

الله الرحمن الرحيم



دانشکده برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی کنترل

تشخیص و جداسازی عیب آونگ وارون با استفاده از مشاهده گر مود لغزشی مبتنی بر منطق فازی

نگارنده: میلاد اسمعیلی

استاد راهنما

دکتر محمد حداد ظریف

دی ماه ۱۳۹۷

در این صفحه صورت جلسه دفاع را قرار دهید. لازم است پس از صحافی این صفحه مجدداً توسط دانشکده مهر گردد و استاد راهنما با امضای خود اصلاحات پایان نامه را تایید کند.

تقدیم بہ

پدرم، تاج سرم

مادرم، بال و پر

و

ہمسر عزیزم

شکر و قدردانی

خدایی که آفرید:

جهان را، انسان را، علم را، معرفت و عشق را.

من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق

سزاوار است که مراتب شکر و قدردانی خود را از استاد گرانقدر جناب آقای دکتر محمد حداد ظریف که من را در انجام این

پایان نامه راهنمایی کردند بجا آورم. همچنین از جناب آقای دکتر محسن قلعه نویی که در تمام مدت این دوره صمیمانه و بدون هیچ

چشمداشتی یار و یاور من بودند بسیار سپاسگزارم و از خداوند منان آینده ای بسیار درخشان برای ایشان خواستارم. بی شک هیچ کار

خیر و نیکی در درگاه خداوند متعال، بی پانخ نخواهد ماند.

میلاد اسماعیلی

دی ماه ۱۳۹۷

تعمیر نامه

اینجانب میلاد اسمعیلی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی کنترل دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **تشخیص و جداسازی عیب آونگ وارون با استفاده از مشاهده گر مود لغزشی مبتنی بر منطق فازی تحت راهنمایی 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 با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آن ها) 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: ۱۳۹۷/۱۰/۱۷

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها 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 پایان‌نامه ابتدا به تفصیل در مورد عیب و انواع آن می‌پردازیم و تاریخچه‌ای مختصر در مورد نظریه‌ها و تئوری‌هایی که توسط محققین مختلف در این زمینه بیان شده است، مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. سپس به شرح کامل سیستم پاندول معکوس به‌عنوان یک سیستم جامع در علم کنترل و روش‌های تشخیص و جداسازی عیب در این سیستم می‌پردازیم.

در ادامه از دو روش رؤیتگر مود لغزشی و رؤیتگر مود لغزشی مبتنی بر منطق فازی برای تشخیص و جداسازی عیب در سیستم پاندول معکوس استفاده می‌کنیم و با استفاده از شبیه‌سازی، قدرت و کیفیت روش‌های عنوان‌شده در تشخیص و جداسازی عیب را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

کلید واژه: پاندول معکوس، تشخیص و جداسازی عیب، رؤیتگر، مود لغزشی، منطق فازی.

فهرست مطالب

ز	فهرست جداول
س	فهرست اشکال
۱	فصل ۱ - مقدمه
۲	۱-۱ پیشگفتار.....
۲	۱-۲ مروری بر تاریخچه‌ی کارهای انجام شده.....
۴	۱-۳ اهمیت تشخیص عیب.....
۵	۱-۴ اصطلاحات و مفاهیم کلی.....
۶	۱-۴-۱ سیگنال‌ها و حالت‌ها.....
۶	۱-۴-۲ توابع.....
۷	۱-۴-۳ مشخصه‌های وقوع عیب.....
۸	۱-۴-۴ عیب بر اساس مشخصه‌ی زمانی.....
۸	۱-۴-۵ عیب بر اساس مشخصه‌ی مکانی.....
۹	۱-۵ اصطلاحات عیب.....
۱۰	۱-۶ مدل‌های توصیفی سیستم.....
۱۰	۱-۷ ویژگی‌های سیستم.....
۱۱	۱-۸ ساختار کلی پایان‌نامه.....
۱۳	فصل ۲ - مبانی تشخیص و جداسازی عیب و روش‌های تخمین عیب
۱۴	۲-۱ پیشگفتار.....

۱۴	..... طبقه‌بندی عیوب
۱۴	..... ۲-۲-۱ عیب عملگر
۱۵	..... ۲-۲-۲ عیب حسگر
۱۵	..... ۲-۲-۳ عیب اجزاء
۱۶	..... ۲-۲-۴ مدل‌سازی عیوب
۱۷	..... ۲-۲-۵ عیوب ضرب شونده
۱۸	..... ۲-۲-۶ عیوب جمع شونده
۱۹	..... ۲-۳ روش‌های مختلف تشخیص عیب
۲۰	..... ۲-۳-۱ افزودنی سخت‌افزاری
۲۰	..... ۲-۴ آزمایش قوانین فیزیکی (تست معقول)
۲۱	..... ۲-۴-۱ تشخیص عیب مبتنی بر داده
۲۱	..... ۲-۵ تشخیص عیب مبتنی بر مدل
۲۳	..... ۲-۶ تشخیص و جداسازی عیب
۲۴	..... ۲-۶-۱ تولید مانده
۲۷	..... ۲-۶-۲ تشخیص و جداسازی عیب با استفاده از منطق فازی
۲۹	فصل ۳ - پاندول معکوس و بررسی معادلات آن
۳۰	..... ۳-۱ پیشگفتار
۳۱	..... ۳-۲ معرفی سیستم
۳۲	..... ۳-۳ مکانیزم کنترلی پاندول معکوس
۳۲	..... ۳-۳-۱ مکانیزم کنترل ارابه
۳۲	..... ۳-۳-۲ مکانیزم کنترل آونگ
۳۳	..... ۳-۴ معادلات آونگ وارون

۳۴	۳-۴-۱ معادلات غیرخطی در سیستم آونگ وارون
۳۶	۳-۴-۲ معادلات خطی در سیستم آونگ وارون
۳۷	۳-۴-۳ ماتریسهای فضای حالت سیستم آونگ وارون
۳۸	۳-۴-۴ رویت پذیری
۳۹	فصل ۴ - تشخیص و جداسازی عیب با استفاده از رویترگر مود لغزشی-فازی
۴۰	۴-۱ پیشگفتار
۴۰	۴-۲ مود لغزشی
۴۱	۴-۳ مزایا و معایب مود لغزشی
۴۱	الف) مزایا
۴۲	ب) معایب
۴۲	۴-۴ رویترگر مود لغزشی
۴۵	۴-۴-۱ فرم کلی طراحی رویترگر با اعمال عیب حسگر
۴۸	۴-۵ سیستمهای فازی و کاربرد آنها
۴۹	۴-۶ مجموعههای فازی
۵۰	۴-۶-۱ توابع عضویت
۵۰	۴-۶-۲ قوانین اگر-آنگاه فازی
۵۰	۴-۷ مدل سیستم فازی
۵۱	۴-۸ مدل فازی تاکاگی-سوگینو
۵۲	۴-۹ قوانین و طراحی منطق فازی $T-S$ مطلوب
۵۴	۴-۹-۱ طراحی رویترگر مود لغزشی-فازی با اعمال عیب حسگر
۵۷	۴-۱۰ شبیه‌سازی
۵۹	۴-۱۱ نتیجه‌گیری

فصل ۵- نتیجه گیری و پیشنهادات

۶۱

۶۲ ۵-۱ نتیجه گیری

۶۳ ۵-۲ پیشنهادات

۶۴

مراجع

فهرست جداول

جدول ۱-۳ : مقادیر ثابت آونگ معکوس.....۳۸

جدول ۲-۳ : بررسی رویت پذیری سیستم پاندول معکوس در زوایای مختلف.....۳۸

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ : سه مرحله فرآیند تشخیص عیب [۹]. ۷.....
- شکل ۲-۱ : انواع عیب در یک فرآیند [۱۰]. ۱۰.....
- شکل ۱-۲ : مکان‌های رخ داد عیب و اثرات مخرب آن [۱۰]. ۱۴.....
- شکل ۲-۲ : انواع عیب در یک فرآیند [۹]. ۱۶.....
- شکل ۳-۲ : دسته بندی روش های تشخیص عیب [۱]. ۲۰.....
- شکل ۴-۲ : سیستم دینامیکی رویتگر [۱۶]. ۲۶.....
- شکل ۱-۳ : تصویری از پاندول معکوس [۱۶]. ۳۱.....
- شکل ۲-۳ : پاندول معکوس [۲۳]. ۳۲.....
- شکل ۱-۴ : مدل بلوکی رویتگر مود لغزشی به منظور تشخیص و جداسازی خطا [۲۳]. ۴۴.....
- شکل ۲-۴ : عیب پله وارد شده به سیستم و خطای بازسازی شده آن (مود لغزشی) [۲۴]. ۴۷.....
- شکل ۳-۴ : نمایش حالات واقعی $(x1)$ و $(x3)$ و حالات تخمین زده شده آنها (مود لغزشی) [۲۴]. ۴۸.....
- شکل ۴-۴ : سیگنال کنترل اعمالی به سیستم آونگ وارون (مود لغزشی-فازی). ۵۸.....
- شکل ۵-۴ : سیگنال‌های عیب وارد شده به سیستم آونگ وارون (مود لغزشی-فازی). ۵۸.....
- شکل ۶-۴ : رویتگر برای تشخیص و شناسایی عیب (مود لغزشی-فازی). ۵۸.....
- شکل ۷-۴ : رویتگر برای جداسازی عیب (مود لغزشی-فازی). ۵۹.....

فصل ۱ - مقدمه

۱-۱ پیشگفتار

با رشد روزافزون علم و پیچیدگی سیستم‌های امروزی انتظار از سیستم‌های کنترلی بیشتر شده و علم کنترل، معنی و مفهومی جدیدی پیدا کرده است. سیستم‌های پیشرفته مدرن به تبع، دارای کنترل‌های پیچیده‌تری هستند تا کاربرد و ساز و برگ ایمنی بیشتری داشته باشند. طراحی کردن کنترل فیدبک معمولی و کلاسیک برای سیستم‌های پیچیده امروزی نمی‌تواند کارایی زیادی داشته باشد و ممکن است در اثر عملکرد نامناسب محرک‌ها، سنسورها و یا بقیه‌ی اجزاء، کل سیستم دچار ناپایداری شود. در اینجا، مسئله‌ی امنیت و ایمنی سیستم‌ها بحثی انکارناپذیر خواهد بود و بطور کلی تقاضا برای بالا بردن قابلیت اطمینان و ایمنی در سیستم‌های جدید رو به افزونی است. به همین دلیل تشخیص و جداسازی خطا در این سیستم‌ها، کاربرد بسیار زیادی خواهد داشت.

۱-۲ مروری بر تاریخچه‌ی کارهای انجام شده

بطور کلی پژوهش و تحقیق در زمینه‌ی تشخیص خطا در اوایل دهه‌ی ۷۰ میلادی در سراسر جهان نگاه‌های بسیاری را به خود معطوف کرد. در ابتدا برای مواجهه با این پدیده، روش‌های مبتنی بر افزونگی تحلیلی^۱ و سخت‌افزاری بسیاری مورد بحث و مطالعه قرار گرفت.

اختراع میکروکنترلرها و افزایش کارایی آن‌ها در سیستم‌های اتوماسیونی و همچنین با پیشرفت رایانه‌های دیجیتالی در آن دهه، محاسباتی شدن هرچه بیشتر نرم‌افزارهای مبتنی بر نظارت و الگوریتم تشخیص خطا

^۱Redundancy Analytical

را به دنبال داشت و از روش‌های تشخیص و جدا سازی خطا مبتنی بر تحلیلی افزونگی به‌عنوان جایگزینی عملی برای روش افزونگی سخت‌افزاری^۱ معرفی شدند [۱].

در سال ۱۹۷۷ میلادی توسزهومان^۲ نخستین بار، استفاده از تکنیک‌های تخمین پارامترها را مطرح کرد، سپس اولین کتاب در سال ۱۹۷۸ میلادی توسط هیمبلوا^۳ با موضوع روش‌هایی بر پایه‌ی مدل، در زمینه تشخیص و تعیین خطا که در فرایندهای شیمیایی کارایی داشت به چاپ رسید و در همان سال کلارک^۴ استفاده کردن همزمان از چند رؤیتگر (که بعدها به‌عنوان بانک رؤیتگر از آن یاد می‌شد) برای تشخیص عملکرد نامناسب حسگرها را ارائه کرد. در اواسط دهه‌ی ۸۰ میلادی، آیزرمن^۵ خلاصه‌ای از اقدامات انجام‌شده در زمینه‌ی تشخیص خطای فرایند بر پایه‌ی مدل‌سازی، تخمین پارامتر و حالت را به جهانیان ارائه کرد [۳].

در گذشته انجام بسیاری از کارها برای انسان مقدور نبود و حتی کارهایی چون سفر به فضا، ورود به اعماق زمین یا بررسی آتشفشان‌ها و ... همانند یک رؤیا و یک آرزوی دست‌نیافتنی بود؛ اما با پیشرفت علم و اختراع وسایل و دستگاه‌های امروزی تحقق این رؤیاها برای انسان امکان‌پذیر شد. ازسوی دیگر دستگاه‌های جدید امروزی برای کاهش هزینه‌های اقتصادی، بهره‌وری بالاتر، کاهش خطرات، حفظ امنیت انسان‌ها و همچنین کاهش خطا در انجام کارهای حساسی همانند جراحی‌های بسیار دقیق جایگزین اپراتورهای انسانی در انجام کارها شده‌اند. همین امر باعث می‌شود که این سیستم‌ها همواره در معرض خطا و بد عمل کردن و اشتباه باشند. وجود خطا و اشتباه در این سیستم‌ها ممکن است ناشی از عوامل خارجی باشد که به حسگرها و قسمت‌های دیگر سیستم آسیب بزنند یا در اثر پارگی در اجزای سخت‌افزاری و ... باشند که عملکرد کل سیستم را با خطر مواجه می‌کنند [۴].

¹RedundancyAnalyses

²Humen Tusez

³Himbliva

⁴Clark

⁵Iserman

۳-۱ اهمیت تشخیص عیب

تشخیص و آشکارسازی عیب از مسائل مهم در فرایندهای مهندسی محسوب شده و از اجزای اصلی سازماندهی رخدادهای غیرعادی (AEM)^۱ بشمار می‌رود. روش AEM با تشخیص و آشکارسازی بلادرنگ عیب و اصلاح شرایط نامطلوب ناشی از عیب در فرایند سروکار دارد. بسیاری از مهم‌ترین وظایف کنترلی همچون شناسایی و تشخیص عیب در سازماندهی فرایندها، توسط فعالیت‌های انسانی اداره می‌گردد. آمارهای صنعتی حاکی از این است که حدود ۷۰ درصد از حوادث صنعتی به دلایل انسانی رخ می‌دهند. این اتفاقات نامطلوب پیامدهای اقتصادی، جانی و زیست‌محیطی دارند. با توجه به دلایل فوق، طبیعی است که گام اول در AEM اتوماسیون یا آشکارسازی و تشخیص عیب خودکار خواهد بود. در اهمیت مبحث تشخیص عیب همین بس که مقالات فراوانی در این باره به چاپ رسیده است. کاربردهای اولیه این مبحث را می‌توان به اواخر قرن ۱۹ نسبت داد که روند توسعه آن، بعدها در سال‌های ۱۹۳۵ و ۱۹۶۰ به ترتیب برای دستگاه‌های چاپ و تقویت‌کننده‌های عملیاتی ادامه یافت و تاکنون نیز پیشرفت‌های زیادی در این زمینه کسب شده است. به‌طور کلی زمانی که یک سیستم، اهداف مورد نظر اپراتور را که برای آن طراحی کرده است، به‌خوبی انجام ندهد و رفتار نرمال نداشته باشد، می‌گویند در سیستم خطا رخ داده است. پیش‌بینی درست و به موقع خطاها و پرهیز از آن‌ها امری بسیار دشوار و در بعضی موارد غیرقابل امکان است. تأثیر وجود خطا در یک سیستم می‌تواند کم و کاهش ضریب راندمان سیستم باشد و یا سیستم را با خطرات بزرگ‌تر و شکست کلی روبرو کند. نکته‌ای که در سیستم‌های امروزی بسیار مهم و حائز اهمیت است، به حداقل رساندن خطرات و آسیب‌های جانی و مالی و همچنین کاهش اثرات مخرب آن‌ها به محیط پیرامون است. عیب در سیستم‌های حساس و حیاتی می‌تواند باعث به وجود آمدن حوادث فاجعه‌بار با هزینه‌های اقتصادی و انسانی زیادی شود [۵]. مثال‌های زیر نمونه‌ای از حوادث ناشی از این عیب‌ها می‌باشند:

^۱Abnormal Event Management

- ۲۶ آوریل ۱۹۸۶، انفجار در نیروگاه چرنوبیل^۱ اوکراین که در این حادثه حدود ۳۰ نفر بلافاصله کشته شدند، درحالی که ۱۵۰۰۰ نفر دیگر کشته و ۵۰۰۰۰ نفر نیز پس از آن حادثه معلول شدند. برآورده شده است که حدود ۵ میلیون نفر در اوکراین، بلاروس و روسیه در معرض تابش پرتوهای هسته‌ای این انفجار قرار گرفتند و هزینه‌ای در حدود ۱۸ میلیارد روبل^۲ برای این فاجعه تخمین زده شد [۶].

- ۴ ژوئن ۱۹۹۶، انفجار موشک Ariane5 که به دلیل عیب در واحد مربع داخلی که وظیفه‌ی فراهم کردن سیستم کنترل با اطلاعات ارتفاع و مسیر را داشت اتفاق افتاد. در نتیجه اطلاعات نادرست ارتفاع به واحد کنترل رسید [۶].

- ۲۵ می ۱۹۷۹، سقوط پرواز ۱۹۱ خطوط هوایی آمریکا، در این حادثه هنگامی که هواپیما سقوط کرد، ۲۷۱ نفر در هواپیما و دو نفر در زمین کشته شدند [۷].

بنابراین شناسایی و تشخیص درست و به‌موقع خطا در سیستم‌های کنترلی از جایگاه و اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

۴-۱ اصطلاحات و مفاهیم کلی

در تحقیقات مربوط به تشخیص و جداسازی خطا، اصطلاحات و عناوینی استفاده می‌شود که به‌صورت استاندارد مورد توافق همه‌ی محققین قرار گرفته است. پاره‌ای از این اصطلاحات که به‌وفور در این پایان‌نامه استفاده می‌شود، در ادامه آورده شده است. این تعاریف و اصطلاحات، نتیجه‌ی تلاش‌های کمیته فنی SAFEPROCESS [۸] می‌باشند.

این اصطلاحات در دو بخش مورد مطالعه قرار می‌گیرد:

- اصطلاحات مربوط به سیگنال‌ها و حالت‌ها

¹Chernobyl

²Ruble

- اصطلاحات مربوط به توابع و اعمال

۱-۴-۱ سیگنال‌ها و حالت‌ها

- عیب^۱: یک انحراف دفعی یا تدریجی از شرایط قابل قبول و استاندارد در حداقل یک ویژگی یا پارامتر سیستم.
- نقص^۲: قطع دائم از توانایی سیستم در اجرای عملکرد خواسته شده، تحت شرایط کاری مشخص.
- خطا^۳: اختلاف بین مقدار اندازه‌گیری شده یک متغیر خروجی با مقدار واقعی آن.
- عملکرد نامناسب^۴: بی‌نظمی پی‌درپی در انجام عملکرد دلخواه و مد نظر سیستم.
- اغتشاش^۵: یک ورودی ناشناخته و غیرقابل کنترل از جنس دینامیک مدل نشده که در فرکانس‌های پایین نمود پیدا می‌کند.
- اختلال^۶: نوعی ورودی کنشی به سیستم است که باعث خروجی موقت سیستم از حالت جاری و فعلی خودش می‌شود.
- مانده^۷: نشانگر عیب بر پایه اختلاف بین مقدار اندازه‌گیری‌ها و محاسبات انجام گرفته براساس مدل است.

۱-۴-۲ توابع

- آشکارسازی عیب^۸: تعیین وجود عیب در سیستم و زمان وقوع آن.

¹Fault

²Failure

³Error

⁴Malfunction

⁵Disturbance

⁶Perturbation

⁷Residual

⁸Fault Detection

- جداسازی عیب^۱: تعیین نوع، محل و زمان آشکارسازی یک عیب، این عمل نیز به دنبال مرحله آشکارسازی انجام می‌گیرد.
- شناسایی عیب^۲: تعیین رفتار متغیر با زمان یک عیب، این عمل به دنبال جداسازی عیب صورت می‌گیرد.
- تشخیص عیب^۳: تعیین نوع، محل و زمان تشخیص یک عیب می‌باشد. این عمل به دنبال آشکارسازی و شناسایی عیب می‌باشد.

ترتیب مراحل تشخیص عیب در شکل (۱-۱) دیده می‌شود.

- تخمین عیب^۴: یکی از روش‌های تشخیص و شناسایی عیب، استفاده از تولید سیگنال مانده است. در این پایان‌نامه از روش تخمین عیب مبتنی بر رویکرد استفاده شده است.
- بازسازی عیب^۵: به فرایند تخمین اندازه عیب رخ داده در سیستم، بازسازی عیب گفته می‌شود و شکل نموداری عیب را، که معرف تمام ویژگی‌های عیب است، بیان می‌کند. اگر فرایند بازسازی عیب به خوبی صورت پذیرد و عیب رخ داده شده در خروجی بازسازی شود، استفاده از این روش می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش‌های تشخیص عیب مبتنی بر تولید سیگنال مانده شود.

۳-۴-۱ مشخصه‌های وقوع عیب

عیب در سیستم‌های کنترلی براساس مشخصه‌ی وقوع آن‌ها به دو صورت زیر بیان خواهد شد که در فصل بعد نیز به‌طور مفصل بیان خواهند شد.



شکل ۱-۱: سه مرحله فرایند تشخیص عیب [۹].

¹Fault Isolation
²Fault Identification
³Fault Diagnosis
⁴ Fault Estimation
⁵Fault Reconstructions

۴-۴-۱ عیب بر اساس مشخصه‌ی زمانی

- عیب ناگهانی^۱: عیبی که به صورت تابع پله می‌باشد و بیانگر ایراد و خرابی در قسمتی از سیستم است و بر عملکرد کلی سیستم و پایداری آن تأثیر مستقیم داشته و سریعاً نیاز به رفع خرابی و مشکل دارد.
- عیب نرم (افزایشی)^۲: این عیب به صورت تابع شیب مدل می‌شود و در اثر فرسوده و کهنه بودن سیستم رخ می‌دهد؛ و نشانگر تغییرات کند پارامتری سیستم و رانش در سیگنال تحت نظر است. این عیب آسیب ناگهانی ندارد اما شناسایی آن دشوار است.
- عیب موقتی (متناوب)^۳: عیبی که ترکیبی از ضربه‌ها با دامنه‌های متفاوت مدل می‌شود. به صورت متناوب ظاهر شده و سپس ناپدید می‌شود.

۴-۵-۱ عیب بر اساس مشخصه‌ی مکانی

- خطای محرک^۴: باعث از بین رفتن کل یا جزئی از عملیات کنترل می‌شود.
- خطای حسگر^۵: این عیب ناشی از اطلاعات اشتباهی است که از حسگرهایی دارای عیب به سیستم اصلی می‌رسد. امروزه برای حصول اطمینان و همچنین در صورت محدود نبودن از لحاظ ابعاد و هزینه‌ی سیستم از دو یا چند حسگر استفاده می‌شود.
- خطای اجزا^۶: این عیب در اجزای سیستم رخ می‌دهد و تغییر در رفتار دینامیکی سیستم را به دنبال خواهد داشت و نشانگر تغییر در پارامترهای فیزیکی سیستم است.

¹Abrupt Fault

²Incipient Fault

³Intermittent Fault

⁴Actuator Fault

⁵Sensor Fault

⁶Component Fault

۵-۱ اصطلاحات عیب

عیب‌هایی را که به‌طور معمول در سیستم رخ می‌دهد، می‌توان براساس چگونگی رخداد آن‌ها، به سه دسته زیر تقسیم نمود. در شکل (۱-۲) انواع عیب بر اساس زمان رخ دادن آن‌ها را می‌توان مشاهده نمود.

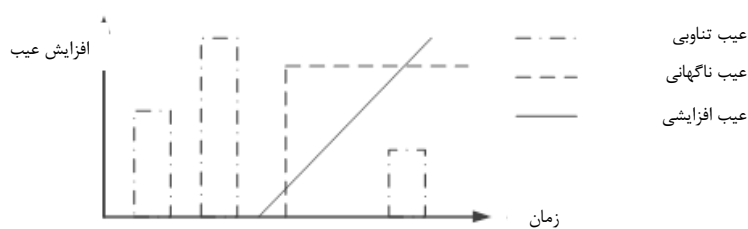
- عیب‌های ناگهانی: شامل قطع یا کاهش ناگهانی یک متغیر، نقص ناگهانی در یکی از اجزای مکانیکی و از کار افتادن ناگهانی یک زیر مجموعه سیستم است. این عیوب اغلب در نتیجه آسیب سخت‌افزاری و به‌صورت یک‌دفعه رخ می‌دهند.
- عیب‌های افزایشی (شیب ثابت): این عیب‌ها در مواردی که یکی از پارامترهای فیزیکی سیستم به تدریج از مقدار طبیعی خود منحرف می‌شود. همانند ایجاد نشستی در منابع یا خطوط انتقال سیال، افت تدریجی انرژی یا سیگنال ورودی به سیستم و یا تغییرات تدریجی بهره سنسورها در اثر تغییر شرایط محیطی از این قسم عیب‌ها می‌باشند. این عیوب به واسطه ویژگی‌های زمانی آهسته‌ی خود، تشخیص آن‌ها دشوارتر بوده اما از شدت خرابی کمتری برخوردار هستند.
- عیب‌های تناوبی: حالتی که مقادیر یکی از متغیرها یا پارامترهای سیستم برای یک بازه زمانی از وضعیت طبیعی خود منحرف شده و دوباره به حالت عادی برگردد. همانند آسیب جزئی در سیم‌کشی و رخ دادن اتصال‌های متناوب است.

۶-۱ مدل‌های توصیفی سیستم

- مدل کمی استفاده از روابط استاتیک و دینامیک بین متغیرها و پارامترهای سیستم به منظور توصیف رفتار سیستم با استفاده از روابط کمی ریاضی است.
- مدل کیفی: استفاده از روابط استاتیک و دینامیک بین متغیرها و پارامترهای سیستم به منظور توصیف رفتار سیستم با استفاده از عبارتهای کیفی ریاضی مانند روابط علی و معلولی و قوانین اگر - آنگاه است.
- مدل تشخیصی مجموعه روابط استاتیک و دینامیک که ارتباط بین ورودی‌های متغیر خاص، نشانه‌ها، با متغیرهای خروجی خاص، عیوب را مشخص می‌کند.
- افزونگی تحلیلی: استفاده از روش‌های بیشتر (نه لزوماً یکسان) برای تعیین یک متغیر است. یک روش آن استفاده از مدل ریاضی فرایند در فرم تحلیلی است.

۷-۱ ویژگی‌های سیستم

- قابلیت اطمینان^۱: توانایی یک سیستم در انجام یک عملکرد خواسته شده تحت شرایط مفروض، در یک دامنه و دوره زمانی مشخص.
- ایمنی^۲: قابلیت یک سیستم برای جلوگیری از ایجاد خطر برای انسان یا تجهیزات یا محیط پیرامون.



شکل ۲-۱: انواع عیب در یک فرآیند [۱۰].

¹Reliability

²Safety

- در دسترس بودن^۱: احتمال اینکه یک سیستم یا تجهیزات به صورت رضایت بخش یا به طور مؤثر در هر لحظه زمانی عمل کند.

۸-۱ ساختار کلی پایان نامه

هدف از این پایان نامه، تشخیص و جداسازی عیب آونگ وارون با استفاده از مشاهده گر مود لغزشی مبتنی بر منطق فازی است. بدین منظور مطالب عنوان شده در فصل های آتی به شرح زیر است: در فصل ۲، ابتدا به کلیاتی درباره مفاهیم و انواع عیوب و همچنین نحوه مدل سازی آن ها پرداخته می شود. در ادامه ی فصل روش های تشخیص و جداسازی عیب دسته بندی شده و نحوه ی کاربرد و ساز و کار هر روش نیز بیان خواهند شد. با توجه به اینکه پایان نامه بر رویکرد مبتنی بر مدل تمرکز دارد، تمامی مفاهیم حول روش های مبتنی بر مدل بحث شده اند.

در فصل ۳، سیستم پاندول معکوس که یک سیستم ذاتاً ناپایدار است، معرفی شده است و به مدل سازی و بیان معادلات آن پرداخته می شود. معادلات بیان شده غیر خطی بوده و از آنجایی که در تخمین عیب و طراحی رؤیتگر مورد نظر، به رؤیت پذیری ماتریس های حالت نیاز است. به همین خاطر ابتدا معادلات غیر خطی را به دست می آوریم؛ سپس به خطی تبدیل کرده و ماتریس های فضای حالت آن را بیان می کنیم.

پس از بیان کردن این پیش نیازها در فصل ۴، مبحث مود لغزشی به طور خلاصه عنوان می شوند. سپس از مزایا و معایب استفاده از آن در کنترل سیستم ها مباحثی شرح داده می شود و با توجه به معادلاتی که در طول فصل بررسی شده اند، طراحی اولیه رؤیتگر مود لغزشی با اعمال عیب صورت می گیرد. سپس در ادامه معادلات فازی جهت طراحی رؤیتگر مود لغزشی فازی با اعمال عیب حسگر بیان می شوند. در این فصل از مدل سیستم فازی T-S که یک سیستم به روز و انعطاف پذیر است، برای طراحی و چینش قوانین فازی استفاده می شود. در پایان این فصل با در نظر گرفتن معادلات سیستم آونگ معکوس و با

¹Availability

اعمال عیب حسگر، تشخیص و جداسازی عیب انجام می‌شود و کاربردی بودن مباحث مطرح شده بررسی گشته و نتایج شبیه‌سازی آن ارائه می‌گردد.

در پایان و در فصل ۵ با جمع‌بندی مطالب، مباحث قابل تأملی نیز در این حوزه پیشنهاد داده شده که می‌توان برای پیشبرد هرچه بهتر این حوزه، از آن‌ها بهره گرفت.

فصل ۲ - مبانی تشخیص و جداسازی عیب و

روش‌های تخمین عیب

۲-۱ پیشگفتار

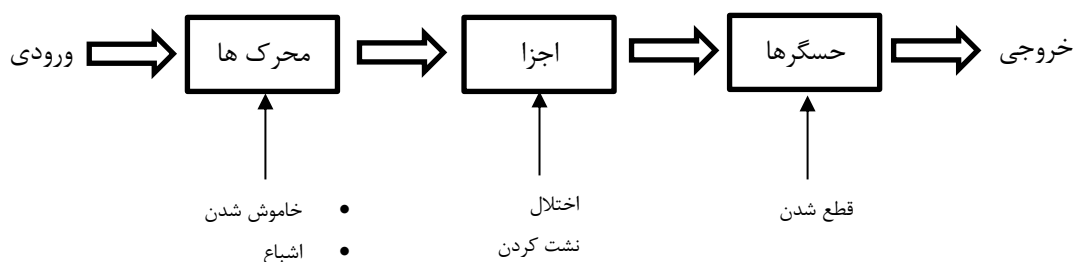
در این فصل به بررسی موضوعات اصلی و مد نظر پایان نامه از انواع عیب محتمل در فرایندها و همچنین نحوه‌ی مدل‌سازی آن‌ها مباحثی بیان شده است. در ادامه روش‌های تشخیص و جداسازی عیب دسته‌بندی شده و نحوه‌ی کاربرد و ساز و کار هر روش نیز بیان شده است. با توجه به اینکه پایان نامه بر رویکرد مبتنی بر مدل تمرکز دارد، تمامی مفاهیم حول روش‌های مبتنی بر مدل بحث می‌شوند.

۲-۲ طبقه‌بندی عیوب

همان‌گونه که در فصل قبل اشاره شد، عیب‌های موجود در یک سیستم را می‌توان با توجه به محل و نحوه‌ی رخ دادن آن‌ها تقسیم‌بندی نمود. در [۱۱،۱۰] قسمت‌های اصلی یک فرایند که امکان رخ دادن عیب در آن‌ها وجود دارد، بیان شده‌اند که در شکل ۲-۱ نیز نمایش داده شده‌اند.

۲-۲-۱ عیب عملگر

در واقع قسمتی از سیستم است که وظیفه‌ی اجرای دستورات کنترل‌کننده را دارد. عیب عملگر بیانگر کاهش عملکرد کنترل به‌طور کل یا جزئی هستند. به‌عنوان مثال: اگر بخواهیم نمونه‌ای برای از دست



شکل ۲-۱: مکان‌های رخ داد عیب و اثرات مخرب آن [۱۰].

دادن کلی محرک بیان کنیم. چسبیدن عملگر را عنوان می‌کنیم که در این حالت علی‌رغم تغییر در فرمان، در خروجی عملگر تغییری دیده نمی‌شود که صرف‌نظر از ورودی‌هایی که به آن اعمال می‌شود، هیچ تحرک قابل‌کنترلی ندارد. عیب‌های کلی محرک را در نتیجه شکستگی، قطعی، سوختگی سیم‌کشی، اتصال کوتاه و یا وجود یک جسم خارجی در محرک دانست؛ اما محرک‌هایی که به‌صورت جزئی دچار نقص شده‌اند، تنها بخشی از فعالیت نرمال یعنی تحت شرایط عملکرد نامی را اجرا می‌کنند.

۲-۲-۲ عیب حسگر

ارتباط یک سیستم با محیط پیرامونش از طریق حسگر امکان‌پذیر است. این عیب بیانگر دریافت اطلاعات نادرست از حسگرها است که به‌صورت عیب کلی و جزئی وجود دارد. برای نمونه، در عیب کلی اطلاعات دریافت شده از حسگر، ارتباطی با مقدار واقعی پارامتر فیزیکی اندازه‌گیری شده ندارد. یا عواملی مانند قطع سیم و یا از بین رفتن سطح تماس می‌توانند باعث بروز چنین آسیبی گردد و برای عیب جزئی می‌توان گفت: مقدار خوانده شده با مقدار متغیر فیزیکی مرتبط بوده به‌طوری که هنوز می‌توان اطلاعات مفیدی از مقدار اندازه‌گیری شده به‌دست آورد و عواملی مانند کاهش بهره، وجود یک مقدار ثابت انحراف و یا افزایش میزان نویز باعث بروز چنین آسیبی در سیستم می‌گردند.

۲-۲-۳ عیب اجزاء

عیب اجزاء، شامل تمامی قسمت‌های تشکیل‌دهنده یک سیستم می‌باشد و شامل عیوبی می‌شوند که در اجزاء خود سیستم رخ می‌دهد، یعنی تمام عیوبی که نمی‌توان آن‌ها را به‌عنوان عیب سنسور یا محرک دسته‌بندی کرد، تحت عنوان عیب اجزاء به آن‌ها اشاره می‌شود. این عیوب تغییرات در پارامترهای سیستم از جمله جرم، ضرایب آیرودینامیکی، نوسانات ثابت و ... را نشان می‌دهد که اغلب به علت آسیب ساختاری رخ می‌دهند. آن‌ها اغلب باعث تغییر در رفتار دینامیکی سیستم کنترل می‌شود. با توجه به تنوع آن‌ها، عیوب اجزاء دسته بسیار گسترده‌ای از موقعیت‌ها (پیش‌بینی نشده) را پوشش می‌دهد و این

عیوب دشوارترین عیوب برای مقابله هستند. لازم به ذکر است که عدم قطعیت‌های بدون ساختار، نویز فرایند (مدل) و نویزهای اندازه‌گیری خارج از محدوده تشخیص عیب می‌باشند. عدم قطعیت‌های بدون ساختار عمدتاً از پیش مدل نمی‌شوند. نویز فرایند هم به عدم تطابق بین فرایند واقعی و معادلات پیش‌بینی شده سیستم برمی‌گردد. نویزهای اندازه‌گیری هم به اجزای افزوده شده‌ی فرکانس بالا در سنسورهای اندازه‌گیری مربوط می‌شود. بایستی الگوریتم تشخیص عیب به گونه‌ای طراحی و پیاده‌سازی شود که بتواند عیب و اغتشاش را به‌درستی از یکدیگر تفکیک کند و در صورت بروز اغتشاش، هشدار ایجاد عیب اعلام نشود. روش‌های متعددی برای دستیابی به این منظور موجود است که بسته به نوع فرایند می‌توان از آن‌ها استفاده نمود.

۴-۲-۲ مدل‌سازی عیوب

عیوب را می‌توان به دو مدل جمع‌شونده^۱ (جمععی) و ضرب‌شونده^۲ (ضربی) طبقه‌بندی کرد. عیوب جمععی برای نشان دادن عیب اجزاء در سیستم مناسب هستند؛ در حالی که عیوب سنسور و محرک به واسطه ماهیتشان، در عمل اغلب ضربی هستند. در شکل ۲-۲ انواع مدل عیوب نشان داده شده است. این بخش بیشتر بر روی نمایش ریاضی این عیوب متمرکز بوده که بخشی از آن راجع به اینکه، چه وقت و چرا یک نمایش مناسب‌تر از دیگری است به دست می‌دهد. در کل این بخش در نمایش فضای حالت سیستم‌های دینامیکی به کار می‌رود؛ به طوری که ورودی‌های سیستم $u \in \mathbb{R}^m$ به خروجی‌های اندازه‌گیری شده $y \in \mathbb{R}^p$ به فرم زیر در می‌آید:

$$S_{nom} = \begin{cases} x_{k+1} = Ax_k + Bu_k \\ y_k = Cx_k + Du_k \end{cases} \quad (2-1)$$



شکل ۲-۲: انواع عیب در یک فرایند [۹].

¹Additive

²Multiplicative

که در آن $x_k \in \mathbb{R}^n$ حالت سیستم در زمان k می‌باشد و A ، B ، C و D ماتریس‌های (احتمالاً متغیر با زمان) با ابعاد مناسب هستند [۱۲].

۵-۲-۲ عیوب ضرب شونده

مدل‌سازی عیوب ضربی عمدتاً برای بیان عیوب سنسور و محرک به کار می‌رود. عیوب محرک، بد عمل کردن محرک‌های سیستم را نشان می‌دهند. چنین عیوبی می‌تواند به‌عنوان تغییر ناگهانی اقدام کنترل نامی از u_k به فرم معادله (۲-۲) مدل‌سازی شود:

$$u_k^f = u_k + (1 - \Sigma_A)(\bar{u} - u_k) \quad (۲-۲)$$

که $\bar{u} \in R^m$ (لزوماً ثابت نیست) برداری است که قابل دست‌کاری نبوده و Σ_A برابر است با:

$$\Sigma_A = \text{diag}\{\sigma_1^a, \sigma_2^a, \dots, \sigma_m^a\} \quad (۲-۳)$$

در این روش $\sigma_i^a = 0$ بیانگر عیب کلی (خرابی کامل) محرک i ام سیستم می‌باشد که در نتیجه اقدام کنترلی محرک i ام با عضو i ام بردار آفست غیرقابل کنترل \bar{u} معادل است، یعنی $u_k^f(i) = \bar{u}(i)$ از طرف دیگر $\sigma_i^a = 1$ نشان می‌دهد که محرک i ام به‌طور نرمال عمل می‌کند ($u_k^f(i) = u(i)$). همچنین کمیت‌های $m, \dots, 2, 1$ می‌توانند مقداری را بین دو مقدار 0 و 1 اختیار کند که بیان عیوب جزئی محرک را ممکن می‌سازد. با جایگذاری تلاش کنترلی معیوب u_k^f بجای ورودی کنترل نامی u_k در معادله (۲-۱) مدل فضای حالت زیر حاصل می‌شود:

$$S_{mult.af} = \begin{cases} x_{k+1} = Ax_k + B\Sigma_A u_k + B(1 - \Sigma_A)\bar{u} \\ y_k = Cx_k + D\Sigma_A u_k + D(1 - \Sigma_A)\bar{u} \end{cases} \quad (۲-۴)$$

به این مدل‌ها تحت عنوان «مدل عیب ضربی» اشاره می‌شود و در ادبیات به صورت گسترده به کار می‌رود. شایان ذکر است که اگرچه عیوب محرک ضربی مستقیماً بر دینامیک‌های خود سیستم کنترل شده تأثیر نمی‌گذارند، اما آن‌ها می‌توانند به‌طور قابل توجهی دینامیک‌های سیستم حلقه بسته را تحت تأثیر قرار دهند و حتی ممکن است بر کنترل‌پذیری سیستم اثر بگذارند.

$$y_k^f = y_k + (I - \Sigma_S)(\bar{y} - y_k) \quad (۵-۲)$$

که $\bar{y} \in \mathbb{R}^p$ یک بردار آفست می باشد و

$$\Sigma_s = \text{diag}\{\sigma_1^s, \sigma_2^s, \dots, \sigma_p^s\}, \sigma_i^s \in \mathbb{R} \quad (6-2)$$

که $\sigma_j^s = 0$ بیانگر عیب کلی سنسور $\sigma^s = 1$ و امواج حالت عادی عملکرد سنسور ازم را مدل سازی می کند. پس عیوب جزئی با در نظر گرفتن $\sigma_j^s \in (0, 1)$ مدل خواهند شد. با جایگذاری خروجی تحت عیب y_k^f بجای مقدار نامی y_k در (۲-۱) مدل فضای حالت زیر که نمایانگر عیوب سنسور ضربی است، به دست می آید.

$$S_{mult.sf}: \begin{cases} x_{k+1} = Ax_k + Bu_k \\ y_k = \Sigma_s Cx_k + \Sigma_s Du_k + (I - \Sigma_s)\bar{y} \end{cases} \quad (2-7)$$

در این روش ترکیب عیوب سنسور و محرک ضربی به رابطه زیر منتهی می گردد.

$$S_{mult}: \begin{cases} x_{k+1} = Ax_k + B\Sigma_A u_k + b(\Sigma_A \cdot \bar{u}) \\ y_k = \Sigma_s Cx_k + \Sigma_s D\Sigma_A u_k + d(\Sigma_A \cdot \Sigma_s \cdot \bar{u} \cdot \bar{y}) \end{cases} \quad (8-2)$$

که

$$\begin{aligned} b(\Sigma_A \cdot \bar{u}) &= B(I - \Sigma_A)\bar{u} \\ d(\Sigma_A \cdot \Sigma_s \cdot \bar{u} \cdot \bar{y}) &= \Sigma_s D(I - \Sigma_A)\bar{u} + (I - \Sigma_s)\bar{y} \end{aligned} \quad (9-2)$$

در نتیجه مدل ضربی، روشی طبیعی برای مدل سازی طیف گسترده ای از عیوب سنسور و محرک محسوب می شود اما از این روش برای بیان عیب اجزاء کلی تر نمی توان استفاده کرد [۱۳].

۶-۲-۲ عیوب جمع شونده

عیوب جمعی بیانگر عیوب کلی تری نسبت به عیوب ضربی هستند. یک مدل فضای حالت با عیوب جمعی به شکل زیر می باشد:

$$S_{add}: \begin{cases} x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + Ff_k \\ y_k = Cx_k + Du_k + Ef_k \end{cases} \quad (2-10)$$

که $f_k \in \mathbb{R}^{n_f}$ سیگنال توصیف عیب است. این نمایش در اصل ممکن است برای مدل سازی کلاس گسترده ای از عیوب، شامل عیوب سنسورها، عملگرها و اجزاء استفاده شود. با این وجود، استفاده از مدل

(۲-۷) اغلب به سیگنال f_k که مرتبط به یک یا چند سیگنال از x_k و y_k و u_k مرتبط شده، منتهی می‌گردد.

به هنگام نمایش عیوب سنسور و محرک، یکی از ضعف‌های مدل جمعی نمایان می‌شود که به همین علت، تمایز این دو عیب برحسب روابط ورودی و خروجی دشوار می‌شود. در واقع فرض کنید که مدل زیر برای بیان عیوب در عملگرها و سنسورها بکار می‌رود.

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + Bu_k + f_k^a \\ y_k &= Cx_k + Du_k + f_k^s \end{aligned} \quad (2-11)$$

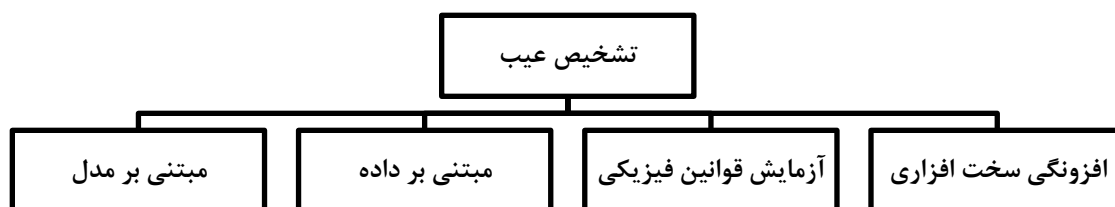
با نوشتن تابع تبدیل مربوطه

$$y(z) = (C(zI - A)^{-1}B + D)u_k + C(zI - A)^{-1}f_k^a + f_k^s \quad (2-12)$$

واضح است که تأثیر یک عیب عملگر بر خروجی سیستم می‌تواند هم با سیگنال f_k^a و هم سیگنال f_k^s مدل‌سازی شود. همان‌گونه که قبلاً اشاره شد یک مزیت نمایش جمعی این است که نمایش جمعی به نسبت نمایش ضربی برای مدل‌سازی کلاس عمومی‌تری از عیوب استفاده می‌شود [۱۴، ۱۵].

۲-۳ روش‌های مختلف تشخیص عیب

به‌منظور تشریح ایده‌های اصلی تکنیک تشخیص عیب براساس مدل که مدنظر ماست، ابتدا یک کلاس‌بندی کلی از روش‌های تشخیص عیب ارائه داده می‌شود [۱]؛ البته با توجه به موضوع مد نظر پایان‌نامه روش‌های مرتبط به‌صورت مبسوط ارائه خواهند شد. در زمینه‌ی تشخیص عیب، روش استفاده از مدل نسبت به روش‌های دیگر نسبتاً جدیدتر است و پیشرفت سریع و کارایی آن توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. همان‌طور که در شکل (۲-۳) مشاهده می‌شود، روش‌های تشخیص و شناسایی عیب را به چهار دسته‌ی اصلی می‌توان تقسیم‌بندی نمود که در ادامه و در جای خود، هرکدام به‌طور خلاصه معرفی شده‌اند.



شکل ۲-۳: دسته بندی روش های تشخیص عیب [۱].

۱-۳-۲ افزونگی سخت افزاری

ایده اصلی روش افزونگی سخت افزاری^۱ قرار دادن نمونه‌ای مشابه شامل اجزای سخت افزاری سیستم در کنار سیستم اصلی در حال کار است. هنگامی که عملکرد یکی از اجزای اصلی با سیستم تشخیص عیب اختلال پیدا کند، عیب در آن مشخص خواهد شد. از اصلی‌ترین مزایای این روش، معتبر بودن (قابل اطمینان بودن) و تشخیص مکان رخداد عیب در فرایند نام برد. در مقابل، به علت استفاده از یک سیستم اضافی (که هزینه تشخیص عیب را بسیار بالا می‌برد) کاربرد آن به تشخیص وقوع عیب در اجزای فرایند اصلی محدود شده است. عمدتاً در فرایندهایی که از این روش برای تشخیص عیب استفاده می‌شود تشخیص وقوع عیب در اجزای اصلی فرایند مد نظر است. در واقع می‌توان گفت این روش یکی از راه‌های تشخیص و جداسازی عیب محسوب می‌شود؛ به عنوان مثال: در مورد تشخیص و جداسازی عیب در حسگرهای چندگانه می‌توان چنین بیان کرد که در این حالت حسگرهای افزونگی سخت افزاری (سخت افزاری اضافی) را که به صورت موازی متصل شده‌اند، بر روی سیستم نصب می‌کنند. با انجام این کار، تعداد حسگرهایی که در سیستم اصلی وجود دارند، بیشتر می‌شود. هنگامی که یک عیب در سیستم رخ دهد، تعدادی از این حسگرها، خروجی متفاوت با حسگرهای دیگر خواهند داشت و با مقایسه کردن خروجی حسگرهای مختلف می‌توان عیب را در سیستم، تشخیص و شناسایی و همچنین جداسازی کرد.

۴-۲ آزمایش قوانین فیزیکی (تست معقول)

روش تست معقول^۲ بر اساس چک کردن قوانین ساده‌ای از اجزای سیستم، عیب موجود در فرایند را

^۱Hardware redundancy

^۲Plausibility test

مشخص می‌کند. این روش به‌طور کامل محدود به تشخیص عیب در سیستم‌های پیچیده و یا برای تفکیک عیب‌ها استفاده می‌شود. با فرض اینکه عیب‌های موجود در سیستم‌ها به از دست رفتن معقولیت منجر می‌شوند، بررسی قوانین، اطلاعات مناسبی در مورد عیب‌های سیستم را به ما می‌دهند که مطالعه و بررسی آن‌ها می‌تواند زمان، نوع و مکان وقوع عیب را مشخص نماید.

۱-۴-۲ تشخیص عیب مبتنی بر داده

در این روش با دانستن اطلاعاتی از ارتباط بین ورودی و خروجی سیستم‌ها، می‌توان از این روش برای تشخیص و جداسازی عیب استفاده کرد. در این روش بدون استفاده از تجهیزات فیزیکی می‌توان تمامی محاسبات لازم جهت تشخیص و جداسازی عیب سیستم مورد نظر را انجام داد. در واقع داده‌های هر فرایند اطلاعات مناسبی از نحوه انجام آن و اتفاقات داخلی آن در بر دارد که با پردازش روی داده‌ها می‌توان عیب‌ها را تشخیص داد. تشخیص عیب از روی سیگنال، اکثراً در پیدا کردن عیب و بعضاً در جداسازی آن در حالت پایدار فرایندها، مورد استفاده قرار می‌گیرد. کارایی روش تشخیص عیب مبتنی بر داده^۱ در سیستم‌های دینامیکی که محدوده عملکردی و تغییرات وسیعی دارند، بسیار محدود است. برای مثال: در نمونه‌ی آزمایشگاهی سیستم پاندول معکوس امکان نصب کردن وسایلی جهت اندازه‌گیری سرعت موتور یا سنجش زاویه آونگ به دلیل هزینه‌ی اقتصادی و محدودیت سخت‌افزاری وجود ندارد و بهترین روش برای تحلیل رفتار این سیستم، استفاده کردن از روش مبتنی بر داده می‌باشد.

۲-۵ تشخیص عیب مبتنی بر مدل

مطالعه بر روی تشخیص عیب مبتنی بر مدل^۲ از اوایل سال ۱۹۷۰ آغاز شد. این روش در آن زمان به شدت با تئوری رؤیتگر که به تازگی پایه‌ریزی شده بود، توسعه یافت. ایده‌ی اولیه‌ی روش تشخیص عیب مبتنی بر مدل، جایگذاری مدل فرایند به‌جای افزونگی سخت‌افزاری است. مدل ایجاد شده در کامپیوتر

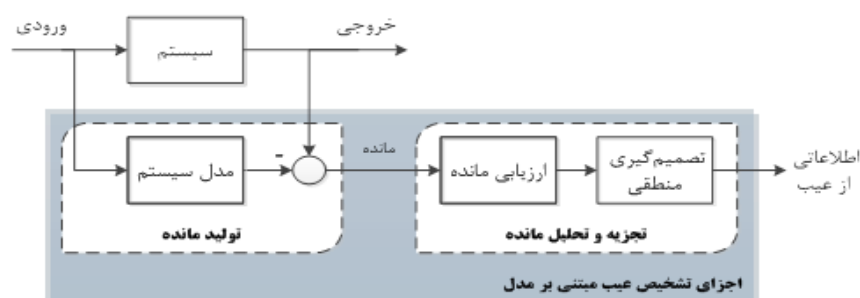
^۱Signal processing

^۲Model-based

همانند سخت‌افزاری دیگر در کنار فرایند، عمل می‌کند و در صورت بروز عیب، خروجی سیستم واقعی با خروجی مدل نرم‌افزاری اختلاف پیدا می‌کند. این روش منوط به داشتن مدل مناسبی از سیستم است که بتواند مانده را در شرایط مختلف و به موقع، تولید کند. مشکلاتی چون عدم قطعیت در مدل‌سازی، اغتشاش و نویز ورودی به سیستم از عواملی است که موجب تولید ناخواسته‌ی مانده می‌شوند و باید این موارد را مورد توجه قرار داد. اولین روش آشکارسازی عیب مبتنی بر مدل که «فیلتر آشکارساز نقص» نام برده می‌شد، توسط *Beard* و *Jones* مطرح شد. سپس تکنیک و تئوری تشخیص عیب مبتنی بر مدل به سمت سیستم‌های دینامیکی رفته و به سرعت توسعه یافت و اکنون نیز یکی از زمینه‌های مهم در مهندسی و تئوری کنترل خودکار می‌باشد.

همان‌طور که در فصل قبل اشاره شد اختلاف بین خروجی اصلی و خروجی تخمین زده شده را مانده نامگذاری می‌کنند. مانده، اطلاعات بسیار مفیدی برای تشخیص عیب دارد که پردازش مناسب آن (ارزیابی مانده) می‌تواند زمان و محل رخداد عیب را با دقت مناسبی در بر داشته باشد. شیوه‌ی تشخیص عیب در این روش در شکل (۴-۲) دیده می‌شود.

امروزه تشخیص عیب بر اساس مدل به‌طور کامل در اجزای سیستم‌های کنترل، ربات‌ها، سیستم‌های حمل و نقل، قدرت، فرایندهای تولید و سیستم‌های کنترل فرایند ادغام شده است. مسئله‌ی اصلی در استفاده از روش تشخیص عیب مبتنی بر مدل، می‌تواند استخراج اطلاعات مورد نیاز عیوب مد نظر از سیگنال‌های مانده باشد. به این منظور دو تدبیر مختلف توسعه یافته است [۱، ۱۶].



شکل ۲-۴: تشخیص عیب مبتنی بر مدل [۱].

۱- طراحی بخش تولید مانده^۱ برای رسیدن به جداسازی عیب‌های مورد نظر از سایر عیوب، اغتشاشات نامعین و نامعینی‌های مدل و تولیدکننده مانده با استفاده از ورودی‌های در دسترس و اطلاعات خروجی از فرآیند، سیگنال نشان‌دهنده‌ی عیب (مانده) را تولید می‌کند. مقدار مانده زمانی که در سیستم عیبی رخ نداده باشد به‌طور معمول باید صفر یا نزدیک به صفر باشد، ولی در غیر این صورت به معنای رخ دادن عیب در سیستم است.

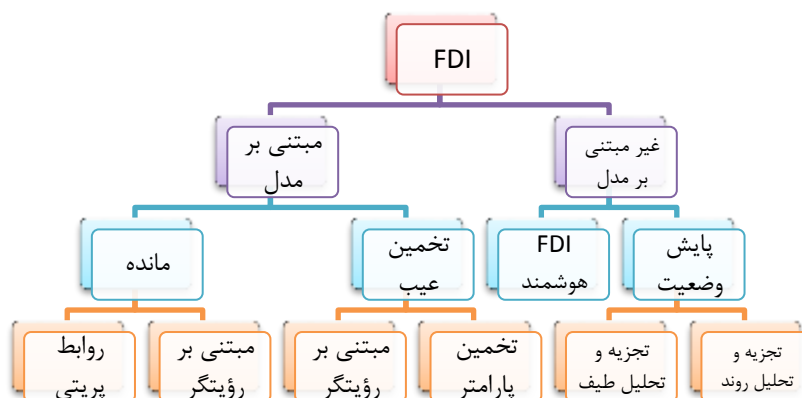
۲- استخراج اطلاعات درباره‌ی عیوب مورد نظر از سیگنال‌های مانده با استفاده از پردازش مانده؛ این روش ارزیابی مانده نامیده می‌شود. یک فرآیند ارزیابی ممکن است شامل یک تست حد آستانه‌ی ساده بر روی مقادیر آنی یا میانگین متحرکی از مانده می‌باشد. به همین ترتیب ممکن است روش‌های تئوری تصمیم آماری همچون آزمون نسبت احتمال پی‌درپی، برای ارزیابی مانده استفاده شود. بسیاری از کارهای انجام گرفته در زمینه تشخیص عیب مبتنی بر مدل بیشتر بر مسائل تولید مانده متمرکز است. دلیل این موضوع این است که ارزیابی مانده و تصمیم‌گیری بر روی مانده‌های طراحی‌شده‌ی مناسب، نسبتاً آسان است.

۲-۶ تشخیص و جداسازی عیب

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، در ادبیات برای تشخیص و جداسازی عیب (FDI)^۲ طبقه‌بندی‌های زیادی وجود دارد و یکی از مشهورترین آن‌ها برحسب به‌کارگیری و یا عدم به‌کارگیری رویکرد مبتنی بر مدل می‌باشد. در [۱۶] طرح‌های FDI بر اساس ویژگی‌شان در دو گروه اصلی طبقه‌بندی می‌شوند، FDI با استفاده از طرح‌های مبتنی بر مانده و طرح‌های مبتنی بر تخمین عیب (شکل ۲-۲).
((۵

¹ Residual generator

² Fault Ditection and Isolaytion



شکل ۲-۵: رویکردهای FDI [۱۶].

در استفاده از رویکرد مبتنی بر مدل، مزایای فراوانی وجود دارد. به طور مثال هیچ سخت‌افزار اضافی جهت تشخیص الگوریتم FDI نیاز نیست. در شرایط نامی یا عاری از عیب، مانده باید صفر و در زمان رخداد عیب غیر صفر باشد. گاهی این سیگنال مانده با یک حد آستانه برای جلوگیری از هشدارهای کاذب ناشی از اغتشاش یا عدم قطعیت اعمال می‌شود. زمانی که سیگنال مانده از حد آستانه عبور کند، نمایشگر وقوع عیب را نشان می‌دهد [۱۶].

۱-۶-۲ تولید مانده

متدهای متعددی برای تولید مانده در هر دو مدل سیستم گسسته و پیوسته وجود دارد که در این بخش معمول‌ترین مدل‌های مبتنی بر مدل برای تولید مانده معرفی می‌شوند.

- متد روابط برابری

این متد در تولید مانده روش متداولی می‌باشد. به منظور توصیف این متد سیستمی را در نظر بگیرید که معادلات خروجی آن به شرح زیر است.

$$y(k) = Cx(k) + f(k) + \xi(k) \quad (۲-۱۳)$$

که $y(k) \in \mathbb{R}^p$ بردار اندازه‌گیری، $x(k) \in \mathbb{R}^n$ بردار حالت و $f(k)$ بردار عیوب سنسور، $\xi(k)$ بردار نویز و $C \in \mathbb{R}^{p \times n}$ ماتریس اندازه‌گیری است. اگر سازگاری بر اساس سخت‌افزار اضافه وجود دارد، یعنی

تعداد بیشتری از حداقل سنسور لازم است، از این رو شرایط ابعاد $p > n$ و $rank(C) = n$ باید تأمین گردد. سپس سیگنال بردار پریتی (مانده) از قرار زیر به دست می‌آید:

$$r(k) = Vy(k) \quad (۱۴-۲)$$

$$s. t. VC = 0$$

زمانی که این شرایط برقرار شود، بردار پریتی (مانده) به شرح زیر می‌باشد:

$$r(k) = v_1[f_1(k) + \xi_1(k)] + \dots + v_m[f_m(k) + \xi_m(k)] \quad (۱۵-۲)$$

که v_i ، i مین ستون V و $f_i(u)$ ، i مین عنصر $f(k)$ می‌باشند که به معنای رخداد عیب در i مین سنسور است. نقطه مثبت این مدل سادگی در طراحی و پیاده‌سازی و تولید مانده می‌باشد و در کاربردهای مبتنی بر سخت‌افزار اضافه از جمله سیستم هدایت ناوبری متصل به بدنه مفید می‌باشد [۱۶].

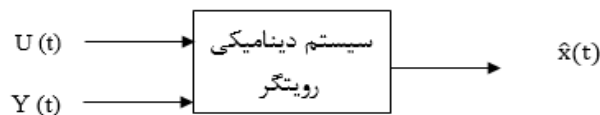
• رویکرد تخمین پارامتر

در این رویکرد پارامترهای مدل سیستم با استفاده از اندازه‌گیری‌های ورودی و خروجی سیستم تخمین زده می‌شوند که در زمان مواجهه با عیوب اجزاء بسیار مفید می‌باشد. ایده اصلی این است که مانده‌ها با آشکارسازی، تغییری در پارامترهای سیستم به وجود می‌آیند. سپس این مانده‌ها در جهت آشکار نمودن و جداسازی عیوب قابل استفاده هستند. مشکل اصلی این رویکرد آن است که پارامترهای مدل باید معنایی فیزیکی داشته باشند و با پارامترهای فیزیکی سیستم مرتبط باشند. برای مشاهده جزئیات بیشتر می‌توان به [۱۶] مراجعه نمود.

• رویکرد مبتنی بر رویتگر

روشی که پایان‌نامه حاضر بر پایه‌ی آن سوار است. بهره‌گیری از روش تولید مانده بر اساس رویتگر است. لذا تمرکز مباحث پایان‌نامه بر روی این روش متمرکز خواهد بود. در تعریف رویتگر می‌توان گفت: سیستم دینامیکی‌ای را که متغیرهای حالت آن تخمینی از متغیرهای حالت یک سیستم دیگر باشد را **رویتگر** آن سیستم می‌نامند. در شکل (۶-۲) می‌توان سیستم دینامیکی رویتگر را مشاهده نمود. عبارت

¹Observer



شکل ۲-۴: سیستم دینامیکی رویتگر [۱۶].

رویتگر اولین بار در سال ۱۹۶۳ میلادی توسط لیونبرگر وارد نظریات سیستم‌های خطی شد. لیونبرگر نشان داد که می‌توان برای هر سیستم خطی که دارای خاصیت رؤیت پذیری است یک رویتگر طراحی نمود که خطای تخمین آن (تفاضل بین سیستم واقعی و حالت رویتگر) با هر سرعتی که مد نظر ما باشد به سمت صفر برود. در واقع رویتگر، سیستمی دینامیکی است که ورودی‌های آن از ورودی و خروجی سیستم اصلی و همچنین خروجی آن از متغیرهای حالت تخمین زده شده، تشکیل شده است.

درواقع رویکرد مبتنی بر رؤیتگر را می‌توان برای تولید مانده‌ها با اندازه‌گیری اختلاف بین خروجی‌های سیستم واقعی و تخمین زده شده، بکار گرفت. نقطه قوت اصلی این رویکرد نسبت به بکارگیری معادلات پیریتی این است که این رویکرد برای تحمل‌پذیری حدی از نامعینی و غیرخطی بودن مدل‌سازی مناسب‌تر است. به همین دلیل رویکرد مبتنی بر رؤیتگر توجه بیشتری را در ادبیات معطوف به خود داشته است. نمونه کلی سیستم دینامیکی با عیوب که قابل ارائه در مدل فضای حالت زیر می‌باشد، در

نظر بگیرید [۱۶].

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + F_1 f(t) \quad (15-2)$$

$$y(t) = Cx(t) + F_2 f(t)$$

یک رؤیتگر ارائه شده در شکل (۲-۶) می‌تواند با معادله زیر توصیف شود.

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + Le_y(t) \quad (15-2)$$

$$\hat{y}(t) = C\hat{x}(t)$$

که $e_y(t) = y(t) - C\hat{x}(t)$ بوده و $L \in \mathbb{R}^{n \times q}$ بهره رؤیتگر طراحی شده، $\hat{x}(t)$ تخمین حالت‌ها، $\hat{y}(t)$

تخمین خروجی و $e_y(t)$ خطای تخمین خروجی می‌باشد.

۲-۶-۲ تشخیص و جداسازی عیب با استفاده از منطق فازی

در [۱۷]، با استفاده از رؤیتگر $T-S$ تمامی حالت‌های عیب توسط این رؤیتگر تخمین زده است؛ که این تخمین به صورتی، بیانگر فلوچارت مراحل رخداد عیب در سیستم است. در [۱۸]، این‌گونه بیان شده است: چنانچه بخواهیم از روش فازی برای تشخیص و جداسازی عیب در یک سیستم استفاده کنیم، آن سیستم باید مقاوم باشد تا بتواند خطای واقعی را نمایش دهد و دلیل آن وجود برخی از عدم قطعیت‌ها (اغتشاش یا ورودی‌های نامعین) است. در [۱۹، ۲۰] برای حل این مشکل از ترکیب رؤیتگر فازی با مود لغزشی جهت مقاوم‌سازی استفاده شده است. متد مورد نظر به این صورت است که با طراحی و تعریف دو رؤیتگر فازی- لغزشی که یکی از آن‌ها وظیفه‌ی سوق دادن قسمت سویچینگ و در نهایت سعی در شناسایی عیب را دارد و دیگری جهت تخمین حالات به کار برده می‌شود.

فصل ۳ - پاندول معکوس و بررسی معادلات آن

۱-۳ پیشگفتار

در مورد تاریخچه‌ی بکارگیری و ساخت سیستم پاندول معکوس، بحث‌های متفاوتی وجود دارد اما در [۱۶،۱] این‌گونه بیان شده است که در سال ۱۹۶۰ روبرگ با همکاری لئوناردو گولد^۱ که مدیریت پروژه را بر عهده داشت در دانشگاه MIT آمریکا اولین چارچوب و معادلات را برای پاندول معکوس ارائه کردند. در سال ۱۹۶۳ نیز کُنون و هیدان تصویری دیگر، از این سیستم ارائه نمودند. در سال ۱۹۶۶ پروفیسور کلود شنون^۲ توصیف‌های متفاوتی از چارچوب مکانیکی و دینامیک پاندول معکوس ارائه داد. هرچند که عده‌ای از محققین تعیین چارچوب‌های گفته شده را به تراکسال^۳ در ۱۹۶۵ نسبت می‌دهند؛ اما در نهایت در سال ۱۹۶۷ تا ۱۹۷۰ افرادی همانند کاننو دورف و اوگاتا^۴ معادلات پاندول معکوس را تکمیل کردند و معادلات آن را به‌صورت فضای حالت امروزی تبیین کردند. در اواخر دهه‌ی ۱۹۷۰ قابلیت و کاربرد پاندول معکوس و همچنین طراحی بی‌نظیری که در پایه‌ی چرخش عمودی آن وجود داشت، توجه مهندسی و محققین عرصه‌ی علم مواد و مکانیک را به خود جلب کرد. هرچند که در اواخر سال ۲۰۰۰ در مقاله‌ی چاپ شده توسط آستروم و فوروتا^۵ آن‌ها مدعی شدند که پاندول معکوس در همان سال ۱۹۵۰ به عنوان نمونه آزمایشگاهی وجود داشته است. در صورتی که با توجه به مقاله‌های چاپ شده در سال‌های فوق‌الذکر، هیچ اشاره‌ای مبنی بر تأیید این ادعا بیان نشده است و اکثر محققان علم کنترل،

¹ Rouberge & Leonardo Gold

² Caneon & Cluoad & shenun

³ Traxual

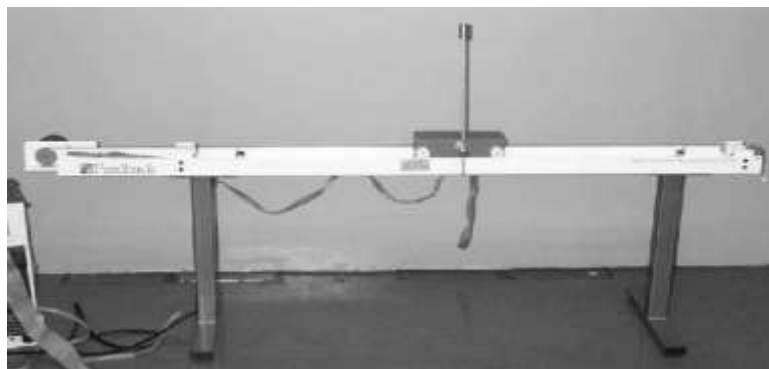
⁴ Caunen & Doruof & Ogata

⁵ Asteruom & Fouruota

عرصه‌ی پیدایش سیستم پاندول معکوس را از آغاز سال ۱۹۶۰ توسط رابرت و همکارش لئوناردو می‌دانند.

۲-۳ معرفی سیستم

سیستم پاندول معکوس از سیستم‌های کلاسیک در دینامیک و کنترل می‌باشد. که به واسطه خواصی از قبیل غیرخطی بودن و ناپایداری ذاتی به عنوان یکی از مسائل مطرح در مهندسی کنترل شناخته می‌شود. در شکل (۱-۳) یک نمونه از پاندول معکوس را می‌توان دید. پاندول معکوس یک پاندول است که جرم آن در بالای نقطه‌ی اتکای آن قرار دارد. اغلب نقطه‌ی محور بر روی یک ارابه (صفحه) سوار می‌شود که آن صفحه می‌تواند به صورت افقی حرکت کند که به صفحه و قطب مشهور است. در بیشتر کاربردهای پاندول، آزادی پاندول به یک درجه مثلثاتی محدود می‌شود. یک پاندول معمولی پایدار است چون به سمت پایین آویزان است، اما یک پاندول معکوس ذاتاً ناپایدار است. پس باید متعادل شود و در حالت قائم بماند. این مهم با استفاده از یک گشتاور (در نمونه آزمایشگاهی با استفاده از یک موتور DC) در صفحه‌ی پایین ممکن است، حرکت صفحه به صورت افقی به عنوان یک فیدبک است که میزان چرخش جرم سوار شده روی پاندول را موازی با محور صفحه عوض می‌کند و در نتیجه یک گشتاور منتج را روی پاندول می‌سازد، یا به صورت نوسان عمودی صفحه‌ی پایینی می‌توان پایداری را حفظ کرد. یک مثال ساده از حرکت صفحه به عنوان فیدبک سیستم دسته‌ی جارو برقی روی انگشت یک شخص است که به صورت عمود آن را نگه می‌دارد [۲۱، ۲۲].



شکل ۱-۳: تصویری از پاندول معکوس [۱۶].

۳-۳ مکانیزم کنترلی پاندول معکوس

برای کنترل پاندول و ارابه دو مسئله متفاوت مد نظر قرار می‌گیرد. که برای تحلیل رفتار این سیستم حائز اهمیت هستند. این مکانیزم‌ها که در زیر به آن‌ها اشاره می‌شود هرکدام دارای نقش خاص خود در سیستم و بدنه‌ی آونگ وارون هستند.

۳-۳-۱ مکانیزم کنترل ارابه

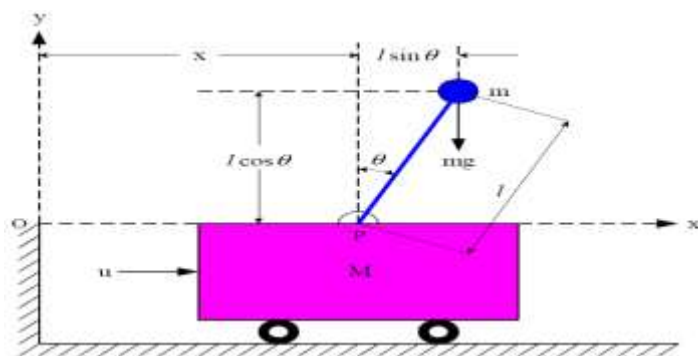
در اینجا هدف کنترلی به این شکل تعریف می‌شود که ابتدا باید ضمن تغییر مکان ارابه از یک موقعیت اولیه به یک موقعیت نهایی، نوسانات در آونگ حداقل باشد و آونگ در وضعیت قائم رو به پایین قرار گیرد. به شکل (۳-۲) توجه نمایید.

۳-۳-۲ مکانیزم کنترل آونگ

همان‌گونه که در شکل (۳-۲) نشان داده شده است. هدف، قرار دادن آونگ در وضعیت قائم و حفظ آن در همان حالت (پایدار) است. ضمن اینکه ارابه نیز در موقعیت مطلوب (معمولاً در وسط ریل) قرار گیرد. این مسئله خود شامل دو مرحله است.

• الگوریتم Swing

در این الگوریتم که بر مبنای تحلیل انرژی سیستم طراحی شده است، پاندول به نوسان واداشته می‌شود.



شکل ۳-۲: پاندول معکوس [۲۳].

تا انرژی آن مرتباً افزایش پیدا کند. این فرآیند تا جایی ادامه پیدا می‌کند که پاندول در وضعیتی نزدیک به حالت قائم قرار گیرد.

• الگوریتم پایدارسازی

حال که پاندول نزدیک حالت قائم قرار دارد. با استفاده از مدل خطی شده حول نقطه کار ناپایدار، کنترلی برای آن طراحی نمود که سیستم حلقه بسته آن پایدار شود.

۳-۴ معادلات آونگ وارون

پاندول معکوس دارای دو نقطه تعادل است که یکی از آنها پایدار و دیگری ناپایدار است. نقطه تعادل پایدار مطابق با حالتی است که در آن آونگ به سمت پایین حرکت می‌کند که در غیاب نیروی کنترل، سیستم بطور طبیعی به این حالت بر می‌گردد از سوی دیگر نقطه تعادل ناپایدار به سمت بالا است. استراژی‌های مختلفی سعی در بدست آوردن و حفظ این موقعیت سیستم را دارند. دینامیک سیستم آونگ وارون مطابق شکل (۳-۲) شامل یک آونگ سوار بر یک ارابه می‌باشد. بدین صورت که ارابه تنها در راستای افقی حرکت می‌کند و آونگ در صفحه‌ی افقی - عمودی حول محور خود می‌چرخد. در [۲۳] با در نظر گرفتن مدل دینامیکی سیستم و طبق قانون دوم نیوتن، معادلات پاندول معکوس به صورت زیر خواهد بود. شایان ذکر است که میله آونگ، بدون جرم و لولا بدون اصطکاک فرض شده‌اند. این فرض باعث می‌شود که مرکز جاذبه تمام آونگ در واقع در مرکز توپ آونگ متمرکز شده باشد.

با در نظر گرفتن شکل (۳-۲) که در آن (x) موقعیت ارابه و (θ) زاویه آونگ است خواهیم داشت.

$$M \frac{d^2}{dt^2}(x) + m \frac{d^2}{dt^2}(x_G) = u \quad (۱-۳)$$

اگر چنانچه مرکز ثقل آونگ (توپ سر آونگ) را با توجه به جاذبه و طبق محور (x) و (y) در نظر بگیریم خواهیم داشت.

$$x_G = x + l \sin\theta \quad y_G = l \sin\theta \quad (2-3)$$

l طول میله آونگ است. با جایگذاری معادله (3-2) در معادله (3-1) داریم.

$$M \frac{d^2}{dt^2}(x) + m \frac{d^2}{dt^2}(x + l \sin\theta) = u \quad (3-3)$$

که می دهد.

$$(M + m)\ddot{x} - ml \sin(\theta) \dot{\theta}^2 + ml \cos(\theta) \ddot{\theta} = u \quad (4-3)$$

در این حالت گشتاور جرمی ناشی از نیروی شتاب (F_X) به وسیله‌ی گشتاور نیروی جاذبه (F_Y) متعادل می شود که خواهیم داشت.

$$(F_X \cos \theta)l - (F_Y \sin \theta)l = (mg \sin \theta)l \quad (5-3)$$

که نیروی‌های (F_X) و (F_Y) برابرند با

$$F_X = m \frac{d^2}{dt^2} x_G = m[\ddot{x} - ml \sin(\theta) \dot{\theta}^2 + ml \cos(\theta) \ddot{\theta}] \quad (6-3)$$

و

$$F_Y = m \frac{d^2}{dt^2} y_G = -m[l \cos(\theta) \dot{\theta}^2 + l \sin(\theta) \ddot{\theta}] \quad (7-3)$$

با قرار دادن معادلات (3-6) و (3-7) در معادله (3-5) داریم.

$$m\ddot{x} \cos \theta - ml \sin(\theta) \cos(\theta) \dot{\theta}^2 + ml \cos^2(\theta) \ddot{\theta} + ml \sin(\theta) \cos(\theta) \dot{\theta}^2 + ml \sin^2(\theta) \ddot{\theta} = mg \sin \theta \quad (8-3)$$

or

$$m\ddot{x} \cos \theta + ml\ddot{\theta} = mg \sin \theta$$

معادلات (3-4) و (3-8) معادلات اصلی سیستم آونگ وارون هستند. واضح است که این دو معادله نشان

دهنده یک سیستم غیرخطی پیچیده ریاضی هستند. هرچند که هدف از این سیستم خاص، قرار دادن

آونگ وارون حول نقطه $\theta = 0$ و خطی سازی سیستم با توجه به همین نقطه است.

۱-۴-۳ معادلات غیرخطی در سیستم آونگ وارون

برای شبیه سازی عددی در مدل غیر خطی سیستم آونگ وارون، لازم است تا فضای حالت معادلات

(۴-۳) و (۸-۳) به صورت استاندارد باشند. برای این کار خواهیم داشت.

$$\frac{d}{dx}(x) = f(x, u, t) \quad (۹-۳)$$

با قرار دادن معادلات (۴-۳) و (۸-۳) به فرم (۹-۳)، در ابتدا به معادلاتی تبدیل می شوند که فقط یک عبارت مشتق دوم در هر معادله دارند. به همین منظور از معادله (۳-۸) داریم.

$$ml\ddot{\theta} = mg \sin \theta - m\ddot{x} \cos \theta \quad (۱۰-۳)$$

با قرار دادن معادله (۱۰-۳) در معادله (۴-۳) داریم.

$$(M + m)\ddot{x} - ml \sin(\theta)\dot{\theta}^2 + mg \sin(\theta) \cos(\theta) - m\ddot{x} \cos^2(\theta) = u$$

$$\text{Or} \quad (۱۱-۳)$$

$$(M + m - m \cos^2 \theta)\ddot{x} = u + ml \sin(\theta)\dot{\theta}^2 - mg \sin(\theta) \cos(\theta)$$

بطور مشابه برای معادله (۳-۸) داریم.

$$\ddot{x} = \frac{g \sin \theta - l\ddot{\theta}}{\cos \theta} \quad (۱۲-۳)$$

با قرار دادن معادله (۱۲-۳) در (۳-۴) داریم.

$$\frac{(M + m)(g \sin \theta - l\ddot{\theta})}{\cos \theta} - ml \sin(\theta)\dot{\theta}^2 + ml \cos \theta \ddot{\theta} = u$$

Or

$$(M + m)(g \sin \theta - l\ddot{\theta}) - \cos(\theta) \sin(\theta)\dot{\theta}^2 + ml \cos^2 \theta \ddot{\theta} = u \cos \theta \quad (۱۳-۳)$$

And

$$(ml \cos^2 \theta - (M + m)l)\ddot{\theta} = u \cos \theta - (M + m)g \sin \theta + ml \cos(\theta) \sin(\theta)\dot{\theta}^2$$

در نهایت با استفاده از معادلات (۳-۱۱) و (۳-۱۳) داریم.

$$\ddot{x} = \frac{u + ml (\sin \theta)\dot{\theta}^2 - mg \cos \theta \sin \theta}{M + m - m \cos^2 \theta} \quad (۱۴-۳)$$

و

$$\ddot{\theta} = \frac{u \cos \theta - (M + m)g \sin \theta + ml (\cos \theta \cdot \sin \theta)\dot{\theta}^2}{ml \cos^2 \theta - (M + m)l} \quad (۱۵-۳)$$

اکنون این معادلات ممکن است بصورت فضای حالت نمایش داده شوند که متغیرهای حالت آن بصورت

زیر در نظر گرفته می شوند.

$$x_1 = \theta \quad . \quad x_2 = \dot{\theta} \quad . \quad x_3 = x \quad . \quad x_4 = \dot{x}$$

در اینجا θ زاویه آونگ، $\dot{\theta}$ سرعت زاویه‌ای آونگ، x موقعیت ارابه، \dot{x} سرعت ارابه است. معادله‌ی فضای حالت برای پاندول معکوس بصورت زیر خواهد بود.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{g \sin(x_1) - a m l x_2^2(t) \sin(2x_1)/2 - a \cos(x_1) u(t)}{4l/3 - a m l \cos^2(x_1)} \\ \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= \frac{-a m g \sin(2x_1)/2 + a m l x_2^2 \sin(x_1) + 4a/3u}{4/3 - a m \cos^2(x_1)} \\ a &= \frac{1}{(M + m)} \end{aligned} \quad (۱۶-۳)$$

حال اگر زاویه پاندول (θ) و موقعیت ارابه (x) را در نظر بگیریم. پس معادله خروجی به صورت زیر نوشته می شود.

$$y = cx \quad \text{or} \quad y = \begin{bmatrix} \theta \\ x \end{bmatrix} = cx = C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} (x) \quad (۱۷-۳)$$

معادلات (۱۶-۳) و (۱۷-۳) یک فضای حالت کامل را برای سیستم آونگ وارون فراهم می کنند

۲-۴-۳ معادلات خطی در سیستم آونگ وارون

از آنجایی که در این سیستم، هدف قرار دادن آونگ در موقعیت تعادل (در اطراف $\theta = 0$) است. پس برای خطی سازی این سیستم، آونگ بصورت عمودی در نظر گرفته می شود و فرم خطی شده‌ی آن بصورت زیر می شود.

$$\frac{d}{dt}x = j_x x + j_u u \quad (۱۸-۳)$$

در اینجا با توجه به موقعیت پاندول که بصورت عمودی و بدون اعمال هیچ گونه فشاری بر آن در نظر گرفته می شود و با در نظر گرفتن $u_0 = 0$ ، $x_0 = 0$ درایه های ماتریس ژاکوبین ترم به ترم بصورت خودکار مشخص می شود و ستون های ماتریس j_x بصورت $\frac{\partial f}{\partial x}$ به ترتیب بدست می آیند.

$$\frac{\partial f_i}{\partial x_1} / u_0 \cdot x_0 \quad . \quad \frac{\partial f_i}{\partial x_2} / u_0 \cdot x_0 \quad . \quad \frac{\partial f_i}{\partial x_3} / u_0 \cdot x_0 \quad . \quad \frac{\partial f_i}{\partial x_4} / u_0 \cdot x_0$$

به این ترتیب خواهیم داشت.

$$j_x = \begin{bmatrix} 0 & & & \\ \frac{g}{4l/3 - aml} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{-mag}{4/3 - am} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (19-3)$$

برای مشتق گرفتن از ترم های غیرخطی با در نظر گرفتن u داریم:

$$j_u = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\delta_u} \\ \frac{\partial f_2}{\delta_u} \\ \frac{\partial f_3}{\delta_u} \\ \frac{\partial f_4}{\delta_u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -a \\ \frac{4l/3 - aml}{4a/3} \\ \frac{0}{4/3 - ma} \end{bmatrix} \quad (20-3)$$

سرانجام معادله (3-18) بعد از طی تمامی مراحل ذکر شده به صورت (3-21) خواهد بود.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & & & \\ \frac{g}{4l/3 - aml} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{-mag}{4/3 - am} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot B = \begin{bmatrix} 0 \\ -a \\ \frac{4l/3 - aml}{4a/3} \\ \frac{0}{4/3 - ma} \end{bmatrix} \quad (21-3)$$

و در نهایت معادله (3-21) بصورت زیر خواهد بود.

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = cx \end{cases} \quad (24-3)$$

۳-۴-۳ ماتریس های فضای حالت سیستم آونگ وارون

با استفاده از جدول (3-1)، مقادیر عددی پارامترها را جایگزین می کنیم.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 17.3138 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1.736 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot B = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.1764 \\ 0 \\ 0.1176 \end{bmatrix} \quad (25-3)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

جدول 3-1: مقادیر ثابت آونگ وارون

g	l	m	M	مقادیر
9.81	0.6	2	8	اندازه
m/s^2	m	Kg	Kg	واحد

۴-۴-۳ رویت پذیری

شرط لازم و اساسی جهت طراحی رویتگر برای یک سیستم، رویت پذیر بودن آن سیستم است. لذا طراحی رویتگر برای پاندول معکوس نیازمند تعیین رویت پذیری سیستم آن است. اگرچه روش‌های متعددی برای رویت پذیری سیستم‌های خطی وجود دارد اما در پاندول معکوس شرط رویت پذیری با توجه به معادلات (۳-۱۹) و (۳-۲۵) در چند زاویه مورد بررسی قرار گرفته است که در جدول (۳-۲) عنوان شده است. شایان ذکر است با توجه به اینکه متغیرهای x_1 و x_3 به عنوان خروجی در نظر گرفته شده‌اند. لذا برای طراحی رویتگر برای این سیستم باید مرتبه ماتریس رویت‌پذیری آن ۴ باشد (مرتبه آن کامل باشد).

$$\Phi_o = [C \quad CA \quad CA^2 \quad \dots \quad CA^{n-1}]^T$$

جدول ۳-۲: بررسی رویت‌پذیری پاندول معکوس در زوایای مختلف

مرتبه ماتریس رویت‌پذیری	زاویه
۴	$\theta = -\pi/2$
۴	$\theta = -\pi/4$
۴	$\theta = 0$
۴	$\theta = \pi/4$
۴	$\theta = \pi/2$

با توجه به جدول (۳-۲) می‌توان اینگونه استنباط کرد که این سیستم در کل فضای $[-\pi/2, \pi/2]$ رویت پذیر است.

فصل ۴ - تشخیص و جداسازی عیب با استفاده از

رویتگر مود لغزشی - فازی

۴-۱ پیشگفتار

در این فصل ابتدا به طور خلاصه مباحثی از مود لغزشی عنوان می‌کنیم و یک فرم کلی برای طراحی رویتگر مود لغزشی با در نظر گرفتن عیب حسگر بیان می‌کنیم. در ادامه برای طراحی رویتگر مود لغزشی فازی، ابتدا مباحثی از روش فازی را شرح داده سپس با استفاده از روش فازی T-S سیستم غیر خطی پاندول معکوس را خطی سازی کرده و رویتگر مود لغزشی_فازی را با توجه به قوانین فازی طراحی می‌کنیم. در آخر با توجه به معادلات سیستم پاندول معکوس، تشخیص و جداسازی عیب‌های وارده به حسگر را به صورت شبیه‌سازی نمایش می‌دهیم.

۴-۲ مود لغزشی

عدم دقت در مدل ممکن است ناشی از عدم قطعیت‌های پلان (مثلاً پارامترهای نامعلوم)، یا به خاطر انتخاب هدف‌دار یک نمایش ساده شده از دینامیک‌های سیستم و یا صرف نظر کردن معقول از حالت‌های ساختاری در سیستم مکانیکی سخت باشد.

از دیدگاه کنترلی، عدم دقت در مدل‌سازی را می‌توان به دو نوع اصلی طبقه‌بندی کرد.

- عدم قطعیت‌های ساختاری (پارامتری)

- عدم قطعیت‌های غیر ساختاری (دینامیک‌های مدل نشده)

نوع اول، به عدم دقت در جملاتی که واقعاً در مدل هستند مربوط می‌شود. در حالی که در نوع دوم، به

عدم دقت در مرتبه‌ی سیستم (تخمین پارامتر) مربوط است.

عدم قطعیت در مدل‌سازی می‌تواند اثرات مخرب و جبران‌ناپذیری را برای سیستم‌های غیرخطی در پی داشته باشد؛ بنابراین، در هر طراحی عملی باید این مسئله مورد توجه قرار گیرد. یکی از راه‌های مقابله

با عدم قطعیت‌های مدل، استفاده از روش کنترل مقاوم است. ساختار یک کنترل کننده مقاوم از یک قسمت اسمی و یک قسمت شامل جملات اضافی معطوف به مقابله با عدم قطعیت‌های مدل شده تشکیل شده است.

یک روش ساده برای کنترل مقاوم، استفاده از روش مود لغزشی است. به‌طور شهودی می‌توان بیان نمود در روش مود لغزشی این نکته مورد نظر است که سیستم‌های مرتبه اول (سیستم‌هایی که با معادلات مرتبه اول توصیف شده‌اند) بسیار آسان‌تر از سیستم‌های مرتبه n ام (سیستم‌هایی که با معادلات مرتبه n توصیف شده‌اند) است.

روش‌های مود لغزشی در آن دسته از سیستم‌هایی که قابل اعمال است، روشی قانونمند برای مسئله حفظ پایداری و عملکرد یکنواخت در روبه‌رویی با بی‌دقتی‌های مدل‌سازی است. روش مود لغزشی با موفقیت در جابه‌جا کننده‌های روبات، وسایل نقلیه‌ی زیرآبی، موتورها و انتقالات خود محرک و ... مورد استفاده قرار گیرد [۲۴].

۳-۴ مزایا و معایب مود لغزشی

استفاده از هر روشی در طراحی سیستم‌های کنترلی دارای مزایا و معایب خاص خود است. با توجه به مباحث بیان شده، روش مود لغزشی نیز دارای مزایا و معایبی است که در [۲۵] به چند نمونه از آن‌ها اشاره شده است.

الف) مزایا

- ۱) سادگی پیاده‌سازی بر روی سیستم‌های چند ورودی - چند خروجی
- ۲) قابلیت اعمال به سیستم‌های متغیر با زمان
- ۳) عملکرد خوب کنترلی در حالت تعقیب حتی برای سیستم‌های غیرخطی
- ۴) تغییر ناپذیری و عدم حساسیت به نویز و اغتشاش سازگار پس از گذشت زمان محدود
- ۵) خطی سازی سیستم غیرخطی و در نتیجه آسان‌تر شدن طراحی کنترل کننده و مشاهده‌گر

۶) کاهش مرتبه‌ی سیستم که به طراح در طراحی کنترل کننده و مشاهده‌گر کمک شایانی می‌کند.

ب) معایب

- ۱) برای محاسبه قسمت کنترل معادل، به دانش زیادی در مورد سیستم نیاز داریم
- ۲) مقدار سیگنال ورودی کنترل بزرگ می‌شود.
- ۳) هنگامی که حالت‌های سیستم از سطح لغزش دور هستند ممکن است زمان رسیدن به سطح (فاز رسیدن) طولانی شود.
- ۴) آسیب پذیری بسیار زیاد در مقابل نویز در فرکانس‌های بالا به دلیل استفاده از تابع Sgn
- ۵) وزوز (چترینگ)

۴-۴ رویتگر مود لغزشی

در یک سیستم تمامی متغیرهای حالت، قابل اندازه‌گیری نیستند. در حالی که برای کنترل و طراحی رویتگرها به این متغیرها نیاز داریم. زمانی که طراحی رویتگر برای اولین بار توسط لیونبرگر^۱ [۱۱] شکل گرفت، تخمین متغیرهای سیستم اصلی در رویتگر لیونبرگر به صورت نمایی انجام می‌شد؛ اما این رویتگر توانایی تخمین متغیرهای سیستم در حضور اغتشاش و عدم قطعیت پارامتری و ساختاری را نداشت و این مسئله دلیلی بر مناسب نبودن و ناکارآمدی این رویتگر بود. تحت این شرایط نه تنها تخمین متغیرها از روی متغیرهای اصلی به خوبی انجام نمی‌گرفت بلکه در حضور عدم قطعیت‌ها منحرف می‌شد. سپس اوتکین^۲ [۱۶] برای حل مشکل رویتگر لیونبرگر، رویتگر مود لغزشی را بیان کرد. در واقع می‌توان گفت اولین طراحی رویتگر مود لغزشی توسط اوتکین صورت گرفت. او با استفاده از یک ترم خطی ناپیوسته قادر بود که خروجی‌های تخمین زده شده را همگرا به خروجی‌های واقعی سیستم در زمان محدود کند. این مسئله نه تنها باعث کاهش حرکت لغزشی می‌شد، بلکه نحوه‌ی همگرا شدن متغیرهای

¹ Leonberger

² Otkine

تخمین زده شده با متغیرهای واقعی سیستم را به صورت نمایی امکان پذیر می کرد. همچنین مشخص شد که رویتر اوتکین در حضور اغتشاش و عدم قطعیتها عملکردی بسیار عالی دارد و تأثیری بر خروجی ندارد.

در سالهای بعد والکت و زاک^۱ [۱۶] با بهبود بخشیدن رویتر اوتکین و با اضافه کردن یک گین خطی، توانستند خطای سیستم را در حضور عدم قطعیتها پایدار کنند. آنها همچنین مشاهده کردند که گین خطی، باعث افزایش مدت زمان لغزش می گردد. بطور کلی روش طراحی آنها توجه بسیاری را به خود جلب کرد. اما روش آنها نیاز به یک سری محاسبات پیچیده جهت طراحی رویتر و به دست آوردن پارامترهای رویتر داشت که می توانست در سیستمهای پیچیده ما را با مشکل مواجه کند.

سرانجام ادوارد و اسپرجن^۲ [۱۲] توانستند با فرموله کردن اصولی روشهای والکت و زاک دست به ابتکاری بزرگ بزنند و از پیچیدگیهای معادلات ریاضی روش پیشنهادی والکت و زاک تا حدود زیادی بکاهند. آنها همچنین توانستند رویتر خود را به گونه ای طراحی کنند که سطح لغزش آن بر اساس خطای تخمین زده شده خروجی تعریف شده باشد.

ادوارد و اسپرجن بیان کردند که: خطای سیستم را با استفاده از یک سیگنال خطای تزریق معادل در طراحی رویتر مود لغزشی که برای حفظ حرکت لغزشی ضروری می باشد را می توان بازسازی کرد. بعدها طراحی FDI با استفاده از رویتر مود لغزشی - تطبیقی توسط یانگ و صیف^۳ برای تنظیم آستانه که در آن یک آستانه ارتباط مستقیمی با حساسیت سیستم در بازسازی خطا دارد را بیان نمودند. در سال ۲۰۰۲ میلادی، ماسادا^۴ یک FDI برای دسته ای از سیستمهای غیرخطی که دارای عدم قطعیت نامعلوم، ولی محدود هستند را با استفاده از رویتر مود لغزشی پیشنهاد داد.

سیستم دینامیکی نامعین (به خاطر وجود خطا) توصیف شده (۴-۱) را در نظر بگیرید:

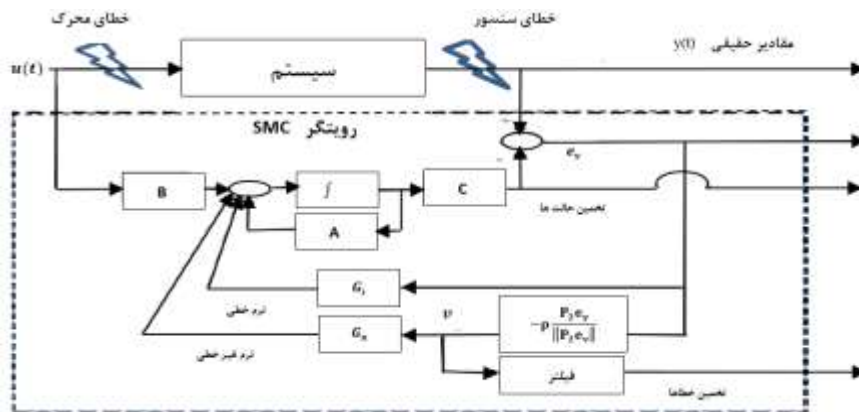
$$\begin{cases} \dot{x} = Ax(t) + Bu(t) + Df_i(x . u . t) \\ y(t) = Cx(t) + f_s(x . u . t) \end{cases} \quad (۱-۴)$$

¹ Vailcat , Zack

² Edward . Esperejenn

³ Yang , Saife

⁴ Masada



شکل ۴-۱: مدل بلوکی رویتگر مود لغزشی به منظور تشخیص و جداسازی خطا [۲۳].

به طوریکه ضریب خطا $D \in R^{n \times q}$ و ماتریس‌های سیستم $A \in R^{n \times n}$ و $C \in R^{p \times n}$ ، $B \in R^{n \times m}$ همچنین $f_i(x, u, t)$ عیب محرک و $f_s(x, u, t)$ عیب حسگر هستند. همانطور که در شکل (۴-۱) مشخص است در اینجا با استفاده از رویتگر، تخمین حالات \hat{x} و تخمین خروجی $\hat{y} = C\hat{x}$ انجام می‌گیرد. به طوریکه مود لغزشی قادر باشد خطای تعریف شده خروجی $e_y(t) = \hat{y}(t) - y(t)$ را به سمت صفر متمایل کند.

به طور کلی ساختار یک رویتگر مود لغزشی به قالب زیر نوشته می‌شود.

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) - G_1 e_y(t) + G_n v \quad (۲-۴)$$

که در آن $G_1, G_n \in R^{n \times p}$ ماتریس‌های بهره مناسب و v جز سوئیچ کننده مود لغزشی است که این جز سوئیچ کننده برای ما تخمین گر خطاست [۲۳].

قضیه ۴-۱:

برای طراحی رویتگر برای سیستمی با معادله (۴-۱) که دارای عیب محرک و حسگر است مراحل زیر را در نظر می‌گیریم.

$$Rank(C, D) = q \quad (۱)$$

(۲) قطب‌ها و صفرهای (A, B, C) در سمت چپ محور موهومی (پایدار) باشند.

(۳) برای آن که بتوانیم اجزا و ترکیبات موجود در ماتریس‌های سیستم را در خروجی ظاهر بکنیم؛

باید با استفاده از ماتریس تابع انتقال مختصات این ماتریس‌ها را به فرم جدید بنویسیم.

$$TAT^{-1} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{11} \end{bmatrix} \cdot TB = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \cdot CT^{-1} = [0 \ I_p] \cdot DT^{-1} = [0 \ D_2] \quad (3-4)$$

(۴) تشکیل معادله رویتر به صورت؛

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) - G_I(C\hat{x}(t) - y(t)) + G_nv$$

که در آن

$$v = \begin{cases} -\rho \|P_2\| \frac{Ce}{\|Ce\|} & \text{if } Ce \neq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

(۵) پیشنهاد یک تابع لیاپانوف ($V = e^T Pe$) برای اثبات پایداری

$$G_n = T^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ P_2^{-1} \end{bmatrix} \text{ و } G_I = T^{-1} \begin{bmatrix} A_{12} \\ A_{22} - A_{22}^S \end{bmatrix} \text{ بهره } \quad (6)$$

۴-۴-۱ فرم کلی طراحی رویتر با اعمال عیب حسگر

در [۲۱] این گونه بیان شده است که برای طراحی رویتر با حضور عیب حسگر سیستم (۴-۱۴) زیر را

در نظر می گیریم.

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + f_S(x \cdot u \cdot t) \end{cases} \quad (4-4)$$

با توجه به معادلات (۴-۳) سیستم به صورت زیر خواهد بود.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = A_{11}x_1(t) + A_{12}x_2(t) + B_1u(t) \\ \dot{x}_2 = A_{21}x_1(t) + A_{22}x_2(t) + B_2u(t) \\ y = x_2 + f_S(x \cdot u \cdot t) \end{cases} \quad (5-4)$$

با در نظر گرفتن

$$\begin{aligned} e_1 &= \hat{x}_1(t) - x_1(t) \\ e_y(t) &= (\hat{y}(t) - y(t)) - f_S(t) = e_2(t) - f_S(t) \end{aligned} \quad (6-4)$$

که خطاهای تخمینی می باشند خواهیم داشت.

$$\begin{cases} \dot{e}_1(t) = A_{11}e_1(t) + A_{12}f_S(t) \\ \dot{e}_y(t) = A_{21}e_1(t) + A_{22}^S e_2(t) + (A_{22} - A_{22}^S)f_S(t) + v \end{cases} \quad (7-4)$$

که A_{22}^S یک ماتریس طراحی پایدار بوده و بردار گسسته v ، جزء مود لغزشی است که این جز برای ما

تخمین گر خطا است و به صورت (۴-۸) تعریف می شود

$$v = \begin{cases} \rho \|D_2\| \frac{P_2 e_y(t)}{\|P_2 e_y(t)\|} & \text{if } e_y \neq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۸-۴)$$

که $P_2 \in R^{p \times p}$ ماتریس لیاپانوف برای A_{22}^S بوده و مقدار ρ یک مقدار اسکالر است. حال خواهیم داشت.

$$\begin{cases} \dot{e}_1(t) = A_{11}e_1(t) + A_{12}f_S(t) \\ \dot{e}_y(t) = A_{21}e_1(t) + A_{22}^S e_y(t) + v + A_{22}f_S(t) - \dot{f}_S(t) \end{cases} \quad (۹-۴)$$

در طول لغزش با میل کردن $e_y(t) \rightarrow 0$ مقدار $\dot{e}_y(t)$ نیز به سمت صفر میل خواهد کرد.

$$e_y(t) \rightarrow 0 \xrightarrow{\text{then}} \dot{e}_y(t) \rightarrow 0 \quad (۱۰-۴)$$

حال با در نظر گرفتن رابطه (۴-۱۰) معادله خطای $\dot{e}_y(t)$ (۹-۴) به صورت زیر خواهد بود.

$$0 = A_{21}e_1(t) + v_{eq} + A_{22}f_S(t) - \dot{f}_S(t) \quad (۱۱-۴)$$

که در آن سیگنال تزریق خروجی بوده که نشان دهنده مقدار متوسط جز ناپیوسته v و همچنین

نشان دهنده تلاش لازم برای نگه داشتن حرکت بر روی سطح لغزش است. حال برای عیب‌های نرم

$$\dot{e}_1(t) = 0 \text{ و } \dot{f}_S(t) = 0 \text{ داریم.}$$

$$v_{eq} = -(A_{21}e_1(t) + A_{22}f_S(t)) \quad (۱۲-۴)$$

طبق رابطه (۴-۹) هنگامی که $\dot{e}_1(t) = 0$ آنگاه

$$\dot{e}_1(t) = A_{11}e_1(t) + A_{12}f_S(t) \quad (۱۳-۴)$$

$$\xrightarrow{\dot{e}_1(t)=0} e_1 = -A_{11}^{-1}A_{12}f_S(t)$$

در نتیجه مقدار v_{eq} برابر خواهد با

$$v_{eq} = -(A_{22} - A_{21}A_{11}^{-1}A_{12})f_S(t) \quad (۱۴-۴)$$

که با استفاده از v_{eq} می‌توان سیگنال عیب حسگر را تقریب زد.

$$f_S(t) = -(A_{22} - A_{21}A_{11}^{-1}A_{12})^{-1} v_{eq} \quad (۱۵-۴)$$

و همچنین خواهیم داشت.

$$f_S(t) = -(A_{22} - A_{21}A_{11}^{-1}A_{12})^{-1} \rho \|D_2\| \frac{P_2 e_y(t)}{\|P_2 e_y(t)\|} \quad (۱۶-۴)$$

نکته‌ای که در اینجا توجه به آن حائز اهمیت است تعیین ماتریس P_2 است. ماتریس‌های متقارن و مثبت زیادی برای P_2 می‌توانند وجود داشته باشند که خطای دینامیکی نامعین سیستم (۴-۴) را به‌طور مجانبی پایدار کنند که در [۲۴] پایداری آن به تفصیل بررسی شده است. حال با توجه به مطالب بیان شده ساختار رویتگر به قالب زیر نوشته می‌شود.

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) - G_I e_y(t) + G_n v \quad (۲۲-۴)$$

که در آن $G_I, G_n \in R^{n \times p}$ ماتریس‌های بهره مناسب هستند و به‌صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$G_I = T^{-1} \begin{bmatrix} A_{21} \\ A_{22} - A_{22}^S \end{bmatrix} \quad G_n = T^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ P_2^{-1} \end{bmatrix} \quad (۲۳-۴)$$

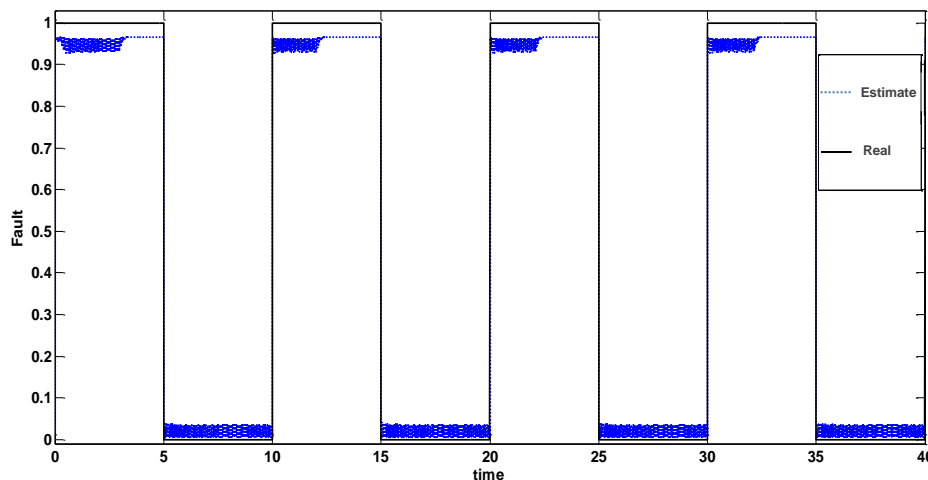
با توجه به [۲۴] اگر فرم مطلوب ماتریس‌های حالت معادلات (۲۵-۳) را به‌صورت (۲۴-۴) در نظر بگیریم.

$$A = \begin{bmatrix} -10 & 0 & -47.3409 & 23.4960 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 9.8503 & -3.1476 \\ 0.0082 & 0 & -1.8437 & -2.0152 \end{bmatrix} \cdot B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0.3202 \end{bmatrix} \quad (۲۴-۴)$$

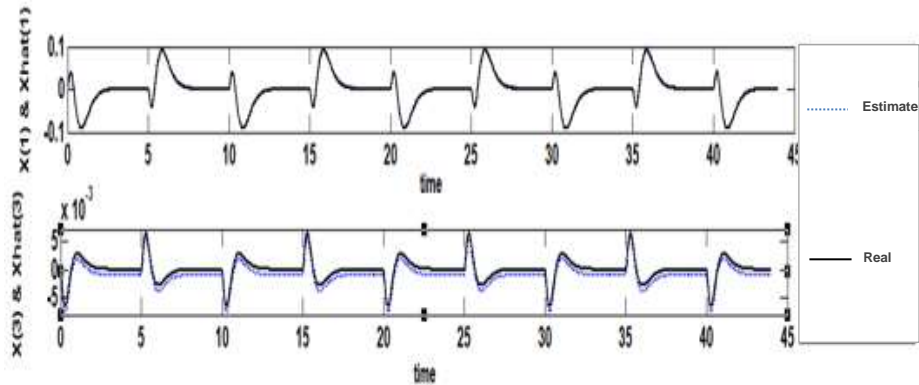
که $A_{11} = -10$ و پایدار و همچنین ماتریس $(-11, -12, -13)$ $A_{22}^S = \text{diag}(-11, -12, -13)$ و ماتریس P_2 در معادله لیاپانوف $P_2 A_{22}^S + (A_{22}^S)^T P_2 = -I$ برآورده کننده شرایط پایداری است.

با محاسبه کردن بهره‌های رویتگر G_n, G_i ، رویتگر مود لغزشی مورد نظر طراحی می‌شود.

$$G_n = \begin{bmatrix} 0.2514 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2514 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2514 \\ 0 & 4.1264 & -2.0013 \end{bmatrix} \cdot G_i = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 1 \\ 0 & 23.4976 & -4.8548 \\ 0 & -2.3758 & 13.3240 \\ 0 & 146.9438 & -28.4831 \end{bmatrix} \quad (۲۵-۴)$$



شکل ۲-۴: عیب پله وارد شده به سیستم و خطای بازسازی شده آن (مود لغزشی) [۲۴]



شکل ۴-۳: نمایش حالات واقعی (x_1) و (x_3) و حالات تخمین زده شده‌ی آنها (مود لغزشی) [۲۴]

در اشکال فوق، نتایج شبیه‌سازی که شامل تخمین حالات و بازسازی خطای ورودی سینوسی به سیستم بوده است، نمایش داده شده است. شایان ذکر است با توجه به اینکه حالت‌های سیستم x_1 تا x_3 مد نظر ما هستند حالات واقعی و تخمین آنها پس از اعمال عیب نمایش داده شده است.

۴-۵ سیستم‌های فازی و کاربرد آن‌ها

سیستم‌های فازی، سیستم‌های مبتنی بر دانش یا قواعد می‌باشند. قلب سیستم فازی یک پایگاه دانش بوده که از قواعد اگر- آنگاه فازی تشکیل شده است. یک قاعده اگر - آنگاه فازی یک عبارت اگر - آنگاه بوده که بعضی کلمات آن به وسیله توابع تعلق پیوسته مشخص شده‌اند. سیستم‌های فازی امروزه در طیف وسیعی از علوم و فنون کاربرد پیدا کرده‌اند. از کنترل، پردازش سیگنال، ارتباطات گرفته تا استفاده در بازرگانی، پزشکی، دانش اجتماعی و... با این حال به‌عنوان یکی از مهم‌ترین کاربردهای آن



شکل ۴-۵: سیستم فازی به‌عنوان کنترل کننده حلقه باز [۱۶].



شکل ۴-۶: سیستم فازی به‌عنوان کنترل کننده حلقه بسته [۱۶].

حل مسائل و مشکلات کنترل را می‌توان بیان نمود. در [۲۵] از سیستم‌های فازی همان‌گونه که در شکل (۴-۵) و (۴-۶) نشان داده شده است می‌توان به عنوان کنترل کننده حلقه باز یا کنترل حلقه بسته استفاده کرد. هنگامی که به عنوان حلقه باز مورد استفاده قرار گیرد، سیستم فازی معمولاً بعضی پارامترهای کنترل را معین کرده و آنگاه سیستم مطابق با این پارامترهای کنترلی کار می‌کند. بسیاری از کاربردهای سیستم فازی در الکترونیک به این دسته تعلق دارد. هنگامی که سیستم فازی به‌عنوان یک کنترل کننده حلقه بسته استفاده می‌شود در این حالت خروجی‌های فرآیند را اندازه‌گیری کرده و به‌طور همزمان عملیات کنترل را انجام می‌دهد. کاربردهای سیستم فازی در فرآیندهای صنعتی به این دسته تعلق دارند.

۴-۶ مجموعه‌های فازی

در [۱۸] این‌گونه بیان شده است: فرض کنید U مجموعه جهانی^۱ و شامل تمامی عناصر و اعضاء ممکن در بحث یا کاربرد مورد نظر ما باشد. حال اگر یک مجموعه کلاسیک A یا به اختصار مجموعه A در فضای جهانی U باشد، می‌توان آن را با فهرست تمامی اعضاء یا با مشخص کردن ویژگی‌هایی که باید توسط اعضاء مجموعه ارضا گردد تعریف کرد. در واقع مجموعه‌های فازی به وسیله‌ی یک تابع عضویت که مقادیری در بازه $(0, 1)$ اختیار می‌کند، مشخص می‌شوند. نحوه‌ی نمایش یک مجموعه فازی در فضای جهانی U به‌صورت زیر است.

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in u\} \quad (۴-۱۹)$$

که $\mu_A(x)$ تابع عضویت نامیده می‌شود.

^۱Universal Set

۱-۶-۴ توابع عضویت

تابع عضویت یک منحنی است که چگونگی نگاشت فضای ورودی را به بازه (0, 1) مشخص می‌کند. مقدار $\mu_A(x)$ بیانگر مقدار عضویت یا درجه عضویت X در مجموعه مرجع است که مقدار عضویت نیز بیانگر درجه تعلق X به مجموعه فازی A می‌باشد.

$$\mu_{A(x)}; x \rightarrow [0, 1] \quad (۲۰-۴)$$

توابع عضویت مختلفی از جمله تابع عضویت گوسی، دوزنقه‌ای، مثلثی و ... وجود دارند.

۲-۶-۴ قوانین اگر-آنگاه فازی

به دلیل اینکه عبارتهای فازی به عنوان روابط فازی تعبیر می‌شوند. حال سؤال اساسی باقیمانده این است که عملگر اگر-آنگاه چگونه تفسیر و تعبیر می‌گردد؟ در ریاضیات جدید عبارت اگر P آنگاه q به شکل $p \rightarrow q$ نوشته می‌شود. به دلیل اینکه قواعد اگر-آنگاه فازی را می‌توان با جایگزینی P و q با عبارتهای فازی در نظر گرفت، ما می‌توانیم قواعد اگر-آنگاه را با جایگزینی با مکمل فازی، اجتماع فازی، اشتراک فازی تفسیر کنیم. رابطه (۳-۵) قاعده اگر-آنگاه را بیان می‌کند

$$\{if X is A then y is B\} \quad (۲۱-۴)$$

بطوری که A و B که توسط مجموعه‌های فازی روی دامنه X و Y مشخص شده‌اند. قسمت $X is A$ مقدم یا فرض نامیده می‌شود و در قسمت $y is B$ نتیجه یا تالی نامیده می‌شود. [۱۷].

۷-۴ مدل سیستم فازی

در بسیاری از مسائل علمی، اشخاص خبره می‌توانند توصیف‌های زبانی (به صورت قواعد اگر-آنگاه فازی) در رابطه با فرآیند را فراهم نمایند که می‌تواند با مدلی از فرآیند ترکیب گردد که این مدل را، مدل

سیستم فازی^۱ می‌نامند. در [۲۴] این‌گونه بیان شده است که در سیستم‌های پیچیده‌ی غیرخطی که خطا در آن‌ها رخ می‌دهد امکان تشخیص و جداسازی خطا نسبت به تشخیص و جداسازی خطا در سیستم خطی، بسیار مشکل‌تر است به همین خاطر در این‌گونه سیستم‌ها از روش فازی برای تشخیص و جداسازی خطا استفاده می‌شود. در روش فازی، زیر سیستم‌های فازی ابتدا بررسی می‌کنند که خطایی در سیستم رخ داده است یا نه؟! و در وهله‌ی بعد اگر خطایی اتفاق افتاده باشد، بررسی می‌کنند که آیا خطای رخ داده شده خطای شناخته شده است یا خیر؟! که در صورت به وجود آمدن هر کدام از شرایط گفته شده اقدام مناسب را انجام می‌دهد. در روش فازی از هوش و دانش انسانی در طراحی و ساختن قوانین *IF – THEN* استفاده می‌شود که همین امر باعث انعطاف پذیری این روش و کاربرد آن در سیستم‌هایی که امکان استفاده از مدل ریاضی وجود ندارد، شده است. در تشخیص و جداسازی خطا به روش فازی ابتدا مانده‌ی^۲ سیستم با استفاده از موتور استنتاج فازی، فازی سازی شده سپس با استفاده از قوانین *IF – THEN* ارزیابی و اعتبار سنج شده و در نهایت برای استفاده از داده‌ها در ادامه پروسه غیر فازی می‌شود. مدل‌های فازی مختلفی وجود دارد که می‌توان از آن‌ها استفاده کرد که از جمله می‌توان به مدل تاکاگی- سوگینو^۳ (*T-S*) اشاره کرد.

۸-۴ مدل فازی تاکاگی-سوگینو

تشخیص و جداسازی عیب در سیستم‌های دینامیکی غیرخطی یکی از مهم‌ترین چالش‌هایی است که با آن مواجه هستیم. در اینجا با استفاده از روش مود لغزشی مبتنی بر منطق فازی می‌توان در تشخیص و جداسازی عیب با استفاده از تحلیل سیگنال مانده اهتمام ورزید و چالش بیان شده را مورد بررسی قرار داد. شایان ذکر است روش‌های مبتنی بر رویتگر، تشخیص و جداسازی عیب با استفاده از سیگنال مانده را به ما معرفی می‌کنند. سیگنال مانده تولید شده توسط رویتگر مود لغزشی فازی، نه تنها معرف عیب

¹Fuzzy Sistem Model

²Residual

³Takagi _Sugeno (*T-S*)

است بلکه برای تخمین حالات و متغیرهای کنترلی نیز استفاده می‌شود. که در آن با استفاده از دستورات و قوانین *IF - THEN* روابط بین ورودی و خروجی را برای سیستم بیان می‌کنند. طرح اصلی مدل *T-S* در واقع بیان کننده قوانین فازی برای هر یک از زیر مجموعه‌های از دینامیک کلی سیستم مورد نظر است. حال در ادامه به معرفی و نحوه ایجاد قوانین خواهیم پرداخت [۲۷].

۹-۴ قوانین و طراحی منطق فازی *T-S* مطلوب

در [۲۷] با توجه به مطالب گفته شده قوانین *if - then* در حالت کلی بصورت رابطه (۴-۲۲) است .

$$\begin{aligned} & \text{IF } Z_1(t) \text{ is } M_1 \text{ and } \dots \text{ and } Z_p(t) \text{ is } M_p \\ & \text{THEN } \begin{cases} \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t) \\ y(t) = C_i x(t) \end{cases} \end{aligned} \quad (۲۲-۴)$$

که $Z(t)$ بردار متغیرهای اساسی، M_p دستگاه فازی است و آن $x(t) \in R^n$ بردار حالت، $u(t) \in R^p$ بردار ورودی، M تعداد اقدامات فازی، و $y(t) \in R^m$ بردار خروجی، (A_i, B_i, C_i) ماتریس‌های متغیر با ابعاد مناسب هستند. هدف استفاده از روش فازی *T-S*، خطی سازی سیستم غیر خطی است.

یک روش برای به دست آوردن مدل‌های فازی *T-S*، تقریب محلی در فضاهای فازی است. اصلی‌ترین هدف خطی سازی به روش *T-S* فازی، کاهش تعداد قوانین فازی در خطی سازی سیستم‌های غیر خطی و سادگی روش آن است که باعث کاهش تلاش کنترلی می‌شود [۲۸].

سیستم غیرخطی پاندول معکوس زیر را در نظر بگیرید.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{g \sin(x_1) - amlx_2^2(t) \sin(2x_1)/2 - a \cos(x_1) u(t)}{4l/3 - aml \cos^2(x_1)} \\ \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= \frac{amg \sin(2x_1)/2 - amlx_2^2 \sin(x_1) - 4a/3u}{4/3 - am \cos^2(x_1)} \\ a &= \frac{1}{(M + m)} \end{aligned} \quad (۲۳-۴)$$

در اینجا $x_1 = \theta$ زاویه آونگ، $x_2 = \dot{\theta}$ موقعیت ارابه، $x_3 = x$ سرعت ارابه و $x_4 = \dot{x}$ سرعت زاویه‌ای آونگ است.

شایان ذکر است که برای خطی سازی سیستم فوق از روش تقریب محلی استفاده می شود و برای این

منظور سیستم (۴-۲۳) را به صورت زیر در نظر می گیریم.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ \frac{g \sin(x_1) - amlx_2^2(t)\sin(2x_1)/2}{4l/3 - aml\cos^2(x_1)} \\ x_4 \\ \frac{-amg\sin(2x_1)/2 + 4amlx_2^2 \sin(x_1)/3}{4/3 - am \cos^2(x_1)} \end{bmatrix} \quad (۲۴-۴)$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 \\ -a \cos(x_1)/2 \\ 0 \\ 4a/3 \end{bmatrix} \frac{1}{4/3 - am \cos^2(x_1)} (u(t))$$

که این سیستم حول $x_1 = 0$ و $x_1 = \pm\pi/4$ خطی سازی می شود.

که در آن $\omega_i(z(t))$ وزن توابع تعلق بوده و به صورت زیر است.

$$\omega_i(z(t)) = \frac{\mu_i(x)}{\sum_{k=1}^l \mu_k(x)} \quad \cdot \quad \begin{cases} \sum_{i=1}^r \omega_i(z(t)) = 1 \\ 0 \leq \omega_i(z(t)) \leq 1 \end{cases} \quad (۲۵-۴)$$

در [۲۹] با در نظر گرفتن $x_1 = 0$ و $x_1 = \pm\pi/4$ و با توجه به معادله (۴-۲۴) قانون های فازی را

می توان به صورت زیر نوشت.

Model Rule 1:

if $x_1(t)$ *a bout* 0 . **THEN** ; $\dot{x}(t) = A_1x(t) + B_1u(t)$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & & & \\ g & 1 & 0 & 0 \\ 4l/3 - aml & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -amg & 0 & 0 & 0 \\ 4/3 - ma & & & \end{bmatrix} \quad \cdot \quad B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -a \\ 4l/3 - aml \\ 0 \\ 4a/3 \\ 4/3 - am \end{bmatrix}$$

Model Rule 1:

if $x_1(t)$ *a bout* $\pm\pi/4$. **THEN** ; $\dot{x}(t) = A_2x(t) + B_2u(t)$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & & & & & \\ \frac{g \sin(x_1)}{4l/3 - am \cos^2(x_1)} (1/x_1) & 1 & 0 & 0 & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & & \\ -\frac{amg \sin(2x_1)/2}{4/3 - am \cos^2(x_1)} (1/x_1) & 0 & 0 & 1 & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & & \end{bmatrix}_{x_1 = \pm \pi/4} \quad . \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 & & & & & \\ -\frac{a \cos(x_1)}{4l/3 - am \cos^2(x_1)} & & & & & \\ 0 & & & & & \\ \frac{4a/3}{4/3 - am \cos^2(x_1)} & & & & & \end{bmatrix}_{x_1 = \pm \pi/4}$$

با جایگذاری پارامترهای جدول (۳-۱) در قانون‌های اول و دوم، ماتریس‌های حالت سیستم به صورت زیر خواهد بود.

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 17.3138 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1.736 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad . \quad B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.1764 \\ 0 \\ 0.1176 \end{bmatrix} \quad (۲۶-۴)$$

و

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 14.3210 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -0.7165 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad . \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.1147 \\ 0 \\ 0.1081 \end{bmatrix} \quad (۲۷-۴)$$

۱-۹-۴ طراحی رویتکر مود لغزشی-فازی با اعمال عیب حسگر

با توجه به شکل (۴-۴) سیستم (۲۸-۴) را در نظر بگیرید که در آن عیب حسگر رخ داده است.

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + f_s(t) \end{cases} \quad (۲۸-۴)$$

که در آن $x(t) \in R^n$ بردار حالت، $u(t) \in R^p$ بردار ورودی، $y(t) \in R^m$ بردار خروجی اندازه‌گیری شده که به عیب و حالت سیستم وابسته است و f_s نیز بردار عیب حسگر است.

با $u(t)$ بردار ورودی داده شده، بردار حالت و خروجی سیستم به صورت زیر حاصل می‌شوند.

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \omega_i(z(t)) \{A_i x(t) + B_i u(t)\} \\ y(t) = \sum_{i=1}^r \omega_i(z(t)) \{C_i x(t) + f_s(t)\} \end{cases} \quad (۲۹-۴)$$

و معادله رویتگر آن به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = \sum_{i=1}^r \omega_i(z(t)) (A_i \hat{x}(t) + B_i u(t) + L_i (y(t) - \hat{y}(t)) + \Phi_i(t)) \\ \hat{y}(t) = C_i \hat{x}(t) \end{cases} \quad (۳۰-۴)$$

که در آن L_i گین رویتر و $\phi_i(t) \in R^m$ بردار مقاوم ساز در روش مود لغزشی است. با توجه به اینکه ، خطای تخمین حالات بصورت (۴-۳۱) و (۴-۳۲) تعریف می شود. خواهیم داشت.

$$e(t) = x(t) - \hat{x} \quad (۳۱-۴)$$

و

$$\dot{e}(t) = \dot{x}(t) - \dot{\hat{x}}(t) \quad (۳۲-۴)$$

با استفاده از رابطه (۴-۲۹) و رابطه (۴-۳۰) خواهیم داشت

$$\dot{e}(t) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \omega_i \omega_j \{ \bar{A}_{ij} e(t) - L_i f_s(t) - \phi_i(t) \} \quad (۳۳-۴)$$

که در آن رابطه (۴-۳۴) خطای تخمین خطی همگرا شده است.

$$\bar{A}_{ijl} = (A_i - L_i C_i(t)) \quad (۳۴-۴)$$

با توجه به رابطه فوق و با توجه به در نظر گرفتن معادله (۴-۳۴) در [۲۹] با در نظر گرفتن مدل $T-S$ و با فرض اینکه N_i ماتریس مثبت معین و P ارضا کننده نامساوی خطی است. داریم:

$$PA_i + A_i^T P - C_i^T N_i^T - N_i C_i < 0 \quad (۳۵-۴)$$

و $\phi_i(t)$ زیر ارضا کننده رابطه (۴-۳۳) است.

$$\phi_i(t) = K_i \frac{\bar{e}(t)}{\|\bar{e}(t)\|} \quad (۳۶-۴)$$

که در آن $\bar{e}(t) = \sum_{i=1}^r \omega_i(z(t)) C_i e(t) + f_s(t)$ با $K_i > 0$ ، حال رویتر مود لغزشی-فازی رابطه (۴-۳۴) با $L_i = P^{-1} N_i$ همگرایی خطای تخمین به صفر را تضمین می کند [۳۰].

اثبات: تابع لیپانوف پیشنهادی زیر را در نظر بگیرید.

$$V(t) = e^T(t) P e(t) \quad (۳۷-۴)$$

که اگر از رابطه (۴-۳۷) مشتق بگیریم خواهیم داشت.

$$\dot{V}(t) = e^T(t) P \dot{e}(t) + \dot{e}^T(t) P e(t) \quad (۳۸-۴)$$

با استفاده از (۴-۳۳) و (۴-۳۸) داریم:

$$\dot{V}(t) = e^T(t)P \left(\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \omega_i \omega_j \{ \bar{A}_{ijl} e(t) - L_i f_s(t) - \phi_i(t) \} \right) + \quad (39-4)$$

$$\left(\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r \omega_i \omega_j \{ \bar{A}_{ijl} e(t) - L_i f_s(t) - \phi_i(t) \} \sum_{i=1}^r (\omega_i \omega_j)^T P e(t) \right)$$

و

$$\dot{V}(t) = e^T(t) (P \bar{A}_{ijl} + \bar{A}_{ijl}^T P) e(t) + \sum_{i=1}^r \omega_i \{ e^T(t) P L_i f_s(t) - e^T(t) P \phi_i(t) \} \quad (40-4)$$

$$+ \sum_{i=1}^r \omega_i \{ -(L_i f_s(t))^T P e(t) - \phi_i^T(t) P e(t) \}$$

با استفاده از معادله (35-4) مشخص است که اولین ترم سمت راست تساوی فوق مقداری منفی معین دارد و می توان معادله فوق را به صورت زیر نوشت:

$$\dot{V}(t) \leq -\gamma \|e(t)\|^2 + \sum_{i=1}^r \omega_i \{ -2e^T(t) P L_i f_s(t) - 2e^T(t) P \phi_i(t) \} \quad (41-4)$$

در اینجا γ یک مقدار اسکالر مثبت است و با در نظر گرفتن ترم مقاوم ساز معادله (36-4) داریم:

$$\dot{V}(t) = -\gamma \|e(t)\|^2 + \sum_{i=1}^r \omega_i \left[-2 \|P e(t)\| \|L_i f_s(t)\| - 2e^T(t) P K_i \frac{\tilde{e}(t)}{\|\tilde{e}(t)\|} \right] \quad (42-4)$$

و

$$\dot{V}(t) = -\gamma \|e(t)\|^2 \|\tilde{e}(t)\| + 2 \sum_{i=1}^r \omega_i [\|P e(t)\| \|L_i\| \|f_s(t)\| \|\tilde{e}(t)\| - e^T(t) P K_i \tilde{e}(t)] \quad (43-4)$$

حال به منظور $\dot{V}(t) \leq 0$ باید

$$-\gamma \|e(t)\|^2 \|\tilde{e}(t)\| + 2 \sum_{i=1}^r \omega_i [\|P e(t)\| \|L_i\| \|f_s(t)\| \|\tilde{e}(t)\| - e^T(t) P K_i \tilde{e}(t)] \leq 0 \quad (44-4)$$

باشد همچنین

$$\begin{aligned}
& -\gamma \|e(t)\|^2 \sum_{i=1}^r \|\omega_i C_{i1} e(t) + f_s(t)\| \\
& + 2 \sum_{i=1}^r \omega_i \left(\|Pe(t)\| \|L_i\| \|f_s(t)\| \|\tilde{e}(t)\| - e^T(t) P K_i \tilde{e}(t) \right) \leq 0
\end{aligned} \tag{۴۵-۴}$$

و داریم

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=1}^r \omega_i \|P\| \|L_i\| \|f_s(t)\|^2 \\
& + \left[\sum_{i=1}^r \omega_i \|P\| \|e(t)\| \|L_i\| \|C_{i1}\| + \sum_{i=1}^r \omega_i \|P\| \|k_i\| - \frac{1}{2} \gamma \|e(t)\| \right] \|f_s(t)\| \\
& - \left[\sum_{i=1}^r \omega_i \|P\| \|e(t)\| \|k_i\| \|C_{i1}\| + \frac{1}{2} \gamma \|e(t)\|^2 \sum_{i=1}^r \omega_i \|C_{i1}\| \right] \leq 0
\end{aligned} \tag{۴۶-۴}$$

حال اگر داشته باشیم.

$$\|f_s(t)\| \leq \frac{-\beta + \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\delta}}{2\alpha} \tag{۴۷-۴}$$

که در آن

$$\alpha = \sum_{i=1}^r \omega_i \|P\| \|L_i\| \tag{۴۸-۴}$$

$$\beta = \sum_{i=1}^r \omega_i \|P\| \|e(t)\| \|L_i\| \|C_{i1}\| + \sum_{i=1}^r \omega_i \|P\| \|k_i\| - \frac{1}{2} \gamma \|e(t)\|$$

$$\delta = \sum_{i=1}^r \omega_i \|P\| \|e(t)\| \|k_i\| \|C_{i1}\| + \frac{1}{2} \gamma \|e(t)\|^2 \sum_{i=1}^r \omega_i \|C_{i1}\|$$

باشد آنگاه شرط $\dot{V}(t) \leq 0$ تحقق خواهد یافت که در نهایت این مهم بدین معنی است که

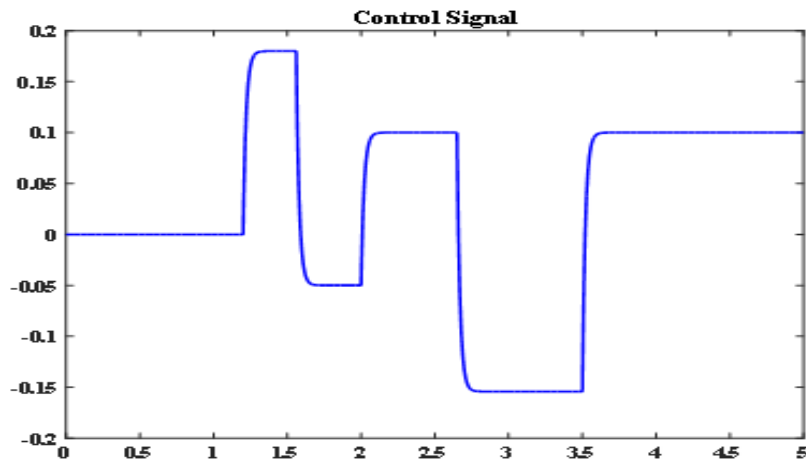
$\lim_{x \rightarrow \infty} e(t) = 0$ است و می توان نتیجه گرفت که خطای تخمین به صفر همگرا می شود [۳۳، ۳۲].

۱۰-۴ شبیه سازی

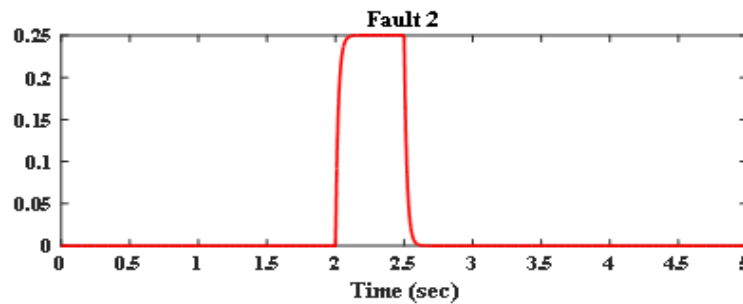
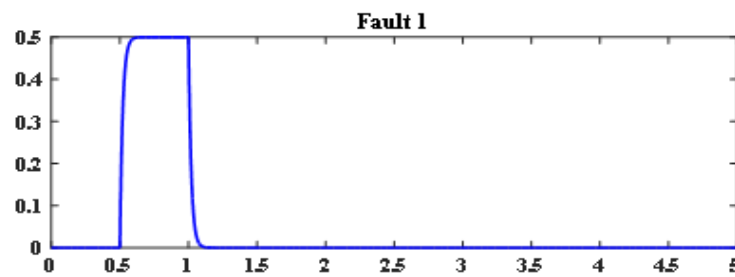
با توجه به ماتریس های به دست آمده شبیه سازی را انجام می دهیم. شایان ذکر است برای بدست

آوردن نتایج و شبیه سازی های پایان نامه یک سیگنال تحریک را تولید می کنیم که به صورت (۴-۷)

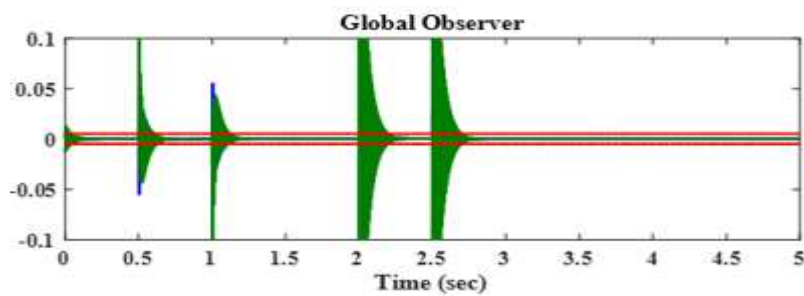
است.



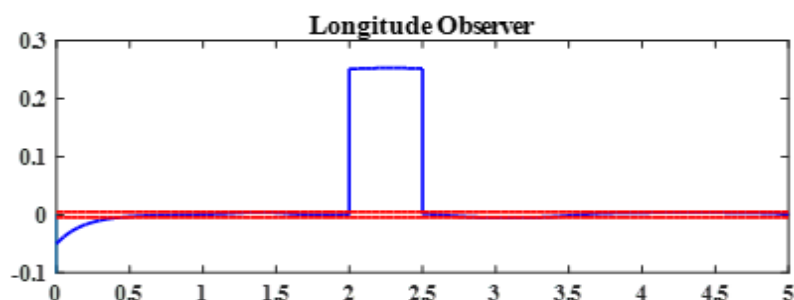
شکل ۴-۴: سیگنال کنترل اعمالی به سیستم آونگ وارون (مود لغزشی-فازی)



شکل ۴-۵: سیگنال‌های عیب وارد شده به سیستم آونگ وارون (مود لغزشی-فازی)



شکل ۴-۶: رویترگر برای تشخیص و شناسایی عیب (مود لغزشی-فازی)



شکل ۴-۷: رویترگر برای جداسازی عیب (مود لغزشی-فازی)

همان‌طور که در شکل (۴-۶) قابل مشاهده است سیگنال‌های مانده که به‌صورت سبز رنگ در شکل مشخص شده‌اند، عیب‌های وارد شده به سیستم را در ثانیه‌های ۰,۵ تا ۱ ثانیه و همچنین در ۲ تا ۲,۵ ثانیه تشخیص می‌دهد. در شکل (۴-۷) نیز عیب‌های وارد شده به سیستم جداسازی شده‌اند که عیب وارد شده در ۰,۵ تا ۱ ثانیه با توجه به اینکه از حد آستانه تعریف شده تجاوز نکرده است، در مابین دو آستانه نشان داده شده است اما عیبی که در بازه زمانی ۲ تا ۲,۵ ثانیه وارد شده است از حد آستانه تجاوز کرده است و به‌صورت فوق نمایش داده شده است.

۴-۱۱ نتیجه‌گیری

در این فصل ابتدا به‌طور خلاصه مباحثی از مود لغزشی و طراحی رویترگر مود لغزشی با در نظر گرفتن عیب حسگر بیان کردیم سپس مباحثی از فازی را شرح دادیم و با استفاده از روش فازی $T-S$ سیستم غیر طی پاندول معکوس را خطی سازی کردیم. همچنین در مورد ترکیب مود لغزشی و فازی مطالبی را بیان کردیم. سپس رویترگر مود لغزشی-فازی را با توجه به قوانین فازی طراحی کردیم. برای شبیه‌سازی نیز ابتدا یک سیگنال کنترلی را به سیستم وارد کردیم سپس نتایج بدست آمده که ابتدا تشخیص سپس جداسازی عیب‌های وارده به حسگر بودند را نمایش دادیم.

فصل ۵ - نتیجه گیری و پیشنهادات

۱-۵ نتیجه گیری

در این پایان نامه سعی شد تشخیص و جداسازی عیب آونگ وارون با استفاده از مشاهده گر مود لغزشی مبتنی بر منطق فازی مورد بررسی قرار گرفت.

در فصل ۱، به بیان اهمیت موضوع و تاریخچه آن پرداخته شد. همچنین کاربردهایی برای این گونه سیستم‌ها معرفی گردید. سپس تعاریف استاندارد در این زمینه ارائه شد تا مطالب فصل‌های بعدی به راحتی قابل درک باشند.

در فصل ۲، ابتدا به کلیاتی درباره مفاهیم و انواع عیوب و همچنین نحوه مدل‌سازی آن‌ها پرداختیم. در ادامه‌ی فصل روش‌های تشخیص و جداسازی عیب دسته‌بندی شده و نحوه‌ی کاربرد و ساز و کار هر روش نیز بیان شد. با توجه به اینکه پایان‌نامه بر رویکرد مبتنی بر مدل تمرکز داشت تمامی مفاهیم حول روش‌های مبتنی بر مدل مورد بحث قرار گرفتند.

در فصل ۳، سیستم پاندول معکوس که یک سیستم ذاتاً ناپایدار است معرفی شد و در مورد مدل‌سازی و معادلات سیستم پاندول معکوس بحث شد. معادلات بیان شده غیرخطی بودند و از آنجایی که در تخمین عیب و طراحی رویتگر مورد نظر به رویت پذیری ماتریس‌های حالت نیاز است، ابتدا معادلات غیرخطی را بدست آوردیم سپس به خطی تبدیل کرده و ماتریس‌های فضای حالت آن را بیان کردیم.

در فصل ۴، مبحث مود لغزشی به‌طور خلاصه عنوان شدند. سپس مزایا و معایب استفاده از آن در کنترل سیستم‌ها عنوان شد و با توجه به معادلاتی که در طول فصل بررسی شدند، طراحی اولیه رویتگر مود لغزشی با اعمال عیب حسگر صورت گرفت. در ادامه معادلات فازی جهت طراحی رویتگر مود لغزشی فازی با اعمال عیب حسگر بیان شد. در این فصل از مدل سیستم فازی T-S برای طراحی و چینه‌ی قوانین فازی استفاده شد. در پایان با در نظر گرفتن معادلات سیستم پاندول معکوس و با اعمال عیب حسگر، تشخیص و جداسازی عیب انجام شد.

۵-۲ پیشنهادات

برای ادامه روند پژوهش در این زمینه مواردی به شرح زیر پیشنهاد می‌گردد.

- (۱) استفاده از رویکردهای دیگر در تشخیص و جداسازی عیب پاندول معکوس
- (۲) استفاده از متد لغزشی- فازی بر روی سیستم‌های دیگر از قبیل ترمز ABS ، هواپیما و ...
- (۳) استفاده از روش‌هایی که بر پایه الگوریتم‌ها هستند. همانند الگوریتم پرندگان، لانه کبوتر و ...
- (۴) ترکیب منطق فازی و شبکه‌های عصبی به منظور تشخیص و جداسازی هرچه بهتر عیب

- [1] Steven X. Ding; " *Model-based Fault Diagnosis Techniques*". Berlin, Springer Verlag, 2015.
- [2] Zhang Youmin and Jiang Jin; " *Bibliographical review on reconfigurable faulttolerant control systems*", *Annual Reviews in Control* 32, p. 229–252, March 2016.
- [3] Heredia. G,Olleron. A ,Begar. M And Mahtani. R " *Sensor and actuator fault detection in small autonomus helicopters* ",*Mechatronics*,49, pp. 90-99,2017.
- [4] Zarei. J and Poshtan J, " *Model-based fault-detection and diagnosis-status and application*" *Annual Reviews in Control* ,29 ,pp .71-85 , 2015.
- [5] Isermann, R.; " *Fault-diagnosis systems: An introduction from fault detection to fault tolerance*", Berlin, Germany, Springer, 2016.
- [6] Mahmoud, M., Jiang, J., Zhang, Y.: " *Active fault tolerant control systems: stochastic analysis and synthesis*". Springer, Berlin (2013).
- [7] NTSB. " *Aircraft accident report - american airlines*", inc. DC-10-10. *Technical Report NTSB-AAR-79-17*, National Transpotration Safety Board, USA (1979).
- [8] Silvio Simani, Cesare Fantuzzi, and Ron J. Patton; " *Model based fault-diagnosis in dynamic systems using identification techniques*", Springer-Verlag, 2017.
- [9] Hongyi Li, Yabin Gao Cesare Fantuzzi, Peng Shi and Hak-Keung Lam. " *Observer-based Fault Detection for Nonlinear Systems with Sensor Fault and Limited Communication Capacity*". *iee transactions on automatic control*, vol. 27, no. 4, 1165. 2016.
- [10] Blanke, M., Kinnaert, M., Lunze, J., & Staroswiecki, M.;" *Diagnosis and fault-tolerant control*", 2nd ed. Berlin, Germany, Springer, 2016.
- [11] Witczak, M.; " *Modelling and estimation strategies for fault diagnosis of non-linear systems From analytical to soft computing approaches*", *Lecture notes in control and information sciences*, Berlin, Germany, Springer, 2016.
- [12] Edwards, Christopher, Thomas Lombaerts, and Hafid Smaili. " *Fault tolerant flight control.*" *Lecture Notes in Control and Information Sciences* 399 (2015).

- [13] Noura, H., Sauter, D., Hamelin, F., Theilliol: " Fault-tolerant control in dynamic systems: application to a winding machine". *IEEE Control Systems Magazine* 20(1), 33–49 (2014).
- [14] Basseville, M.: "On-board component fault detection and isolation using the statistical local approach". *Automatica* 34(11), 1391–1415 (1998).
- [15] Gertler, J.: " Designing dynamic consistency relations for fault detection and isolation". *International Journal of Control* 73(8), 720–732 (2017).
- [16] Chen, J. and Patton, R. J. (1999). " Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems", Norwell, MS: Kluwer Academic Publishers
- [17] Z. Gao, X. Shi, and S.X. Ding, "Fuzzy State/Disturbance Observer Design for T.S Fuzzy Systems With Application to Sensor Fault Estimation". *IEEE Transaction On Systems, Man, and Cybernetics, Part B : Cybernetics*, 38(3), pp.875-880-2008.
- [18] K. Tanaka and H.O. Wang, "Fuzzy Control Systems Design and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach", John Wiley & Sons, 2015.
- [19] P. Bergsten, R.Palm and D. Driankov, "Observers for Takagi-Sugeno Fuzzy Systems. *IEEE Transaction On Systems, Man, and Cybernetics*, 32(1), pp.114-121-2016.
- [20] T.Takagi and M. Sugeno, " Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modeling and Control" , in *Transaction On Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 151, pp.116-132-2017.
- [21] Christopher Edwards, Sarah K. Spurgeon, Ron J. Patton, " Sliding Mode Observer for Fault Detection and Isolation" *Automatica* 36 541-533.2000
- [22] Van-Phong Vu, Wen-June Wang, " Observer synthesis for uncertain Takagi–Sugeno fuzzy systems with multiple output matrices," *The Institution of Engineering and Technology* 2015
- [23] Mendonca L. F, Sousa J. M. C and Sada Costa, " Modelling & Simulation for Optimal Control of Nonlinear Inverted Pendulum Dynamical System using PID Controller & LQR", *Expert Systems with Application*, 36, pp. 1104, 2016.

[24] عزیزآبادی، جواد؛ (۱۳۹۳). پایان نامه کارشناسی ارشد کنترل: " طراحی رویت گر مود لغزشی به منظور تشخیص و جداسازی خطا در سیستم‌های دینامیکی غیرخطی ". ، دانشکده برق و رباتیک ، دانشگاه صنعتی شاهرود.

- [25] Mendonca L. F, Sousa J. M. C and Sada Costa, "Architecture for Fault Detection and Isolation Based on Fuzzy Methods", *Expert Systems with Application*, 36.pp. 1092-1104, 2016. [26] Zak, S. H., and Walcott, B. L, "State Observation of Nonlinear Control System via the Method of Lyapunov". *Deterministic Control of Uncertain Systems*, edited by A.S.I, 1990.
- [26] P. Bergsten, R. Palm, and D. Driankov "Observers for Takagi–Sugeno Fuzzy Systems" *IEEE Transactions on Systems, and Cybernetics—Part B: Cybernetics*, Vol. 32, NO. 1, February 2000.
- [27] Kazuo Tanaka, Hua O. Wang. "Fuzzy Control Systems Design and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach". *Contr.ENG.Practice* Vol.5., NO.pp.663-670, 2014.
- [28] A. Akhenak, M. Chadli, J. Ragot, D. Maquin "Design of Sliding Mode Unknown Input Observer for Uncertain Takagi – Sugeno Model" *16th Mediterranean Conference on Control and Automation* pp.,286-291-2007
- [29] Abdelkader Akhenak, Mohammed Chadli, José Ragot, Didier Maquin "Fault detection and isolation using sliding mode observer uncertain Takagi- Sugeno fuzzy model" *16th Mediterranean Conference on Control and Automation* pp.,286-291, 2016
- [30] Abdelkader Akhenak, Mohammed Chadli, José Ragot, Didier Maquin "Fault detection and isolation using sliding mode observer uncertain Takagi- Sugeno fuzzy model" *16th Mediterranean Conference on Control and Automation* pp.,286-291, 2016
- [31] M.Thirumarimurugan., N.Bagyalakshmi., P.Paarkavi "Comparison Of Fault Detection And Isolation Methods: A Reviews"., *Department of Chemical Engineering, Coimbatore Institute of Technology, Coimbatore, India*. Vol. 2, No. 3, November 2017,33-41
- [32] A.E. Garcia Y P.M. Frank, "Deterministic Nonlinear Observer-Based Approaches to Fault Diagnosis: A survey", *Contr.ENG.Practice* Vol.5., NO.pp.663-670, 2016
- [33] S. H. Zak, "Stabilizing fuzzy models using linear controllers," *IEEE Trans Fuzzy Syst.*, vol. 7, pp. 236-240, Apr. 1999.

Abstract

In this thesis, a brief introduction of the various types of fault and the relevant theories has been illustrated. Then, the dynamic model of the inverted pendulum system has been described as a case study.

In order to detect and isolate of fault in the mentioned system, sliding mode observer and fuzzy sliding mode observer based on T-S model have been proposed. The Lyapunov stability analysis has been utilized to ensure the boundedness of the closed-loop system. Simulation results confirm the potential and effectiveness of the proposed FDI.

Keywords:

Fault detection and isolation, Inverted pendulum, Sliding mode observer, Fuzzy logic



Shahrood University of Technology

Faculty of Electrical and Robotic Engineering

**Inverted Pendulum Fault Detection and Isolation Using Sliding Mode
Observer Based On Fuzzy Logic**

Milad Esmaeili

**Supervisor:
Dr Mohammad Hadad Zarif**

Date: 2019
