک خطا. تشخیص و شناسایی

خطا در ادامه‌ی تشخیص خطا است و ترکیبی از تشخیص خطا و شناسایی خطا می‌باشد.

۲-۱-۳- خواص سیستم

قابلیت اطمینان^{۱۷}: توانایی سیستم در انجام وظایف تعیین شده، تحت شرایط مشخص، در بازه‌ی زمانی

داده شده.

ایمنی^{۱۸}: توانایی سیستم در آسیب نرساندن به تجهیزات و منابع انسانی یا محیط اطراف.

در دسترس بودن^{۱۹}: احتمال اینکه سیستم در هر لحظه از زمان به صورت موثر و مفیدی کار خواهد

کرد.

¹² Functions

¹³ Fault detection

¹⁴ Fault isolation

¹⁵ Fault identification

¹⁶ Fault diagnosis

¹⁷ Reliability

¹⁸ Safety

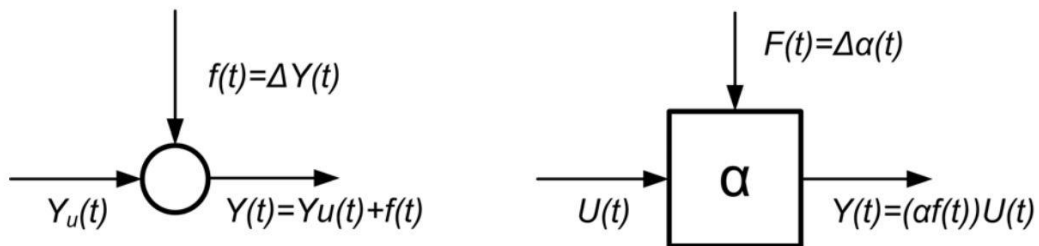
¹⁹ Availability

۲-۲-۲- دسته‌بندی خطا

خطاها با توجه به ویژگی‌هایی که دارند به سه دسته تقسیم می‌شوند: دسته بندی از نظر نوع خطا، محل رخ دادن خطا و یا مشخصه زمانی خطا [۱۵].

۲-۲-۲-۱- نوع خطا

در دسته‌بندی براساس نوع خطا، خطا به دو گروه تقسیم می‌شود. خطای جمع شونده^{۲۰} و خطای ضرب شونده^{۲۱} که در شکل (۱-۲) نشان داده شده است.



شکل ۱-۲: خطاهای وارد شده بر سیستم بر مبنای فرم وارد شدن خطا به سیستم [۱۵]

۲-۲-۲-۲- مکان رخ دادن خطا

خطاها رویدادهایی هستند که در قسمت‌های مختلف یک سیستم روی می‌دهند که به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند.

۲-۲-۲-۱- خطاهای فرآیند (سیستم)

این دسته از خطاها خواص دینامیکی سیستم را تغییر می‌دهند.

²⁰ Additive fault

²¹ Multiplicative fault

۲-۲-۲-۲- خطاهای محرک

محرک وسیله ای مکانیکی است که از طریق فرمان گرفتن از کنترل کننده وظیفه ای را انجام می دهد. محرکها بخشی ضروری و جدا نشدنی از سیستم های کنترلی هستند. خطاهایی که بر روی محرکها رخ می دهند خواص دینامیکی سیستم را تغییر نمی دهند ولی تاثیر کنترل کننده بر روی سیستم را دچار وقفه یا تغییر می کنند.

دسته بندی خطاهایی که بر روی محرکها رخ می دهند بستگی به نوع محرک دارند ولی با این حال می توان آنها را به چهار دسته کلی تقسیم کرد:

- گیرکردن در یک موقعیت^{۲۲}: گیرکردن یا قفل کردن در یک موقعیت، زمانی رخ می دهد که محرک هیچ عکس العملی به سیگنال کنترلی نشان نمی دهد و در موقعیتی ثابت مانده است. این خطا به دلیل مشکلات مکانیکی مانند عدم روغنکاری محرک رخ می دهد. از جمله حوادثی که به دلیل بروز این نوع خطا رخ داده می توان به حادثه پرواز ۱۰۸۰ سن دیگو در سال ۱۹۷۷ و پرواز ۹۶ در سال ۱۹۷۲ اشاره کرد [۱۶].
- خطای شناور^{۲۳}: چنانچه محرک بدون اعمال هیچ نیرویی از طرف کنترل کننده، به صورت آزادانه حرکت کند، خطای شناور رخ داده است. دو حادثه پروازی که در سال های ۱۹۸۵ و ۲۰۰۳ رخ داد به دلیل همین نوع خطا بوده است [۱۶].
- خطای hardover: در این نوع خطا سیگنال کنترلی با بیشترین سرعت به مقدار بیشینه یا کمینه خود می رسد که موجب می گردد که محرک تغییر سریع و آنی داشته باشد. برای مثال در پرواز ۸۵ سال ۲۰۰۲ آلاسکا، تغییر مکان سریع و آنی محرک ایرودینامیک باعث بروز حادثه هوایی شد [۱۶].

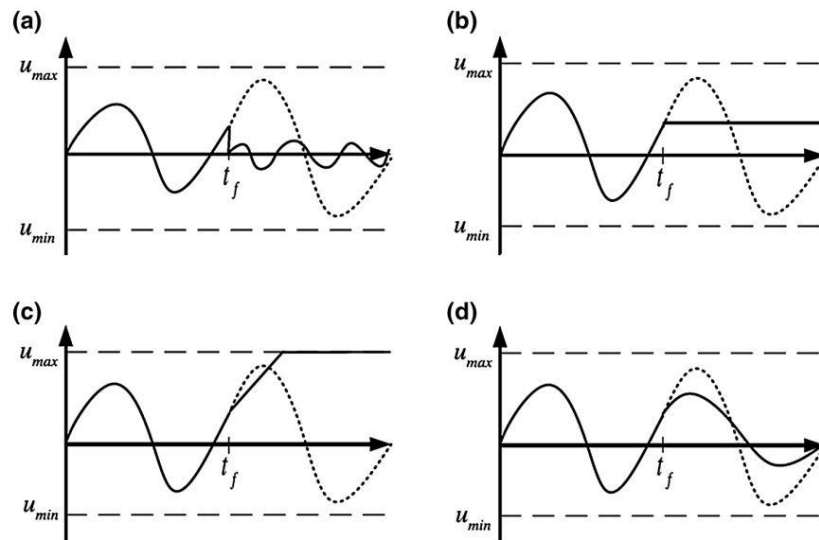
²² lock in place

²³ Float

- خطای کاهش کارایی: این نوع خطا زمانی رخ می‌دهد که کارایی یک یا مجموعه‌ای از محرک‌ها

کاهش یابد. این نوع از خطا جزء خطاهای رایج در انواع محرک‌ها است.

در شکل زیر انواع خطاهایی که بر روی محرک می‌توانند رخ دهد نشان داده شده است:



شکل ۲-۲: انواع خطاهای محرک [۱۷]: (a) خطای شناور، (b) خطای گیر کردن در یک موقعیت

(c) خطای Hard-Over، (d) خطای کاهش کارایی

۲-۲-۳- خطاهای سنسور

حسگر یک ابزار اندازه‌گیری است که متغیر فیزیکی را به متغیری ثانویه تبدیل می‌کند. خطاهایی که روی سنسورها رخ می‌دهند خواص دینامیکی سیستم را دچار تغییر نمی‌کنند ولی تغییرات و یا وقفه‌هایی در عملکرد سنسور ایجاد می‌کنند به طوری که تاثیرات نامطلوبی روی متغیرهای اندازه‌گیری شده توسط سنسور ایجاد می‌کنند. خطاهای سنسور را می‌توان به پنج دسته تقسیم کرد: خطای بایاس^{۲۴}، خطای دریفت^{۲۵}، خطای کاهش دقت^{۲۶}، خطای freezing و خطای کالیبراسیون^{۲۷}.

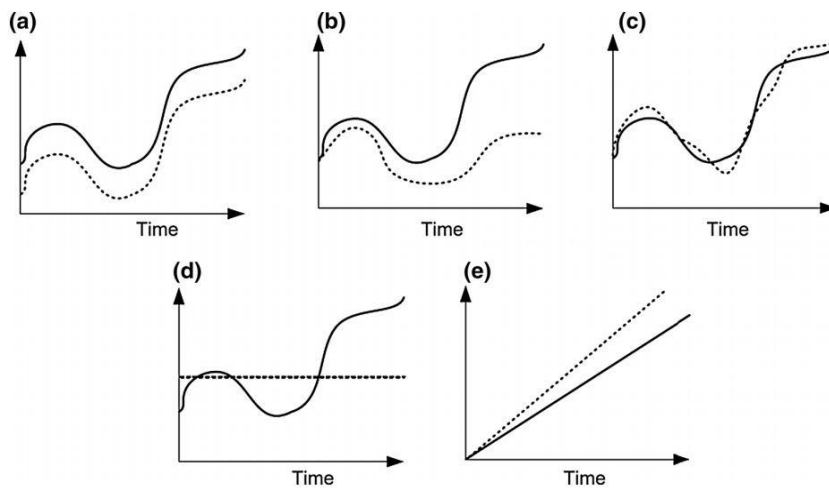
²⁴ Bias

²⁵ Drift

²⁶ Loss of accuracy

²⁷ Calibration error

در شکل زیر انواع خطاهایی که بر روی سنسور می‌توانند رخ دهد نشان داده شده است:

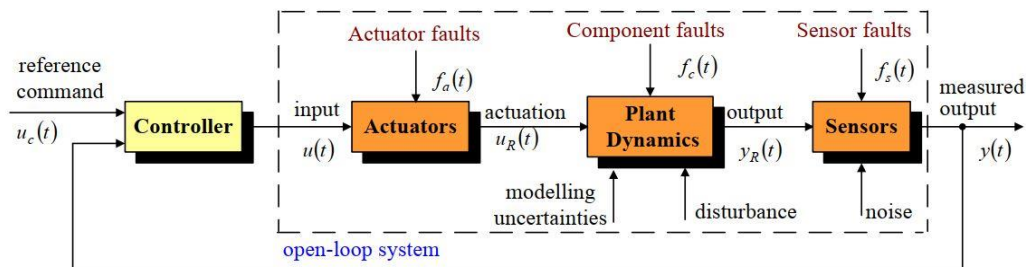


شکل ۳-۲: انواع خطاهای سنسور [۱۷]: (a) خطای بایاس، (b) خطای دررفت

(c) خطای کاهش دقت، (d) خطای فیریزینگ، (e) خطای کالیبراسیون

خطاهایی که بر اساس مکان رخ دادن خطا دسته‌بندی می‌شوند را می‌توان به صورت مختصر در شکل

(۴-۲) مشاهده نمود:



شکل ۴-۲: خطای عملگر-خطای سیستم-خطای سنسور [۳]

۳-۲-۲-۲- مشخصه زمانی خطا

در این نوع دسته‌بندی خطاها به سه دسته‌ی خطای ناگهانی^{۲۸}، خطای متناوب^{۲۹} و خطای نرم^{۳۰} تقسیم می‌شوند.

۲-۲-۳-۱- خطای ناگهانی

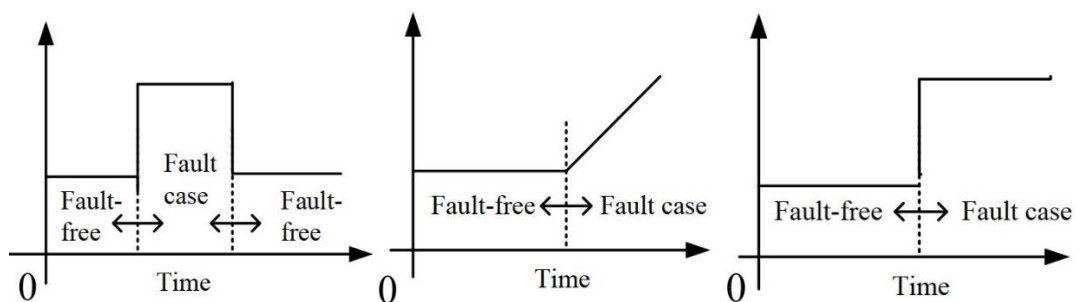
خطاهای ناگهانی در سیستم‌های ایمن بسیار خطرناک هستند و معمولا به دلیل خرابی بخشی از سخت‌افزار رخ می‌دهند که موجب اثرات تخریبی شدیدی می‌گردند که باید به سرعت تشخیص داده شده و رفع گردند [۱۸]. این خطا می‌تواند توسط یک تغییر ناگهانی در محرک و یا سنسور مشخصی رخ دهد.

۲-۲-۳-۲- خطای نرم

خطاهای نرم به مرور زمان زیاد می‌شوند و می‌توانند دلایلی مانند استهلاک اجزای سیستم در طول زمان باشد. چنین خطاهایی معمولا مقدار کوچکی دارند و صدمه ناگهانی به سیستم وارد نمی‌کنند [۱۸].

۲-۲-۳-۳- خطای متناوب

خطای متناوب، خطای دائمی نیست و گاهی اوقات و به صورت متناوب رخ می‌دهد.



شکل ۲-۵: دسته‌بندی خطا بر اساس مشخصه زمانی [۳]

²⁸ Abrupt fault

²⁹ Intermittent fault

³⁰ Incipient fault

۲-۳- روش های تشخیص خطا

تشخیص خطا بخش بسیار مهم و حساسی است که به عنوان یک ناظر، عملکرد سیستم را ارزیابی می‌کند و باعث تضمین صحت عملکرد و امنیت فرآیند کنترلی می‌گردد و پیشگیری از صدمات و خسارات احتمالی به سیستم را به همراه خواهد داشت. بطور کلی یک سیستم تشخیص خطا در هر لحظه اطلاعات سیگنال های ورودی و خروجی فرآیند را مورد پردازش قرار می‌دهد. خروجی سیستم تشخیص خطا می‌تواند سیگنالی تحت عنوان باقی‌مانده باشد که سیستم تشخیص خطا با تحلیل این سیگنال پی به بروز خطا در سیستم می‌برد.

همانطور که در فصل اول اشاره شد، به‌طور کلی تشخیص خطا را می‌توان به سه دسته‌ی تشخیص خطای مبتنی بر مدل و تشخیص خطای مبتنی بر سیگنال [۶] و تشخیص خطای مبتنی بر افزونگی سخت‌افزاری که روشی قدیمی است تقسیم‌بندی نمود.

با توجه به اینکه در این پایان‌نامه تمرکز بیشتر بر روی روش تشخیص خطای مبتنی بر مدل است، به توضیح مفصل‌تر این روش پرداخته می‌شود.

۲-۳-۱- تشخیص خطای مبتنی بر مدل

در تشخیص خطای مبتنی بر مدل نیاز به شناخت ساختار و مدل ریاضی در مورد سیستم می‌باشد. لذا در صورتی که مدل سیستم در دسترس باشد استفاده از روش تشخیص خطای مبتنی بر مدل انتخاب بسیار مناسبی است چرا که از سرعت و کارایی بیشتری نسبت به تشخیص خطای مبتنی بر سیگنال برخوردار است. روش‌های تشخیص خطای مبتنی بر مدل، خود به دو دسته‌ی مدل کمی^{۳۱} و مدل کیفی^{۳۲} تقسیم می‌شوند. در روش‌های مدل مرجع کمی، سیستم بر اساس توابع ریاضی که ارتباط بین ورودی‌ها و

³¹ Quantitative model

³² Qualitative model

خروجی‌های سیستم را بیان می‌کند، توصیف می‌شود در صورتی که در روش‌های مدل مرجع کیفی، مدل بر اساس توابع کمی که در قسمت‌های مختلف سیستم متمرکز شده‌اند بیان می‌شود [۱۹]. در ادامه به بررسی دقیق‌تر هر یک از این روش‌ها پرداخته می‌شود.

۲-۳-۱-۱- روش‌های تشخیص خطای مبتنی بر مدل کیفی

در مورد روش‌های تشخیص خطای مبتنی بر مدل کیفی تنها به توضیح دو دسته از روش‌ها پرداخته می‌شود:

- فیزیک کیفی^{۳۳}: این روش در حیطه ی هوش مصنوعی^{۳۴} است و به دو روش مختلف می‌توان آن را بیان نمود: یک روش، مدل کردن رفتار کلی سیستم براساس معادلات دیرانسیلی کیفی است و روش دوم استنتاج معادلات کیفی از معادلات دیرانسیلی مرسوم است. با توجه به اینکه روش فیزیک کیفی تمام رفتارهای سیستم را بدون داشتن مدل ریاضی سیستم مشخص می‌کند، می‌تواند روشی کارآمد باشد [۱۹].
- آنالیزهای درخت خطا^{۳۵}: این روش شامل لایه‌هایی از عملگرهای منطقی است تا خطاها را به لایه‌های بالایی منتقل کند. درخت خطا بیشتر برای مبحث قابلیت اطمینان سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۹].

۲-۳-۱-۲- روش‌های تشخیص خطای مبتنی بر مدل کمی

اصول کلی روش‌های تشخیص خطای مبتنی بر مدل کمی تولید سیگنال باقی‌مانده است به طوری که این سیگنال بیانگر اختلاف رفتار فعلی سیستم و رفتاری است که براساس مدل از سیستم انتظار می‌رود. در زمانی که خطا وجود نداشته باشد و سیستم در شرایط عادی کار کند، سیگنال باقی‌مانده باید صفر

³³ Qualitative physics

³⁴ Artificial intelligence

³⁵ Fault tree analysis

باشد که بیانگر این است که خطایی در سیستم رخ نداده است و زمانی که خطایی رخ دهد، اندازه‌ی سیگنال باقی‌مانده باید از صفر بیشتر باشد.

عموما هر زمانی که بحث تشخیص خطای مبتنی بر مدل (کمی) به میان می‌آید مراحل زیر باید اجرا گردند [۲۰].

-طراحی سیستم تولید سیگنال باقی‌مانده به طوری که بتوان تاثیر خطا را در آن مشاهده کرد. با توجه به اینکه اکثر سیستم‌ها در معرض اغتشاشات نامعلوم و نامعینی‌های مدل می‌باشند، این سیگنال نیز تاثیر چنین ورودی‌هایی را در خود خواهد داشت.

-طراحی نوعی ارزیاب مناسب که بر روی سیگنال باقی‌مانده پردازش‌هایی را انجام دهد و حدودی را به عنوان حد آستانه در نظر گیرد.

-سیگنال باقی‌مانده باید طوری طراحی گردد تا از سیگنال خطا تاثیر بسیار بیشتری نسبت به اغتشاش یا نامعینی مدل سازی بپذیرد.

در بحث تشخیص خطا عموماً تمرکز بر روی مرحله اول، یعنی طراحی سیستم تولید سیگنال باقی‌مانده است چرا که دو مرحله بعدی وابستگی مستقیم به این سیگنال دارند و در صورتی که تولیدگر سیگنال باقی‌مانده نامناسب طراحی گردد، باعث تضعیف مستقیم عملکرد سیستم تشخیص خطا می‌گردد.

لذا چنانچه سیستم تولیدکننده سیگنال باقی‌مانده به درستی طراحی شده باشد و همچنین طراحی سیستم ارزیاب برای آشکارسازی خطا نیز بدرستی انجام گرفته باشد، ویژگی‌های زیر محقق می‌گردد [۲۰]:

-پاسخ سریع به خطاها و حتی پیش بینی خطا قبل از وقوع آن.

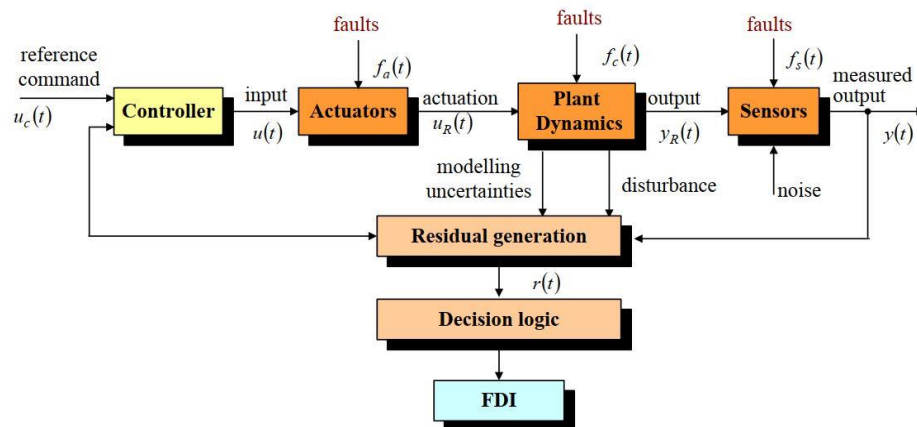
-حساسیت زیاد به خطا و حساسیت کم نسبت به اغتشاشات و نویز و عدم قطعیت‌های مدل سیستم.

-حداقل نمودن هشدارهای اشتباه و هشدارهای فراموش شده.

برای طراحی سیستم تشخیص خطا مبتنی بر مدل در اولین قدم به ایجاد یک مدل ریاضی از سیستم پرداخته می‌شود که معمولاً این مدل به صورت تحقیقی از فضای حالت بیان می‌گردد.

۲-۴- روش های تولید سیگنال باقی مانده

روش های تولید سیگنال باقی مانده که به آنها روش های تشخیص خطای مبتنی بر مدل نیز می‌گویند، به چهار دسته کلی، روش تخمین پارامتر، روش تخمین حالت، روش فضای برابری و روش تخمین همزمان حالت و پارامتر تقسیم می‌شوند که در زیر به توضیح هر یک پرداخته می‌شود.



شکل ۲-۶: روش تشخیص خطا مبتنی بر مدل - تولید سیگنال باقی مانده [۳]

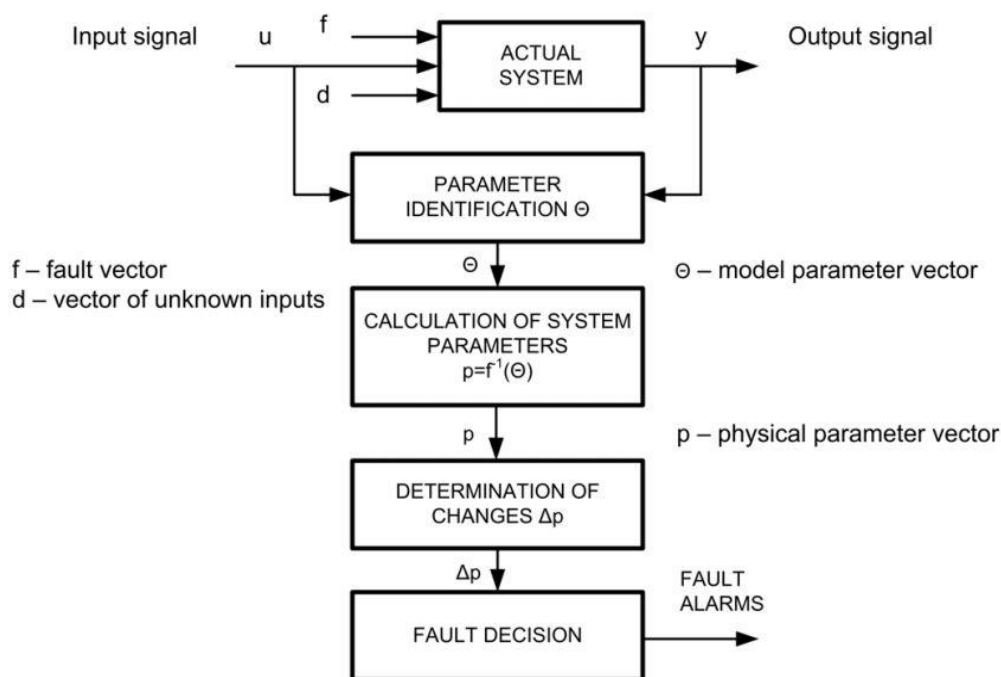
۲-۴-۱- روش تخمین پارامتر

روش تخمین پارامتر بر اساس این فرض بنا شده است که خطاها در پارامترهای فیزیکی سیستم نمود پیدا می‌کنند. ایده اساسی در این روش، تخمین پارامترهای واقعی فرآیند خطا دار به صورت آنلایین با استفاده از روش های تخمین پارامتر است. هر تغییری در پارامترهای سیستم در خروجی های سیستم منعکس خواهد شد و بدین ترتیب بین خروجی های سیستم و خروجی های تخمین زده شده اختلافاتی ایجاد خواهد شد. این اختلافات به سیگنال باقیمانده تعبیر خواهد شد.

بکار بردن روش‌های تخمین پارامتر نیازمند اندازه‌گیری‌های دقیق حالت‌ها و مشتقات آنها است. به عبارت دیگر اندازه‌گیری‌ها نباید دارای نویز باشند.

در مرجع [۲۱] برای شناسایی پارامترهای دینامیکی ربات‌ها روش جدیدی براساس رویکرد خطای خروجی ارائه شده است که در این روش به کمک اندازه‌گیری نیروی فواصل و براساس مدل دینامیکی معکوس ربات که نسبت به پارامترهای دینامیکی خطی است، با استفاده از تکنیک حداقل مربعات پارامترهای سیستم تخمین زده شده است. برای این منظور باید مسیرهایی برای حرکت ربات در نظر گرفت که دینامیک‌های سیستم و همه‌ی پارامترهای سیستم را تحریک کند.

بطور کلی این روش برای سیستم‌هایی که پارامترهای آن دقیقاً مشخص نیست به کار می‌رود. این روش برای تشخیص خطای ضرب شونده بسیار مناسب است [۴]



شکل ۲-۷: روش تخمین پارامتر [۱۵]

۲-۴-۲- روش تخمین حالت (روش مبتنی بر رویتگر)

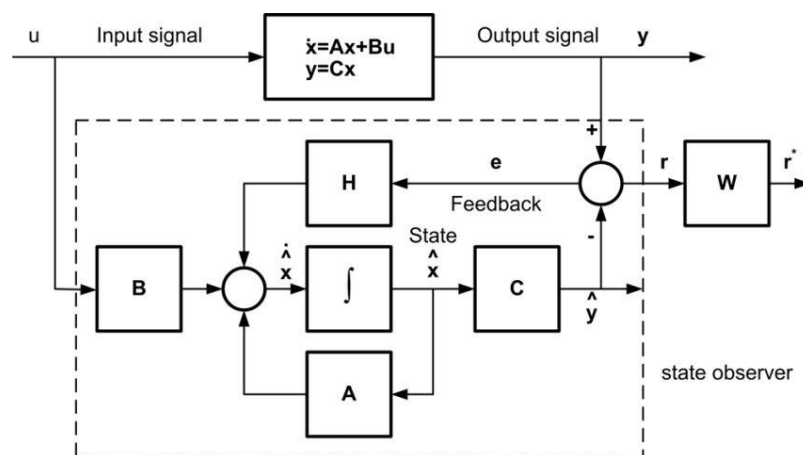
از نظر تئوری روش مبتنی بر رویتگر بیشتر از روش تخمین پارامتر مورد توجه قرار دارد.

در بحث تخمین پارامتر دو رویکرد کلی وجود دارد، تخمین حالت به وسیله رویتگرها و تخمین حالت به وسیله فیلتر کالمن.

یکی از محبوب‌ترین روش‌های تشخیص خطا، استفاده از رویتگرها می‌باشد که این رویتگرها می‌توانند انواع مختلف و متنوعی داشته باشند، برای مثال می‌توان به رویتگرهای ورودی ناشناخته، رویتگر مد لغزشی، رویتگر تطبیقی، رویتگر با بهره بالا^{۳۶} اشاره نمود.

روش رویتگر حالت رویکردی است که بر اساس این فرض بنا شده است که خطاها در حالت‌های سیستم نمود پیدا می‌کنند. روش کار به این صورت است که حالت‌های سیستم واقعی بدون خطا را به صورت آنلاین به کمک روش‌های رویتگر حالت، تخمین می‌زنند. هر تغییری در حالت‌های سیستم منجر به انحراف بین حالت‌های سیستم و تخمین‌های آن‌ها خواهد شد.

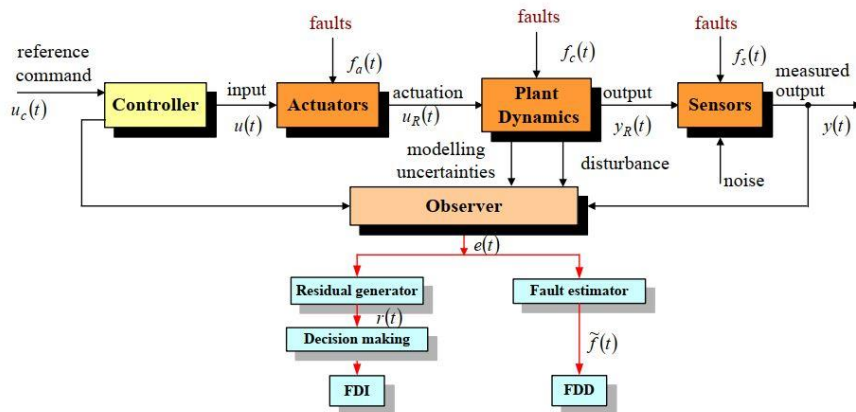
با توجه به اینکه رویتگرها به مدل دقیق سیستم نیاز دارند و به این علت که این مدل در دسترس نیست طراحی مقاوم برای رویتگرهای تشخیص خطا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.



شکل ۸-۲: روش رویتگر حالت [۱۵]

³⁶ High-gain observer

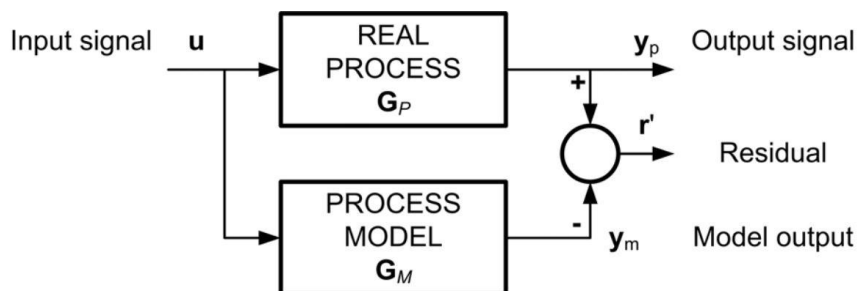
همانطور که در شکل (۲-۹) مشخص است، برخی از رویتگرها فقط توانایی تخمین حالت های سیستم را دارند در صورتی که برخی دیگر توانایی تخمین و بازسازی خطای وارد شده بر سیستم را نیز دارند:



شکل ۲-۹: تشخیص خطای مبتنی بر رویتگر [۳]

۲-۴-۳- روش فضای برابری

همانطور که در شکل (۲-۱۰) نشان داده شده است، روش معادلات برابری روشی ساده و مستقیم برای تولید سیگنال باقی مانده است. با وجود اینکه روش مبتنی بر معادلات برابری از لحاظ محاسباتی یکی از ساده ترین روش ها است اما به دلیل استفاده از پارامترهای دقیق مدل که باید شناخته شده و ثابت باشند، عملاً سیستم تشخیص خطا در برابر اغتشاشات و عدم قطعیت های مدل سازی ضعیف عمل خواهد کرد. برای غلبه بر این مشکل باید از معادلات برابری مقاوم استفاده گردد. روش معادلات برابری برای تشخیص و جداسازی خطاهای جمع شونده بسیار مناسب است [۴].



شکل ۲-۱۰: روش معادلات برابری [۱۵]

۲-۴-۴- روش تخمین همزمان حالت و پارامتر

استفاده از روش تخمین همزمان حالت و پارامترهای سیستم یکی از روش‌های جدید در حوزه تشخیص خطای مبتنی بر مدل است. این روش به دلیل توانایی در شناسایی خطاهای محرک، سنسور، سرعت بالا در تشخیص خطا، مورد توجه قرار گرفته است. از جمله پژوهش‌هایی که در این حوزه انجام گرفته می‌توان به [۲۲] اشاره کرد.

۲-۵- مساله مقاوم بودن روش تشخیص خطای مبتنی بر مدل

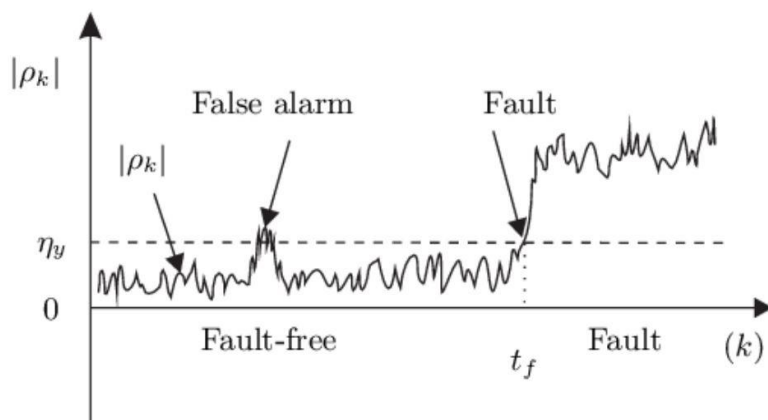
در روش تشخیص خطای مبتنی بر مدل، داشتن مدل دقیق سیستم امری لازم و ضروریست، ولی با توجه به اینکه مدل سازی دقیق سیستم های فیزیکی امری دشوار است و همواره با خطاهای مدل سازی روبرو هستیم و از طرفی سیستم های واقعی همواره در معرض اغتشاشات و نویز های محیط قرار دارند. لذا باید همواره به دنبال روشی بود که سیگنال باقی مانده فقط به خطا حساس باشد نه به عدم قطعیت های مدل یا اغتشاشات.

۲-۶- طراحی آستانه برای سیگنال باقیمانده

روش‌هایی که تا اینجا بررسی گردید صرفاً به جهت تولید سیگنال باقی مانده بود و سیستم تشخیص خطا بوسیله بخش ارزیابی سیگنال باقی مانده، خطا را تشخیص خواهد داد و اخطار های لازم را اعمال خواهد کرد. این سیستم ارزیابی باید طوری طراحی شود که چنانچه سیگنال باقی مانده آلوده به اغتشاشات و یا عدم قطعیت های ناشی از مدل سازی نیز بود، بازهم دچار اخطار اشتباه نگردد. ساده ترین روش برای ارزیابی و تصمیم گیری در مورد وجود خطا استفاده از آستانه باقی مانده یا تابعی از باقی مانده می باشد. به این معنا که برای سیگنال باقی مانده آستانه ای انتخاب می کنیم که چنانچه باقی مانده از این آستانه بیشتر شد اعلام بروز خطا نماید. انتخاب آستانه از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است، به این

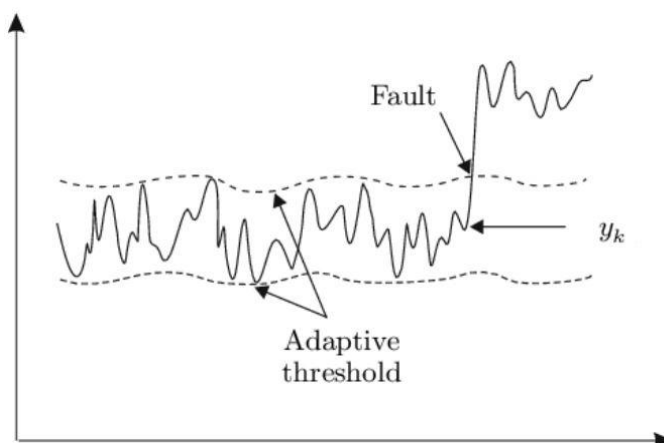
معنا که یک مقدار آستانه کم، حساسیت سیستم تشخیص خطا را به نوبز و نامعینی های مدل سازی زیاد نموده و باعث افزایش نرخ اخطار اشتباه خطا می شود. از طرف دیگر انتخاب آستانه ی بزرگ، منجر به کاهش حساسیت نسبت به خطا شده که ممکن است موجب کاهش سرعت تشخیص خطا گردد که در این صورت باعث کاهش قابلیت اطمینان سیستم خواهد شد.

برای طراحی آستانه تشخیص خطا روش های مختلفی وجود دارد که ساده ترین روش طراحی آستانه ثابت می باشد. هر چند طراحی چنین آستانه ای برای تشخیص خطا از سادگی زیادی برخوردار است ولی اگر در سیستم نامعینی های مدل سازی یا اغتشاشات زیادی داشته باشیم احتمال اینکه اخطار اشتباه رخ دهد زیاد است، حتی اگر آستانه ثابت به دقت طراحی شده باشد. برای نمونه در شکل (۲-۱۱) اغتشاشات یا نامعینی های مدل سازی موجب تغییرات سیگنال باقی مانده شده است که با انتخاب آستانه نادرست این اغتشاشات به عنوان خطا دیده شده اند.



شکل ۲-۱۱: اعلام اخطار اشتباه به دلیل استفاده از آستانه ثابت نامناسب [۲۳]

برای رفع این مشکل میتوان از روشی تحت عنوان طراحی آستانه تطبیقی استفاده نمود به طوری که آستانه تشخیص خطای طراحی شده با توجه به عدم قطعیت های مدل و اغتشاشات، به صورت تطبیقی تغییر می کند تا در عین حال که به سرعت و دقت خطاها را تشخیص می دهد، دچار اخطار اشتباه نیز نگردد.



شکل ۲-۱۲: طراحی آستانه تطبیقی جهت تشخیص خطا [۲۴]

با توجه به اینکه روش تشخیص خطا در این پایان نامه، استفاده از رویکرد برای تخمین خروجی می باشد لذا در ادامه به معرفی و توضیح مختصر در مورد چند رویکرد پرکاربرد در حوزه تشخیص خطا پرداخته می شود.

۲-۷- تشخیص خطای مبتنی بر مدل با استفاده از رویکرد

۲-۷-۱- رویکرد لیونبرگر

یک سیستم خطی تغییر ناپذیر با زمان را به صورت زیر در نظر بگیرید.

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (۱-۲)$$

به طوریکه $x \in \mathcal{R}^n$ و $u \in \mathcal{R}^{n_u}$ و $y \in \mathcal{R}^{n_y}$ به ترتیب بردارهای حالت، ورودی و خروجی سیستم می باشند. A و B و C ماتریس های مدل فضای حالت سیستم هستند و فرض بر آن است که سیستم رویت پذیر باشد. با معلوم بودن مدل سیستم، از یک رویکرد حالت برای بازسازی متغیرهای حالت استفاده می شود.

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + N(y - C\hat{x}) \\ \hat{y} = C\hat{x} \end{cases} \quad (۲-۲)$$

که $\hat{x} \in \mathcal{R}^n$ بردار تخمین زده شده ی حالت ها است و $N \in \mathcal{R}^{n \times n_y}$ بهره رویتگر می باشد. با تعریف خطای تخمین به صورت $e = x - \hat{x}$ معادله دینامیکی خطا به صورت زیر نوشته خواهد شد:

$$\dot{e} = (A - NC)e \quad (3-2)$$

برای اینکه خطای تخمین به سمت صفر میل کند باید مقدار L را طوری انتخاب نمود که مقادیر ویژه های ماتریس $A-NC$ سمت چپ محور موهومی قرار بگیرند [۲۵].

۲-۷-۲- رویتگر اغتشاش

یک سیستم با اغتشاش ثابت به فرم زیر در نظر گرفته می شود:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + B_d d \\ \dot{d} = 0 \\ y = Cx \end{cases} \quad (4-2)$$

که نمایش فضای حالت این سیستم به فرم زیر خواهد بود:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B_d \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u \\ y = [C \quad 0] \begin{bmatrix} x \\ d \end{bmatrix} \end{cases} \quad (5-2)$$

با فرض:

$$z = \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{d} \end{bmatrix}, A_d = \begin{bmatrix} A & B_d \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B_D = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, C_D = [C \quad 0]$$

با جایگذاری دو رابطه اخیر:

$$\begin{cases} \dot{z} = A_d z + B_D u \\ y = C_D z \end{cases} \quad (6-2)$$

حال یک رویتگر مرتبه کامل به صورت زیر را می توان ساخت که N_D بهره رویتگر می باشد.

$$\dot{\hat{z}} = (A_d - N_D C_D) \hat{z} + N_D y + B_D u \quad (7-2)$$

حال فرض می شود که اغتشاش به صورت $\dot{d} = M$ باشد که در آن M متناسب با رتبه دینامیک های اغتشاش است. در این صورت مساله به فرم زیر خواهد بود:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + B_d d \\ \dot{d} = Md \\ y = Cx \end{cases} \quad (8-2)$$

مشابه حالت قبل، نمایش فضای حالت این سیستم به فرم زیر خواهد بود:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{\hat{x}} \\ \dot{\hat{d}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B_d \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{d} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u \\ y = [C \quad 0] \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{d} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (9-2)$$

با فرض:

$$z = \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{d} \end{bmatrix}, A_d = \begin{bmatrix} A & B_d \\ 0 & M \end{bmatrix}, B_D = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, C_D = [C \quad 0]$$

با جایگذاری دو رابطه اخیر:

$$\begin{cases} \dot{z} = A_{DM} z + B_D u \\ y = C_D z \end{cases} \quad (10-2)$$

حال یک رویتگر مرتبه کامل به صورت زیر را می توان ساخت:

$$\dot{\hat{z}} = (A_{DM} - N_{DM} C_D) \hat{z} + N_{DM} y + B_D u \quad (11-2)$$

که N_{DM} بهره رویتگر است که با طراحی مناسب این بهره، رویتگر قادر خواهد بود اغتشاش d را از سیستم اصلی تخمین بزند [۲۶].

۲-۷-۳- رویتگر مدلغزشی

برای اولین بار در دهه ۹۰ میلادی رویتگر مدلغزشی به عنوان روشی برای تشخیص خطا و تولید سیگنال باقی مانده پیشنهاد شد [۲۶]. بعد از آن از رویتگر مدلغزشی برای تخمین و بازسازی خطا استفاده گردید.

یکی از مزیت‌های روش‌های مبتنی بر مد لغزشی این است که نه تنها می‌توان به وسیله آنها عیب‌ها را تشخیص و جداسازی نمود، بلکه می‌تواند از عیب‌های تخمین زده شده برای طراحی مجدد کنترل کننده نیز استفاده نمود.

رویتگر مد لغزشی روشی است که مقاوم بودن سیگنال باقی‌مانده‌ی تولیدی نسبت به اغتشاش را تضمین می‌کند. در این تکنیک که بسیار پرکاربرد و مورد توجه است، از یک ترم غیرخطی و ناپیوسته به جهت برقراری خواسته‌های مساله استفاده می‌گردد.

۲-۷-۴- رویتگر ورودی نامعلوم

در بحث روش‌های تشخیص خطای مقاوم، یکی از روش‌ها استفاده از رویتگرهای ورودی ناشناخته است. یکی از راهکارهایی که در این حوزه استفاده می‌شود استفاده از دکوپله سازی اغتشاشات و عدم قطعیت‌های تخمین می‌باشد.

طراحی رویتگر ورودی نامعلوم مستلزم این است که ماتریس توزیع ورودی نامعلوم شناخته شده باشد. البته نیازی نیست که ورودی نامعلوم واقعی شناخته شده باشد [۲].

برای طراحی تشخیص خطای مبتنی بر رویتگر ورودی نامعلوم به فرم زیر عمل می‌گردد:

ابتدا سیستم خطی نامتغیر با زمان با یک عامل اغتشاش نامعلوم به فرم زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + Ed \\ y = Cx \end{cases} \quad (۱۲-۲)$$

به‌طوری‌که $x \in \mathcal{R}^n$ و $u \in \mathcal{R}^{n_u}$ و $y \in \mathcal{R}^{n_y}$ و $d \in \mathcal{R}^{n_d}$ به ترتیب بردارهای حالت، ورودی معلوم و خروجی سیستم و تابع اسکالر نامعلوم که بیانگر اغتشاش می‌باشند. A و B و C و E ماتریس‌هایی معلوم با ابعاد مناسب هستند.

رویتگر ورودی نامعلوم مرتبه‌ی کامل به فرم زیر بیان می‌گردد:

$$\begin{cases} \dot{z} = Fz + TB_u + Ny \\ \hat{x} = z + Hy \end{cases} \quad (۱۳-۲)$$

به طوریکه $z \in \mathcal{R}^n$ بردار حالت های رویتگر ورودی نامعلوم \hat{x} بردار تخمین زده شده ی حالت های سیستم است. H و T و K و F به گونه ای طراحی می شوند که اثر اغتشاش را از خطای تخمین حالت که به شکل $\dot{e} = x - \hat{x}$ تعریف می شود، جدا نماید.

اگر رویتگر ورودی نامعلوم به سیستم اصلی اعمال شود، خطای تخمین حالت از طریق رابطه زیر بدست خواهد آمد:

$$\dot{e} = [A - HCA - N_1C]e + [F - (A - HCA - N_1C)]z + [N_2 - (A - HCA - N_1C)H]y + [T - (I - HC)]Bu + (HC - 1)Ed \quad (۱۴-۲)$$

به طوری که $N = N_1 + N_2$

برای اینکه رویتگر بدرستی پیاده سازی شود باید روابط زیر برقرار باشد:

$$\begin{aligned} (HC - I)E &= 0 \\ T &= I - HC \end{aligned} \quad (۱۵-۲)$$

$$F = A - HCA - N_1C$$

$$N_2 = FH$$

بنابراین خطای تخمین حالت به فرم زیر خواهد بود:

$$\dot{e} = Fe \quad (۱۶-۲)$$

اگر تمام مقادیر ویژه F پایدار باشد، خطا به سمت صفر همگرا می شود [۲۵].

۲-۷-۵- رویتگر تطبیقی

به دلیل وجود عدم قطعیت در مدل و یا بروز تغییرات در پارامترهای سیستم های عملی، استفاده از رویتگرهای تطبیقی از اهمیت بالایی برخوردار است. استفاده از رویتگر تطبیقی پیشرفته به عنوان روشی

برای تشخیص خطا در دهه ۹۰ میلادی آغاز شد [۲۷] و [۲۸]. این روش توجه بسیاری را به خود جلب کرده و کاربردهای بسیاری در حوزه های مختلف پیدا کرده است [۲۷] و [۲۹] و [۳۰]. رویکرد تطبیقی را می توان به عنوان ترکیبی از روش های مبتنی بر رویکرد و شناسایی پارامتر در نظر گرفت. مزیت این رویکرد تخمین کامل بردار حالت ها و خطا به صورت همزمان است. یکی از روش های تشخیص خطای مبتنی بر رویکرد تطبیقی، استفاده از روش موسوم به رویکرد تطبیقی کلاسیک است که در ادامه به توضیح این روش پرداخته می شود:

سیستم را در شرایطی که خطای محرک در آن رخ داده است مطابق رابطه زیر در نظر گرفته:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + E f_{ac} \\ y = Cx \end{cases} \quad (17-2)$$

به طوری که $x \in \mathcal{R}^n$ بردار حالت و $u \in \mathcal{R}^m$ بردار ورودی و $y \in \mathcal{R}^p$ بردار خروجی و $f_{ac} \in \mathcal{R}^r$ بیانگر خطای محرک است. ماتریس های A, B, C, E ثابت و معلوم هستند و فرض بر رویت پذیر بودن زوج (A, C) است. با توجه به [۳۱] رویکرد تطبیقی به صورت معادله زیر خواهد بود:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + E\hat{f} - N(\hat{y} - y) \\ \hat{y} = C\hat{x} \end{cases} \quad (18-2)$$

که $\hat{x} \in \mathcal{R}^n$ بردار حالت های رویکرد و $y \in \mathcal{R}^p$ بردار خروجی رویکرد و $\hat{f} \in \mathcal{R}^r$ بیانگر تخمین خطای محرک است. N بهره رویکرد است که باید طوری انتخاب شود که $(A - NC)$ پایدار باشد. اختلاف بین مقادیر واقعی و مقادیر تخمین زده شده ی حالت ها به فرم زیر تعریف می گردد:

$$e_x(t) = \hat{x}(t) - x(t), \quad e_y(t) = \hat{y}(t) - y(t), \quad e_f(t) = \hat{f}(t) - f_{ac}(t)$$

دینامیک های خطا به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{cases} \dot{e}_x(t) = (A - NC)e_x(t) + Ee_f(t) \\ e_y(t) = Ce_x(t) \end{cases} \quad (19-2)$$

برای بدست آوردن تخمین خطا و استفاده از آن در معادله رویتگر، رابطه تطبیقی زیر پیشنهاد شده است [۳۱]:

$$\hat{f}(t) = -\Gamma F e_y(t) \quad (20-2)$$

که Γ ماتریسی است مثبت معین و متقارن است که به عنوان ضریب تنظیم برای یادگیری تطبیقی بکار می‌رود و F ماتریسی است که توسط روابط و شرایط زیر بدست می‌آید:

قضیه ۱: اگر ماتریس‌های $P, Q \in \mathcal{R}^{n \times n}$ متقارن و مثبت معین وجود داشته باشند به طوری که در رابطه زیر صدق کنند، آنگاه رویتگر تشخیص خطای طراحی شده تضمین می‌نماید که خطای تخمین حالت‌ها و خطای تخمین خطا (عیب) به سمت صفر میل می‌کنند.

$$P(A - NC) + (A - NC)^T P = -Q \quad (21-2)$$

$$E^T P = FC$$

اثبات قضیه ۱ در مراجع [۲۷] و [۳۰] آورده شده است.

۳- فصل سوم تعریف سیستم

۳-۱-ربات

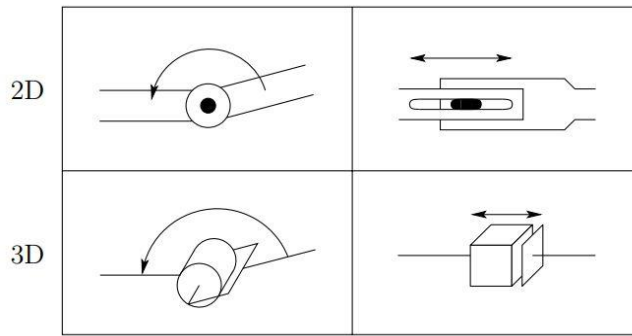
در عصر حاضر استفاده از ربات‌ها به دلیل قابلیت اطمینان و دقت بیشتر و همچنین سرعت انجام وظیفه، به خصوص در مشاغلی که خطرات جدی ای برای نیروی انسانی دارند، گسترش زیادی پیدا کرده است و پیشرفت‌های زیادی در زمینه‌ی توسعه صنعت رباتیک رقم خورده است به طوری که دیگر کمتر صنعتی را می‌توان پیدا کرد که وابسته علم رباتیک نباشد. در اکثر موارد از ربات‌ها به عنوان بازوهای رباتیک در خطوط تولید کارخانه‌ها استفاده می‌کنند، از این رو بررسی و شناخت بازوهای رباتیک از اهمیت بالایی برخوردار است.



شکل ۳-۱: ربات‌های بازویی به نام‌های ABB IRB1400 و Motoman SK16 از چپ به راست [۳۲]

از بازوهای رباتیک برای بهتر انجام دادن وظایفی مانند تحویل و جابجایی اجسام و یا کارهایی مداوم و تکراری مانند مونتاژ، بسته‌بندی، جوشکاری، سوراخ‌کاری، رنگ‌آمیزی، لحیم‌کاری و یا کارهایی که در دسته کارهای سخت و پرمخاطره قرار دارند استفاده می‌شود.

مفصل‌های ربات ارتباط بین بازوهای ربات را شکل می‌دهند. بطور کلی مفصل‌های بکار رفته در ربات‌ها یا از نوع مفصل دوار و لولایی هستند و یا از نوع مفصل کشویی هستند [۳۲] که در شکل (۳-۲) نشان داده شده‌اند.



شکل ۳-۲: مفصل‌های کشویی و لولایی به ترتیب از راست به چپ [۳۲]

در تقسیم‌بندی کلی، ربات‌ها را می‌توان به دو دسته ربات‌صلب و ربات‌انعطاف‌پذیر تقسیم نمود.

عواملی که موجب انعطاف‌پذیری ربات می‌شود، انعطاف‌پذیری مفاصل و یا انعطاف‌پذیری رابط‌ها در بازوی رباتیک است.

هر ربات دارای محرک‌هایی است تا به وسیله آنها بتواند عملی را انجام دهد. نیروی محرکه اکثر بازوهای رباتیک از طریق موتورهای الکتریکی تامین می‌شوند که در این بین استفاده از موتورهای جریان مستقیم از کاربرد بیشتری برخوردار هستند. این موتورها با وجود اینکه سرعت چرخش بالایی دارند ولی به دلیل گشتاور کم، از قدرت کمی برخوردار هستند لذا برای افزایش گشتاور، موتورهای الکتریکی، از سیستم‌های انتقال و تبدیل قدرت مانند تسمه، مجموعه چرخ دنده و یا محورهای بلند استفاده می‌کنند که همین امر موجب به‌وجود آمدن پدیده ای به اسم انعطاف‌پذیری در ربات‌ها می‌گردد. حتی اگر فرض شود که در سیستم رباتیک از چرخ‌دنده و تسمه استفاده نمی‌شود، با توجه به اینکه مواد سختی‌ای محدود دارند و با اعمال نیرو مقداری تغییر شکل می‌دهند و یا در سرعت‌های بالا دچار نوسان می‌شوند، باز هم اثر انعطاف‌پذیری قابل مشاهده است. انعطاف‌پذیری، منبع اصلی نوسانات در ربات‌های صنعتی است [۳۳].

اولین راهکار برای حل مسئله انعطاف مفصل‌های ربات، تغییر در طراحی مکانیکی آنها است، به عنوان مثال چرخ‌دنده‌ها را می‌توان از موادی با سختی بالاتر ساخت. ولی استفاده از این راهکار بسیار محدود است و در بسیاری از موارد بازوهای مکانیکی‌ای که در حال حاضر ساخته شده‌اند را پوشش نمی‌دهد.

راهکار دوم در نظر گرفتن اثر انعطاف در مدل‌سازی دینامیکی است که این مسئله موجب می‌شود که معادلات دینامیکی سیستم ربات از پیچیدگی‌های بیشتری برخوردار شود و کار را برای طراحی سیستم کنترلی یا سیستم تشخیص خطا سخت‌تر از قبل نماید. از طرفی استفاده از روش‌های کنترل ربات صلب، در ربات‌های واقعی که مفاصل انعطاف‌پذیر دارند می‌تواند باعث ناپایداری و یا کاهش عملکرد صحیح سیستم شود، بنابراین در نظر گرفتن اثر انعطاف‌پذیری برای بهبود و تضمین کارایی در طراحی کنترل-کننده و سیستم تشخیص خطا از اهمیت بالایی برخوردار است به طوری که مثلاً می‌توان سیستم تشخیص خطا را به گونه‌ای طراحی نمود که نسبت به نامعینی‌هایی مانند انعطاف‌پذیری ربات مقاوم باشند.

در سال‌های اخیر بیشتر پژوهش‌ها بر روی ربات‌های صلب بوده است و اکثر کنترل‌کننده‌های صنعتی بر مبنای کنترل ربات صلب طراحی شده‌اند. نوع کنترل‌کننده و سیاست کنترلی که برای کنترل ربات در نظر گرفته می‌شود بر اساس نوع اهداف و وظایفی است که از ربات انتظار انجام آنها را داریم. در بعضی از موارد ربات با طی کردن مسیر مورد نظر، وظیفه محوله را انجام می‌دهد، لذا در این شرایط کنترل موقعیت ربات مورد نظر است. در اکثر کاربردهای صنعتی از کنترل موقعیت ربات استفاده می‌شود. برای مثال به جهت جابجایی جسم توسط ربات، ابتدا بازو ربات در مسیر مشخصی به سمت جسم حرکت کرده و سپس با باز کردن گیره یا عملگرهایی جسم را گرفته و سپس با طی کردن مسیر مشخص دیگری جسم را جابجا می‌کند.

تا به امروز اکثر روش‌های کنترل ربات بر مبنای استراتژی کنترل گشتاور مفاصل ربات می‌باشد [۳۴]. در این روش به دلیل استفاده از مدل دینامیکی ربات در قانون کنترل، باعث می‌شود این روش محاسبات پیچیده و زیادی داشته باشد که یکی از عیب‌های آن است. در استفاده از استراتژی کنترل گشتاور اغلب از دینامیک‌های محرکه‌ها، برای طراحی قانون کنترل صرف‌نظر می‌شود. در صورتی که دینامیک محرکه‌ها نقش بسیار مهمی در حرکت‌های سریع، بارهای متغیر، اصطکاک و اشباع محرکه‌ها ایفا

می‌کند [۳۵]. استراتژی کنترل گشتاور شامل محاسبات سنگین و پیچیده برای کارکردن با سیستمی کاملاً غیرخطی، با تزویج زیاد است.

برای حل این مشکل اخیراً کنترل ربات مبتنی بر استراتژی ولتاژ ارائه شده است [۳۶]. در این روش توجه بیشتر بر روی نقش محرک‌های ربات است به گونه‌ای که از مدل محرک‌ها به جای مدل ربات در طراحی قانون کنترل استفاده می‌شود و ربات به عنوان بار خارجی در نظر گرفته می‌شود. در این روش به دلیل استفاده از مدل دینامیکی موتور، طراحی کنترل‌کننده بسیار ساده‌تر از روش مبتنی بر گشتاور است. به این ترتیب کنترل سیستم چند متغیره ربات به آسانی تبدیل به کنترل موتورهای آن می‌شود که با کنترل جداگانه هر مفصل به‌سادگی می‌توان ربات مورد نظر را کنترل کرد.

برای بحث تشخیص خطای محرک ربات، چنانچه از ایده‌ی استراتژی ولتاژ استفاده شود، قطعاً از مزیت‌های این استراتژی بهره‌مند شده و از سادگی و در عین حال عملکرد خوب این روش استفاده خواهد شد.

۳-۲- انواع محرک‌های ربات

محرک‌ها عضوهای اساسی و مهم در ربات‌ها هستند به طوری که بدون وجود آنها ربات معنایی نخواهد داشت. بر اساس اینکه از ربات چه نوع وظیفه‌ای را با چه دقتی و با چه سرعتی و در چه شرایط محیطی‌ای انتظار داشته باشیم، محرک‌های آن متفاوت خواهند بود. آنچه که اهمیت دارد انتخاب درست محرک ربات است که در این خصوص انواع مختلف محرک‌ها با ساختار و مواد تشکیل‌دهنده متفاوت وجود دارند. محرک‌های مورد استفاده در ربات می‌توانند از نوع محرک‌های پنوماتیکی^{۳۷}، هیدرولیکی^{۳۸}،

³⁷ pneumatic

³⁸ hydraulic

الکتریکی^{۳۹}، مغناطیسی^{۴۰}، پیزوالکتریکی^{۴۱}، مواد حافظه دار^{۴۲} و یا از نوع ماده مغناطیس شونده^{۴۳} که ماده‌ای از مواد فرومغناطیسی است که موجب تغییر شکل یا ابعاد آنها در طی فرآیند مغناطیسی می‌شود، باشند [۳۷]. که در این بین با توجه به زمینه این پایان‌نامه و کاربرد زیادی که محرک‌های نوع الکتریکی دارند، صرفاً به بررسی موتورهای الکتریکی به عنوان محرک‌های ربات پرداخته می‌شود.

۳-۳- موتور الکتریکی به عنوان محرک ربات و دلایل خرابی آن

موتور الکتریکی نوعی از ماشین الکتریکی است که الکتریسیته را به حرکت مکانیکی تبدیل می‌کند. بیشتر موتورهای الکتریکی توسط پدیده الکترومغناطیس کار می‌کنند ولی موتورهایی هم هستند که براساس پدیده‌های الکترواستاتیک و یا پیزوالکتریک کارکنند. در حالت کلی ایده اصلی این است که زمانی که ماده حامل جریان الکتریسیته تخت اثر میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، نیرویی بر روی آن ماده از سوی میدان اعمال می‌شود. اغلب موتورهای الکتریکی بصورت گردان طراحی می‌شوند ولی موتورهای خطی هم وجود دارند.

۳-۳-۱- دلایل خرابی موتورهای الکتریکی

عمده خرابی‌هایی که بر روی موتورهای الکتریکی اتفاق می‌افتند را می‌توان به دسته‌های زیر تقسیم‌بندی نمود [۳۸]:

- اتصال کوتاه یا مدار باز شدن یک یا چند سیم پیچ استاتور
- اتصال غیر عادی سیم پیچ‌های استاتور

³⁹ electrical

⁴⁰ magnetic

⁴¹ piezo-electric

⁴² shape memory alloy

⁴³ magnetostrictive

- شکستن نوار روتور یا حلقه های انتهایی روتور^{۴۴}
- بی‌نظمی‌های استاتیک یا دینامیکی فاصله هوایی^{۴۵}
- شفت خمیده^{۴۶} که می‌تواند بین روتور و استاتور ایجاد گردد و باعث آسیب جدی به هسته استاتور و سیم پیچی‌ها می‌گردد
- اتصال کوتاه سیم پیچ روتور
- شکستگی یاتاقان یا جعبه‌دنده‌ها
- این خرابی‌ها می‌توانند باعث بروز مسائل زیر گردند [۳۸]:
- عدم تعادل ولتاژ فاصله هوایی و جریان خط^{۴۷}
- افزایش ارتعاشات گشتاور^{۴۸}
- کاهش گشتاور متوسط
- افزایش تلفات و کاهش بهره‌وری
- ایجاد گرمای بیش از حد

با توجه به نقش حساس موتورهای الکتریکی در ربات‌ها، قطعاً بروز خرابی در این موتورها موجب بروز خطاهای مختلف در ربات می‌شود، این خطاها باید قبل از اینکه موجب بروز خرابی‌های سنگین و اتفاقات خطر آفرین شوند، سریعاً شناسایی شده تا به‌توان تصمیم صحیحی در مورد ربات اتخاذ شود.

در ادامه به مدل‌سازی ربات‌ها با در نظر گرفتن موتور DC به عنوان محرک مفصل‌ها پرداخته می‌شود.

⁴⁴ broken rotor bar or cracked rotor end-rings

⁴⁵ static and/or dynamic air-gap irregularities;

⁴⁶ bent shaft

⁴⁷ unbalanced air-gap voltages and line currents;

⁴⁸ increased torque pulsations

۳-۴- مدل سازی دینامیکی ربات

سیستم‌های رباتیک سیستم‌هایی غیرخطی و پیچیده که دارای تزویج زیاد به همراه عدم قطعیت هستند. در مدل سازی آنها، با هر دقتی که مدل ریاضی تهیه شود باز هم این مدل فقط بخشی از رفتار سیستم واقعی را می‌توانند بیان کند و از بیان دقیق تمام دینامیک‌های موجود در سیستم واقعی عاجز خواهد بود. و از طرفی برای ردگیری موقعیت بازوی رباتیک حتما باید نقش عدم قطعیت‌ها را در نظر گرفت.

عدم قطعیت‌ها به دو دسته عدم قطعیت ساختاری و غیر ساختاری تقسیم می‌شود. عدم قطعیت ساختاری مربوط به پارامترهای سیستم می‌باشد. زمانی که پارامترهای سیستم ثابت و یا با تغییرات بسیار جزئی و نامعلوم تغییر کنند به آن عدم قطعیت ساختاری یا پارامتری گفته می‌شود. در صورتی که اطلاعات دقیقی از دینامیک‌های سیستم در اختیار نباشد و یا مدل سیستم به لحاظ دینامیکی با سیستم واقعی متفاوت باشد، به آن عدم قطعیت غیرساختاری یا دینامیک مدل نشده گفته می‌شود.

انتخاب صحیح مدل‌های ریاضی برای طراحی سیستم‌های کنترلی یا تشخیص خطا مرحله ای حیاتی در توسعه استراتژی‌های کنترلی است. به ویژه برای بازوهای رباتیکی که دارای پیچیدگی‌های بسیاری در دینامیک‌های آن است.

در این بخش ابتدا معادلات دینامیکی ربات ارائه می‌شود. مطالعه دینامیکی به معنی حرکت‌شناسی است و شاخه‌ای از مهندسی مکانیک است که به بحث و مطالعه دلایل حرکت به کمک نیروها و قوانین مربوطه می‌پردازد. یکی از روش‌های کنترل ربات‌ها، به‌منظور حرکت در مسیری مشخص، استفاده از معادله دینامیکی حرکت ربات است که به‌وسیله آن گشتاور محرک را محاسبه می‌کند.

پس از ارائه معادلات دینامیکی ربات، تأثیر دینامیک موتورها را در مدل سازی ربات بررسی کرده و ربات صنعتی مدل سازی می‌شود.

۳-۴-۱- دینامیک ربات

حرکت بازوهای ربات در یک سیستم رباتیک توسط گشتاوری که محرک‌های مفاصل تولید می‌کنند انجام می‌شود. ارتباط میان گشتاور ورودی و تغییرات بازوی رباتیک به وسیله معادلات دینامیکی (معادلات حرکت) ربات بیان می‌شود. برای بدست آوردن معادلات دینامیکی ربات می‌توان از روش‌های گوناگونی همچون روش نیوتن-اوایلر و یا لاگرانژ استفاده کرد. در این بخش با استفاده از روش لاگرانژ که بر پایه انرژی سیستم می‌باشد و معادلات بدون تاثیر نیروهای داخلی از طریق آن استخراج می‌شوند، معادلات دینامیکی ربات بیان می‌گردد. روابط و معادلات دینامیکی که در ادامه بیان می‌شود به کمک مراجع [۳۲] و [۳۹] گردآوری شده است.

به منظور بدست آوردن معادلات حرکت به کمک روش لاگرانژ در ابتدا باید انرژی جنبشی و پتانسیل کل سیستم را محاسبه نمود.

برای رابط i ام انرژی جنبشی بصورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$U_i = \frac{1}{2} m_i V_{c_i}^T V_{c_i} + \frac{1}{2} w_0^{iT} I_0^i w_0^i \quad (۱-۳)$$

که m_i جرم رابط i ام و V_{c_i} بردار سرعت‌های خطی مرکز جرم رابط i ام و w_0^i بردار سرعت زاویه‌ای رابط i ام ربات نسبت به دستگاه مختصات مرجع ثابت و I_0^i ماتریس ممان‌های اینرسی رابط i ام ربات نسبت به دستگاه مختصات متصل به آن است.

انرژی جنبشی در ربات از مجموع انرژی‌های جنبشی تک تک رابط‌های ربات بدست می‌آید:

$$U = \sum_{i=1}^n U_i \quad (۲-۳)$$

انرژی پتانسیل برای رابط i ام برابر خواهد بود با:

$$T_i = m_i g^T P_{c_i} \quad (۳-۳)$$

که در رابطه (۳-۳) بردار گرانش و بردار موقعیت مرکز جرم رابط i ام نسبت به دستگاه ثابت است.

انرژی پتانسیل کل سیستم برابر خواهد بود با:

$$T = \sum_{i=1}^n T_i \quad (۴-۳)$$

حال به تشکیل تابع لاگرانژین ربات پرداخته می‌شود.

لاگرانژین سیستم به صورت اختلاف انرژی جنبشی و پتانسیل تعریف می‌شود:

$$L = U - T \quad (۵-۳)$$

حال با داشتن لاگرانژین سیستم و انتخاب q_i به عنوان مختصه تعمیم یافته i ام سیستم ربات، معادلات

حرکت سیستم به صورت زیر خواهند بود:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \quad i = 1, \dots, n \quad (۶-۳)$$

در معادله اخیر Q_i نیروهای تعمیم یافته متناظر با مختصه تعمیم یافته رابط i ام است که از رابطه زیر

بدست می‌آید:

$$Q_i = \sum_j F_j^T \frac{\partial r_j}{\partial q_i} + \sum_j \tau_j^T \frac{\partial w_j}{\partial q_i} \quad (۷-۳)$$

در رابطه (۷-۳) F_j, τ_j به ترتیب بردارهای نیروی خارجی z ام و موقعیت اثر نیروی خارجی هستند. τ_j

و w_j نیز گشتاور خارجی z ام و سرعت زاویه ای محور اثر گشتاور خارجی هستند.

می‌توان رابطه اخیر را برای ربات با فرض اینکه تنها عامل خارجی ایجاد گشتاور، گشتاور محرک‌های

مفاصل باشند به صورت زیر بازنویسی کرد که معادله کلی دینامیکی ربات حاصل خواهد شد:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i \quad i = 1, \dots, n \quad (۸-۳)$$

که در رابطه (۸-۳) τ بردار گشتاور برای مفاصل است با استفاده از معادلات (۳-۱) تا (۳-۸) و ساده‌سازی روابط، معادله نهایی زیر بدست خواهد آمد:

$$P(q)\ddot{q} + \dot{P}(q)\dot{q} - \frac{1}{2}\dot{q}^T \left(\frac{\partial P(q)}{\partial q} \right) \dot{q} + \frac{\partial T}{\partial q} = \tau \quad (۹-۳)$$

در نهایت، معادله دینامیکی ربات صلب به این صورت نمایش داده می‌شود:

$$P(q)\ddot{q} + E(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \quad (۱۰-۳)$$

که در آن q بردار n بعدی موقعیت مفاصل و $P(q)$ ماتریس $n \times n$ اینرسی ربات و τ بردار گشتاور مفاصل است و $E(q, \dot{q})$ بردار گشتاور کوریولیس و جانب مرکز و $G(q)$ بردار گشتاور گرانشی هستند که به فرم زیر تعریف می‌شوند:

$$E(q, \dot{q}) = \dot{P}(q)\dot{q} - \frac{1}{2}\dot{q}^T \left(\frac{\partial P(q)}{\partial q} \right) \dot{q} \quad (۱۱-۳)$$

$$G(q) = \frac{\partial T}{\partial q} \quad (۱۲-۳)$$

۳-۴-۲- استراتژی کنترل ولتاژ

موتورهای الکتریکی عامل حرکت مفصل‌های ربات هستند، بنابراین مسئله کنترل یا تشخیص خطای ربات را می‌توان به مسئله کنترل موتورهای آن تبدیل نمود. به عبارت دیگر به جای کنترل گشتاور مفصل‌ها می‌توان به کنترل ولتاژ موتورهای مفصل‌ها پرداخت که در این صورت سیگنال تلاش کنترلی ورودی، ولتاژ هر یک از موتورها خواهد بود.

۳-۴-۳- معادلات دینامیکی ربات با در نظر گرفتن حضور محرکه‌ها

در این بخش به بیان معادلات دینامیکی ربات صلب و ربات انعطاف‌پذیر به صورت مجزا پرداخته می‌شود:

۳-۴-۳-۱- معادلات دینامیکی ربات صلب

در این بخش مفصل‌های ربات، صلب در نظر گرفته می‌شوند، بنابراین معادلات دینامیک ربات صلب و گشتاور مورد نیاز هر مفصل توسط موتورها با روابط زیر فراهم خواهد شد [۴۰].

$$P(q)\ddot{q} + E(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau_r - \tau_f(\dot{q}) \quad (۱۳-۳)$$

$$M\ddot{\theta}_m + H\dot{\theta}_m + r\tau_r = \tau_m \quad (۱۴-۳)$$

τ_m بردار گشتاور تولیدی موتورها برای هر مفصل و θ_m بردار زاویه موتورها می‌باشد. M ، H و r ماتریس‌های قطری $n \times n$ به ترتیب از جمع ممان اینرسی‌های روتورها، ثابت میرایی چرخشی و ضریب چرخ‌دنده است که:

$$q = r\theta_m \quad (۱۵-۳)$$

لذا رابطه (۱۳-۳) را می‌توان به شکل زیر باز نویسی کرد:

$$Mr^{-1}\ddot{q} + Hr^{-1}\dot{q} + r\tau_r = \tau_m \quad (۱۶-۳)$$

برای بدست آوردن ولتاژ موتورها به عنوان ورودی کنترلی سیستم باید از معادلات موتور DC مغناطیس دائم به عنوان محرک استفاده کرد که به فرم ماتریسی زیر می‌باشد:

$$RI_a + L\dot{I}_a + K_b r^{-1}\dot{q} + \varphi = V \quad (۱۷-۳)$$

که $V \in R^n$ بردار ولتاژ موتورها، $I_a \in R^n$ بردار جریان آرمیچر و $\dot{\theta}_m \in R^n$ بردار سرعت موتورها است. R ، L و K_b ماتریس‌های قطری $n \times n$ به ترتیب از اندوکتانس آرمیچر، ثابت مقاومت آرمیچر و ثابت ضد محرکه است.

$$K_m I_a = \tau_m \quad (۱۸-۳)$$

رابطه (۱۸-۳) ارتباط بین گشتاور تولیدی موتورها و جریان آرمیچر را نشان می‌دهد. K_m ماتریس $n \times n$ نشان دهنده ضرایب ثابت‌های گشتاور است.

با استفاده از رابطه‌های (۱۳-۳) و (۱۴-۳) و (۱۸-۳)، نمایش فضای حالت ربات به فرم زیر خواهد بود:

$$\dot{x} = f(x) + b(V - \varphi) \quad (۱۹-۳)$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} x_2 \\ (Mr^{-1} + rP(x_1))^{-1}(- (Hr^{-1} + rE(x_1, x_2))x_2 - rg(x_1) + k_mx_3 - r\tau_f(x_2)) \\ -L^{-1}(K_br^{-1}x_2 + Rx_3) \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ L^{-1} \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \\ I_a \end{bmatrix}$$

مدل فضای حالت بدست آمده برای ربات صلب، یک سیستم بسیار غیرخطی است که دارای تزویج زیادی است. همچنین فضای حالت بیان شده به فرم همراه نیست و که البته در صورت نیاز با محاسبات زیاد می‌توان فرم همراه آن را بدست آورد. طراحی سیستم تشخیص خطا برای چنین سیستم غیرخطی - ای کار دشواری است که نیازمند محاسبات سنگینی است. که البته در فصل چهارم به بیان ایده اصلی استراتژی ولتاژ و بهره‌مندی از این استراتژی برای طراحی سیستم تشخیص خطا پرداخته می‌شود.

۳-۴-۲- معادلات دینامیکی ربات انعطاف‌پذیر

در این بخش مفصل‌های ربات انعطاف‌پذیر در نظر گرفته می‌شوند، بنابراین معادلات دینامیک ربات انعطاف‌پذیر و گشتاور مورد نیاز هر مفصل توسط موتورها با روابط زیر فراهم خواهد شد [۴۱].

$$P(q)\ddot{q} + E(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = k(r\theta_m - q) \quad (۲۰-۳)$$

$$M\ddot{\theta}_m + H\dot{\theta}_m + rk(r\theta_m - q) = \tau_m \quad (۲۱-۳)$$

که مانند قبل در آن q بردار n بعدی موقعیت مفاصل و $P(q)$ ماتریس $n \times n$ اینرسی و $E(q, \dot{q})$ بردار گشتاور کوریولیس و جانب مرکز و $G(q)$ بردار گشتاور گرانشی هستند و τ_m بردار گشتاور

تولیدی موتورها برای هر مفصل و θ_m بردار زاویه موتورها می‌باشد. H ، M و r ماتریس های قطری $n \times n$ به ترتیب از جمع ممان اینرسی های روتورها، ثابت میرایی چرخشی و ضریب چرخ دنده است و k ماتریس قطری ضرایب سختی فنرهای مدل کننده انعطاف پذیری در مفاصل است.

برای ساده سازی مدل، هردو ضریب چرخ دنده و ضریب سختی مفاصل ثابت و بردار نیروهای گرانشی، فقط تابعی از موقعیت مفاصل فرض شده است. برای بدست آوردن ولتاژ موتورها به عنوان ورودی کنترلی سیستم باید از معادلات موتور DC مغناطیس دائم به عنوان محرک استفاده کرد که به فرم زیر می‌باشد:

$$RI_a + L\dot{I}_a + K_b\dot{\theta}_m = V \quad (22-3)$$

که $V \in R^n$ بردار ولتاژ موتورها، $I_a \in R^n$ بردار جریان آرمیچر و $\dot{\theta}_m \in R^n$ بردار سرعت موتورها است. R ، L و K_b ماتریس های قطری $n \times n$ به ترتیب از اندوکتانس آرمیچر، ثابت مقاومت آرمیچر و ثابت ضد محرکه است.

بردار گشتاور τ_m ، توسط بردار جریان موتور به صورت زیر بدست می‌آید:

$$K_m I_a = \tau_m \quad (23-3)$$

که K_m ماتریس قطری از ثابت گشتاور است.

روابط اخیر یک سیستم دینامیکی را تشکیل می‌دهد. ولتاژ V به عنوان ورودی و بردار زاویه مفاصل، q ، به عنوان خروجی سیستم می‌باشد. فرم فضای حالت سیستم به صورت خواهد بود:

$$\dot{x} = f(x) + b(V) \quad (24-3)$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} x_2 \\ P^{-1}(x_1)(-g(x_1) - Kx_1 - E(x_1, x_2)x_2 + Krx_3) \\ x_4 \\ M^{-1}(rKx_1 - r^2Kx_3 - Bx_4 + K_mx_5) \\ -L^{-1}(K_b x_4 + Rx_5) \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ L^{-1} \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \\ \theta_m \\ \dot{\theta}_m \\ I_a \end{bmatrix}$$

مدل فضای حالت بدست آمده برای ربات انعطاف پذیر، یک سیستم بسیار غیرخطی است که دارای تزویج زیادی است. همچنین فضای حالت بیان شده به فرم همراه نیست و که البته در صورت نیاز با محاسبات زیاد می توان فرم همراه آن را بدست آورد. طراحی سیستم تشخیص خطا برای چنین سیستم غیرخطی ای کار دشواری است که نیازمند محاسبات سنگینی است. که البته در فصل چهارم به بیان ایده استراتژی ولتاژ و بهره مندی از این استراتژی برای طراحی سیستم تشخیص خطا پرداخته می شود.

لازم به ذکر است که مدل های دینامیکی ربات هایی که بدست آورده شد بیانگر رفتار دینامیکی اکثر ربات ها اعم از ربات های بازویی صنعتی و ربات های بازویی توان بخش می باشد [۴۳] و [۴۲].

۳-۴-۴- مدل سازی دینامیکی ربات های بازویی دولینکی و سه لینکی

باتوجه به معادله دینامیکی (۳-۱۰)، ماتریس های $E(q, \dot{q})$ و $P(q)\ddot{q}$ برای هر یک از ربات های دو و سه لینکی به شکل زیر محاسبه می گردند:

۳-۴-۴-۱- ربات دولینکی

ماتریس متقارن ممان اینرسی فضای مفصلی $(P(q))$ بردار گشتاورهای کوریولیس و جانب مرکز $(E(q, \dot{q})\dot{q})$ بردار توصیف کننده نیروهای گرانشی $(G(q))$ باتوجه به مرجع [44] برای ربات دولینکی به صورت زیر خواهند بود:

$$P(q) = \begin{bmatrix} m_1 l_{c1} + m_2(l_1^2 + l_{c1}^2 + 2l_1 l_{c2} \cos(q_2)) + I_1 + I_2 & m_2(l_{c2}^2 + l_1 l_{c2} \cos(q_2)) + I_2 \\ m_2(l_{c2}^2 + l_1 l_{c2} \cos(q_2)) + I_2 & m_2 l_{c2}^2 + I_2 \end{bmatrix},$$

$$E(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -m_2 l_1 l_{c2} \sin(q_2) & -m_2 l_1 l_{c2} (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \sin(q_2) \\ m_2 l_1 l_{c2} \sin(q_2) & 0 \end{bmatrix},$$

$$G(q) = \begin{bmatrix} (m_1 l_{c1} + m_2 I_1) g \cos(q_1) + m_2 l_{c2} g \cos(q_1 + q_2) \\ m_2 l_{c2} g \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix} \quad (۳-۲۵)$$

که l_i طول لینک، m_i جرم لینک، I_i ممان اینرسی، l_{ci} فاصله مرکز لینک تا مفصل i هستند.

۳-۴-۲- ربات سه‌لینکی

ماتریس متقارن ممان اینرسی فضای مفصلی $(P(q))$ ، بردار گشتاورهای کوریولیس و جانب مرکز

$E(q, \dot{q})\dot{q}$ ، بردار توصیف کننده نیروهای گرانشی $(G(q))$ با استفاده از مرجع [۴۵] برای ربات

سه‌لینکی به صورت زیر خواهند بود:

$$P(q) = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{12} & P_{22} & P_{23} \\ P_{13} & P_{23} & P_{33} \end{bmatrix}, E(q, \dot{q})\dot{q} = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & E_{13} \\ E_{21} & E_{22} & E_{23} \\ E_{31} & E_{32} & E_{33} \end{bmatrix}, G(q) = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix}, q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \quad (۳-۲۶)$$

و $[x_i \quad y_i \quad z_i]$ مختصات مرکز جرم ربات i ام در دستگاه i ام است که:

$$\begin{aligned} P_{11} &= m_3 a_3 x_3 - 0.5 I x x_2 \cos(2q_2) + I x y_2 \sin(2q_2) + 0.5 m_3 a_2^2 \cos(2q_2) + 0.5 m_3 x_3^2 \cos(2q_3 + 2q_2) + I y y_1 + 0.5 I y y_2 \cos(2q_2) - \\ & m_3 a_3 y_3 \sin(2q_3 + 2q_2) + m_3 a_3 x_3 \cos(2q_3 + 2q_2) + 0.5 I x x_3 + 0.5 m_3 a_3^2 \cos(2q_3 + 2q_2) + m_3 a_3 a_2 \cos(2q_2 + q_3) - \\ & m_3 a_2 y_3 \sin(2q_2 + q_3) - m_3 x_3 y_3 \sin(2q_3 + 2q_2) - m_3 a_2 y_3 \sin(q_3) + m_3 \cos(q_3) a_3 a_2 + m_3 a_2 x_3 \cos(q_3) + 0.5 m_2 x_2^2 + \\ & m_3 a_2 x_3 \cos(2q_2 + q_3) + 0.5 I y y_3 \cos(2q_3 + 2q_2) - 0.5 m_3 y_3^2 \cos(2q_3 + 2q_2) - 0.5 I x x_3 \cos(2q_3 + 2q_2) + 0.5 m_2 y_2^2 + 0.5 m_3 y_3^2 + \\ & 0.5 I y y_2 + I x y_3 \sin(2q_3 + 2q_2) + 0.5 I x x_2 + m_2 z_2^2 + m_1 z_1^2 + m_1 x_1^2 + m_2 a_2 x_2 + 0.5 m_3 a_3^2 + m_3 z_3^2 + 0.5 I y y_3 + 0.5 m_3 x_3^2 + 0.5 m_2 a_2^2 + \\ & 0.5 m_3 a_2^2 + 0.5 m_2 x_2^2 \cos(2q_2) - 0.5 m_2 y_2^2 \cos(2q_2) + 0.5 m_2 a_2^2 \cos(2q_2) + m_2 a_2 x_2 \cos(2q_2) - m_2 a_2 y_2 \sin(2q_2) - m_2 x_2 y_2 \sin(2q_2), \\ P_{12} &= I y z_3 \cos(q_3 + q_2) + I x z_3 \sin(q_3 + q_2) - m_3 z_3 a_3 \sin(q_3 + q_2) - m_3 z_3 \sin(q_3 + q_2) x_3 + \sin(q_2) I x z_2 + \\ & \cos(q_2) I y z_2 - m_3 z_3 \cos(q_3 + q_2) y_3 - m_2 z_2 \cos(q_2) y_2 - m_2 z_2 \sin(q_2) x_2 - m_2 z_2 \sin(q_2) a_2 - m_3 z_3 \sin(q_2) a_2, \\ P_{13} &= I y z_3 \cos(q_3 + q_2) + I x z_3 \sin(q_3 + q_2) - m_3 z_3 a_3 \sin(q_3 + q_2) - m_3 z_3 \sin(q_3 + q_2) x_3 - m_3 z_3 \cos(q_3 + q_2) y_3, \\ P_{22} &= I z z_2 + 2 m_3 a_3 x_3 + m_2 x_2^2 + m_2 y_2^2 + m_3 y_3^2 + I z z_3 - 2 m_3 a_2 y_3 \sin(q_3) + 2 m_3 \cos(q_3) a_3 a_2 + 2 m_2 a_2 x_2 + \\ & m_3 a_3^2 + m_3 x_3^2 + 2 m_3 a_2 x_3 \cos(q_3) + m_2 a_2^2 + m_3 a_2^2, \\ P_{23} &= 2 m_3 a_3 x_3 + m_3 y_3^2 + I z z_3 - m_3 a_2 y_3 \sin(q_3) + m_3 \cos(q_3) a_3 a_2 + m_3 a_3^2 + m_3 x_3^2 + m_3 a_2 x_3 \cos(q_3), \\ P_{33} &= 2 m_3 a_3 x_3 + m_3 y_3^2 + I z z_3 + m_3 a_3^2 + m_3 x_3^2, \quad P_{21} = P_{12}, \quad P_{31} = P_{13}, \quad P_{32} = P_{23}, \end{aligned}$$

$$E_{11} = \begin{pmatrix} -m_2 a_2 x_2 \sin(2q_2) - m_2 a_2 y_2 \cos(2q_2) - m_2 x_2 y_2 \cos(2q_2) - m_3 a_3 y_3 \cos(2q_3 + 2q_2) - \\ m_3 a_2 x_3 \sin(2q_2 + q_3) - m_3 x_3 y_3 \cos(2q_2 + 2q_3) - m_3 a_3 x_3 \sin(2q_2 + 2q_3) - m_3 a_2 y_3 \cos(2q_2 + q_3) - \\ m_3 a_3 a_2 \sin(2q_2 + q_3) + 0.5 I x x_3 \sin(2q_2 + 2q_3) - 0.5 I y y_2 \sin(2q_2) + I x y_2 \cos(2q_2) + I x y_3 \cos(2q_2 + 2q_3) - \\ 0.5 m_3 a_2^2 \sin(2q_2) + 0.5 m_2 y_2^2 \sin(2q_2) - 0.5 m_2 a_2^2 \sin(2q_2) - 0.5 m_2 x_2^2 \sin(2q_2) - 0.5 m_3 a_3^2 \sin(2q_3 + 2q_2) + \\ 0.5 m_3 y_3^2 \sin(2q_2 + 2q_3) - 0.5 m_3 x_3^2 \sin(2q_3 + 2q_2) - 0.5 I y y_3 \sin(2q_3 + 2q_2) + 0.5 I x x_2 \sin(2q_2) \end{pmatrix} \dot{q}_2 +$$

$$\begin{pmatrix} -0.5 m_3 a_2 y_3 \cos(q_3) - 0.5 m_3 a_2 x_3 \sin(q_3) - m_3 a_3 y_3 \cos(2q_2 + 2q_3) - 0.5 m_3 a_2 x_3 \sin(2q_2 + q_3) - \\ m_3 x_3 y_3 \cos(2q_2 + 2q_3) - m_3 a_3 x_3 \sin(2q_2 + 2q_3) - 0.5 m_3 a_2 y_3 \cos(2q_2 + q_3) - 0.5 m_3 a_3 a_2 \sin(2q_2 + q_3) - \\ 0.5 m_3 \sin(q_3) a_3 a_2 + 0.5 I x x_3 \sin(2q_2 + 2q_3) + I x y_3 \cos(2q_2 + 2q_3) - 0.5 m_3 a_3^2 \sin(2q_2 + 2q_3) + \\ 0.5 m_3 y_3^2 \sin(2q_2 + 2q_3) - 0.5 m_3 x_3^2 \sin(2q_2 + 2q_3) - 0.5 I y y_3 \sin(2q_2 + 2q_3) \end{pmatrix} \dot{q}_3,$$

$$E_{12} = \begin{pmatrix} -m_2 a_2 x_2 \sin(2q_2) - m_2 a_2 y_2 \cos(2q_2) - m_2 x_2 y_2 \cos(2q_2) - m_3 a_3 y_3 \cos(2q_3 + 2q_2) - \\ m_3 a_2 x_3 \sin(2q_2 + q_3) - m_3 x_3 y_3 \cos(2q_2 + 2q_3) - m_3 a_3 x_3 \sin(2q_2 + 2q_3) - m_3 a_2 y_3 \cos(2q_2 + q_3) - \\ m_3 a_3 a_2 \sin(2q_2 + q_3) + 0.5 I x x_3 \sin(2q_2 + 2q_3) - 0.5 I y y_2 \sin(2q_2) + I x y_2 \cos(2q_2) + I x y_3 \cos(2q_2 + 2q_3) - \\ 0.5 m_3 a_2^2 \sin(2q_2) + 0.5 m_2 y_2^2 \sin(2q_2) - 0.5 m_2 a_2^2 \sin(2q_2) - 0.5 m_2 x_2^2 \sin(2q_2) - 0.5 m_3 a_3^2 \sin(2q_3 + 2q_2) + \\ 0.5 m_3 y_3^2 \sin(2q_2 + 2q_3) - 0.5 m_3 x_3^2 \sin(2q_3 + 2q_2) - 0.5 I y y_3 \sin(2q_3 + 2q_2) + 0.5 I x x_2 \sin(2q_2) \end{pmatrix} \dot{q}_1 +$$

$$\begin{pmatrix} -m_2 z_2 \cos(q_2) x_2 - m_3 z_3 a_3 \cos(q_3 + q_2) - m_3 z_3 \cos(q_3 + q_2) x_3 + m_3 z_3 \sin(q_3 + q_2) y_3 - I y z_3 \sin(q_3 + q_2) + \\ I x z_3 \cos(q_3 + q_2) + m_2 z_2 \sin(q_2) y_2 - m_3 z_3 \cos(q_2) a_2 + \cos(q_2) I x z_2 - \sin(q_2) I y z_2 - m_2 z_2 \cos(q_2) a_2 \end{pmatrix} \dot{q}_2 +$$

$$(-m_3 z_3 a_3 \cos(q_3 + q_2) - m_3 z_3 \cos(q_3 + q_2) x_3 + m_3 z_3 \sin(q_3 + q_2) y_3 - I y z_3 \sin(q_3 + q_2) + I x z_3 \cos(q_3 + q_2)) \dot{q}_3,$$

$$E_{13} = \begin{pmatrix} -0.5 m_3 a_2 y_3 \cos(q_3) - 0.5 m_3 a_2 x_3 \sin(q_3) - m_3 a_3 y_3 \cos(2q_3 + 2q_2) - 0.5 m_3 a_2 x_3 \sin(2q_2 + q_3) - \\ m_3 x_3 y_3 \cos(2q_3 + 2q_2) - m_3 a_3 x_3 \sin(2q_3 + 2q_2) - 0.5 m_3 a_2 y_3 \cos(2q_2 + q_3) - 0.5 m_3 a_3 a_2 \sin(2q_2 + q_3) - \\ 0.5 m_3 \sin(q_3) a_3 a_2 + 0.5 I x x_3 \sin(2q_3 + 2q_2) + I x y_3 \cos(2q_3 + 2q_2) - 0.5 m_3 a_3^2 \sin(2q_3 + 2q_2) + \\ 0.5 m_3 y_3^2 \sin(2q_3 + 2q_2) - 0.5 m_3 x_3^2 \sin(2q_3 + 2q_2) - 0.5 I y y_3 \sin(2q_3 + 2q_2) \end{pmatrix} \dot{q}_1 +$$

$$(-m_3 z_3 a_3 \cos(q_3 + q_2) - m_3 z_3 \cos(q_3 + q_2) x_3 + m_3 z_3 \sin(q_3 + q_2) y_3 - I y z_3 \sin(q_3 + q_2) + I x z_3 \cos(q_3 + q_2)) \dot{q}_2 +$$

$$(-m_3 z_3 a_3 \cos(q_3 + q_2) - m_3 z_3 \cos(q_3 + q_2) x_3 + m_3 z_3 \sin(q_3 + q_2) y_3 - I y z_3 \sin(q_3 + q_2) + I x z_3 \cos(q_3 + q_2)) \dot{q}_3,$$

$$E_{21} = \begin{pmatrix} m_2 a_2 x_2 \sin(2q_2) + m_2 a_2 y_2 \cos(2q_2) + m_2 x_2 y_2 \cos(2q_2) + m_3 a_3 y_3 \cos(2q_2 + 2q_3) + \\ m_3 a_2 x_3 \sin(2q_2 + q_3) + m_3 x_3 y_3 \cos(2q_2 + 2q_3) + m_3 a_3 x_3 \sin(2q_2 + 2q_3) + m_3 a_2 y_3 \cos(2q_2 + q_3) + \\ m_3 a_3 a_2 \sin(2q_2 + q_3) - 0.5 I x x_3 \sin(2q_2 + 2q_3) + 0.5 I y y_2 \sin(2q_2) - I x y_2 \cos(2q_2) - I x y_3 \cos(2q_2 + 2q_3) + \\ 0.5 m_3 a_2^2 \sin(2q_2) - 0.5 m_2 y_2^2 \sin(2q_2) + 0.5 m_2 a_2^2 \sin(2q_2) + 0.5 m_2 x_2^2 \sin(2q_2) + 0.5 m_3 a_3^2 \sin(2q_3 + 2q_2) - \\ 0.5 m_3 y_3^2 \sin(2q_3 + 2q_2) + 0.5 m_3 x_3^2 \sin(2q_3 + 2q_2) + 0.5 I y y_3 \sin(2q_3 + 2q_2) - 0.5 I x x_2 \sin(2q_2) \end{pmatrix} \dot{q}_1,$$

$$E_{22} = (-m_3 \sin(q_3) a_3 a_2 - m_3 a_2 y_3 \cos(q_3) - m_3 a_2 x_3 \sin(q_3)) \dot{q}_3,$$

$$E_{23} = (-m_3 \sin(q_3) a_3 a_2 - m_3 a_2 y_3 \cos(q_3) - m_3 a_2 x_3 \sin(q_3)) \dot{q}_2 + (-m_3 \sin(q_3) a_3 a_2 - m_3 a_2 y_3 \cos(q_3) - m_3 a_2 x_3 \sin(q_3)) \dot{q}_3,$$

$$E_{31} = \begin{pmatrix} 0.5 m_3 a_2 y_3 \cos(q_3) + 0.5 m_3 a_2 x_3 \sin(q_3) + m_3 a_3 y_3 \cos(2q_3 + 2q_2) + 0.5 m_3 a_2 x_3 \sin(2q_2 + q_3) + \\ m_3 x_3 y_3 \cos(2q_3 + 2q_2) + m_3 a_3 x_3 \sin(2q_3 + 2q_2) + 0.5 m_3 a_2 y_3 \cos(2q_2 + q_3) + 0.5 m_3 a_3 a_2 \sin(2q_2 + q_3) + \\ 0.5 m_3 \sin(q_3) a_3 a_2 - 0.5 I x x_3 \sin(2q_3 + 2q_2) - I x y_3 \cos(2q_3 + 2q_2) + 0.5 m_3 a_3^2 \sin(2q_3 + 2q_2) - \\ 0.5 m_3 y_3^2 \sin(2q_3 + 2q_2) + 0.5 m_3 x_3^2 \sin(2q_3 + 2q_2) + 0.5 I y y_3 \sin(2q_3 + 2q_2) \end{pmatrix} \dot{q}_1,$$

$$E_{32} = (m_3 \sin(q_3) a_3 a_2 + m_3 a_2 y_3 \cos(q_3) + m_3 a_2 x_3 \sin(q_3)) \dot{q}_2,$$

$$E_{33} = 0,$$

$$G1 = 0,$$

$$G2 = g \begin{pmatrix} m_2 \cos(q_2) a_2 + m_2 \cos(q_2) x_2 - m_2 \sin(q_2) y_2 + m_3 a_3 \cos(q_3 + q_2) + m_3 \cos(q_2) a_2 + \\ m_3 \cos(q_3 + q_2) x_3 - m_3 \sin(q_3 + q_2) y_3 \end{pmatrix},$$

$$G3 = g m_3 (a_3 \cos(q_3 + q_2) + \cos(q_3 + q_2) x_3 - \sin(q_3 + q_2) y_3).$$

۴ - فصل چهارم

طراحی سیستم تشخیص خطای محرک ربات با
استفاده از رویتر تطبیقی

۴-۱- مقدمه

همانطور که در فصل های گذشته بیان شد، مسئله تشخیص خطای ربات مسئله ی مهمی است. به خصوص اگر ربات در محیط پرخطری باشد که وظایف مهم و حساسی را برعهده داشته باشد، تشخیص به موقع و سریع خطا می تواند باعث جلوگیری بسیاری از هزینه های اقتصادی و زیست محیطی شود.

تشخیص خطای ربات با توجه به معادلات دینامیکی بسیار پیچیده و غیرخطی ربات امری دشوار خواهد بود. ولی همانطور که در فصل گذشته بیان شد، به دلیل استفاده از تکنیک استراتژی ولتاژ، سیستم تشخیص خطا به مراتب ساده تر خواهد بود. این تکنیک روشی است که بیشتر توجه بر روی نقش محرک های ربات دارد، به گونه ای که از مدل محرک ها به جای مدل ربات در طراحی رویتگر، برای تشخیص خطا استفاده می کند و ربات به عنوان بار خارجی در نظر گرفته می شود. در این روش به دلیل استفاده از مدل دینامیکی موتور، طراحی رویتگر بسیار ساده تر از روشی است که رویتگر را بر اساس مدل دینامیکی ربات طراحی می نمود. به این ترتیب تشخیص خطای سیستم چند متغیره ربات به آسانی تبدیل به تشخیص خطای موتورهای آن، درحالتی که بازوهای ربات به عنوان بار خروجی آن لحاظ می شوند خواهد بود که با اعمال سیستم تشخیص خطای جداگانه بر روی هر مفصل به سادگی می توان ربات مورد نظر را تحت نظارت قرار داد.

در ادامه ابتدا به بیان خلاصه ای از مدل دینامیکی ربات و ساده سازی روابط آن بر اساس رویکرد استراتژی ولتاژ پرداخته می شود. سپس به بیان روابط سیستم تشخیص خطای تطبیقی پرداخته خواهد شد.

۴-۲- ساده سازی روابط ربات صلب بر اساس رویکرد استراتژی ولتاژ

پیچیدگی ها و معادلات غیرخطی با تزویج بالا در رابطه (۳-۱۹) که بیانی از فضای حالت ربات صلب است، باعث می شود که طراحی سیستم تشخیص خطا با محاسبات و پیچیدگی های زیادی روبرو شود. آنچه در ادامه مطرح می شود استفاده از ایده استراتژی ولتاژ به منظور دستیابی به مدل دینامیکی

ساده تر خواهد بود. به این صورت که ربات به عنوان بار خارجی بر روی موتورها در نظر گرفته می شود و در واقع تاثیر دینامیک های ربات در جریان آرمیچر موتور هر مفصل لحاظ شده سیستم تشخیص خطا به صورت مجزا برای هر موتور طراحی می شود.

با بازنویسی روابط ربات صلب که در فصل سوم آورده شد خواهیم داشت:

$$P(q)\ddot{q} + E(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + \tau_f(\dot{q}) = \tau_r \quad (1-4)$$

$$Mr^{-1}\ddot{q} + Hr^{-1}\dot{q} + r\tau_r = \tau_m \quad (2-4)$$

$$K_m I_a = \tau_m \quad (3-4)$$

$$\Rightarrow I_a = K_m^{-1}(Mr^{-1}\ddot{q} + Hr^{-1}\dot{q} + r\tau_r) \quad (4-4)$$

$$RI_a + LI_a + K_b r^{-1}\dot{q} + \varphi = V \quad (5-4)$$

با قرار دادن معادله (4-4) در (5-4) :

$$\Rightarrow V = RK_m^{-1}Mr^{-1}\ddot{q} + RK_m^{-1}Hr^{-1}\dot{q} + RK_m^{-1}r\tau_r + LI_a + K_b r^{-1}\dot{q} + \varphi \quad (6-4)$$

$$\Rightarrow V = RK_m^{-1}Mr^{-1}\ddot{q} + (RK_m^{-1}Hr^{-1} + K_b r^{-1})\dot{q} + RK_m^{-1}r\tau_r + LI_a + \varphi$$

با تعریف های زیر معادله (6-4) ساده خواهد شد:

$$a = RK_m^{-1}Mr^{-1}, \quad b = RK_m^{-1}Hr^{-1} + K_b r^{-1}, \quad d = RK_m^{-1}r\tau_r + LI_a + \varphi$$

با تعریف $d = RK_m^{-1}r\tau_r + LI_a$ تاثیر گشتاور ربات بر روی موتور DC به عنوان نامعینی سیستم در نظر گرفته می شود بنابراین خواهیم داشت:

$$V = a\ddot{q} + b\dot{q} + d \quad (7-4)$$

$$\Rightarrow \ddot{q} = a^{-1}(V - b\dot{q} - d)$$

باتعریف متغیرهای حالت x_1, x_2 فضای حالت سیستم به این شکل بدست خواهد آمد:

$$X = \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -a^{-1}bx_2 + a^{-1}V - a^{-1}d \end{cases} \Rightarrow \dot{X} = AX + B_1U + B_2d \quad (۸-۴)$$

که A, B_1, B_2 ماتریس های فضای حالت سیستم هستند که به شکل زیر خواهند بود:

$$\begin{cases} A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -a^{-1}b \end{bmatrix} \\ B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ a^{-1} \end{bmatrix} \\ B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ -a^{-1} \end{bmatrix} \end{cases}$$

همانطور که مشاهده می شود استفاده از رویکرد استراتژی ولتاژ باعث می شود مسئله تشخیص خطای ربات به مسئله تشخیص خطای موتورهای آن، درحالتی که بازوهای ربات به عنوان بار خروجی آن لحاظ می شوند تبدیل شود که به مراتب طراحی سیستم تشخیص خطا را ساده تر می نماید.

۴-۳- ساده سازی روابط ربات انعطاف پذیر بر اساس رویکرد استراتژی ولتاژ

به دلیل دشواری های طراحی که در بخش قبل به آن اشاره شد، برای ربات انعطاف پذیر نیز همانند ربات صلب نیاز به مدلی ساده تر برای طراحی سیستم تشخیص خطا وجود دارد بنابراین مطابق با آنچه در بخش قبل بیان شد برای ربات انعطاف پذیر به صورت زیر عمل می گردد.

با بازنویسی روابط ربات انعطاف پذیر که در فصل سوم آورده شد خواهیم داشت:

$$P(q)\ddot{q} + E(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = k(r\theta_m - q) \quad (۹-۴)$$

$$M\ddot{\theta}_m + H\dot{\theta}_m + rk(r\theta_m - q) = \tau_m \quad (۱۰-۴)$$

$$K_m I_a = \tau_m \quad (11-4)$$

$$\Rightarrow I_a = K_m^{-1} (M\ddot{\theta}_m + H\dot{\theta}_m + rk(r\theta_m - q)) \quad (12-4)$$

$$RI_a + LI_a + K_b\dot{\theta}_m + \varphi = V \quad (13-4)$$

با قرار دادن معادله (12-4) در (13-4) :

$$\Rightarrow V = RK_m^{-1}M\ddot{\theta}_m + RK_m^{-1}H\dot{\theta}_m + RK_m^{-1}rk(r\theta_m - q) + LI_a + K_b\dot{\theta}_m + \varphi \quad (14-4)$$

$$\Rightarrow V = RK_m^{-1}M\ddot{\theta}_m + (RK_m^{-1}H + K_b)\dot{\theta}_m + RK_m^{-1}rk(r\theta_m - q) + LI_a + \varphi$$

باتعریف های زیر معادله (14-4) ساده خواهند شد:

$$a = RK_m^{-1}M \quad , \quad b = RK_m^{-1}H + K_b \quad , \quad d = RK_m^{-1}rk(r\theta_m - q) + LI_a + \varphi$$

با تعریف $d = RK_m^{-1}rk(r\theta_m - q) + LI_a + \varphi$ تاثیر گشتاور ربات بر روی موتور DC به عنوان نامعینی

سیستم در نظر گرفته می شود بنابراین خواهیم داشت:

$$V = a\ddot{\theta}_m + b\dot{\theta}_m + d \quad (15-4)$$

$$\Rightarrow \ddot{\theta}_m = a^{-1}(V - b\dot{\theta}_m - d)$$

باتعریف متغیر های حالت x_1, x_2 فضای حالت سیستم به این شکل بدست خواهد آمد:

$$X = \begin{bmatrix} \theta_m \\ \dot{\theta}_m \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -a^{-1}bx_2 + a^{-1}V - a^{-1}d \end{cases} \Rightarrow \dot{X} = AX + B_1U + B_2d \quad (16-4)$$

که A, B_1, B_2 ماتریس های فضای حالت سیستم هستند که به شکل زیر خواهند بود:

$$\begin{cases} A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -a^{-1}b \end{bmatrix} \\ B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ a^{-1} \end{bmatrix} \\ B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ -a^{-1} \end{bmatrix} \end{cases}$$

همانطور که مشاهده می‌شود با استفاده از رویکرد استراتژی ولتاژ باعث می‌شود مسئله تشخیص خطای ربات به مسئله تشخیص خطای موتورهای آن، درحالتی که بازوهای ربات به عنوان بار خروجی آن لحاظ می‌شوند تبدیل شود که به مراتب طراحی سیستم تشخیص خطا را ساده‌تر می‌نماید.

۴-۴- تشخیص خطای مبتنی بر رویکرد تطبیقی

به دلیل وجود عدم قطعیت و نامعینی مدل سازی در مدلی که ارائه گردید، استفاده از رویکردهای تطبیقی که نسبت به این نامعینی ها مقاوم باشند از اهمیت بالایی برخوردار است. رویکرد تطبیقی را می‌توان به عنوان ترکیبی از روش های مبتنی بر رویکرد و شناسایی پارامتر در نظر گرفت. مزیت این رویکرد تخمین کامل بردار حالت ها و خطا به صورت همزمان است.

در ابتدا به بیان طرحی از رویکرد تطبیقی ساده پرداخته می‌شود و در ادامه به طراحی رویکرد تطبیقی برای سیستم دارای نامعینی مدل سازی پرداخته خواهد شد.

۴-۴-۱- رویکرد تطبیقی بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت های مدل

سیستم را در شرایطی که خطای محرک در آن رخ داده است مطابق رابطه زیر در نظر گرفته [۴۶] و رویکرد تطبیقی برای تشخیص خطای محرک طراحی می‌گردد :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ef_{ac}(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (۱۷-۴)$$

به طوری که $x \in \mathcal{R}^n$ بردار حالت و $u \in \mathcal{R}^m$ بردار ورودی و $y \in \mathcal{R}^p$ بردار خروجی و $f_{ac} \in \mathcal{R}^h$ بیانگر خطای محرک است. ماتریس های A, B, C, E ثابت و معلوم هستند و فرض بر رویت پذیر بودن زوج (A, C) است.

رویتگر تطبیقی به صورت معادله زیر خواهد بود:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + E\hat{f}(t) + N(y(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \end{cases} \quad (18-4)$$

که $\hat{x} \in \mathcal{R}^n$ بردار حالت های رویتگر و $y \in \mathcal{R}^p$ بردار خروجی رویتگر و $\hat{f} \in \mathcal{R}^r$ بیانگر تخمین خطای محرک است. N بهره رویتگر است که باید طوری انتخاب شود که $(A - NC)$ پایدار باشد.

اختلاف بین مقادیر واقعی و مقادیر تخمین زده شده ی حالت ها به فرم زیر تعریف می گردد:

$$\tilde{x}(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (19-4)$$

$$\tilde{y}(t) = y(t) - \hat{y}(t) \quad (20-4)$$

$$\tilde{f}(t) = f_{ac}(t) - \hat{f}(t) \quad (21-4)$$

دینامیک های خطا به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}(t) = (A - NC)\tilde{x}(t) + E\tilde{f}(t) \\ \tilde{y}(t) = C\tilde{x}(t) \end{cases} \quad (22-4)$$

قضیه ۱: اگر ماتریس های $P, Q \in \mathcal{R}^{n \times n}$ متقارن و مثبت معین وجود داشته باشند به طوری که در رابطه زیر صدق کنند، آنگاه رویتگر تشخیص خطای طراحی شده به وسیله قانون تطبیقی که در ادامه تعریف می شود، تضمین می نماید که خطای تخمین حالت ها و خطای تخمین خطا (عیب) به سمت صفر میل می کنند.

$$\begin{cases} P(A - NC) + (A - NC)^T P = -Q \\ E^T P = FC \end{cases} \quad (23-4)$$

ماتریس های K و F ماتریس های انتخابی هستند.

برای بدست آوردن تخمین خطا و استفاده از آن در معادله رویتگر، رابطه تطبیقی زیر پیشنهاد شده است :

$$\dot{\hat{f}}(t) = -\beta F(y(t) - \hat{y}(t)) \quad (24-4)$$

به این معنا که:

$$\hat{f}(t) = -\beta F \int_{t_f}^t (y(t) - \hat{y}(t)) d\tau \quad (25-4)$$

که β به عنوان ضریب تنظیم برای یادگیری تطبیقی بکار می‌رود.

۴-۴-۲- طراحی رویتگر تطبیقی با وجود عدم قطعیت های مدل

سیستم دارای عدم قطعیت های مدل، در شرایطی که خطای محرک در آن رخ داده است مطابق رابطه

زیر در نظر گرفته [۴۶] و رویتگر تطبیقی برای تشخیص خطای محرک طراحی می‌گردد:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + E f_{ac}(t) + Gd(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (26-4)$$

به طوری که $x \in \mathcal{R}^n$ بردار حالت و $u \in \mathcal{R}^m$ بردار ورودی و $y \in \mathcal{R}^p$ بردار خروجی و $f_{ac} \in \mathcal{R}^h$ بیانگر خطای محرک است و $d(t) \in \mathcal{R}^q$ که بیانگر تمام ورودی های ناشناخته سیستم هستند و ماتریس های A, B, C, E, G ثابت و معلوم هستند.

هدف تخمین خطای متغیر با زمان محرک در حضور نامعینی ها و اغتشاشات نامعلوم است. باید سیستم تشخیص خطا طوری طراحی شود که سیگنال باقیمانده نسبت به نامعینی ها مقاوم باشد ولی نسبت به خطا های محرک از حساسیت زیادی برخوردار باشد.

رویتگر تطبیقی به صورت معادله زیر در نظر گرفته خواهد شد:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + E\hat{f}(t) + N(y(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \\ r(t) = Z(y(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{f}(t) = g(t) * r(t) \end{cases} \quad (27-4)$$

که $\hat{x} \in \mathcal{R}^n$ بردار حالت های رویتگر و $y \in \mathcal{R}^p$ بردار خروجی رویتگر و $\hat{f} \in \mathcal{R}^r$ بیانگر تخمین خطای محرک است و $g(t) * r(t)$ کانولوشن سیگنال باقی مانده با پاسخ ضربه فیلتر خطی g است.

ماتریس ثابت Z نیز برای افزایش درجه آزادی طراحی در نظر گرفته شده است. N بهره رویتگر است که باید طوری انتخاب شود که $(A - NC)$ پایدار باشد.

اختلاف بین مقادیر واقعی و مقادیر تخمین زده شده ی حالت ها مجدداً به فرم زیر تعریف می‌گردد:

$$\tilde{x}(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (28-4)$$

$$\tilde{y}(t) = y(t) - \hat{y}(t) \quad (29-4)$$

$$\tilde{f}(t) = f_{ac}(t) - \hat{f}(t) \quad (30-4)$$

دینامیک‌های خطا به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}(t) = (A - NC)\tilde{x}(t) + E\tilde{f}(t) + Gd(t) \\ \tilde{y}(t) = C\tilde{x}(t) \end{cases} \quad (31-4)$$

با توجه به رویتگر تطبیقی ای که پیشنهاد شد، باید دو مرحله زیر انجام گیرد تا سیستم تشخیص خطا پیاده‌سازی گردد:

- ماتریس‌های مناسبی برای N و Z انتخاب شود به طوری که $(A-NC)$ هرویتس باشد و غیر

وابسته به ورودی نامعلوم d و سیگنال باقیمانده r برای زمانهایی که خطایی رخ نداده صفر یا

نزدیک صفر باشد و برای زمانهایی که خطا رخ دهد مخالف صفر شود.

- طراحی قانون تطبیق برای بروزرسانی $\hat{f}(t)$ که $\hat{f}(t)$ خروجی کانولوشن سیگنال باقی مانده

فیلتری است که در ادامه طراحی خواهد شد.

قانون تطبیق در رویتگری که پیشنهاد شد، باید طوری تنظیم شود تا پارامتر تخمین خطا به سرعت به

سمت پارامتر خطای واقعی که بر سیستم اصلی رخ داده است همگرا شود.

لازم به ذکر است که در قوانینی که برای رویتگر استاندارد که در رابطه (۴-۱۷) آمده است، تخمین

خطا، خروجی انتگرالی است که در آن خطای تخمین خروجی $\tilde{y}(t)$ به عنوان ورودی انتگرال در نظر

گرفته شده است. به عبارت دیگر خطای تخمین زده شده از روی انتگرال $\tilde{y}(t)$ بدست می‌آید در صورتی

که مسلماً انتخاب های مختلف دیگری نیز برای مکانیزم تطبیق وجود دارند که می توانند سرعت قانون تطبیق را افزایش داده و باعث تخمین سریع تر خطا شوند.

ایده اصلی استفاده از نوعی فیلتر تناسبی و انتگرالی است به این معنا که قانون تطبیق از نوعی فرایند فیلتری تشکیل می شود:

$$\hat{f}(t) = \{g(t) * F\tilde{y}(t)\} \quad (۳۲-۴)$$

که $g(t)$ بصورت زیر تعریف می شود:

$$g(t) = -(\beta_1\delta(t) + \beta_2u(t)) \quad (۳۳-۴)$$

که در آن F ماتریس معلوم است که قضیه اول فصل بدست می آید و g پاسخ ضربه فیلتر خواهد بود و β_1 و β_2 ماتریس های تنظیم فیلتر هستند که مثبت معین در نظر گرفته می شوند. $\delta(t)$ ضربه دیراک و $u(t)$ تابع پله واحد است.

به عنوان نمونه مانند رابطه زیر می توان برای قانون تطبیق، فیلتر انتگرالی-مشتقی-تناسبی در نظر گرفت :

$$\hat{f} = \beta_1\dot{\tilde{y}}_F + \beta_2\tilde{y}_F + \beta_3\ddot{\tilde{y}}_F \Leftrightarrow \hat{f} = \beta_1\tilde{y}_F + \beta_2\int_{t_f}^t \tilde{y}_F(\xi)d\xi + \beta_3\dot{\tilde{y}}_F \quad (۳۴-۴)$$

که در آن β_1 و β_2 و β_3 ماتریس های تنظیم فیلتر و مثبت معین هستند و \tilde{y}_F به فرم زیر تعریف می شود:

$$\tilde{y}_F = F\tilde{y}$$

لذا با استفاده از قانون تطبیق جدید و انتخاب درست ماتریس های N و Z با توجه به شرایطی که گفته شد میتوان روی تگر تشخیص خطای مناسبی طراحی نمود.

در فصل پنجم از این روی تگر با عنوان "روی تگر تطبیقی اول" یاد می شود.

۴-۴-۳- طراحی رویتگر تطبیقی با قابلیت تخمین پارامتر و عدم قطعیت‌های مدل

سیستم دارای عدم قطعیت‌های مدل مطابق رابطه زیر در نظر گرفته و رویتگر تطبیقی برای تشخیص خطای محرک طراحی می‌گردد [۴۷]:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) + \Phi(t)\psi \\ y(t) = C(t)x(t) \end{cases} \quad (۳۵-۴)$$

به طوریکه $x \in \mathcal{R}^n$ بردار حالت و $u \in \mathcal{R}^m$ بردار ورودی و $y \in \mathcal{R}^p$ بردار خروجی و ψ که بیانگر تمام ورودی‌های ناشناخته سیستم هستند و ماتریس‌های A, B, C, Φ معلوم، پیوسته و یک‌نواخت محدود در زمان هستند.

برای طراحی رویتگر تطبیقی، دو فرض زیر مطابق با مرجع [۴۷] در نظر گرفته می‌شود:

فرض ۱: ماتریس $N(t)$ متغیر با زمان و محدودی وجود داشته باشد به طوری که سیستم زیر به صورت نمایی پایدار گردد:

$$\dot{\eta}(t) = [A(t) - N(t)C(t)]\eta(t) \quad (۳۶-۴)$$

فرض ۲: حل $\Lambda(t)$ از معادله $\dot{\Lambda}(t) = [A(t) - N(t)C(t)]\Lambda(t) + \Phi(t)$ همواره شرط زیر را برقرار کند:

$$\alpha_1 I \leq \int_t^{t+T_1} \Lambda(\tau)^T C^T(\tau) S(\tau) C(\tau) \Lambda(\tau) d\tau \leq \beta_1 I, \quad \forall t \geq t_0 \quad (۳۷-۴)$$

که در آن ماتریس S ماتریسی محدود و مثبت معین است.

تئوری ۱: چنانچه فرض‌های ۱ و ۲ برقرار باشد، آنگاه سیستم زیر، رویتگر نمایی برای سیستم (۳۵-۴) خواهد بود به طوری که به ازای هر شرایط اولیه ای $\hat{x}(t) - x(t)$ و $\hat{\psi}(t) - \psi(t)$ بصورت نمایی به سمت صفر میل می‌نمایند.

رویتگر تطبیقی به صورت معادله زیر خواهد شد:

$$\begin{cases} \dot{\Lambda}(t) = [A(t) - N(t)C(t)]\Lambda(t) + \Phi(t) \\ \dot{\hat{x}}(t) = A(t)\hat{x}(t) + B(t)u(t) + \Phi(t)\hat{\psi}(t) + [N(t) + \Lambda(t)\Gamma\Lambda^T(t)C^T(t)S(t)][y(t) - C(t)\hat{x}(t)] \\ \dot{\hat{\psi}}(t) = \Gamma\Lambda^T(t)C^T(t)S(t)[y(t) - C(t)\hat{x}(t)] \end{cases} \quad (38-4)$$

اثبات تئوری ۱ به طور کامل در مرجع [۴۸] آورده شده است.

برای طراحی رویتگر تطبیقی فوق نیاز به تنظیم پارامتر تطبیق Γ می باشد که این پارامتر براساس مرجع [۴۸] ماتریسی متقارن و مثبت معین در نظر گرفته شده و بر اساس مرجع [۴۹] قانون تطبیق ای مطابق زیر پیشنهاد گردیده است که :

$$\dot{\Gamma}(t) = -\Gamma(t)\Lambda^T(t)C^T(t)S(t)C(t)\Lambda(t)\Gamma(t) + \lambda\Gamma(t) \quad for \lambda > 0 \quad (39-4)$$

همانطور که مشخص است رویتگری که به آن پرداخته شد برای سیستم متغیر با زمان طراحی گردیده است که البته می توان از آن با در نظر گرفتن فرضیاتی، برای سیستم نامتغیر با زمان نیز استفاده نمود؛ همانگونه که در مرجع [۵۰] این رویتگر را برای استفاده در سیستم نامتغیر با زمان تعمیم داده و استفاده نموده است.

در فصل پنجم از این رویتگر با عنوان "رویتگر تطبیقی دوم" یاد می شود.

۵- فصل پنجم

نتایج شبیه‌سازی

۵-۱- تعریف مدل مورد نظر جهت شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی ربات دولینک، به اطلاع از پارامترهای ربات و موتور نیاز می‌باشد که در ادامه این اطلاعات ارائه می‌گردد:

۵-۱-۱- پارامترهای ربات و محرک‌های آن برای ربات دولینکی

پارامترهای ربات دولینکی با توجه به مرجع [۴۴] مطابق با جدول‌های زیر است.

بازو	l	l_c	m	I_i
۱	۱	۰,۵	۱۵	۵
۲	۱	۰,۵	۶	۲

جدول ۵-۱: پارامترهای دینامیکی بازوهای ربات دولینکی

موتورها	K_m	J_m	B_m	$1/r$	R	L_a
۱	۰,۲۶	۰,۰۰۰۲	۰,۰۰۰۸۱	۱۰۷,۸۲۰۰	۱,۶	۰,۰۰۱
۲	۰,۲۶	۰,۰۰۰۲	۰,۰۰۱۳۸	۵۳,۷۰۶۳	۱,۶	۰,۰۰۱

جدول ۵-۲: پارامترهای موتور DC های ربات دولینکی

۵-۱-۲- پارامترهای ربات و محرک‌های آن برای ربات سه‌لینکی

پارامترهای ربات سه‌لینکی با توجه به مرجع [۴۵] مطابق با جدول‌های زیر است.

بازو	θ	d	a	α
۱	θ_1	$d_1 = 0,28$	$\pi/2$	۰
۲	θ_2	0	$a_2 = 0,76$	۰
۳	θ_3	0	$a_3 = 0,93$	۰

جدول ۵-۳: پارامترهای دناویت-هارتنبِگ برای ربات سه‌لینکی

i	x_i	y_i	m_i	Ixx_i	Iyy_i	Izz_i
۱	۰	-۰,۲۲	۱۹	۰,۳۴	۰,۳۶	۰,۳۱
۲	-۰,۵۱	۰	۱۸,۱۸	۰,۱۸	۱,۳۲	۱,۳۱
۳	-۰,۶۷	۰	۱۰,۹۹	۰,۰۷	۰,۹۲	۰,۹۳

جدول ۴-۵: پارامترهای دینامیکی بازوهای ربات سه لینکی

موتورها	K_b	J_m	B_m	r	R_a	L_a
۳ و ۲ و ۱	۰,۲۶	۰,۰۰۰۲	۰,۰۰۱	۰,۰۱	۱,۲۶	۰,۰۰۱

جدول ۵-۵: پارامترهای موتور DC های ربات سه لینکی

همانطور که مشاهده شد پارامترهای ربات و پارامترهای موتور در جدول (۵-۱) تا (۵-۵) آمده است.

برای طراحی سیستم تشخیص خطا، ابتدا باید ربات ها با استفاده از روابط (۳-۱۹) ، (۳-۲۴) و روابط

(۳-۲۵)، (۳-۲۶) در نرم افزار شبیه ساز متلب پیاده سازی شوند. مسیر حرکتی مطلوب که برای هر مفصل

در نظر گرفته شده در جدول زیر آمده است.

	مسیر مطلوب برای مفصل اول	مسیر مطلوب برای مفصل دوم	مسیر مطلوب برای مفصل سوم
ربات دولینکی صلب	$Q_{d1} = \cos(\pi t/5)$	$Q_{d2} = \cos(\pi t/8)$	-
ربات سه لینکی صلب	$Q_{d1} = \cos(\pi t/4)$	$Q_{d2} = \cos(\pi t/8)$	$Q_{d3} = \cos(\pi t/15)$
ربات دو لینکی منعطف	$Q_{d1} = 1 - \cos(\pi t/20)$	$Q_{d2} = 1 - \cos(\pi t/20)$	-

جدول ۵-۶: مسیرهای حرکتی مطلوب ربات ها برای شبیه سازی در متلب

لازم به ذکر است که به جهت محافظت از موتورها، باتوجه به مشخصات الکتریکی آنها، حداکثر ولتاژ

قابل اعمال به موتورها ۴۰ ولت در نظر گرفته شده است.

برای طراحی روی تگر تطبیقی اول، پارامترهای طراحی به شرح زیر است:

P	Q	N	F	β_1	β_2	β_3
$\begin{bmatrix} 36 & 0.1 \\ 0.1 & 5.5 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 21 & 0.2 \\ 0.2 & 4 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.2843 \\ 2.6448 \end{bmatrix}$	36	150	2	5

جدول ۵-۷: پارامترهای طراحی برای روی تگر تطبیقی اول

برای طراحی روبتگر تطبیقی دوم، پارامترهای طراحی به شرح زیر است:

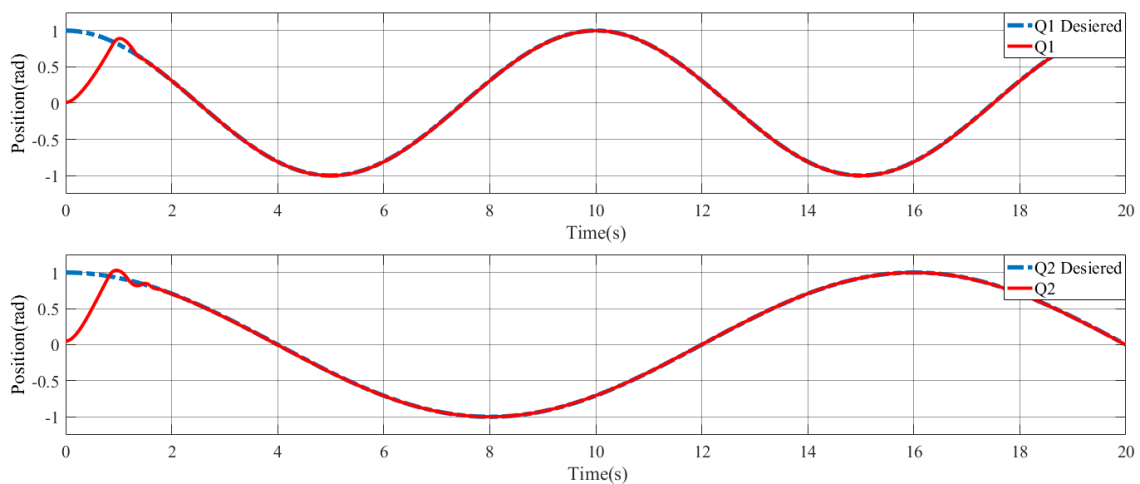
N	S	λ
$\begin{bmatrix} 4 \\ 1 \end{bmatrix}$	5	4

جدول ۵-۸: پارامترهای طراحی برای روبتگر تطبیقی دوم

۵-۲- شبیه‌سازی ربات دولینکی صلب و روبتگر تطبیقی اول

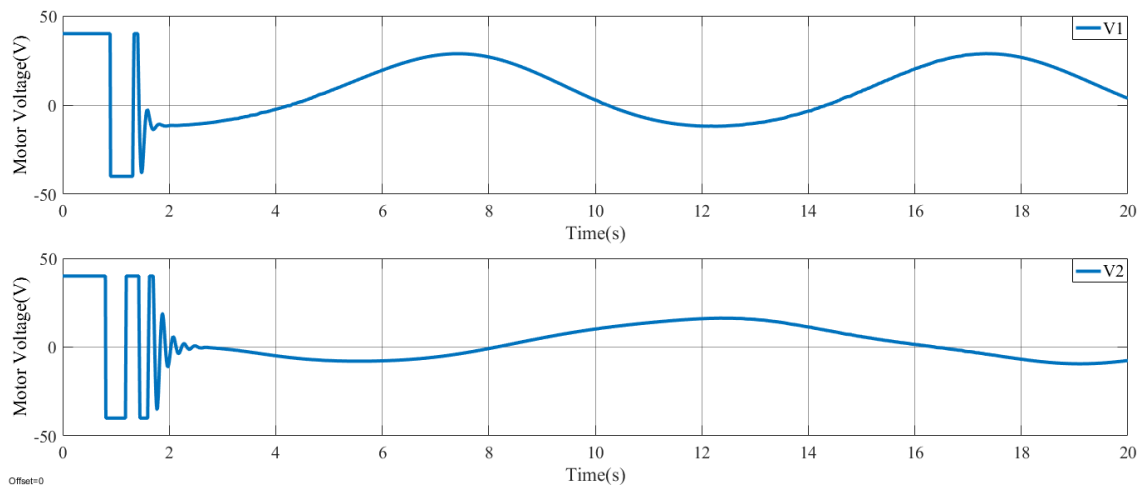
در ابتدا ربات دولینکی، با هدف دنبال کردن مسیر حرکت سینوسی برای هر یک از بازوها شبیه‌سازی می‌گردد، سپس به اعمال خطای محرک در سیستم و مشاهده عملکرد سیستم تشخیص خطا پرداخته می‌شود.

۵-۲-۱- خروجی موقعیت مفصل‌های ربات دولینکی صلب در مقایسه با مسیر مطلوب



شکل ۵-۱: موقعیت مفصل‌های ربات دولینکی صلب در مقایسه با مسیرهای مطلوب

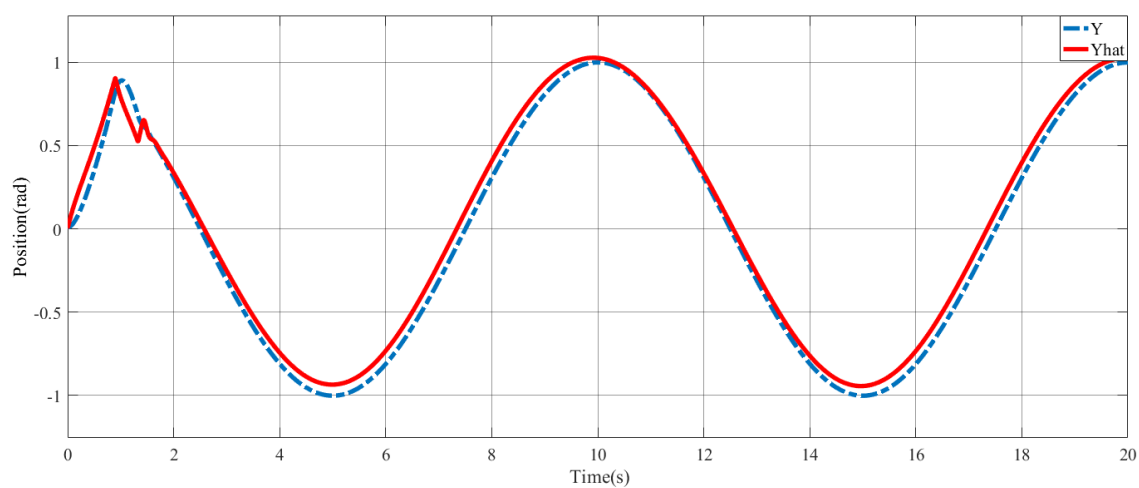
همانطور که از شکل (۵-۱) مشخص است، هر دو بازوی ربات به خوبی مسیر مطلوب را دنبال می‌کنند. ولتاژ اعمالی به هر یک از موتورها به صورت شکل (۵-۲) خواهد بود.



شکل ۲-۵: تلاش کنترلی برای هر یک از موتورهای ربات دولینکی صلب

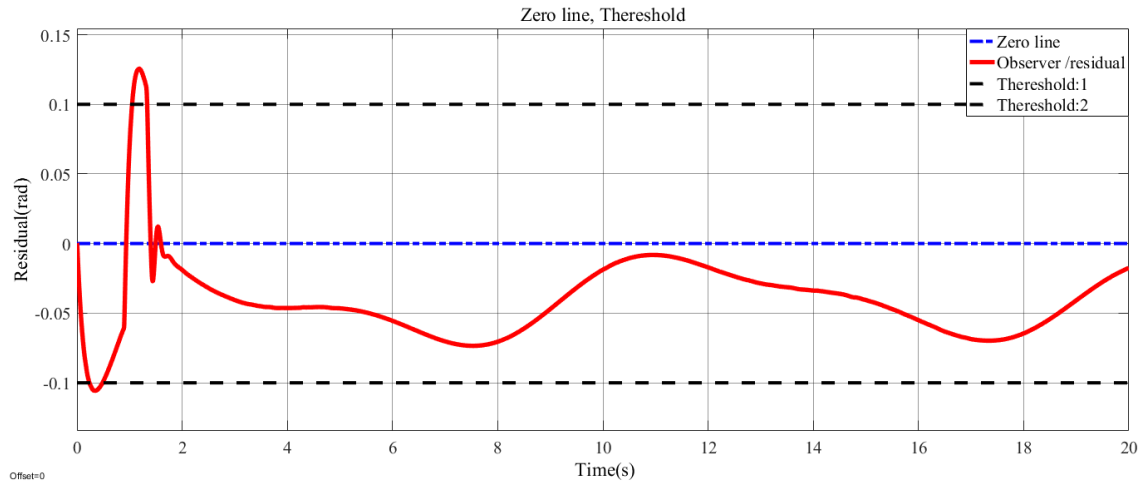
۲-۲-۵- تخمین خروجی سیستم توسط رویتگر تطبیقی اول و تحلیل عملکرد آن

در شکل (۳-۵) خروجی واقعی سیستم در مقایسه با تخمین آن که توسط رویتگر تطبیقی اول بدست آمده است، نشان داده شده است.



شکل ۳-۵: تخمین خروجی سیستم توسط رویتگر تطبیقی اول در مقایسه با خروجی واقعی سیستم ربات دولینک

همانطور که در شکل (۳-۵) مشخص است، رویترگر تطبیقی استفاده شده، مسیر حرکت مفصل را نسبتاً خوب تخمین زده است ولی این تخمین از مقداری خطا برخوردار است که مقدار این خطا را می‌توان از طریق شکل (۴-۵) مشاهده نمود.

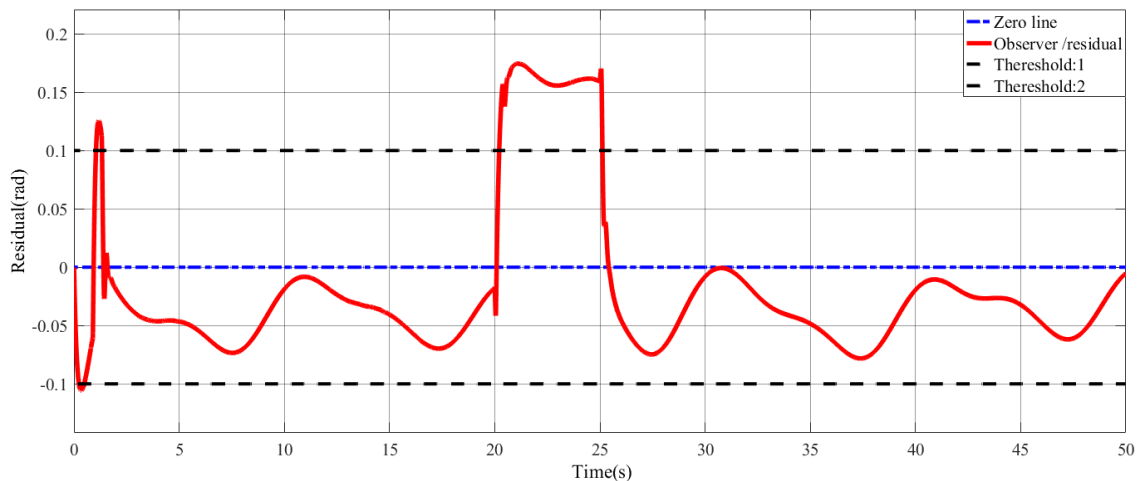


شکل ۴-۵: سیگنال باقی‌مانده رویترگر اول در شرایط عدم حضور خطای محرک در سیستم ربات دولینک

در شکل بالا حدود آستانه ثابتی به منظور اعلام بروز خطا در سیستم در نظر گرفته شده است، به طوریکه سیگنال باقی‌مانده با حدود آستانه مقایسه می‌شود و چنانچه باقیمانده از حدود آستانه عبور کند، هشدار وجود خطا فعال خواهد شد.

۳-۲-۵- اعمال خطای محرک به سیستم

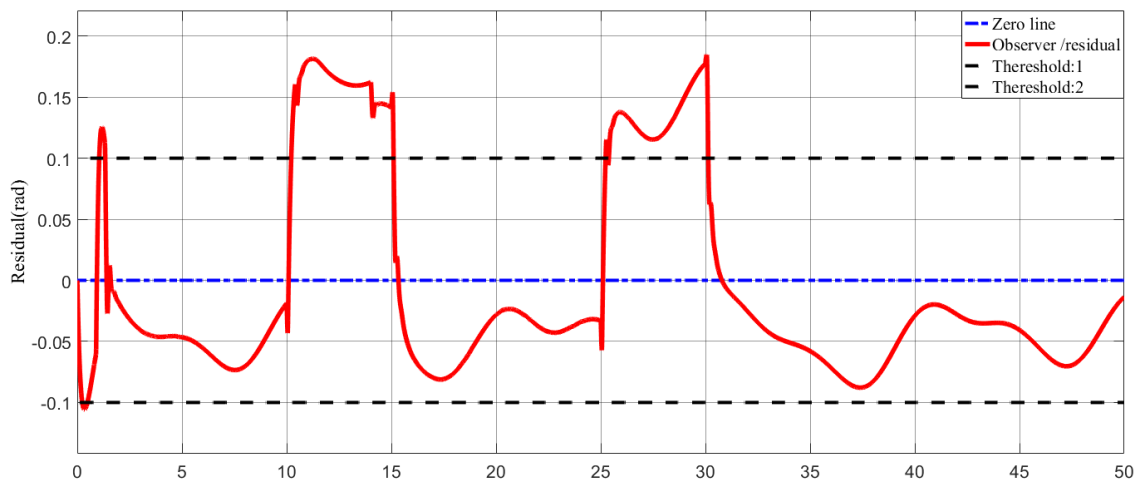
در ادامه خطاهای ناگهانی و متناوب به سیستم اعمال می‌شود و عملکرد سیستم تشخیص خطا مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. با اعمال خطای ناگهانی در لحظه ۲۰ ثانیه به سیستم، سیگنال باقیمانده به صورت شکل زیر خواهد بود.



شکل ۵-۵: سیگنال باقیمانده رویتر اول در حضور خطای ناگهانی محرک در سیستم ربات دولینک

همانطور که از رفتار سیگنال باقیمانده مشخص است، سیستم تشخیص خطا، در بازه زمانی ۲۰ تا ۲۵ ثانیه رخ دادن خطای محرک را تشخیص داده است.

با اعمال خطای متناوب در لحظات ۱۰ و ۲۵ ثانیه به سیستم، سیگنال باقیمانده مطابق شکل (۵-۶) خواهد بود.



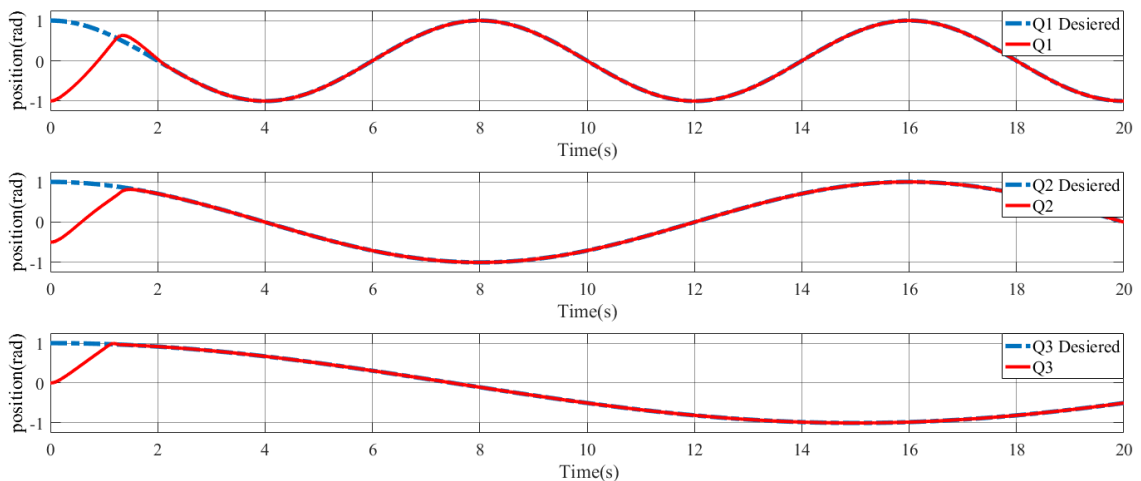
شکل ۵-۶: سیگنال باقیمانده رویتر اول در حضور خطای متناوب محرک در سیستم ربات دولینک

۵-۳- شبیه سازی ربات سه لینکی صلب و رویتگر تطبیقی اول

در این بخش، ابتدا ربات سه لینکی صلب، با هدف دنبال کردن مسیر حرکت سینوسی برای هر یک از بازوها شبیه سازی می گردد و سپس به اعمال خطای محرک در سیستم و مشاهده عملکرد سیستم تشخیص خطا پرداخته می شود.

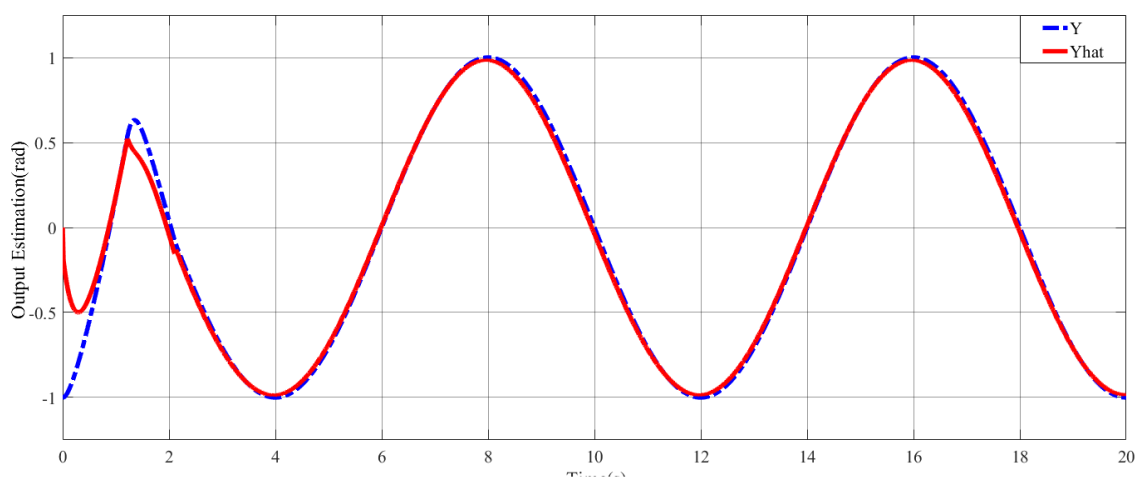
۵-۳-۱- خروجی موقعیت مفصل های ربات سه لینکی صلب

مسیر مطلوب برای هر یک از مفصل های ربات در مقایسه با خروجی واقعی مفصل ها مطابق شکل زیر است:

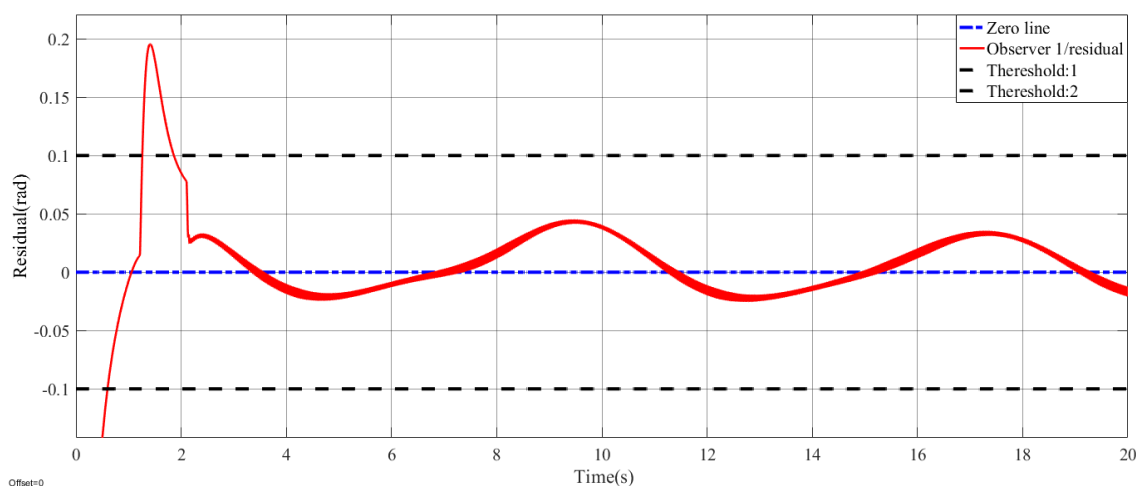


شکل ۵-۷: موقعیت مفصل های ربات سه لینکی صلب در مقایسه با مسیر های مطلوب

۵-۳-۲- تخمین خروجی سیستم توسط رویترگر تطبیقی اول



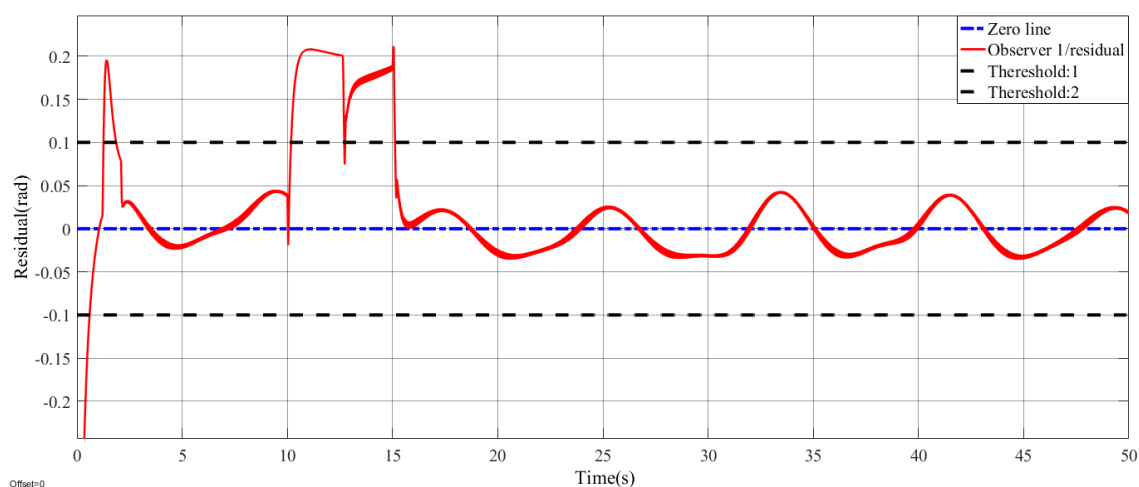
شکل ۵-۸: تخمین خروجی سیستم توسط رویترگر تطبیقی اول در مقایسه با خروجی واقعی سیستم ربات سه لینک همانطور که در شکل (۵-۸) مشاهده می‌شود، رویترگر تطبیقی طراحی شده، موقعیت مفصل ربات را به درستی تخمین زده است. خطای تخمین را می‌توان با بررسی سیگنال باقی‌مانده در شرایط عدم وجود خطای محرک و اغتشاش خارجی، مطابق با شکل (۵-۹) مشاهده نمود.



شکل ۵-۹: سیگنال باقی‌مانده رویترگر اول در شرایط عدم حضور خطای محرک در سیستم ربات سه لینک

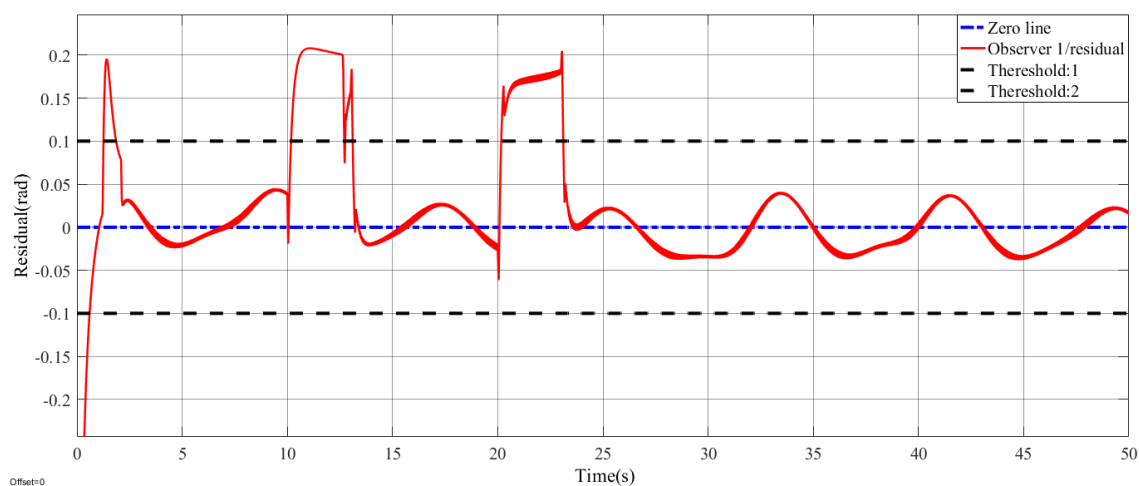
با اعمال خطای ناگهانی به سیستم، سیگنال باقی‌مانده به فرم زیر خواهد بود:

۵-۳-۳- اعمال خطای محرک به سیستم



شکل ۵-۱۰: سیگنال باقی مانده رویتر اول در حضور خطای ناگهانی محرک در سیستم ربات سه لینک

مطابق با شکل بالا، سیگنال باقیمانده به خوبی در مقابل عدم قطعیت‌های مدل‌سازی که برای طراحی رویتر در نظر گرفته شده بود، مقاوم بوده و در عین حال در صورت بروز خطای محرک، حساسیت مناسبی از خود نشان می‌دهد.

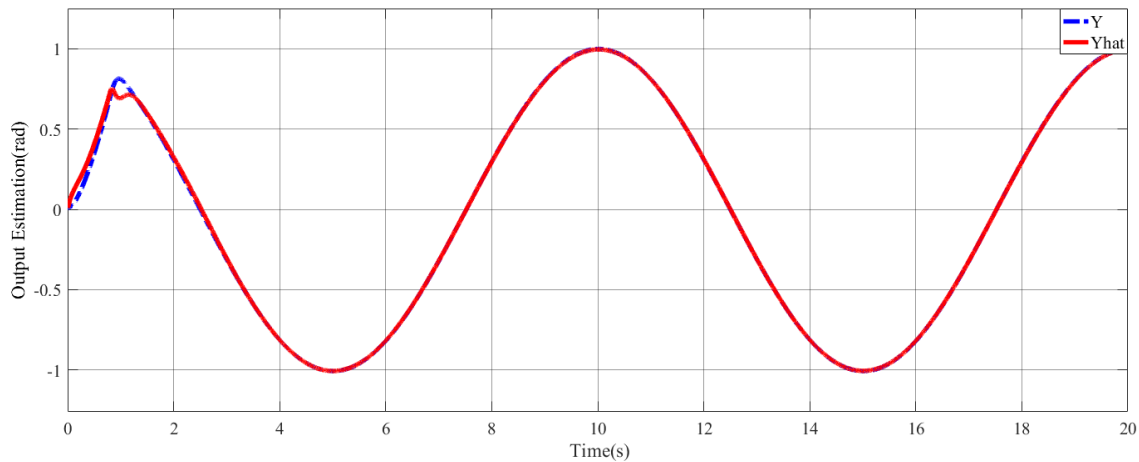


شکل ۵-۱۱: سیگنال باقی مانده رویتر اول در حضور خطای متناوب محرک در سیستم ربات سه لینک

۵-۴- شبیه‌سازی ربات دولینکی صلب و رویتر تطبیقی دوم

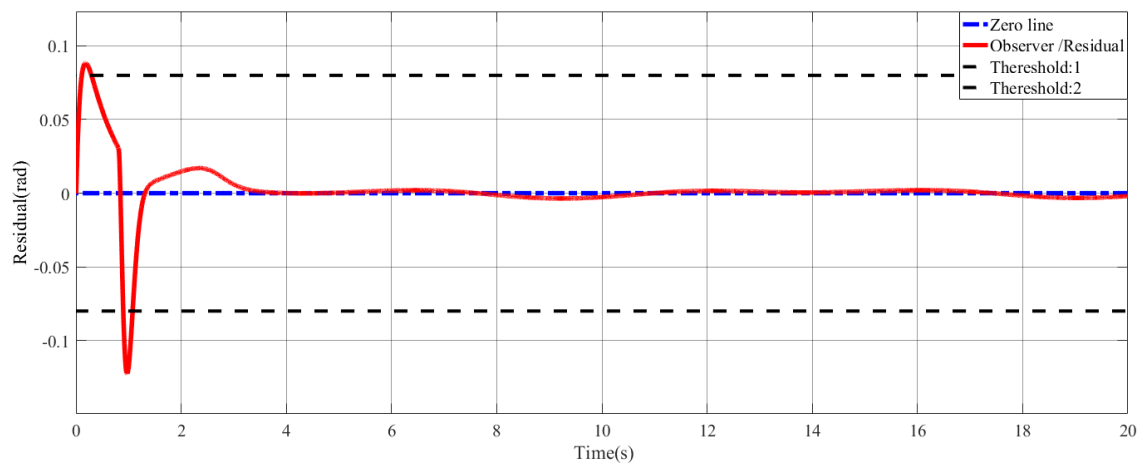
در این بخش به بررسی عملکرد رویتر تطبیقی دوم بر روی سیستم ربات دولینکی صلب پرداخته می‌شود.

۵-۴-۱- تخمین خروجی سیستم توسط رویتر تطبیقی دوم



شکل ۵-۱۲: تخمین خروجی سیستم توسط رویتر تطبیقی دوم در مقایسه با خروجی واقعی سیستم ربات دولینک همانطور که از شکل (۵-۱۲) مشخص است، با استفاده از رویتر تطبیقی دوم، تخمین مناسبی از موقعیت مفصل ربات دو لینکی در اختیار خواهد بود تا به کمک آن به توان سیگنال باقی مانده مقاوم به عدم قطعیت‌های مدل را تولید نمود.

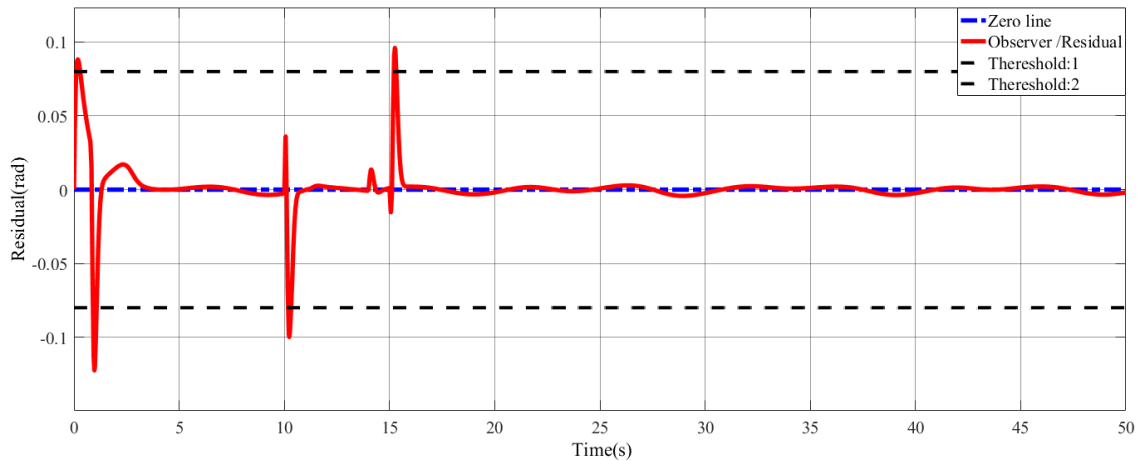
سیگنال باقی مانده تولیدی در شرایط عدم حضور خطا مطابق با شکل زیر خواهد بود.



شکل ۵-۱۳: سیگنال باقی مانده رویتر دوم در شرایط عدم حضور خطای محرک در سیستم ربات دولینک

۵-۴-۲- اعمال خطای محرک به سیستم

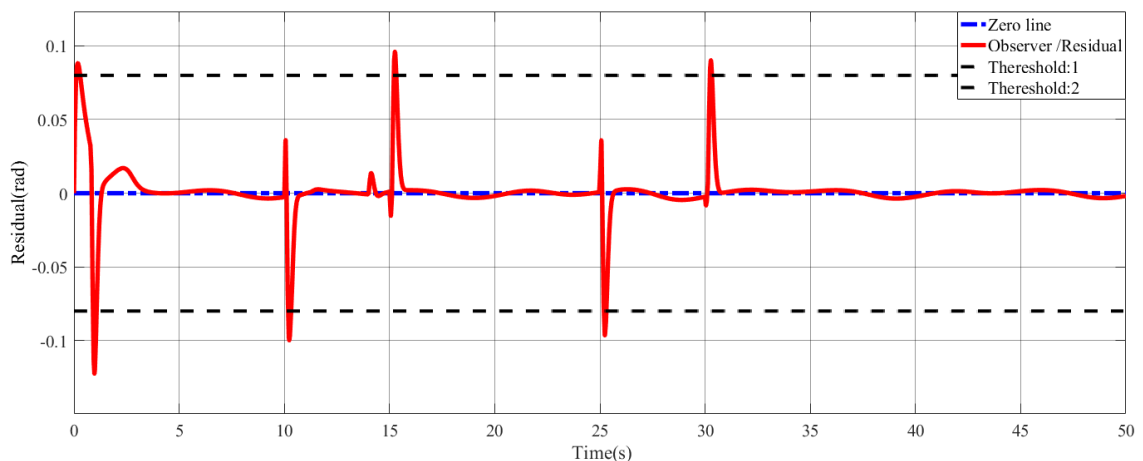
با اعمال خطای ناگهانی به سیستم، سیگنال باقیمانده بصورت زیر خواهد بود.



شکل ۵-۱۴: سیگنال باقی مانده روی تگر دوم در حضور خطای ناگهانی محرک در سیستم ربات دولینک

همانطور که انتظار می رفت، سیگنال باقی مانده به خوبی بر عدم قطعیت های مدل سازی غلبه کرده است و در مقابل نسبت به آشکار سازی خطای محرک، از عملکرد مطلوبی برخوردار است.

همچنین با اعمال خطای متناوب در زمان های ۱۰ و ۲۵ ثانیه، سیگنال باقی مانده به شکل زیر خواهد بود:



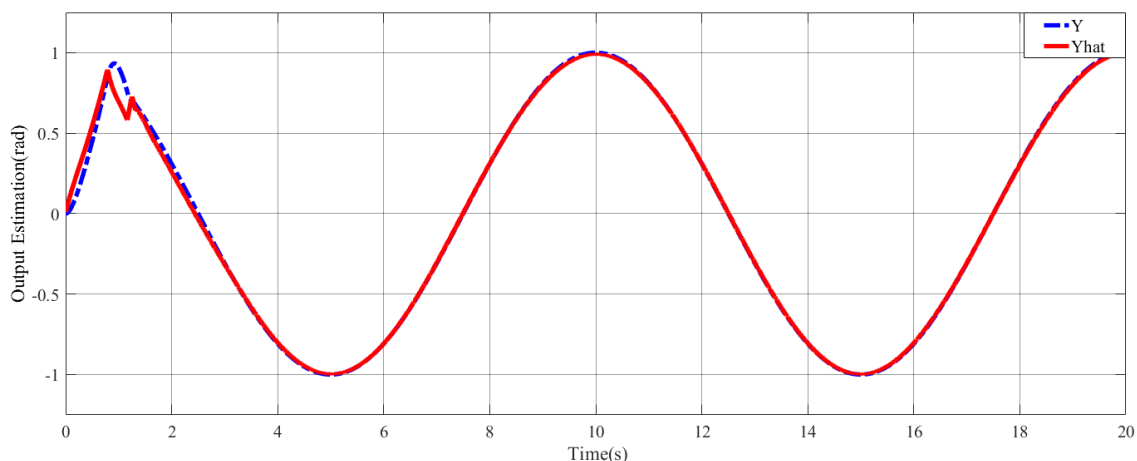
شکل ۵-۱۵: سیگنال باقی مانده روی تگر دوم در حضور خطای متناوب محرک در سیستم ربات دولینک

۵-۵- شبیه‌سازی ربات سه لینکی صلب و رویتگر تطبیقی دوم

۵-۵-۱- تخمین خروجی سیستم توسط رویتگر تطبیقی دوم

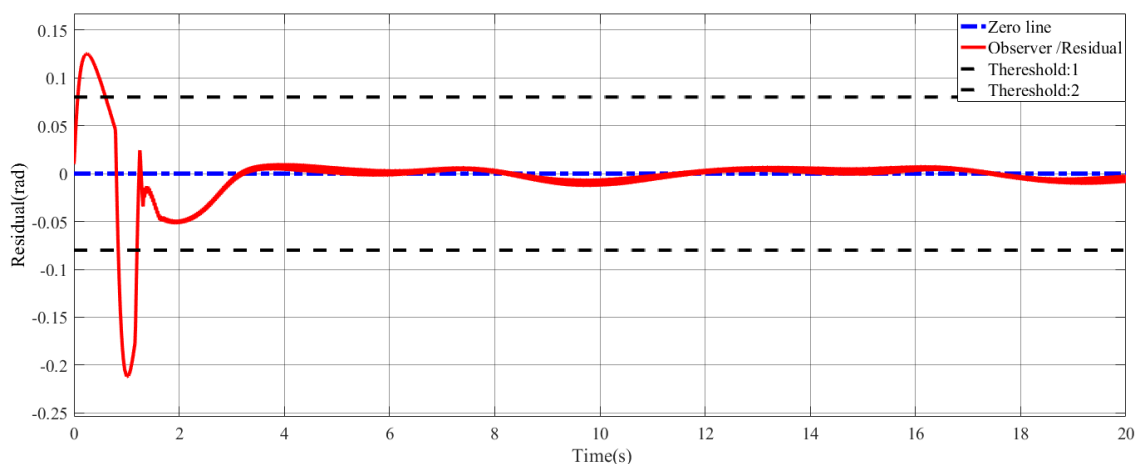
در این بخش به بررسی عملکرد رویتگر تطبیقی دوم به منظور تخمین سیستم ربات پرداخته می‌شود که نتایج شبیه‌سازی بیانگر عملکرد مناسب رویتگر طراحی شده است.

تخمین موقعیت مفصل ربات به عنوان خروجی سیستم مطابق با شکل (۵-۱۶) خواهد بود:



شکل ۵-۱۶: تخمین خروجی سیستم توسط رویتگر تطبیقی دوم در مقایسه با خروجی واقعی سیستم ربات سه لینک

سیگنال باقی‌مانده در شرایط عدم حضور خطا و سیگنال مطابق با شکل زیر خواهد بود.

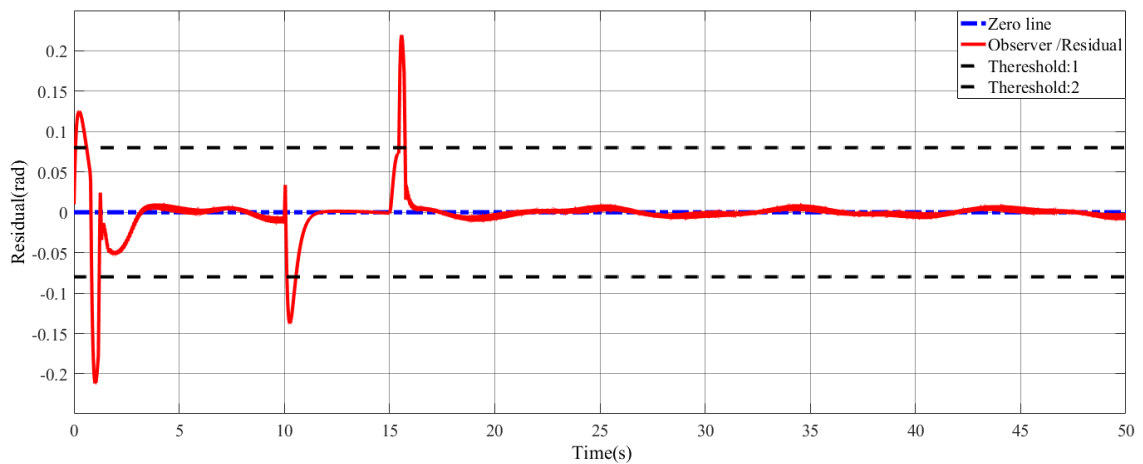


شکل ۵-۱۷: سیگنال باقی‌مانده رویتگر دوم در شرایط عدم حضور خطای محرک در سیستم ربات سه لینک

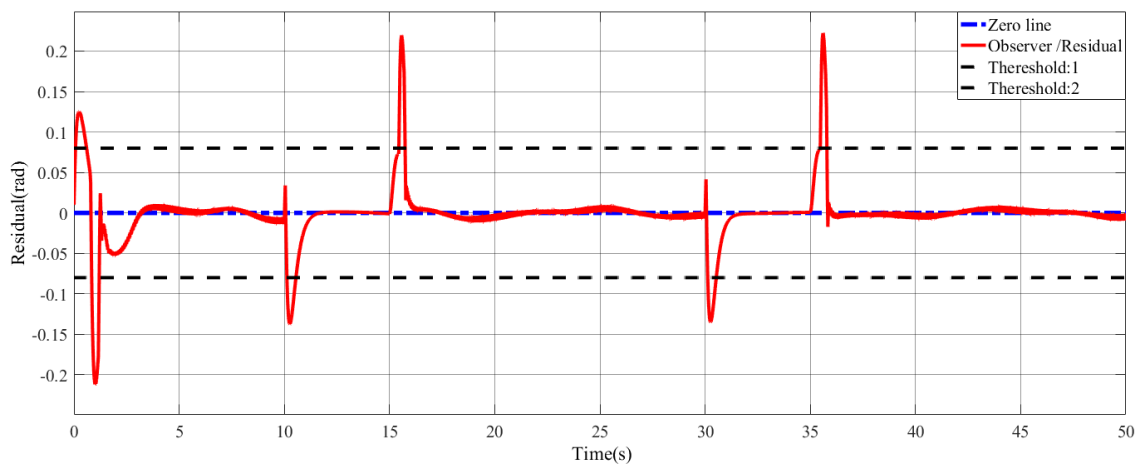
با توجه به شکل (۵-۱۷)، سیگنال باقی مانده تولید شده توسط رویتگر دوم برای سیستم ربات سه لینکی دارای مقداری چترینگ (پدیده وزوز) است که علت این مسئله ضعف سیستم کنترل کننده ربات است که موجب می شود سیگنال کنترلی دارای نوسانات زیادی باشد که این مسئله، روند تخمین را برای رویتگر دوم با مشکل مواجه می کند.

۵-۵-۲- اعمال خطای محرک به سیستم

با اعمال خطای ناگهانی و متناوب به سیستم، سیگنال باقیمانده به صورت شکل های (۵-۱۸) و (۵-۱۹) خواهد بود که بیانگر عملکرد مطلوب و مناسب این رویتگر است.



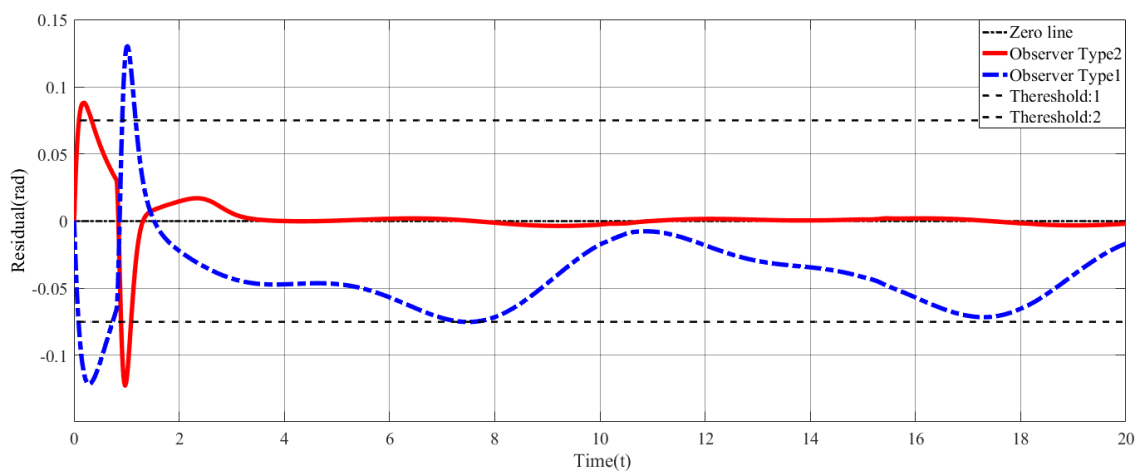
شکل ۵-۱۸: سیگنال باقی مانده رویتگر دوم در حضور خطای ناگهانی محرک در سیستم ربات سه لینک



شکل ۵-۱۹: سیگنال باقی مانده رویتگر دوم در حضور خطای متناوب محرک در سیستم ربات سه لینک

۵-۶- مقایسه رویتگر تطبیقی اول و دوم بر روی ربات صلب دولینکی

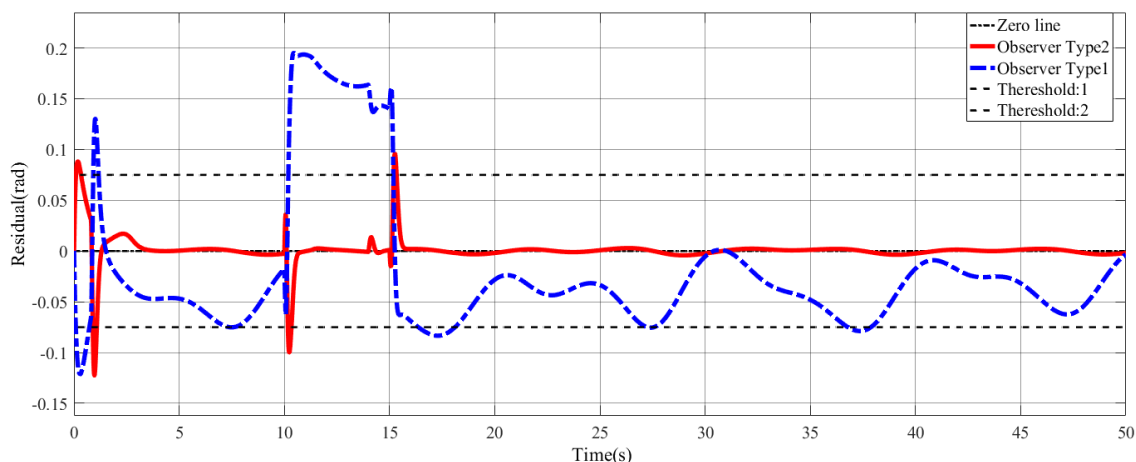
در این بخش به جهت مقایسه رویتگرهای طراحی شده، آنها را بر روی ربات صلب دولینکی پیاده سازی کرده و عملکرد آنها با هم مقایسه می‌گردد. برای این منظور سیگنال باقی‌مانده تولید شده توسط هر یک از رویتگرها، در شرایط عدم حضور خطا که در شکل (۵-۲۰) آمده است، در نظر گرفته می‌شود:



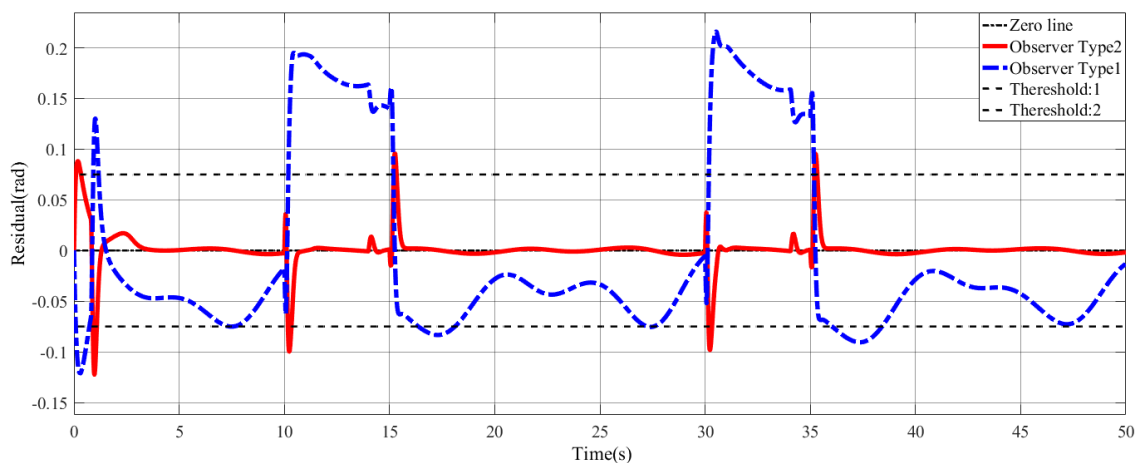
شکل ۵-۲۰: سیگنال باقی‌مانده رویتگر اول و دوم در شرایط عدم حضور خطای محرک در سیستم ربات دولینکی صلب

همانطور که از شکل بالا مشخص است، رویتگر دوم نسبت به رویتگر اول مقاوم‌تر است؛ به این معنا که رویتگر دوم حساسیت کمتری نسبت به نامعینی‌های مدل‌سازی از خود نشان می‌دهد.

به جهت مقایسه عملکرد هر دو رویتگر در برابر رخ دادن خطاهای ناگهانی محرک، مطابق شکل‌های (۵-۲۱) و (۵-۲۲) به سیستم خطا وارد می‌گردد.



شکل ۵-۲۱: سیگنال باقی مانده رویتر اول و دوم در حضور خطای ناگهانی محرک در سیستم ربات دولینکی صلب



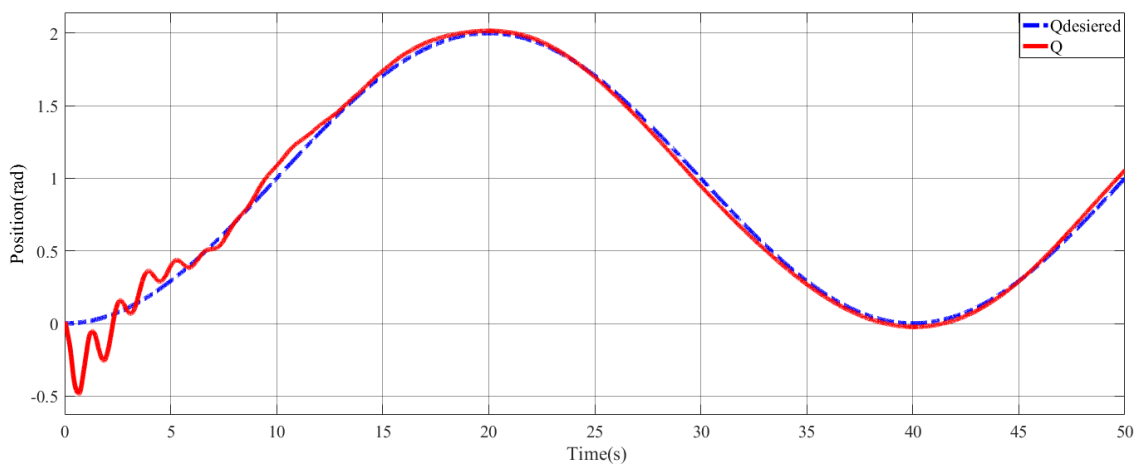
شکل ۵-۲۲: سیگنال باقی مانده رویتر اول و دوم در حضور خطای متناوب محرک در سیستم ربات دولینکی

همانطور که مشاهده می شود، رویتر اول، در زمان رخ دادن خطا، دچار خطای تخمین می شود به این معنا که سیگنال باقی مانده تا زمان از بین رفتن خطای محرک، مقداری غیر صفر دارد. در صورتی که رویتر دوم درست لحظاتی پس از رخ دادن خطا، مجدداً سیگنال خروجی را به درستی تخمین می زند. از طرف دیگر به دلیل تاثیری که نامعینی های مدل سازی بر روی رویتر اول دارد، مقدار باقی مانده برای رویتر اول همواره نزدیک حدود آستانه است تا حدی که در لحظه ۱۷ ثانیه سیستم تشخیص خطا دچار اختار اشتباه می شود. نتایج شبیه سازی برتری رویتر تطبیقی دوم را بیان می کند.

۵-۷- شبیه سازی ربات دولینکی انعطاف پذیر و رویتر تطبیقی اول

در این بخش در ابتدا ربات دولینکی انعطاف‌پذیر، با هدف دنبال کردن مسیر حرکت سینوسی برای هر یک از بازوها شبیه سازی می گردد، سپس به اعمال خطای محرک در سیستم و مشاهده عملکرد سیستم تشخیص خطا پرداخته می شود.

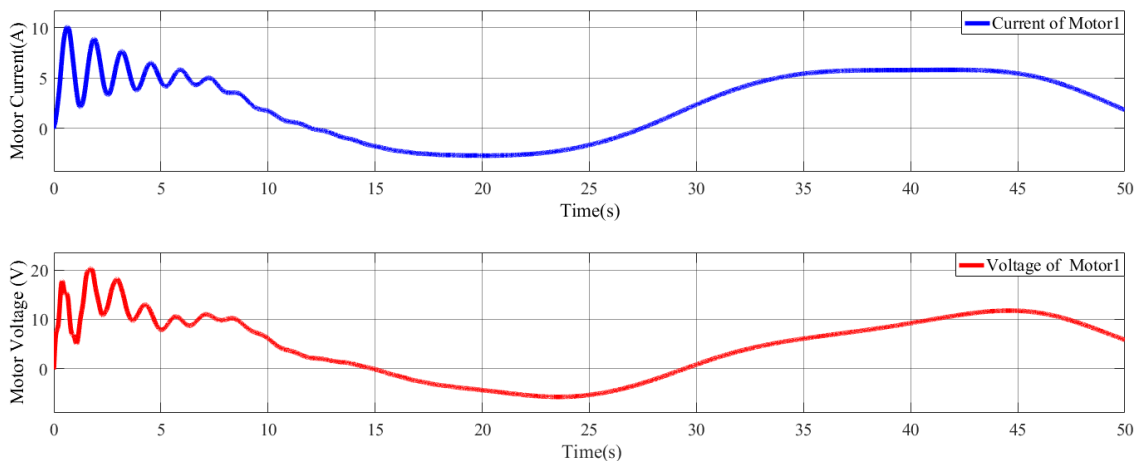
۵-۷-۱- خروجی موقعیت مفصل های ربات دولینکی انعطاف‌پذیر در مقایسه با مسیر مطلوب



شکل ۵-۲۳: موقعیت مفصل ربات دولینکی انعطاف‌پذیر در مقایسه با مسیر مطلوب

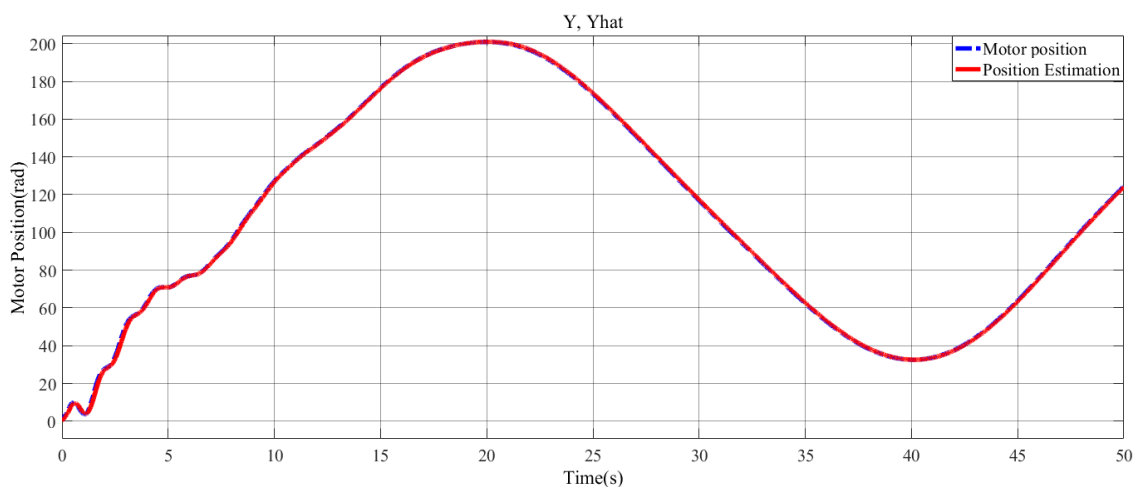
۵-۷-۲- تلاش کنترلی و جریان هر موتور

در این بخش منظور از تلاش کنترلی همان ولتاژ اعمال شده به موتورهای هر مفصل است.

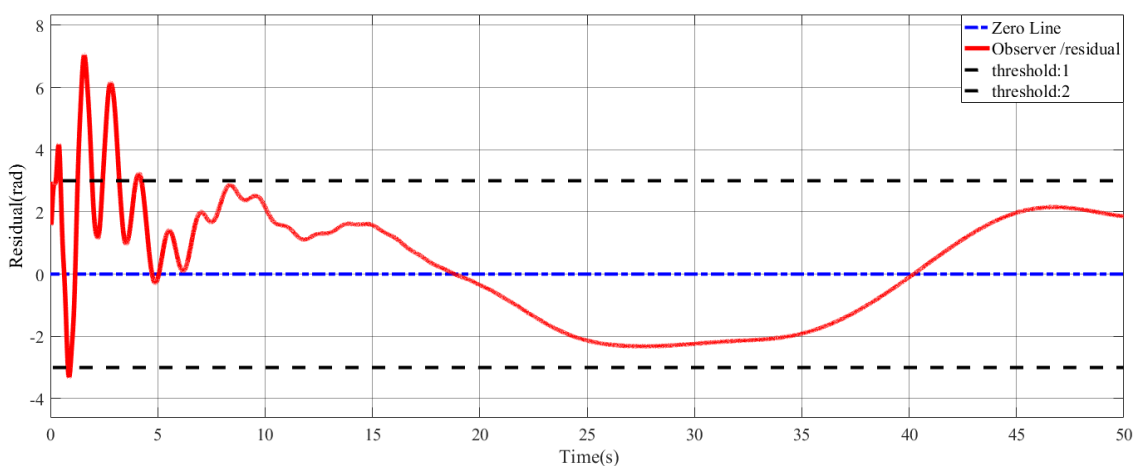


شکل ۵-۲۴: تلاش کنترلی و جریان هر یک از موتور های ربات دولینکی انعطاف‌پذیر

۵-۷-۳- تخمین خروجی سیستم توسط رویتگر تطبیقی اول



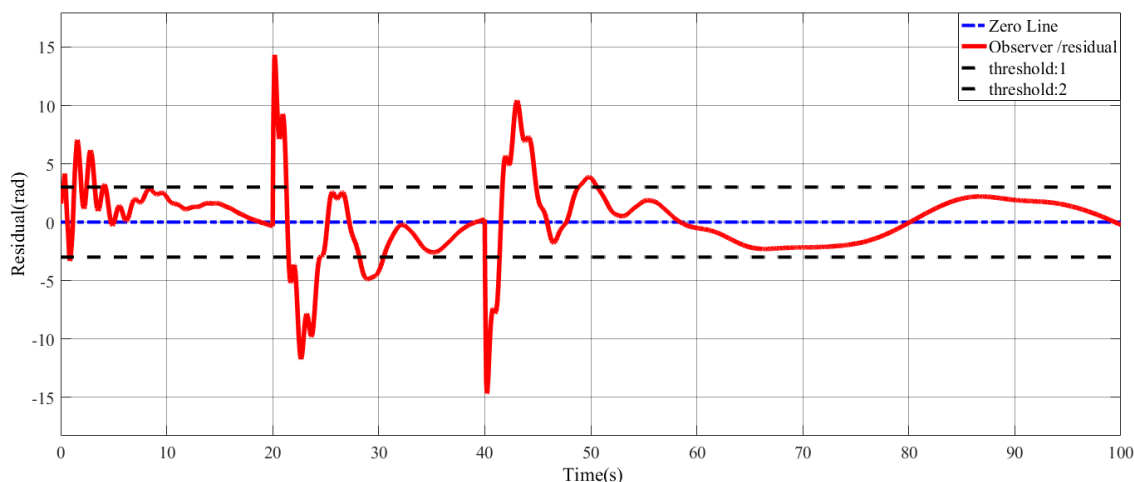
شکل ۵-۲۵: تخمین زاویه موتور توسط رویتگر اول در مقایسه با خروجی واقعی سیستم ربات انعطاف پذیر همانطور که از شکل (۵-۲۵) مشاهده می شود، رویتگر اول نسبتاً خوب خروجی را تخمین زده است. که سیگنال باقیمانده در شرایط عدم حضور خطا در سیستم مطابق با شکل (۵-۲۶) خواهد بود. لازم به ذکر است برخلاف بخش های قبل که زاویه مفصل به عنوان خروجی سیستم در نظر گرفته می شد، در این بخش از زاویه موتور به عنوان خروجی سیستم استفاده شده است.



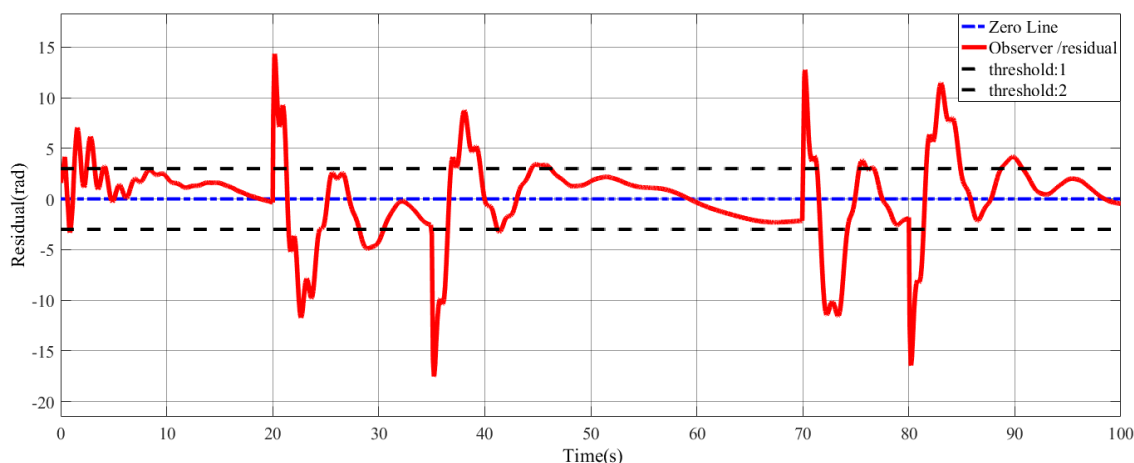
شکل ۵-۲۶: سیگنال باقی مانده رویتگر اول در شرایط عدم حضور خطای محرک در سیستم ربات انعطاف پذیر

۵-۷-۴- اعمال خطای ناگهانی محرک به سیستم

در این بخش به سیستم ربات انعطاف پذیر، خطا اعمال کرده و عملکرد رویتگر اول بررسی می گردد:



شکل ۵-۲۷: سیگنال باقی مانده رویتر اول در حضور خطای ناگهانی محرک در سیستم ربات دولینک انعطاف پذیر



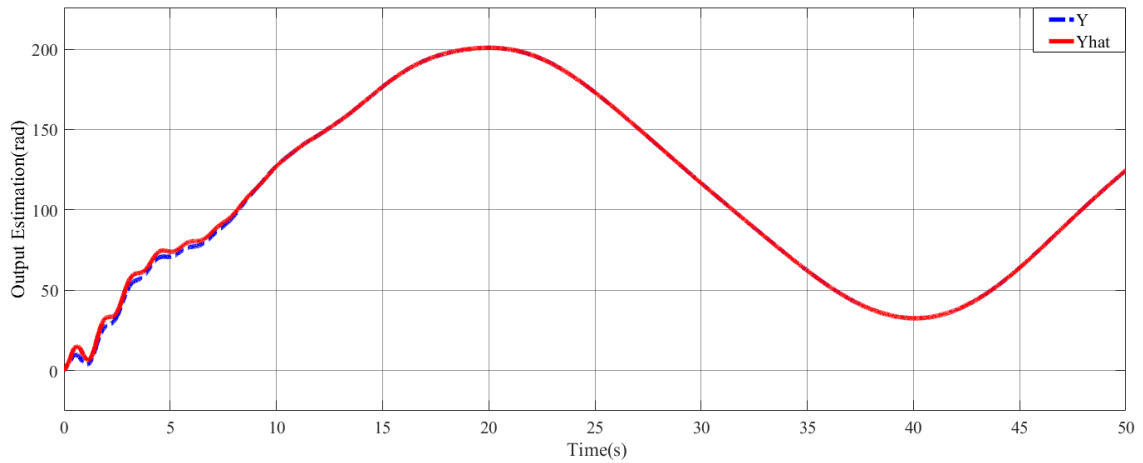
شکل ۵-۲۸: سیگنال باقی مانده رویتر اول در حضور خطای متناوب محرک در سیستم ربات دولینک انعطاف پذیر

همانطور که از شکل های (۵-۲۷) و (۵-۲۸) مشخص است، سیگنال باقیمانده تولید شده توسط رویتر اول نسبتاً خوب توانسته خطاهای ناگهانی و متناوب را تشخیص دهد. ولی همچنان این رویتر در برابر عدم قطعیت های مدل سازی برای ربات انعطاف پذیر دارای ضعف می باشد.

۵-۸- شبیه سازی ربات دولینکی انعطاف پذیر و رویتر تطبیقی دوم

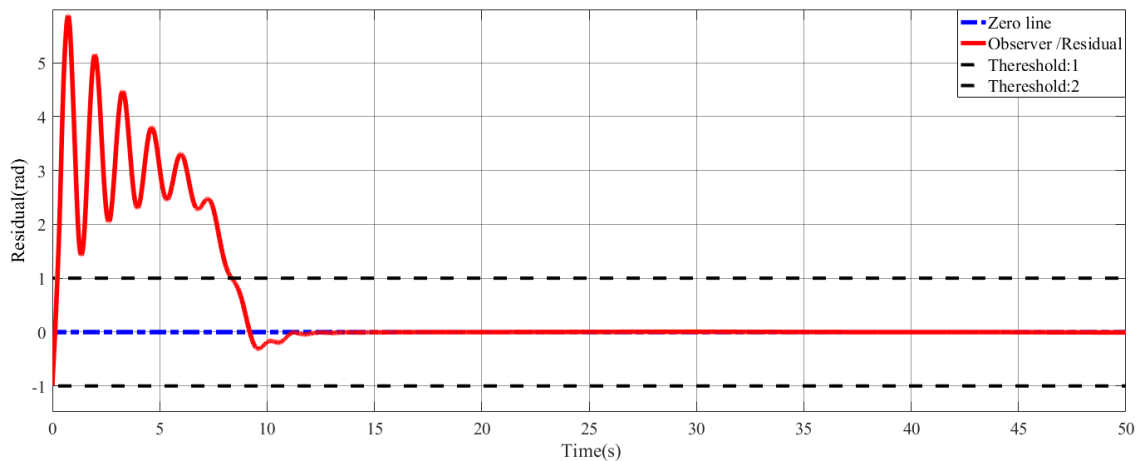
حال به بررسی عملکرد رویتر تطبیقی دوم پرداخته می شود و در نهایت عملکرد رویتر تطبیقی اول و دوم در ربات انعطاف پذیر مقایسه می گردد.

۵-۸-۱- تخمین خروجی سیستم توسط رویتگر تطبیقی دوم و مقایسه آن با خروجی واقعی



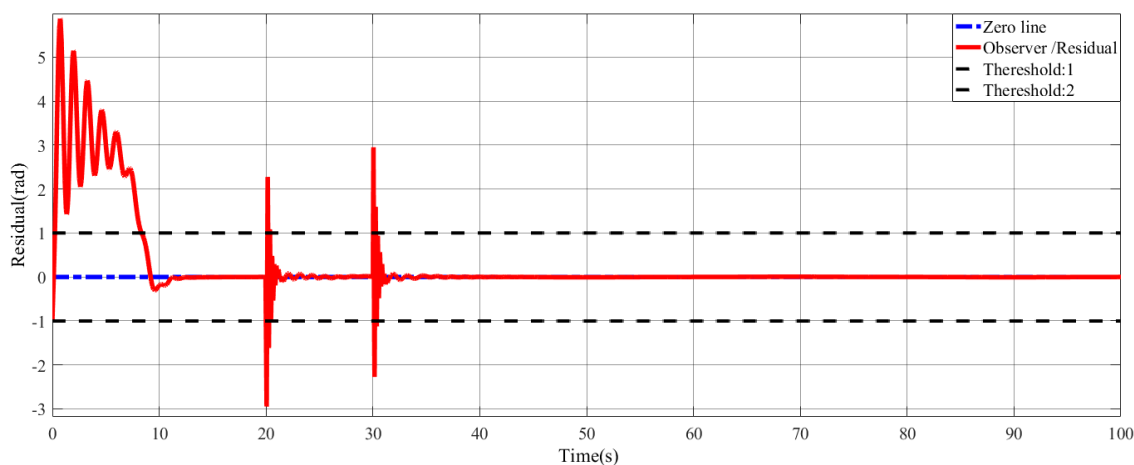
شکل ۵-۲۹: تخمین خروجی سیستم توسط رویتگر دوم در مقایسه با خروجی واقعی سیستم ربات انعطاف‌پذیر

۵-۸-۲- سیگنال باقی‌مانده در شرایط عدم حضور خطا در سیستم

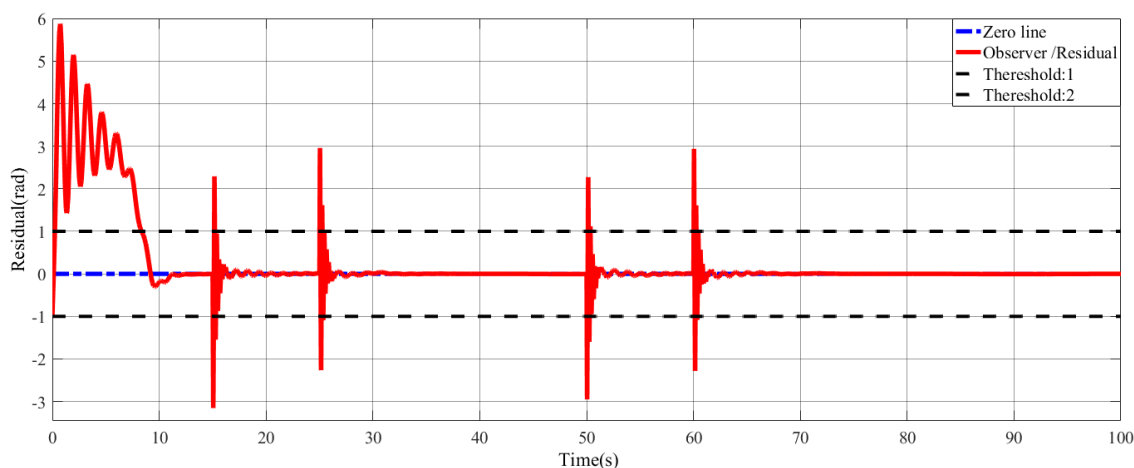


شکل ۵-۳۰: سیگنال باقی‌مانده رویتگر دوم در شرایط عدم حضور خطای محرک در سیستم ربات انعطاف‌پذیر

۵-۸-۳- اعمال خطای محرک به سیستم



شکل ۵-۳۱: سیگنال باقی مانده روی تگر دوم در حضور خطای ناگهانی محرک در سیستم ربات دولینک انعطاف پذیر



شکل ۵-۳۲: سیگنال باقی مانده روی تگر دوم در حضور خطای متناوب محرک در سیستم ربات دو لینک انعطاف پذیر

همانطور که در شکل های (۵-۳۱) و (۵-۳۲) مشاهده می گردد، روی تگر دوم به خوبی توانسته بر عدم قطعیت های مدل سازی غلبه نماید و سیستم تشخیص خطای طراحی شده بر مبنای این روی تگر عملکرد خوبی داشته باشد.

با مقایسه شکل های (۵-۲۸) و (۵-۳۲) می توان عملکرد هر دو روی تگر را با هم مقایسه نمود. همانطور که مشاهده می شود روی تگر تطبیقی اول در مقایسه با روی تگر تطبیقی دوم اصلا عملکرد مناسبی نداشته

و مخصوصاً در برابر عدم قطعیت های مدل که در حین طراحی در نظر گرفته شد، عملکرد خوبی ندارد.

در حالی که رویکرد تطبیقی دوم عملکرد کاملاً مناسبی از خود نشان می دهد.

۶- فصل ششم نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه به مسئله تشخیص خطا در ربات‌ها پرداخته شد و در این راستا از ایده‌ی استراتژی ولتاژ جهت ساده‌سازی مدل و سهولت در پیاده‌سازی روی‌تگر استفاده گردید.

همانطور که اشاره گردید لزوم طراحی سیستم تشخیص خطا برای نظارت بر سیستم رباتیک کاملاً مشهود است به‌طوری‌که در صورت رخ‌دادن خطا در این سیستم‌ها، بخش تشخیص خطا می‌تواند موجب جلوگیری از خسارت‌های مالی و جانی جدی‌ای شود. با توجه به اهمیت عملکرد صحیح ربات‌ها، سیستم تشخیص خطا باید بتواند در سریع‌ترین زمان ممکن، خطا را به‌درستی و به‌دقت تشخیص دهد که این مسئله به‌دلیل مدل دینامیکی کاملاً غیر خطی ربات، امری دشوار و پیچیده خواهد بود که همانطور که مشاهده گردید با استفاده از ایده استراتژی ولتاژ و طراحی دوباره مدل دینامیکی ربات، این امر محقق گردید. همانطور که قبلاً اشاره شد در طراحی مدل دینامیکی ربات از معادلات موتورهای که به مفصل‌های ربات متصل هستند استفاده شد و دینامیک غیر خطی ربات صرفاً به عنوان بار خارجی برای موتور در نظر گرفته شد که همین امر از طرفی موجب ساده‌شدن مدل سیستم گردید ولی از طرف دیگر این پژوهش را با چالش مقاوم نمودن سیستم تشخیص خطا در برابر نامعینی‌های مدل‌سازی قرار داد که همانطور که بیان شد بوسیله طراحی روی‌تگر تطبیقی، سیستم تشخیص خطای مناسبی برای ربات بازویی دولینکی ارائه گردید. مزیت روش استراتژی ولتاژ استفاده شده در این پژوهش این است که به کمک سیستم تشخیص خطای مبتنی بر روی‌تگری خطی، ربات با معادلات کاملاً غیرخطی تخمین زده شد.

در روش تشخیص خطا مبتنی بر روی‌تگر تطبیقی، در ابتدا خطا تخمین زده شد و از طریق آن، خروجی سیستم تخمین زده شد که سیگنال باقیمانده از اختلاف خروجی واقعی و خروجی تخمین زده شده بدست آمد. همانطور که از نتایج شبیه‌سازی مشخص است، زمان تشخیص و آشکارسازی خطا بسیار کم است و تشخیص خطا به سرعت انجام می‌شود.

۶-۲- پیشنهادات

به عنوان پیشنهاداتی برای پژوهش های آینده، به موارد زیر اشاره می شود:

- استفاده از الگوریتم های هوشمند برای بهینه سازی انتخاب ماتریس بهره رویتگر و پارامترهای تنظیم در رویتگر تطبیقی اول.
- استفاده از حدود آستانه تطبیقی به جای آستانه ثابت به طوری که به توان سیگنال باقی مانده را نسبت به اغتشاشات و تغییر بارهای ناگهانی ربات مقاوم نمود.
- با توجه به متغیر با زمان بودن رویتگر تطبیقی دوم، می توان مدل دقیق تری از محرک های ربات را در نظر گرفت، به عنوان مثال می توان مقاومت آرمیچر هر موتور را متغیر با زمان در نظر گرفت تا نتایج به واقعیت نزدیکتر گردند.

٧- مراجع

- [1] S. X. Ding, *Model-based Fault Diagnosis Techniques: Design Schemes, Algorithms, and Tools*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [2] S. Simani, C. Fantuzzi, and R. J. Patton, *Model-based Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Identification Techniques*. 2003.
- [3] X. Sun, “Unknown input observer approaches to robust fault diagnosis,” 2013.
- [4] R. Isermann, “Model-based fault-detection and diagnosis – status and applications,” *Annu. Rev. Control*, vol. 29, no. 1, pp. 71–85, Jan. 2005.
- [5] J. Ma and J. Jiang, “Applications of fault detection and diagnosis methods in nuclear power plants: A review,” *Prog. Nucl. Energy*, vol. 53, no. 3, pp. 255–266, Apr. 2011.
- [6] Y. Zhang and J. Jiang, “Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems,” *Annu. Rev. Control*, vol. 32, no. 2, pp. 229–252, Dec. 2008.
- [7] R. Beard, “Failure accommodation in linear systems through self-reorganization,” 1971.
- [8] R. Mehra, J. P.- Automatica, and U. 1971, “An innovations approach to fault detection and diagnosis in dynamic systems,” *Elsevier*, vol. 5, pp. 637–640, 1971.
- [9] R. I.- automatica and U. 1984, “Process fault detection based on modeling and estimation methods—A survey,” *Elsevier*, vol. 4, pp. 387–404, 1984.
- [10] E. Chow, A. W.-I. T. on automatic Control, and U. 1984, “Analytical redundancy and the design of robust failure detection systems,” *ieeexplore.ieee.org*, vol. 7, pp. 603–614, 1984.
- [11] J. Wünnenberg and P. M. Frank, “Sensor Fault Detection via Robust Observers,” in *System Fault Diagnostics, Reliability and Related Knowledge-Based Approaches*, Dordrecht: Springer Netherlands, 1987, pp. 147–160.
- [12] Q. Z.-I. transactions on automatic control and U. 2002, “Adaptive observer for multiple-input-multiple-output (MIMO) linear time-varying systems,” *ieeexplore.ieee.org*, vol. 3, pp. 525–529, 2002.
- [13] G. Bastin, M. G.-I. T. on A. Control, and U. 1988, “Stable adaptive observers for

- nonlinear time-varying systems,” *ieeexplore.ieee.org*, vol. 33, no. 7, pp. 650–658, 1988.
- [14] G. B.-S. & control letters and U. 2000, “Remarks on nonlinear adaptive observer design,” *Elsevier*, vol. 41, no. 4, pp. 271–280, 2000.
- [15] D. M.- MIPRO, 2011 proceedings of the 34th International, and U. 2011, “Fault detection methods: A literature survey,” *ieeexplore.ieee.org*, pp. 750–755, 2011.
- [16] F. W. . J. Burcham, C. G. Fullerton, and T. A. Maine, “Manual Manipulation of Engine Throttles for Emergency Flight Control,” Jan. 2004.
- [17] H. M. Nahim, R. Younes, H. Shraim, and M. Ouladsine, “Oriented review to potential simulator for faults modeling in diesel engine,” *J. Mar. Sci. Technol.*, vol. 21, no. 3, pp. 533–551, Sep. 2016.
- [18] P. F.- automatica and U. 1990, “Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy: A survey and some new results,” *Elsevier*, vol. 26, no. 3, pp. 459–474, 1990.
- [19] “A review of process fault detection and diagnosis: Part II: Qualitative models and search strategies,” *Comput. Chem. Eng.*, vol. 27, no. 3, pp. 313–326, Mar. 2003.
- [20] J. Chen and R. Patton, *Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems*. 2012.
- [21] M. Gautier, ... A. J.-I. T. on, and U. 2013, “A new closed-loop output error method for parameter identification of robot dynamics,” *ieeexplore.ieee.org*, vol. 21, no. 2, pp. 428–444, 2013.
- [22] Y. Z.-H. of U. A. Vehicles and U. 2015, “Fault Detection and Diagnosis for NASA GTMUAV with Dual Unscented Kalman Filter,” *Springer*, pp. 1157–1181, 2015.
- [23] B. Mrugalska, ... A. A.-W.-... on P. R., and U. 2014, “Robust quality control of products with experimental design,” in *researchgate.net*, 2014, pp. 343–348.
- [24] M. Mrugalski, M. W.-A. in E. and Computer, and U. 2012, “State-space GMDH neural networks for actuator robust fault diagnosis,” *researchgate.net*, vol. 12, no. 3, pp. 65–72, 2012.

- [25] J. Zhang, "Evaluation of observer structures with application to fault detection," 2009.
- [26] H. Yang, M. S. Cybernetics, 1995. Intelligent Systems For, and U. 1995, "Fault detection in a class of nonlinear systems via adaptive sliding observer," *ieeexplore.ieee.org*, vol. 3, pp. 2199–2204, 1995.
- [27] H. Wang, S. D.-I. transactions on A. Control, and U. 1996, "Actuator fault diagnosis: an adaptive observer-based technique," *ieeexplore.ieee.org*, vol. 41, no. 7, pp. 1073–1078, 1996.
- [28] H. Wang, Z. Huang, S. D.- Automatica, and U. 1997, "On the use of adaptive updating rules for actuator and sensor fault diagnosis," *Elsevier*, vol. 33, no. 2, pp. 217–225, 1997.
- [29] B. Jiang, ... M. S.-I. T. on, and U. 2006, "Fault accommodation for nonlinear dynamic systems," *ieeexplore.ieee.org*, vol. 51, no. 9, pp. 1578–1583, 2006.
- [30] B. Jiang, J. L. Wang, and Y. C. Soh, "An adaptive technique for robust diagnosis of faults with independent effects on system outputs," *Int. J. Control*, vol. 75, no. 11, pp. 792–802, Jan. 2002.
- [31] K. Zhang, B. Jiang, V. C.-I. J. of Control, and U. 2008, "Adaptive observer-based fast fault estimation," *researchgate.net*, vol. 6, no. 3, pp. 320–326, 2008.
- [32] M. Spong, S. Hutchinson, and M. Vidyasagar, *Robot modeling and control*. 2006.
- [33] L. Sweet, M. G.-D. and Control, 1984. The 23rd, and U. 1984, "Re-definition of the robot motion control problem: Effects of plant dynamics, drive system constraints, and user requirements," in *ieeexplore.ieee.org*, 1984, pp. 724–732.
- [34] M. Spong and M. Vidyasagar, "Robot dynamics and control," 2008.
- [35] B. Chen, H. Uang, C. T.-I. T. on Fuzzy, and U. 1998, "Robust tracking enhancement of robot systems including motor dynamics: A fuzzy-based dynamic game approach," *ieeexplore.ieee.org*, vol. 6, no. 4, pp. 538–552, 1998.
- [36] M. F.-I. J. of Control, U. Automation, U. And, and U. 2008, "On the voltage-based control of robot manipulators," *ijcas.com*, vol. 6, no. 5, pp. 702–712, 2008.

- [37] J. Merlet, *Parallel robots*. 2006.
- [38] S. Nandi, H. Toliyat, X. L.-I. transactions on Energy, and U. 2005, “Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors—A review,” *ieeexplore.ieee.org*, vol. 20, no. 4, pp. 719–729, 2005.
- [39] R. Murray, *A mathematical introduction to robotic manipulation*. 2017.
- [40] S. Ahmadi, M. F.-C. & E. Engineering, and U. 2016, “Robust control of electrically driven robots using adaptive uncertainty estimation,” *Elsevier*, no. 56, pp. 674–687, 2016.
- [41] M. Fateh, & M. S.-J. of I., and U. 2015, “Indirect adaptive fuzzy control for flexible-joint robot manipulators using voltage control strategy,” *content.iospress.com*, vol. 28, no. 3, pp. 1451–1459, 2015.
- [42] S. Banala, A. Kulpe, S. A.-R. and Automation, and U. 2007, “A powered leg orthosis for gait rehabilitation of motor-impaired patients,” in *ieeexplore.ieee.org*, 2007, pp. 4140–4145.
- [43] V. Khoshdel, A. Akbarzadeh, N. Naghavi, A. Sharifnezhad, and M. Souzanchi-Kashani, “sEMG-based impedance control for lower-limb rehabilitation robot,” *Intell. Serv. Robot.*, vol. 11, no. 1, pp. 97–108, Jan. 2018.
- [44] M. F.-W. A. S. Journal and U. 2009, “Robust Control of Electrical Manipulators by Reducing the Effects of Uncertainties,” *pdfs.semanticscholar.org*, vol. 7, pp. 161–167, 2009.
- [45] M. Mehdi Fateh and M. Baluchzadeh, “Modeling and Robust Discrete LQ Repetitive Control of Electrically Driven Robots,” *Int. J. Autom. Comput.*, vol. 10, no. 5, pp. 472–480, Oct. 2013.
- [46] K. Menighed, J. Yamé, ... C. A.-A. R. &, and U. 2010, “A slightly improved robust adaptive observer for actuator fault detection,” in *ieeexplore.ieee.org*, 2010, pp. 1322–1328.
- [47] G. Besançon, J. De León-Morales, and O. Huerta-Guevara, “On adaptive observers for state affine systems,” *Int. J. Control*, vol. 79, no. 6, pp. 581–591, Jun. 2006.
- [48] Q. Zhang, “Adaptive observer for MIMO linear time varying systems,” 2001.

- [49] Q. Zhang, A. C. Control, 2001. Proceedings of The, and U. 2001, “Adaptive observer with exponential forgetting factor for linear time varying systems,” in *ieeexplore.ieee.org*, 2001, vol. 4, pp. 3886–3891.
- [50] A. Xu, Q. Z.- Automatica, and U. 2004, “Nonlinear system fault diagnosis based on adaptive estimation,” *Elsevier*, vol. 40, no. 7, pp. 1181–1193, 2004.

واژه‌نامه فارسی به انگلیسی

Fixed Threshold	آستانه ثابت
Adaptive Threshold	آستانه تطبیقی
False Alarm.....	اخطار اشتباه
Voltage Control Strategy	استراتژی کنترل ولتاژ
Disturbance	اغتشاش
Hardware Redundancy.....	افزونگی سخت‌افزاری
Analytical Redundancy	افزونگی تحلیلی
Robot Manipulator	بازوی ربات
Malfunction.....	بدکار کردن
Model Free.....	بدون مدل
Chattering	پدیده وزوز
Parameter Estimation.....	تخمین پارامتر
Fault detection	تشخیص خطا
Robust Fault Detection.....	تشخیص خطای مقاوم
Fault Detection and Isulation	تشخیص و جداسازی خطا
Residual Signal Generator	تولید سیگنال باقی‌مانده
Process Fault.....	خطای فرآیند
Rigid Robot	ربات صلب
Flexible Robot.....	ربات انعطاف‌پذیر
Model Uncertainty	عدم قطعیت مدل

Model Based	مبتنی بر مدل
Signal Based	مبتنی بر سیگنال
Robot actuator.....	محرك ربات
Model Free.....	مدل آزاد
Adaptive Observer	مشاهده‌گر تطبیقی
Parity Equations.....	معادلات برابری
Prismatic Joint	مفصل کشویی
Hinge Joint	مفصل لولایی
Model Uncertainty	نامعینی مدل سازی

واژه‌نامه انگلیسی به فارسی

Adaptive Observer	مشاهده گر تطبیقی
Adaptive Threshold	آستانه تطبیقی
Analytical Redundancy	افزونی تحلیلی
Chattering	پدیده وزوز
Disturbance	اغتشاش
False Alarm.....	اخطار اشتباه
Fault detection	تشخیص خطا
Fault Detection and Isulation	تشخیص و جداسازی خطا
Fixed Threshold	آستانه ثابت
Flexible Robot.....	ربات انعطاف پذیر
Hardware Redandancy.....	افزونی سخت افزاری
Hinge Joint	مفصل لولایی
Malfunction.....	بدکار کردن
Model Based	مبتنی بر مدل
Model Free.....	مدل آزاد
Model Free.....	بدون مدل
Model Uncertainty	عدم قطعیت مدل
Model Uncertainty	نامعینی مدل سازی
Parameter Estimation.....	تخمین پارامتر
Parity Equations.....	معادلات برابری

Robot actuator.....	محرك ربات
Prismatic Joint	مفصل كشویی
Process Fault.....	خطای فرآیند
Robot Manipulator	بازوی ربات
Robust Fault Detection.....	تشخیص خطای مقاوم
Residual Signal Generator	تولید سیگنال باقی مانده
Rigid Robot	ربات صلب
Signal Based	مبتنی بر سیگنال
Voltage Control Strategy	استراتژی کنترل ولتاژ

Abstract

In this thesis, an adaptive observer-based fault detection system is designed. This system detects a fault in the event of failure in the robot actuators and activates the system fault alarms. The fault detection system for a rigid and flexible robot arm with a DC motor drive is designed to withstand the disturbance signal, such as a change in load of the arm of the robot, or modeling uncertainties, has the lowest sensitivity, and has a maximum sensitivity to the actuator faults. In order to simplify the nonlinear and complex equations of the robot, the idea of voltage control strategy is used. The adaptive observer performance has been studied in terms of speed and accuracy in detecting the actuator faults. Simulation results show the effectiveness of this method.

Key words: *Fault detection–Robot–Adaptive observer – Robust fault Detection*



Faculty of Electrical Engineering and Robotic
M.Sc. Thesis in Control Engineering

Fault Detection for Robot Actuator using Adaptive Observer

By:

Morteza Asgari

Supervisor:

Mohammad Haddad Zarif

Date: August 2018