

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

رشته مهندسی برق گرایش کنترل

پایان نامه کارشناسی ارشد

تشخیص خطا با استفاده از رویکرد مود لغزشی برای سیستم مبتنی بر مدل فازی نامعین

نگارنده : سید حسین حدادی

استاد راهنما :

دکتر محمدعلی صدرنیا

شهریور ۱۳۹۵

تقدیم به

پدر و مادر عزیز و خواهر مهربانم

که در سختی‌ها و دشواری‌های زندگی همواره یاور و دلسوز و فداکار

و پشتیبانی محکم و مطمئن برایم بوده‌اند.

با تقدیم احترام و سپاس

از پروردگار دادار هور و گرداننده آسمان‌ها و زمین‌ها که به من عمر مکفی داد تا بتوانم این پایان‌نامه را در قلم پیاده‌سازی کنم، را شکر گذارم. و تا آنجایی که استخوان کتفم اجازه دهد؛ دستان خالی خود را به‌سوی آسمانی که طراحی و ساخت آن از طراحی و ساخت بدن انسان هم پیچیده‌تر است، بلند می‌کنم و امید به اعتلا و ارتقای سطح ایران عزیز را دارم.

جناب آقای دکتر صدرنیا

شما روشنائی‌بخش تاریکی جان هستی و ظلمت اندیشه را نور می‌بخشی. چگونه سپاس گویم
مهربانی و لطف شما را که سرشار از عشق و یقین است. چگونه سپاس گویم تأثیر علم‌آموزی شما را
که چراغ روشن هدایت را بر کلبه‌ی محقر وجودم فروزان ساخته است. آری در مقابل این همه عظمت
و شکوه، مرا نه توان سپاس است و نه کلام وصف.

تعهد نامه

اینجانب سید حسین حدادی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق / کنترل دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تشخیص خطا با استفاده از رویکرد مود لغزشی برای سیستم مبتنی بر مدل فازی نامعین تحت راهنمایی دکتر محمدعلی صدرنیا 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

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:

همان‌طور که با گذشت زمان و پیشرفت علم سیستم‌های کنترلی پیچیده‌تر می‌شود، امنیت و قابلیت اطمینان آن سیستم‌ها نیز مورد توجه قرار می‌گیرد. از آنجایی که در عمل هیچ سیستمی نمی‌تواند بدون نقص کار کند، بنابراین تشخیص خطا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌گردد. با توجه به مشکلات و خسارات ناشی از خطای عملگر در یک سیستم، این پایان‌نامه سعی بر تشخیص این نوع خطا داشته و هدف آن تخمین حالات ورودی سیستم است. تشخیص خطا به وسیله‌ی رویتگر مود لغزشی انجام شده که عملکرد این رویتگر به‌وسیله‌ی منطق فازی بهبود یافته است. روش پیشنهادی یک سیستم فازی بوده که با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها تشابه آن به سیستم اصلی بیشتر شده است. در نهایت درستی روش پیشنهادی با پیاده‌سازی بر روی مدل دینامیکی خودرو، تشخیص خطا و تخمین حالات آن اثبات می‌شود.

کلمات کلیدی: تشخیص خطا، منطق فازی، مود لغزشی، مشاهده‌گر، عدم قطعیت

فهرست مطالب

- ۱- فصل اول: پیشگفتار..... ۱
- ۱-۱ مقدمه ۲
- ۲-۱ تاریخچه خطا..... ۲
- ۳-۱ لزوم شناسایی خطا ۴
- ۴-۱ تعاریف خطا ۵
- ۱-۴-۱ تعاریف خطا بر اساس مشخصه سیگنالی..... ۵
- ۲-۴-۱ تعاریف خطا بر اساس مشخصه تابعی..... ۶
- ۵-۱ خطا و انواع دسته‌بندی آن ۷
- ۱-۵-۱ بر اساس مشخصه مطلوبیتی ۷
- ۲-۵-۱ بر اساس مشخصه زمانی خطا..... ۷
- ۳-۵-۱ از نظر مدل کردن ۸
- ۴-۵-۱ بر اساس مشخصه مکانی..... ۹
- ۲- فصل دوم: معرفی و مرور روش های تشخیص و جداسازی خطا ۱۱
- ۱-۲ مقدمه ۱۲
- ۲-۲ تشخیص خطا بدون مدل ۱۳

- ۱۴-۲-۱ تشخیص خطا مبتنی بر مشاهدات چشمی..... ۱۴
- ۱۴-۲-۲ تشخیص خطا مبتنی بر بررسی تغییرات سنسورها..... ۱۴
- ۱۴-۲-۳ تشخیص خطا مبتنی بر تحلیل فرکانسی..... ۱۴
- ۱۵-۳-۲ تشخیص خطا مبتنی بر مدل..... ۱۵
- ۱۷-۳-۱ تشخیص خطا مبتنی بر معادلات برابری..... ۱۷
- ۲۰-۳-۲ تشخیص خطا با استفاده از مشاهده گر حالت..... ۲۰
- ۲۱-۳-۳ تشخیص خطا مبتنی بر شبکه های عصبی..... ۲۱
- ۲۲-۳-۴ تشخیص خطا مبتنی بر منطق فازی..... ۲۲
- ۲۳-۴-۲ روش های هوش مصنوعی و سیستم های خبره..... ۲۳
- ۲۳-۵-۲ تشخیص خطا مبتنی بر مشاهده گرها..... ۲۳
- ۲۴-۶-۲ تشخیص خطا مبتنی بر مشاهده گر مود لغزشی..... ۲۴
- ۲۴-۷-۲ مسئله ی مقاوم پذیری در تشخیص خطای مبتنی بر مدل..... ۲۴
- ۲۵-۳- فصل سوم: معرفی و طراحی مشاهده گر مود لغزشی برای تشخیص خطا..... ۲۵
- ۲۶-۱-۳ مقدمه..... ۲۶
- ۲۷-۲-۳ مرور تحقیقات پیشین در زمینه ی مودلغزشی..... ۲۷
- ۳۰-۱-۲-۳ مشاهده گر لیونبرگر..... ۳۰
- ۳۱-۲-۲-۳ مشاهده گر اوتکین..... ۳۱
- ۳۴-۳-۲-۳ اصلاح مشاهده گر اوتکین..... ۳۴
- ۳۵-۴-۲-۳ مشاهده گر اسلوتین..... ۳۵

- ۳-۲-۵ مشاهده گر والکت و زاک ۳۶
- ۳-۲-۶ مشاهده گر ادواردز و اسپرجن ۳۸
- ۳-۳ فرم همراه مشاهده گر مود لغزشی ۴۰
- ۴-۳ توضیح مدل فازی تاکاگی سوگنو ۴۲
- ۵-۳ مشاهده گر مود لغزشی فازی ۴۴
- ۴-۴ فصل چهارم: شبیه سازی مدل دینامیکی وسیله ی نقلیه ۴۷
- ۱-۴ مقدمه ۴۸
- ۲-۴ مثالی برای خودرو دینامیکی ۴۸
- ۳-۴ تشخیص خطا برای مدل وسیله ی نقلیه ۵۲
- ۴-۴ نتیجه گیری مثال خودرو نقلیه ۵۷
- ۵-۵ فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادها ۵۹
- ۱-۵ مروری بر کارهای انجام شده ۶۰
- ۲-۵ پیشنهادها ۶۱
- ۶-۶ مراجع ۶۲

فهرست جدول‌ها

جدول ۴-۱: مقادیر پارامترهای معادلات سیستم خودرو نقلیه ۴۹

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱: خطا بر اساس مشخصه‌ی زمانی ۸

شکل ۲-۱: خطا از نظر مدل کردن در سیستم ۹

شکل ۳-۱: خطا بر اساس مشخصه‌های مکانی ۱۰

شکل ۱-۲: تشخیص خطا مبتنی بر مدل ۱۶

شکل ۲-۲: تولید مانده با استفاده از معادلات برابری و تابع تبدیل ۱۸

شکل ۳-۲: شناسایی خطا مبتنی بر شبکه عصبی ۲۲

شکل ۱-۳: مدل بلوکی مشاهده‌گر مود لغزشی به منظور تشخیص و جداسازی خطا ۴۲

شکل ۱-۴: توابع عضویت ۵۱

شکل ۲-۴: تابع تکه‌ای ثابت ۵۱

شکل ۳-۴: ورودی سیستم خودرو نقلیه ۵۴

شکل ۴-۴: خطای محرک ۵۴

شکل ۵-۴: خطای عملگر ۵۴

شکل ۶-۴: حالات سیستم و تخمین آن ۵۵

شکل ۷-۴: خطای تخمین حالات ۵۵

شکل ۸-۴: تشخیص خطای خروجی ۵۶

فصل اول

پیشگفتار

۱-۱ مقدمه

در عصر جدید و با پیشرفت علم، تشخیص خطا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. سیستم‌ها و دستگاه‌ها دچار اختلال و خرابی می‌شوند و این امر در صورت عدم تشخیص سریع، ممکن است خطرات جانی و مالی به همراه داشته باشد. برای پیشگیری از بروز این خطرات می‌توان از برنامه‌های نظارتی استفاده کرد. وظیفه برنامه‌ی نظارتی تشخیص به‌موقع خطا، شناسایی بخش مرتبط با خرابی و جایگزینی یک پیکره‌بندی مناسب جهت ادامه‌ی عملکرد مطلوب سیستم می‌باشد.

تشخیص به‌موقع خطا برای سیستم‌های امنیتی حساس مانند هواپیما و فناوری حمل‌ونقل، راکتورهای هسته‌ای، فرآیندهای شیمیایی و... و همچنین سیستم‌هایی که می‌توانند در صورت عدم به‌موقع تشخیص خطا عواقب بسیار جدی (مانند مرگ‌ومیر انسانی، اثرات زیست‌محیطی و خسارات اقتصادی) داشته باشند، از اهمیت بالایی برخوردار است.

۱-۲ تاریخچه خطا

در دهه ۱۹۶۰ میلادی، تأثیر عملکرد اتوماسیون‌های صنعتی و طراحی پردازنده‌های صنعتی به‌طور گسترده و روزافزونی بر تولید و حمل‌ونقل افزایش یافت. این گسترش روند در حال توسعه‌ی صنعتی شدن، دلیلی برای تقاضای افزایش عملکرد پردازش یا کیفیت محصولات بود، که خود خواهان استقلال انجام عملکرد پردازش توسط انسان^۱ است؛ و چون گزینه انسان به شکل مستقیم حضور نخواهد داشت؛ لذا این عدم وابستگی به انسان، هر چند که مزیت‌رهایی کاربرها از انجام وظایف و کارهای یکنواخت و نیز کاهش دستمزدها را در بردارد، اما احتمال بروز خطا را افزایش می‌داد.

^۱ اتوماسیون صنعتی

پیاده‌سازی بر خط^۲ فرآیندهای کامپیوتری عملی در سال ۱۹۶۰، راهی نوین برای بهبود و پیشرفت در روش‌های نظارت را باز کرد، مانند روند تجزیه و تحلیل در امر نظارت که پیشرفت قابل توجهی کرد. در سال ۱۹۶۸ کنترل‌های قابل برنامه‌ریزی منطقی، به‌منظور جایگزینی از رله‌های الکترومکانیکی، به کنترل‌های سخت‌افزاری معرفی شدند. که این جایگزینی موجب آسان‌تر شدن سیستم‌های حفاظی شد. ظهور و پیدایش میکروکنترلرها در سال ۱۹۷۱ و افزایش کارایی آن‌ها در مرکز زدایی فرآیند سیستم‌های اتوماسیونی در سال ۱۹۷۵، شروعی بر محاسباتی شدن هرچه بیشتر نرم‌افزارهای مبتنی بر نظارت و الگوریتم‌های تشخیص خطا بود. نخستین انتشاراتی که بر فرآیندهای مبتنی بر مدل و روش‌های تشخیص خطا منتشر شد، در خصوص ارتباطات سیستم‌های هوافضا [۱]، و طرح‌های دارویی و شیمیایی بود. تعدادی از این مفاهیم اولیه را می‌توان به‌عنوان روش‌های رابط برابری، طبقه‌بندی کرد، که این روش‌ها می‌توانند شامل بررسی سازگاری وسایل استفاده شده و توازن مواد باشند. این توازن مواد که عموماً باعث تولید مانده وزن (عدم دقت در وزن) می‌شوند، برای مثال می‌توانند برای تشخیص نشتی در یک خط لوله استفاده شود [۲].

روش‌های مبتنی بر مشاهده‌گر حالت، به‌منظور تولید مانده در خروجی، مانند مشاهده‌گر حالت توسط لیونبرگر [۳] و فیلتر کالمن [۴] به‌سرعت گسترش یافتند، بعدها به علت بروز تحلیل‌های بیشتر و رو به افزونی که بین تعدادی اقدامات برای تشخیص خطای حسگرها به وجود آمد، بانکی از مشاهده‌گرها مورد تأیید و استفاده قرار گرفت [۵] و در نهایت به‌منظور جبران ورودی‌های اندازه‌گیری نشده در یک سیستم، مشاهده‌گرهای ورودی ناشناخته یا مشاهده‌گرهای خروجی نیز گسترش یافتند [۶].

استفاده از تخمین پارامترها، از دیگر روش‌های تشخیص خطا است، که برای اولین بار در مرجع [۷]

² Online

انتشار یافت؛ که این روش در زمینه تخمین پارامتری توربین جت بود. و بعدها برای فرآیندهای عمومی مانند پمپ‌های در گردش، موتورهای DC و موتورهای الکتریکی مورد استفاده واقع شد [۸].

علاوه بر موارد ذکر شده در بالا چندین کتاب ارزشمند در زمینه تشخیص خطا، و خلاصه‌هایی از کارهای انجام شده در مراجع [۹]، [۱۰] و [۱۱] آورده شده‌اند. لازم به ذکر است که کتاب‌های یاد شده بیشتر در زمینه روش‌های مبتنی بر مدل و مبتنی بر فرایند فعالیت داشته و تصاویر خوبی در این زمینه عرضه کرده‌اند.

۱-۳ لزوم شناسایی خطا

سیستم‌های واقعی عمدتاً غیرخطی و غیرقابل پیش‌بینی هستند؛ به همین دلیل عمل شناسایی و تشخیص خطا هم بر روی این سیستم‌ها کار دشواری است. در صنعت، عمل تشخیص و شناسایی خطا بر روی سیستم و مجموعه‌هایی انجام می‌گیرند، که ارزش تشخیص و شناسایی خطا را داشته باشند و سیستم‌هایی این ارزش را پیدا می‌کنند که دارای سه ویژگی خطرناک زیر باشند:

۱. اگر خطا تشخیص داده نشود، امکان بروز خطر جانی برای انسان را در پی داشته باشد.
۲. اگر خطا تشخیص داده نشود، امکان متحمل شدن هزینه گزاف برای انسان را در برداشته باشد.
۳. وجود دلایل فنی مانند لقی، فرسایش، خوردگی و خلاصی.

که این سه مهم در سیستم‌های دینامیکی نمود پیدا می‌کند.

در زیر نمونه‌هایی برای روشن‌تر شدن اهمیت تشخیص خطا برای سیستم‌های دینامیکی آورده شده است:

- سقوط پرواز شماره‌ی ۱۹۱ هواپیمایی آمریکا در ۲۵ می ۱۹۷۹ در شیکاگو، که کارشناسان بعد از تحقیقات، علت این حادثه را مشکل در عملکرد سیستم حسگر تنظیم ارتفاع هواپیما دانستند، تلفات جانی این حادثه ۲۷۳ کشته گزارش شده است.
- انفجار در تأسیسات انرژی هسته‌ای اکرین در ۲۶ آوریل ۱۹۸۶، تلفات این حادثه بیش از ۱۵۰۰۰ کشته و ۵۰۰۰۰ مصدوم گزارش شده است به نقل از گزارش BBC تخمین زده شده است که بر اثر این حادثه، حدود ۵ میلیون نفر، در معرض تشعشعات رادیواکتیو قرار گرفتند.
- سقوط هواپیمای باربری بوئینگ ۷۴۷ در ۴ اکتبر ۱۹۹۲، این هواپیما اندکی پس از پرواز به - دلیل اشکال در بال سمت راست در فرودگاه بین‌المللی آمستردام دچار سانحه گردید.

۴-۱ تعاریف خطا

به نظر شاید کمی دشوار به نظر برسد که واقعاً چه تفاوتی بین خطا، شکست، بدعمل کردن، اشتباه و نیز از نگاهی دیگر چه تفاوتی بین تشخیص، جداسازی، شناسایی و شناخت وجود دارد؟ به همین دلیل، اصطلاحات و مفاهیمی تعریف شد، تا تمایزی بین این تعاریف برقرار شود.

۱-۴-۱ تعاریف خطا بر اساس مشخصه سیگنالی

خطا (Fault): انحراف غیرمجاز حداقل یک ویژگی رفتاری و یا پارامتر سیستم، از مقدار مطلوب، یا شرایط استاندارد.

شکست (Failure): یک وقفه‌ی موقت در توانایی یک سیستم، برای اجرای یک عمل مورد نیاز، تحت شرایط عملکردی مشخص.

بدعمل کردن (Malfunction): یک بی‌نظمی متناوب، در برآورده کردن عملکرد مطلوب سیستم.

اشتباه (Error): اختلاف بین مقدار اندازه‌گیری شده یا محاسبه شده‌ی یک متغیر خروجی با مقدار واقعی، یا از نظر تئوری درست آن متغیر.

اغتشاش (Disturbance): ورودی ناخواسته و کنترل نشده به سیستم، که در فرکانس‌های پایین نمود پیدا می‌کند.

اختلال (Perturbation): نوعی ورودی کنشی به سیستم، که منجر به خروج موقتی سیستم از حالت جاری و فعلی خودش می‌شود.

مانده (Residual): یک شاخص خطا، مبتنی بر انحراف بین اندازه‌گیری و محاسبات مبتنی بر معادلات مدل می‌باشد.

۱-۴-۲ تعاریف خطا بر اساس مشخصه تابعی

تشخیص خطا (Fault detection): وظیفه‌ی تشخیص وجود خطا در سیستم، و تعیین زمان آن را دارد.

تعیین خطا (Fault determination): معرف مدت زمانی است که سیستم با خطا مواجه بوده و همچنین بیانگر میزان دامنه خطای رخدادی است.

جداسازی خطا (Fault isolation): تعیین نوع، مکان و زمان یک خطا است که در ادامه‌ی تشخیص خطا انجام می‌شود.

شناسایی خطا (Fault diagnosis): تعیین نوع، مکان، اندازه و زمان خطایی که رخ داده است. که این مرحله در امتداد تشخیص، جداسازی، و تعیین خطا است.

بازسازی خطا (Fault reconstructions): آخرین مرحله از فرایند این مقوله است، و شکل

نموداری خطا را که معرف تمام ویژگی‌های خطا است، نشان می‌دهد.

۱-۵ خطا و انواع دسته‌بندی آن

۱-۵-۱ بر اساس مشخصه مطلوبیتی

اطمینان‌پذیری (Reliability): توانایی سیستم برای انجام یک عملکرد مورد نیاز تحت شرایط معلوم، در یک دامنه داده شده و مشخص، و نیز در طول یک دوره زمانی معین.

ایمنی (Safety): توانایی سیستم از بابت این مهم که خطر و تهدیدی برای افراد انسانی، محیط و تجهیزات نداشته باشد.

دسترسی‌پذیری (Availability): امکان این مهم که سیستم یا تجهیزات مربوطه، در هر لحظه از زمان عملکردی سیستم، رضایت‌مندی و مفید بودن را برای ما به ارمغان می‌آورد.

اعتماد‌پذیری (Dependability): در واقع نوعی از دسترسی‌پذیری بوده که ملاک‌های مورد نیاز عملکردی معین، در طول دوره زمانی کارکرد سیستم را تأمین می‌کند.

۱-۵-۲ بر اساس مشخصه زمانی خطا

خطای ناگهانی (Abrupt fault): شبیه تابع پله بوده و یک تغییر نامطلوب و ناگهانی و همچنین تنظیم نامناسب را نشان می‌دهد. این نوع خطا به دلیل تأثیر مستقیم بر عملکرد سیستم و پایداری آن نیاز فوری به اصلاح دارد.

خطای نرم (Incipient fault): نام دیگر آن خطای افزایشنده است، منجر به لغزش‌های نامطلوب سیستم از مقادیر سالم بوده که با گذشت زمان افزایش می‌یابند. شبیه تابع شیب بوده و نشان‌دهنده رانش در سیگنال مطلوب است. این نوع خطا صدمه‌ای ناگهانی ایجاد نمی‌کند ولی شناسایی آن مشکل

می‌باشد.

خطای موقتی (Intermittent fault): نام دیگر آن خطای تناوبی است، که شبیه تابع پالس بوده و به صورت ترکیبی از توابع ضربه یا دامنه‌های متفاوت است. این نوع خطا به صورت متناوب ظاهر می‌شود و سپس ناپدید می‌شود.

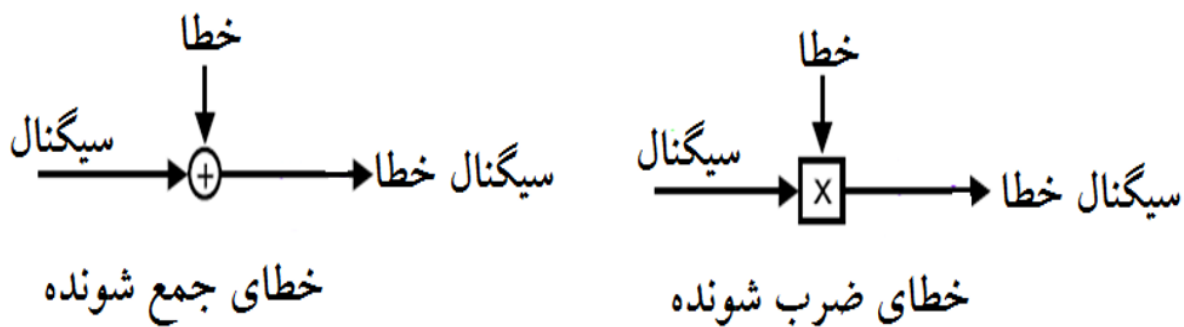


شکل ۱-۱: خطا بر اساس مشخصه‌ی زمانی

۱-۵-۳ از نظر مدل کردن:

خطاهای جمع شونده (Additive fault): خطا به صورت جمع شدن با متغیری که خطا در آن رخ داده، مدل می‌شود. آفست حسگرها مثال خوبی برای این نوع خطاها هستند.

خطاهای ضرب شونده (Multiplicative fault): خطا در متغیری که در آن رخ داده است ضرب می‌شود. این خطا اغلب به صورت تغییر پارامتر در فرآیندها ظاهر می‌شود ممکن است تأثیر مستقیم بر روی پایداری سیستم داشته باشد.



شکل ۲-۱: خطا از نظر مدل کردن در سیستم

۱-۵-۴ بر اساس مشخصه مکانی:

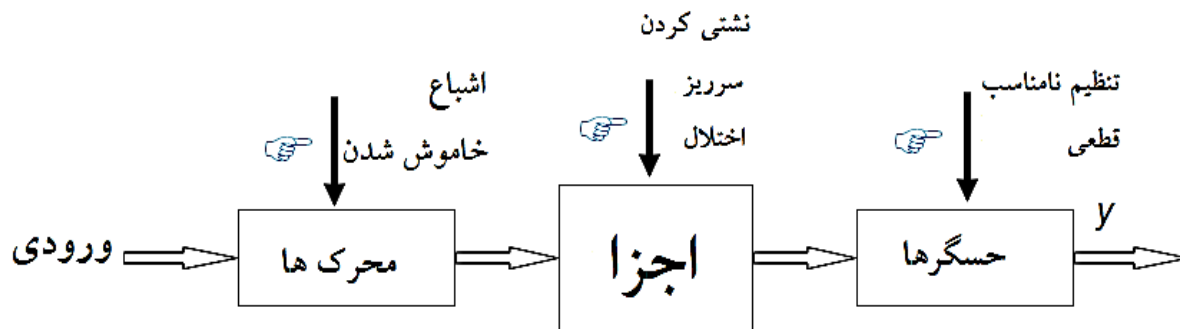
از نقطه نظر مکانی، خطاهایی که بر روی سیستم اعمال می‌شوند را می‌توان بر سه دسته تقسیم کرد:

خطای حسگر (Sensor Fault): حسگرها اساساً رابط ورودی یک سیستم با دنیای بیرون هستند. خطای حسگر بیانگر اطلاعات نادرستی است که حسگر دارای خطا به سیستم می‌دهد. برای رفع این مشکل اگر محدودیتی در استفاده از حسگر از لحاظ ابعاد و قیمت وجود نداشته باشد، می‌توانیم با به‌کارگیری حسگرهای اضافی، ایمنی سیستم را بالا ببریم.

خطای محرک (Actuator Fault): در بسیاری از سیستم‌های مکانیکی سیگنال‌های کنترل مستقیم از کنترل‌کننده هدایت نمی‌شوند، وظیفه‌ی محرک‌ها انتقال سیگنال‌های کنترلی به سیگنال-های محرک مناسب (مثل گشتاورها و نیروها) برای راه‌اندازی سیستم است. به بیان دیگر، محرک‌ها مجریان کنترل یک سیستم هستند. وجود خطا در محرک‌ها باعث از بین رفتن کامل یا جزئی عملیات کنترل می‌شود.

خطای عناصر (Component Fault): خطایی که در پارامترهای فیزیکی یا اجزای سیستم رخ می‌دهد و سبب بد عمل کردن سیستم می‌شود. شامل هر خطایی است که نتوان آن را جز خطاهای

محرك يا حسگر قرار داد.



شکل ۱-۳: خطا بر اساس مشخصه‌های مکانی

در این فصل با خطا و اصطلاحات آن آشنا شدیم. بعد از بیان مختصری از تاریخچه‌ی خطا، با ذکر مثال‌هایی، به لزوم استفاده از تشخیص خطا پی بردیم. و در انتها انواع خطا و تفاوت بین خطاها را توضیح دادیم. در فصل بعد قصد داریم انواع روش‌های تشخیص خطا را بیان کنیم و با نگاهی به کارهای انجام شده در خصوص تشخیص خطا بهترین روش را برای سیستم پیشنهادی انتخاب کنیم.

فصل دوم

معرفی و مرور روش‌های تشخیص

و جداسازی خطا

در سال ۱۹۷۵ هم‌زمان با پیدایش میکرو کامپیوترهای ارزان و قابل اطمینان که توانایی حل بسیاری از مسائل و مشکلات اتوماسیون را در یک دستگاه داشتند، میزان و درجه صنعتی شدن به شکل فشرده و با سرعت رو به بالایی افزایش یافت. این روند در اکثر ناحیه‌ها مانند حسگرها، محرک‌ها، سیستم‌های ارتباطی و رابط‌های بین انسان و ماشین، به شکل موازی پیشرفت کرد، این پیچیدگی موجبات رخداد خطا در حسگرها و محرک‌ها را در پی داشت که باعث شد مقوله علمی تشخیص خطا، شمای اتوماسیونی به خود گرفته و وارد صنعت شود.

به مرور زمان، با پیشرفت و پیچیده‌تر شدن سیستم‌های کنترلی، مسائل مربوط به قابلیت اطمینان و ایمنی این سیستم‌ها اهمیت ویژه‌ای پیدا کردند. از آنجایی که هیچ سیستمی نمی‌تواند تحت شرایط مختلف و متغیر کاری، کیفیت عملکرد خود را تضمین کند، تشخیص و شناسایی خطا^۳ در سریع‌ترین زمان ممکن، امری حیاتی و ضروری به نظر می‌رسد. برای این منظور از روش‌های تشخیص و جداسازی خطا برای جلوگیری از خسارات قابل توجه به تجهیزات و البته حفظ ایمنی و جان کارکنان استفاده می‌کنیم.

برای تشخیص و جداسازی خطا دو رویکرد اصلی وجود دارد: تشخیص خطا مبتنی بر مدل^۴ و تشخیص خطا بدون مدل^۵. در بین روش‌هایی که مبتنی بر مدل هستند، راهبردهای متنوعی نظیر روش‌های مختلف شناسایی سیستم، مانند عصبی، فازی، روش معادلات برابری، تخمین پارامتر و انواع روش‌های مبتنی بر رویکرد کارآمدترین روش مطرح هستند.

³ Fault Detection and Isolation(FDI)

⁴ GoModel based ssel

⁵ Gossel

۲-۲ تشخیص خطا بدون مدل

در این روش، رویکردهای تشخیص خطا از مدل ریاضی سیستم مانیتور شده، استفاده نمی‌کنند. آن‌ها می‌توانند به روش افزونگی سخت‌افزاری، بررسی حد، طیف فرکانسی، آنالیز آماری و استدلال منطقی و... تقسیم شوند که در ادامه، به توضیح برخی از آن‌ها می‌پردازیم.

افزونگی سخت‌افزاری: در این روش چند حسگر برای اندازه‌گیری یک متغیر فیزیکی نصب می‌شوند. اختلاف جدی بین اندازه‌گیری‌ها، خطای حسگر نامیده می‌شود. افزونگی فیزیکی هزینه‌ی سخت‌افزار اضافی و وزن اضافی را به همراه دارد.

بررسی حد: در این روش اندازه‌گیری، متغیرهای سیستم با حدود از پیش تعیین شده، توسط یک کامپیوتر، مقایسه می‌شوند. تجاوز از آستانه نشان دهنده‌ی یک وضعیت خطاست.

آنالیز طیفی اندازه‌گیری‌های یک فرآیند: بیشتر متغیرهای فرایند، یک طیف فرکانسی نوعی تحت شرایط عملکردی نرمال را نشان می‌دهند که هرگونه عدم تطابق با آن نشان دهنده‌ی ناهنجاری است.

استدلال منطقی: این روش‌ها یک کلاس وسیع را تشکیل می‌دهند که مکمل روش‌های ذکر شده در بالاست و هدفشان ارزیابی سیگنال‌های خطای به دست آمده از سخت‌افزار یا نرم‌افزار تشخیص است. ساده‌ترین روش‌ها شامل درخت‌های منطقی قوانین اگر-آنگاه می‌شوند. "اگر سیگنال خطا X و سیگنال خطا Y آنگاه نتیجه‌گیری Z ". هر نتیجه‌گیری می‌تواند به‌عنوان یک سیگنال خطا در قانون بعدی عمل کند تا اینکه نتیجه‌گیری نهایی حاصل شود [۱۲، ۱۳].

۲-۲-۱ تشخیص خطا مبتنی بر مشاهدات چشمی

در مقوله مشاهدات چشمی، تشخیص خطا با استفاده از افراد خبره و کارآمد و یا از روش‌های سخت‌افزاری و فیزیکی انجام می‌شود، که معمولاً هم با دقت بالایی انجام نمی‌شود. لازم به ذکر است چون این روش از شناسایی، بیشتر فیزیکی است، مانور چندانی روی آن نمی‌دهیم.

۲-۲-۲ تشخیص خطا مبتنی بر بررسی تغییرات حسگرها

حسگرها با توجه به نوع، وزن و قیمتی که دارند، طبعاً دارای محدودیت‌ها و آستانه‌هایی هم هستند. به‌طور مثال حسگرهایی که برای حرارت یا فشار طراحی و ساخته می‌شوند، محدوده خاصی از فشار یا حرارت را می‌توانند رصد کنند، کار بر روی این نوع از روش شناسایی در مقاله گوسل^۶ [۱۴] آورده شده است. شایان ذکر است که حسگرهایی هم که برای شناسایی خطا استفاده می‌شوند، نباید به صورت سری بسته شوند چرا که در این صورت تنها یک حسگر می‌تواند عمل رصد را انجام دهد و ممکن است ما نیاز به چند حسگر داشته باشیم. توضیحات بیشتر در باب روش چند سنسوری هم در مقاله جرتلر^۷ [۱۵] و فورد^۸ [۱۶] آورده شده است.

۲-۲-۳ تشخیص خطا مبتنی بر تحلیل فرکانسی

روش تحلیل فرکانسی، بیشتر در سیستم‌ها و دستگاه‌هایی به کار می‌رود که در محدوده فرکانس-های پایین کار می‌کنند، زیرا ماهیت فرکانسی خطا در فرکانس‌های پایین نمود پیدا می‌کند. روش مبتنی بر فرکانس تحت عملکرد حالت ماندگار^۹ سیستم اعمال می‌شود. اصول پردازشی آن هم به این گونه است که تغییر در فرکانس کاری سیستم نشانگر بروز خطا می‌باشد. توضیحات بیشتر در مقالات [۱۷] و [۱۸] شرح داده شده‌اند.

⁶ Gossel

⁷ Gertler

⁸ Hereford

⁹ Steady State

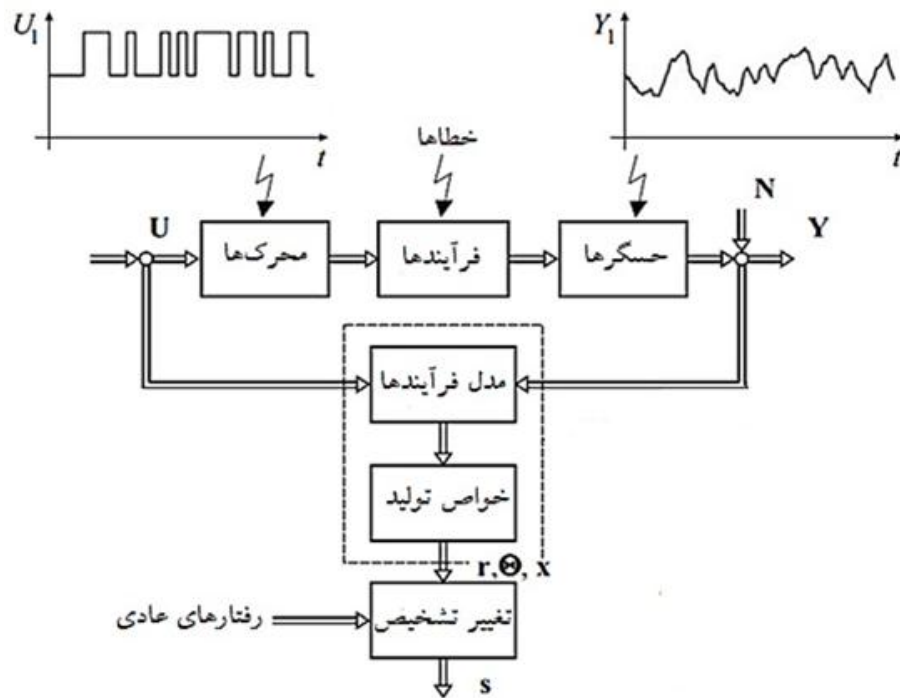
۳-۲ تشخیص خطا مبتنی بر مدل

ایده‌ی اساسی در روش مبتنی بر مدل، جایگزینی افزونگی نرم‌افزاری به جای روش افزونگی سخت‌افزاری است. روش‌های مبتنی بر مدل از روابط بین چندین متغیر اندازه‌گیری شده، برای استخراج اطلاعات از تغییرات محتمل به وجود آمده توسط خطاها استفاده می‌کند. شکل ۱-۲ یک شمای کلی از ساختار تشخیص خطای مبتنی بر مدل را نشان می‌دهد.

با تکیه بر یک مدل واضح از فرآیند مانیتور شده، همه‌ی روش‌های مبتنی بر مدل به دو مرحله نیازمندند: تولید باقیمانده و ارزیابی مقدار باقیمانده. اهداف اساسی این دو مرحله به صورت ذیل شرح داده می‌شوند:

مرحله‌ی اول؛ تولید باقیمانده: این مرحله، تناقضی را بین رفتار حقیقی و رفتار مورد انتظار تولید می‌کند. چنین تناقضاتی باقیمانده نامیده می‌شوند که خطاهای بالقوه‌ی سیستم را بازتاب می‌دهد. در حالت عادی، تحت شرایط بدون خطا مقدار باقیمانده باید صفر یا نزدیک به آن باشد، در حالی که وقتی خطایی رخ می‌دهد باید مقدار باقیمانده، به طور قابل ملاحظه‌ای با صفر فرق کند.

برای بررسی تناقض، نیاز به نوعی از افزونگی است که در ادامه شرح داده خواهد شد. باقیمانده به‌طور ایده آل تنها اطلاعات خطا را حمل می‌کند و لذای برای حصول اطمینان از تشخیص خطا، اتلاف اطلاعات خطا در تولید باقیمانده باید تا حد امکان کوچک باشد [۱۳].



شکل ۱-۲: تشخیص خطا مبتنی بر مدل

مرحله‌ی دوم؛ ارزیابی مقدار باقیمانده: هر الگوریتم تشخیص خطا، باید شامل بخش تصمیم‌گیری باشد که در آن ارزیابی مقدار باقیمانده انجام می‌گیرد. در این بخش یک تصمیم در رابطه با وجود یک خطا به همراه یک اشاره‌ی محتمل به رخدادی که سیگنال خطای متناظر را تولید کرده (مربوط به موضوع جداسازی خطا) انجام می‌گیرد. این سیگنال باید اطلاعات مربوط به تأثیر خطا بر روی باقیمانده را حمل کند.

بیشتر شبیه‌سازی‌ها در مسئله‌ی تشخیص خطای مبتنی بر مدل بر تولید باقیمانده تمرکز می‌کند زیرا اگر باقیمانده به خوبی طراحی شود. مسئله‌ی تصمیم‌گیری نسبتاً آسان‌تر خواهد بود [۱۳].

۲-۳-۱ تشخیص خطا مبتنی بر معادلات برابری

روش پیشنهادی زیر نیز، بر مبنای تولید مانده عمل می‌کند، به این صورت که با ایجاد عمل مقایسه‌ای، بین استفاده از محاسبات ریاضی با دقت بالا و مقدارهای حاصل از اندازه‌گیری‌های فیزیکی، مانده‌ای به وجود می‌آید که نشان دهنده‌ی خطاست، اگر مانده‌ای تولید نشود دال بر عدم وجود خطا دارد. کار بر روی این عمل هم توسط چاو^{۱۰} [۱۹] و دینگ^{۱۱} [۲۰] عملی شد و بعد ها توسط کیم^{۱۲} [۲۱] توسعه و گسترش یافت.

شکل ۲-۲ آرایش روش معادلات برابری با کمک تابع تبدیل را نشان می‌دهد. برای آشنایی با این روش یک مدل تک ورودی-تک خروجی را در نظر بگیرید.

تابع تبدیل فرآیند واقعی به صورت زیر می‌باشد:

$$G_p(s) = \frac{y_p(s)}{u(s)} = \frac{B_p(s)}{A_p(s)} \quad (1-2)$$

و مدل نامی آن به صورت زیر می‌باشد:

$$G_m(s) = \frac{y_m(s)}{u(s)} = \frac{B_m(s)}{A_m(s)} \quad (2-2)$$

که معمولاً بین فرآیند و مدل نامی آن اختلاف‌هایی وجود دارد یعنی:

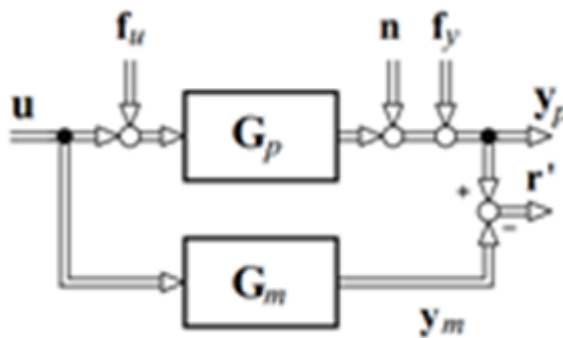
$$G_p(s) = G_m(s) + \Delta G_m(s) \quad (3-2)$$

که در این رابطه $\Delta G_m(s)$ نشان دهنده‌ی خطای مدل‌سازی می‌باشد.

¹⁰ Chaw

¹¹ Ding

¹² Kim



شکل ۲-۲: تولید مانده با استفاده از معادلات برابری و تابع تبدیل

طبق شکل ۲-۲ با کمک تابع تبدیل، مانده‌های معادلات برابری را می‌توان به دو حالت خطای چندجمله‌ای و خطای خروجی محاسبه نمود.

در حالت خطای خروجی مانده‌ها به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\begin{aligned}
 r'(s) &= y_p(s) - y_m(s) = y_p(s) - G_m(s)u(s) \\
 &= G_p(s)(u(s) + f_u(s)) + n(s) + f_y(s) - G_m(s)u(s) \quad (۴-۲) \\
 &= \Delta G_m(s)u(s) + G_p(s)f_u(s) + n(s) + f_y(s)
 \end{aligned}$$

که در این روابط f_u , f_y بیانگر خطای افزوده در حسگر و محرک و n نویز در خروجی می‌باشد. در حالت ایده آل که مدل نامی و فرآیند کاملاً منطبق بوده و هیچ‌گونه نویز یا خطای حسگر یا محرکی نداشته باشیم مانده صفر است. ولی معمولاً مانده به دلیل وجود خطای مدل‌سازی، خطای حسگر یا محرک و نویز صفر نیست. در حالت خطای چندجمله‌ای شکل ۲-۲ مانده به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned}
 r(s) &= A_m(s)y_p(s) - B_m(s)u(s) \\
 &= A_m(s)[G_p(s)(u(s) + f_u(s)) + n(s) + f_y(s)] - B_m(s)u(s) \quad (۵-۲)
 \end{aligned}$$

اگر فرآیند و مدل بر هم منطبق باشند مانده به صورت زیر ساده می‌شود:

$$r(s) = A_m(s) (f_y(s) + n(s)) - B_m(s)f_u(s) \quad (6-2)$$

طبق معادله (6-2) خطای ورودی f_u با مدل چندجمله‌ای $B_m(s)$ و خطای خروجی f_y با چندجمله‌ای $A_m(s)$ فیلتر می‌شوند. به r, r' مانده‌های اصلی^{۱۳} می‌گویند.

مانده‌ها برای این فرآیند تک ورودی- تک خروجی^{۱۴} در هر دو حالت r و r' تحت تأثیر خطای ورودی و خروجی، نویز و خطای مدل‌سازی هستند و معمولاً جداسازی خطاها در این حالت میسر نمی‌باشد. اما زمانی که تعداد اندازه‌گیری‌ها افزایش می‌یابد، مثلاً در فرآیند چند ورودی- چند خروجی، جداسازی بهتر انجام می‌شود.

تولید مانده در حالت خطای خروجی برای یک فرآیند چند ورودی- چند خروجی^{۱۵} با تابع تبدیل $G_p(s)$ به صورت زیر می‌باشد:

$$r'(s) = y_p(s) - y_m(s) = y_p(s) - G_m(s)u(s) \quad (7-2)$$

به این ترتیب مانده‌ها با استفاده از سیگنال‌های ورودی و خروجی، محاسبه می‌شوند. چنان چه خطاهای ذکر شده را به معادله وارد کنیم خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} r'(s) &= G_p(s)[u(s) + f_u(s)] + f_y(s) + n(s) - G_m(s)u(s) \\ &= \Delta G_m(s)u(s) + G_p(s)f_u(s) + f_y(s) + n(s) \end{aligned} \quad (8-2)$$

رابطه بالا تأثیر هر یک از خطاها بر بردار مانده را نشان می‌دهد.

¹³ Primary residuals

¹⁴ Singel Intput Single Output

¹⁵ Multi Input Multi Output

اگر مدل و فرآیند با هم منطبق باشند رابطه (۲-۸) به صورت زیر ساده می‌شود:

$$r'(s) = G_p(s)f_u(s) + f_y(s) + n(s) \quad (۹-۲)$$

مانده در حالت چندجمله‌ای نیز در صورتی که مدل و فرآیند با هم یکی باشند، به صورت زیر ساده

می‌شود :

$$\begin{aligned} r(s) &= A_m(s)[G_p(s)u(s) + G_p(s)f_u(s) + f_y(s) + n(s)] - B_m(s)u(s) \\ &= A_m(s)[f_y(s) + n(s)] + B_m(s)f_u(s) \end{aligned} \quad (۱۰-۲)$$

تعداد مانده‌ها نیز برابر با تعداد خروجی‌ها است.

اگر تنها یک خطا در ورودی یا خروجی رخ دهد برخی از مانده‌ها از مقدار صفر منحرف می‌شوند.

این امر موجب جداسازی خطاهای افزایشی از یکدیگر می‌شود.

با توجه به معادله (۲-۱۰) مانده‌ی چندجمله‌ای، شامل مشتقاتی از سیگنال‌های ورودی و خروجی

است که این امر می‌تواند مشکلاتی در تحقق و همچنین تقویت سیگنال نویز را منجر شود.

۲-۳-۲ تشخیص خطا با استفاده از مشاهده‌گر حالت

مشاهده‌گر حالت، متغیرهای حالت را بر اساس اندازه‌گیری سیگنال متغیرهای خروجی و کنترل

تخمین می‌زند. با اینکه تئوری تخمین متغیرهای حالت با انگیزه‌ی استفاده در فیدبک حالت بسط

داده شده است، اما استفاده از این تئوری به این کاربرد محدود نشده و امروزه در بسیاری از

کاربردهای مهندسی، نظیر پیش‌بینی وقوع خطا و جبران سازی آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. در

بحث مشاهده‌گر، سیستم باید مشاهده‌پذیر باشد. در غیر این صورت طراحی مشاهده‌گر حالت، برای

آن امکان‌پذیر نمی‌باشد.

۳-۳-۲ تشخیص خطا مبتنی بر شبکه‌های عصبی

مشاهده‌گرهای عصبی پیشنهاد شده برای شناسایی خطا، با استفاده از معادلات خطایی که از خروجی مشاهده‌گر حاصل می‌شود، عمل تولید مانده را انجام می‌دهند. سیستم زیر را در نظر بگیرید [۲۲].

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + g(x, u) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (11-2)$$

به طوری که:

$$x(t) \in \mathbb{R}^n \text{ بردار حالت}$$

$$u(t) \in \mathbb{R}^m \text{ بردار ورودی}$$

$$y(t) \in \mathbb{R}^m \text{ بردار خروجی}$$

$$g(x, u) \text{ ترم غیرخطی}$$

حال با این فرض که زوج (A, C) مشاهده‌پذیر باشد، می‌توان معادلات مشاهده‌گر را به قرار زیر نوشت:

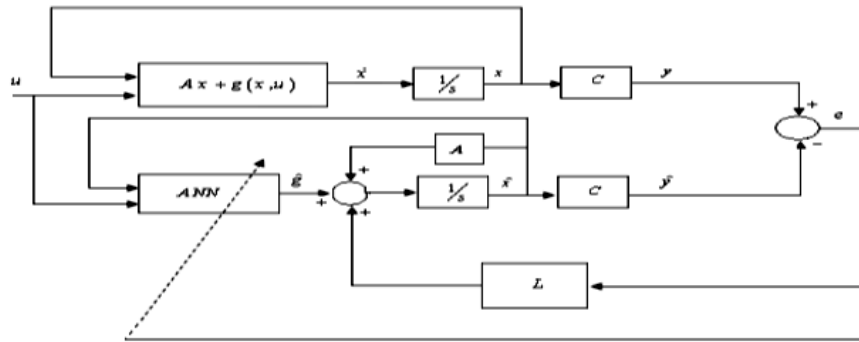
$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + \hat{g}(\hat{x}, u) + L(y - \hat{y}) \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \end{cases} \quad (12-2)$$

طوری که \hat{x} و \hat{y} ، دلالت بر حالات و خروجی مشاهده‌گر دارند، لیکن برای انتخاب L ، باید به این

نکته عنایت داشته باشیم که طیف $(A - LC)$ ، در سمت چپ محور مختلط قرار گیرد.

نکته اصلی در طراحی و پیاده‌سازی مشاهده‌گر عصبی، استفاده از شبکه عصبی جهت شناسایی و

بازسازی حالات مشاهده‌گر است. شکل ۳-۲ شمای کلی یک مشاهده‌گر عصبی را نمایش می‌دهد.



شکل ۲-۳: شناسایی خطا مبتنی بر شبکه عصبی

از جمله مزیت‌های یک شبکه عصبی، این است که به تنهایی قادر به شناسایی و مدل کردن یک سیستم غیرخطی، با هر مرتبه‌ای است.

۲-۳-۴ تشخیص خطا مبتنی بر منطق فازی

طراحی مشاهده‌گرهای فازی ^{۱۶} *TSK* مبتنی بر مفهومی تحت عنوان ^{۱۷} *PDC* انجام می‌شوند [۲۳]. در مقاله [۲۳] روشی برای شناسایی خطا با استفاده از مشاهده‌گر فازی ارائه شده، که در آن از تمامی حالات، توسط یک مشاهده‌گر، تخمینی زده می‌شود؛ که این تخمین بیانگر درخت رویداد خطا است. به علت وجود برخی عدم قطعیت‌ها، مانند اغتشاش و نیز ورودی‌های نامعین، این مسئله پیش آمد که باید سیستمی که قرار است به روش فوق شناسایی خطا را انجام دهد مقاوم بوده تا بتواند خطای واقعی را به ما نمایش دهد. در این زمان بود که ترکیب مشاهده‌گر فازی با مود لغزشی توسط برگستن^{۱۸} در مقاله [۲۴] عمل مقاوم‌سازی انجام شد. روش کار هم به این صورت بود که با تعریف دو مشاهده‌گر لغزشی-فازی، یکی به‌عنوان مشاهده‌گری که با سوق دادن ترم کلیدزنی، سعی در شناسایی خطا، و دیگری در جهت تخمین حالات انجام وظیفه می‌کند.

¹⁶ Takagi Sogno Kang

¹⁷ Parallel Distributed Compensation

¹⁸ Bergsten

۲-۴ روش‌های هوش مصنوعی و سیستم‌های خبره

هنگامی که فرآیند پیچیده است، دانش کیفی از فرآیند را می‌توان برای ارزیابی سیگنال‌های اندازه‌گیری شده، به کار برد. همچنین می‌توان از تکنیک‌های منطق فازی نیز در این راستا استفاده کرد. راهکار دیگر استفاده از شبکه‌های عصبی برای مدل‌سازی فرآیندها می‌باشد. با کمک شبکه‌های عصبی که توسط سیگنال‌های حاصل شده از سیستم مرجع آموزش داده شده است، می‌توان سیگنال‌های مانده را همانند روش‌های مبتنی بر مدل تولید نمود [۲۵].

۲-۵ تشخیص خطا مبتنی بر مشاهده‌گرها

در بحث مشاهده‌گرها، سیستم ابتدا باید مشاهده‌پذیر باشد که در فصل بعد به بررسی این موضوع، پرداخته‌ایم؛ چرا که اگر سیستم مشاهده‌پذیر نباشد، در این صورت طراحی مشاهده‌گر حالت، برای آن ممکن نخواهد بود.

بعد از اولین مشاهده‌گر توسط لیونبرگر، دومین مشاهده‌گری که معرفی شد، مشاهده‌گر اوتکین^{۱۹} بود که با کمک گرفتن از یک پارامتر غیرخطی، مشکل ناتوانی مشاهده‌گر لیونبرگر را در مقابله با اغتشاش حل نموده و به نوعی، سیستم را مقاوم کرد. معادلات و شرح مبسوط آن در فصل بعدی ارائه خواهد شد.

در رویکرد مشاهده‌گر، مبنای کار، بر تولید مانده چیده می‌شود، که ما با استفاده از روش مود لغزشی به طور کامل در فصل بعدی به بیان آن خواهیم پرداخت.

¹⁹ utkin

۲-۶ تشخیص خطا مبتنی بر مشاهده‌گر مود لغزشی

مفهوم مود لغزشی حدود هفتاد سال پیش، که تأثیر کنترل‌کننده‌های گسسته بر روی سیستم‌های دینامیکی وجود داشت؛ در اتحاد جماهیر شوروی پدیدار شد [۲۶]. در همان دوران بود که اوتکین [۳] گونه مشاهده‌گر لغزشی را که از نوع گسسته بود، معرفی کرد. سپس توسط اسلوتین [۲۷] با اضافه کردن یک پارامتر خطی به خروجی مشکل بهره پایین آن را حل نمودند. بعدها والکت و زاک [۲۸] با استفاده قضیه پایداری لیاپانوف و با بهبود بخشیدن به پارامتر خطی، مشکل عدم مقاوم بودن در برابر عدم قطعیت و اغتشاش را حل کردند. در اینجا از توضیحات بیشتر خودداری کرده و بحث مفصل آن را در فصل بعد ارائه خواهیم کرد.

۲-۷ مسئله‌ی مقاوم‌پذیری در تشخیص خطای مبتنی بر مدل

جهت بهبود عملکرد روش‌های مبتنی بر مدل، نیاز به مدل دقیقی از سیستم داریم. ولی به دست آوردن مدل دقیقی از سیستم در فرآیندهای پیچیده امری مشکل است. روش FDI ^{۲۰} اعمال شده به یک سیستم باید نسبت به عواملی از قبیل خطای مدل‌سازی، نویز و عدم قطعیت‌ها مقاوم باشد. عدم مقاوم بودن روش FDI نسبت به هر یک از عوامل ذکر شده، موجب تولید هشدارهای اشتباه در حین کار سیستم خواهد شد. هدف از مقاوم‌سازی در تشخیص خطا، حساس بودن تنها به خطا می‌باشد [۲۹، ۳۰].

در این فصل انواع روش‌های تشخیص خطا و تقسیم‌بندی آن را بیان کردیم و نگاهی به کارهای انجام شده در این زمینه انداختیم. در فصل بعد با توضیحی مختصر پیرامون مود لغزشی انواع روش‌های مود لغزشی را توضیح داده و معادلات ریاضی آن را بیان می‌کنیم و در نهایت با بهره‌گیری از این روش‌ها ساختار اصلی شبیه‌سازی این پایان‌نامه را توضیح می‌دهیم.

²⁰ Fault Detection and Isolation

فصل سوم

معرفی و طراحی مشاهده‌گر مود

لغزشی برای تشخیص خطا

رویتگر مود لغزشی در سال‌های اخیر، به‌طور گسترده توسط محققین، برای تخمین حالت‌های غیرقابل اندازه‌گیری سیستم و یا تخمین پارامترهای نامعلوم در زمینه‌های مختلف مهندسی، استفاده شده است. یکی از مزیت‌های عمده رویتگرهای مود لغزشی، طراحی ساده‌ی آن، همگرایی در زمان محدود و مقاوم بودن در مقابل عدم قطعیت‌ها می‌باشد. این امر باعث افزایش تحقیقات در زمینه‌ی توسعه و کاربرد رویتگرهای مود لغزشی در کاربردهای مهندسی شده است [۳۱].

روش‌های مود لغزشی، دارای خواص مقاوم‌پذیری بالایی هستند به طوری که نسبت به عدم قطعیت همسان^{۲۱} کاملاً غیر حساس هستند [۳۲, ۳۳] علاوه بر آن، این روش‌ها برای مقابله با هر دو عدم قطعیت ساختاری و غیرهمسان^{۲۲} می‌توانند مورد استفاده قرار بگیرند [۳۴]. از دیگر ویژگی‌های رویتگر مود لغزشی، می‌توان به کاربرد سیگنال تزریق معادل خطای خروجی^{۲۳} اشاره کرد که این سیگنال، نوع فرکانس پایین جمله‌ی غیرخطی ناپیوسته بوده، که قادر است اغتشاش موجود در سیستم را ردیابی کند. و می‌توان با توسعه دادن آن، در کاربردهای تشخیص خطا از آن استفاده کرد.

به‌طور کلی استفاده از روش رویتگر مود لغزشی، برای تشخیص خطا از ۱۵ سال قبل پیشنهاد شده است. اسریدهار و همکارانش یک سری تحقیقات به همراه شبیه‌سازی برای هردو خطای محرک و حسگر و همچنین پردازش این خطاها معرفی کردند [۳۵]. نتایج شبیه‌سازی ارائه شده در [۳۵]، نشان می‌دهد که رویتگر مود لغزشی پیشنهاد شده برای تشخیص خطا، در مقایسه با رویتگرهای خطی، نسبت به عدم قطعیت‌ها، مقاوم است. در صورتی که رویتگرهای خطی مقاوم نبوده و در صورت وجود خطاهای مدل‌سازی به راحتی از کار می‌افتند و ممکن است هشدارهای اشتباهی برای وجود خطا اعلام کنند.

²¹ Matched uncertainty

²² Unmatched uncertainty

²³ Equivalent output error injection signal

۲-۳ مرور تحقیقات پیشین در زمینه‌ی مود لغزشی

رویتگر مود لغزشی از نوع تطبیقی مدل مرجع، برای تخمین سرعت در موتور القایی بدون حسگر، در [۳۶]، پیشنهاد شده است. در [۳۷, ۳۸]، رویتگر و کنترل‌کننده‌ی مودلغزشی، به‌طور هم‌زمان برای موتور القایی، بررسی شده و همچنین، تضمین پایداری سیستم حلقه بسته نیز تحلیل شده است. روش رویتگر تطبیقی مودلغزشی، در [۳۹]، و روش رویتگر مرتبه‌ی دو مودلغزشی، در [۴۰]، برای موتور القایی ارائه شده است. در [۴۱]، رویتگر مود لغزشی مرتبه‌ی بالا، برای شناسایی پارامترهای نامعلوم سیستم‌های غیرخطی، به کار گرفته شده است. رویتگرهای مود لغزشی به‌عنوان حسگر می‌توانند مورد استفاده قرار بگیرند؛ علاوه بر آن برای اندازه‌گیری پارامترهای مورد نیاز کنترل خودرو، استفاده شوند. همچنین برای اهداف تشخیص خطا در بسیاری از سیستم‌ها کاربردهای فراوانی دارند [۴۲]. در [۴۳]، برای تخمین سرعت و موقعیت موتورهای رلوکتانسی از رویتگر مودلغزشی استفاده شده است. در [۴۴]، به جای استفاده از حسگرهای موقعیت و سرعت، در موتورهای رلوکتانسی، رویتگر مودلغزشی جایگزین شده و نتایج شبیه‌سازی و پیاده‌سازی عملی، عملکرد مطلوب‌تر این روش را نشان می‌دهد. در [۳۲] برای تخمین ورودی نامعلوم سیستم‌هایی که حالت‌های آن‌ها قابل اندازه‌گیری است از رویتگر مودلغزشی استفاده می‌شود.

به‌طور کلی در سیستم‌های کنترل، تمامی متغیرهای حالت قابل اندازه‌گیری نمی‌باشند. در صورتی که جهت کنترل سیستم ما نیازی به این متغیرها نخواهیم داشت. در نتیجه یک رویتگر اغلب با استفاده از ورودی و خروجی سیستم مورد کنترل، متغیرهای غیر قابل دسترس را تخمین می‌زند. در واقع یک رویتگر بر اساس خواص شناخته شده سیستم که رویت می‌شوند، طراحی می‌گردد.

اولین رویتگری که طراحی شد، یک رویتگر خطی بود که توسط لیونبرگر [۳]، پیشنهاد شد که در آن تخمین متغیرهای سیستم با رویتگر، به صورت نمایی به متغیرهای واقعی سیستم همگرا می‌شدند.

با این حال، رویتر پیشنهاد شده توسط لیونبرگر، قادر به تخمین متغیرهای سیستم در حضور اغتشاش و عدم قطعیت پارامتری و ساختاری سیستم نبودند که نشان دهنده مناسب نبودن این رویتر، برای یک سیستم در چهار چوب مدل اصلی می‌باشد. تحت این شرایط، دیگر تخمین متغیرها، از روی متغیرهای اصلی همگرا نگردیده، بلکه در حضور عدم قطعیت منحرف می‌گردند.

پس از رویتر ارائه شده توسط لیونبرگر، اوتکین [۴۵] رویتر مودلغزشی را معرفی کرد که با بهره‌گیری از یک ترم غیرخطی ناپیوسته قادر بود خروجی‌های تخمین زده را همگرا به خروجی‌های واقعی سیستم در زمان محدود کند، این نتایج باعث کاهش حرکت لغزشی، و در نتیجه همگرا شدن متغیر-های تخمین زده شده با متغیرهای واقعی سیستم، به طور نمایی می‌شد. علاوه بر این مشخص شد که عملکرد رویتر مودلغزشی در حضور اغتشاش و عدم قطعیت‌ها بسیار عالی می‌باشد و تأثیر بر خروجی رویتر ندارد.

والکت و زاک [۲۸]، با بهبود بخشیدن رویتری که توسط اوتکین پیشنهاد شده بود، با اضافه کردن یک گین خطی به رویتر توانستند خطای سیستم را در حضور عدم قطعیت‌ها پایدار کنند. همچنین مشاهده کردند که گین خطی باعث افزایش مدت زمان لغزش می‌گردد. آن‌ها یک روش طراحی رویتر به وسیله محدودیت‌های ساختاری ارائه نمودند، که این روش طراحی آن‌ها نظر همگان را به خود جذب کرد. اما این روش نیازمند یک سری محاسبات و حل پیچیده، جهت طراحی رویتر و به دست آوردن پارامترهای مورد نیاز رویتر بود، که این مشکل در سیستم‌های پیچیده ما را با چالش مواجه می‌کند.

ادواردز واسپرجن برای بهبود بخشیدن به عملکرد رویتر پیشنهاد شده توسط والکت و زاک دست به ابتکار بزرگی زدند [۲۶]. آن‌ها در طراحی‌هایشان با فرموله کردن اصولی روش‌های طراحی والکت و زاک، توانستند از پیچیدگی معادلات ریاضی روش پیشنهادی قبلی، تا حد قابل ملاحظه‌ای بکاهند. علاوه بر آن رویتر خود را به گونه‌ای طراحی کردند که سطح لغزش آن بر اساس خطای تخمین زده

شده خروجی تعریف شده باشد. در حالی که سطح لغزش پیشنهاد شده توسط والکت و زاک بر اساس یک جز و زیرمجموعه‌ای از خطای تخمین زده خروجی تعریف شده بود.

ادواردز و همکارانش بیان کردند که، اگر سیگنال خطای تزریقی معادل، که برای حفظ حرکت لغزشی ضروری می‌باشد، برای طراحی رویتر مود لغزشی، تعریف شود، آنگاه می‌توان خطای سیستم را بازسازی کرد. یانگ و صیف [۴۶]، بعدها طراحی FDI با استفاده از رویتر مود لغزشی تطبیقی برای تنظیم آستانه، که در آن یک آستانه ارتباط مستقیمی با حساسیت سیستم در بازسازی خطا دارد را ارائه نمودند. آن‌ها مدل رویتر خود را برای دسته‌ای از سیستم‌های غیرخطی پیشنهاد کردند که دارای تغییرات کندی در پارامترها می‌باشند و تأکید کردند که مدل پیشنهاد شده از سوی آن‌ها در برابر اغتشاشات مقاوم نمی‌باشد و باعث می‌شود که جواب نادرست در اکثر مواقع بدهد. روش طراحی آن‌ها بیشتر شبیه به روش والک و زاک بود ولی یک مزیت بزرگی که روش آن‌ها وجود دارد این است که عدم قطعیت پارامتری هم در معادلات خود اضافه کردند.

در سال ۲۰۰۲ ماسادا [۳۵] با استفاده از رویتر مود لغزشی توانست یک FDI را برای دسته‌ای از سیستم‌های غیرخطی که دارای عدم قطعیت نامعلوم ولی محدود هستند، پیشنهاد کند. وی در این روش به منظور دستیابی به یک مشخصه‌ی غیرخطی از خطا، یک تخمین‌گر غیرخطی آنلاین را با استفاده از تئوری شبکه‌های عصبی پیشنهاد کرد [۴۷].

وانگ و همکارانش نیز در همان سال یک روش طراحی FDI را برای دسته‌ای از سیستم‌ها مطرح کردند که مدل پیشنهادی آن‌ها، قادر به بازسازی خطای حسگر و عملگر به طور هم‌زمان می‌باشد. آن‌ها در این کار رویتر مود لغزشی را چنان پیشرفت دادند که با استفاده از یک رویتر مرتبه‌ی کامل، قادر به تشخیص نفوذ هرگونه خطا در سیستم می‌شدند. آن‌ها همچنین، پایداری متغیرهای تخمین زده شده‌ی سیستم را، با استفاده از تئوری لیاپانوف اثبات کردند.

۱-۲-۳ مشاهده گر لیونبرگر

لیونبرگر در سال ۱۹۶۳ نشان داد، می توان برای هر سیستم خطی رویت پذیر، رویتگری طراحی کرد که خطای تخمین آن با هر سرعت دلخواهی به سمت صفر برود.

فرض کنید سیستمی به فرم زیر داریم که تنها خروجی های آن در دسترس باشند.

$$\begin{aligned}\dot{X}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ Y(t) &= Cx(t)\end{aligned}\tag{۱-۳}$$

$Y(t)$ را "متغیر اندازه گیری شده" می نامند.

حال سیستم دینامیکی زیر را در نظر بگیرید:

$$\dot{\hat{X}}(t) = \hat{A}\hat{x}(t) + \hat{B}u(t) + Ly(t)\tag{۲-۳}$$

بردار $\dot{\hat{X}}(t)$ برداری n بعدی بوده و ماتریس های \hat{A} و \hat{B} و L طوری انتخاب می شوند که بردار خطای رویت زیر به طور مجانبی به سمت صفر برود. (روش لیونبرگر)

$$e(t) = X(t) - \hat{X}(t)\tag{۳-۳}$$

با به کارگیری معادلات فوق خواهیم داشت:

$$\begin{aligned}\dot{e}(t) &= \dot{X}(t) - \dot{\hat{X}}(t) = Ax(t) + Bu(t) - \hat{A}[X(t) - e(t)] - \hat{B}u(t) - LCx(t) \\ &= \hat{A}e(t) + (A - LC - \hat{A})x(t) + (B - \hat{B})u(t)\end{aligned}\tag{۴-۳}$$

برای آنکه خطای رویتگر مستقل از $X(t)$ و $U(t)$ صفر شود، لازم است ضرایب این دو عامل صفر شوند و ماتریس متناظر با یک سیستم پایدار باشد.

لذا باید داشته باشیم:

$$\begin{aligned}\hat{A} &= A - LC \\ \hat{B} &= B\end{aligned}\quad (5-3)$$

با توجه به روابط فوق تنها ماتریس L را می‌توان انتخاب نمود و سایر ماتریس‌ها با توجه به ماتریس‌های سیستم اصلی خود به خود تعیین می‌شوند.

لذا رویبگر لیونبرگر دارای رابطه‌ای به فرم زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{X}}(t) &= (A - LC)\hat{x}(t) + Bu(t) + Ly(t) \\ &= (A - LC)\hat{x}(t) + \begin{bmatrix} B & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(t) \\ y(t) \end{bmatrix} \\ &= A\hat{x}(t) + Bu(t) + L[y(t) - C\hat{x}(t)]\end{aligned}\quad (6-3)$$

۲-۲-۳ مشاهده‌گر اوتکین^{۲۴}

سیستم به معادلات (۷-۳) تحت شرایط مشاهده‌پذیر بودن زوج (A, C) و در نظر گرفتن $f(x, u, t) \equiv 0$ را در نظر می‌گیریم.

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + f(x, u, t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases}\quad (7-3)$$

حال برای آن که بتوانیم اجزا و ترکیبات موجود در حالت را در خروجی ظاهر بکنیم، باید با استفاده از تغییر مختصاتی در خروجی این عمل را پیاده‌سازی بکنیم. منطقی به نظر می‌رسد که بدون از دست دادن کلیت ماهیت در خروجی، ما ماتریس خروجی را به صورت زیر توزیع کنیم [۲۱].

$$C = [C_1 \ C_2]\quad (8-3)$$

به طوری که $C_1 \in R^{p \times (n-p)}$ ، $C_2 \in R^{p \times p}$ & $\det(C_2) \neq 0$ ، در نتیجه ماتریس انتقال

²⁴ Utkin

نامنحصرفرد T را به صورت

$$T = \begin{bmatrix} I_{n-p} & 0 \\ C_1 & C_2 \end{bmatrix} \quad (۹-۳)$$

تعریف می کنیم که این مختصات جدید سیستم را می توان به صورت ماتریس توزیع جدید خروجی

$$CT^{-1} = [0 \ I_p]$$

فرض کرد. حال دیگر ماتریس های سیستم در مختصات جدید را به صورت زیر می نویسیم:

$$TAT^{-1} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \ \& \ TB = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \quad (۱۰-۳)$$

سپس سیستم نامی را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = A_{11}x_1(t) + A_{12}y(t) + B_1u(t) \\ \dot{y}(t) = A_{21}x_1(t) + A_{22}y(t) + B_2u(t) \end{cases} \quad (۱۱-۳)$$

که در اینجا داریم:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ y \end{bmatrix} = Tx \ \& \ x_1 \in R^{n-p} \quad (۱۲-۳)$$

مشاهده گر پیشنهاد شده توسط اوتکین به فرم زیر است:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1(t) = A_{11}\hat{x}_1(t) + A_{12}\hat{y}(t) + B_1u(t) + Lv \\ \dot{\hat{y}}(t) = A_{21}\hat{x}_1(t) + A_{22}\hat{y}(t) + B_2u(t) - v \end{cases} \quad (۱۳-۳)$$

به طوری که $(\hat{x}_1(t), \hat{y}(t))$ به عنوان تخمین های حالت برای $(x_1(t), y(t))$ در نظر گرفته

می شود، و $L \in R^{(n-p) \times p}$ ماتریس بهره فیدبک ثابت و بردار گسسته v توسط اجزای زیر تعریف

می شود:

$$v_i = M \operatorname{sgn}(\hat{y}_i(t) - y_i(t)) \quad M \in R_+ \quad (۱۴-۳)$$

و نیز sgn به عنوان تابع علامت در نظر گرفته می شود.

اگر بین حالات واقعی و تخمین زده شده خطای اندازه گیری وجود داشته باشد، بردار خطاهایی تحت عناوین $e_1(t) = \hat{x}_1(t) - x_1(t)$ و $e_y(t) = \hat{y}(t) - y(t)$ تعریف می کنیم که طبق معادلات (۱۳-۳) و (۱۴-۳) خطای سیستم به شکل زیر به دست می آید:

$$\begin{cases} \dot{e}_1(t) = A_{11}e_1(t) + A_{12}e_y(t) + Lv \\ \dot{e}_y(t) = A_{21}e_1(t) + A_{22}e_y(t) - v \end{cases} \quad (۱۵-۳)$$

از آن جایی که زوج (A, C) ، و نیز زوج (A_{11}, A_{21}) ، مشاهده پذیر هستند، لذا باید L طوری انتخاب شود که طیف $A_{11} + LA_{21}$ در نیمه سمت چپ صفحه مختلط واقع شود. حال تغییر مختصات دیگری، را طبق زیر اعمال می کنیم:

$$T_s = \begin{bmatrix} I_{n-p} & L \\ 0 & I_p \end{bmatrix} \quad \& \quad \begin{bmatrix} x_1'(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = T_s \begin{bmatrix} x_1(t) \\ y(t) \end{bmatrix} \quad (۱۶-۳)$$

حال با توجه به مختصات جدید فوق، خطای سیستم را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\dot{e}_1(t) = A'_{11}e_1(t) + A'_{12}e_y(t) \quad (۱۷-۳)$$

$$\dot{e}_y(t) = A'_{21}e_1(t) + A'_{22}e_y(t) - v \quad (۱۸-۳)$$

به طوری که:

$$A'_{11} = A_{11} + LA_{21}, A'_{12} = A_{21} + LA_{22} - A'_{11}L \quad \& \quad A'_{22} = A_{22} - A_{21}L$$

و این مختصات جدید را می توان با استفاده از نظریه اختلال منحصربه فرد نشان داد که برای یک M به اندازه کافی بزرگ، یک حرکت لغزشی را می توان در خروجی حالت خطا در معادله (۱۸-۳) دارا بود. که متعاقباً بعد از گذشت زمان محدود، باید $e_y(t) = 0$ و $\dot{e}_y(t) = 0$ داشته باشیم. و نیز

معادله (۳-۱۷) به معادله زیر تقلیل می‌یابد:

$$\dot{e}_1(t) = A_{11}' e_1(t) \quad (۱۹-۳)$$

که می‌توان با استفاده از انتخاب مناسب برای L ارائه شده سیستم را پایدار نموده و $e_1 \rightarrow 0$ as $t \rightarrow \infty$ و متعاقباً $\hat{x}_1(t) \rightarrow x_1(t)$. حالات باقی‌مانده را هم می‌توان در مختصات اصلی سیستم بازسازی نمود، که این حالات باقی‌مانده عبارتند از:

$$\hat{x}_2(t) = C_2^{-1}(y - C_1)\hat{x}_1(t) \quad (۲۰-۳)$$

که البته یکی از مشکلات اصلی در این روش انتخاب مناسب بهره M برای محدود کردن زمان رسیدن به حرکت لغزشی است.

۳-۲-۳ اصلاح مشاهده‌گر اوتکین

با در نظر گرفتن اضافه کردن ترم فیدبک منفی خطای خروجی به هر یک از معادلات مشاهده‌گر اوتکین، نتایجی جدید در سیستم خطا، حکم‌فرما می‌شود، که این نتایج به صورت زیر حاصل می‌شوند:

$$\begin{cases} \dot{e}_1(t) = A_{11}' e_1(t) + A_{12}' e_y(t) - G_I e_y(t) \\ \dot{e}_y(t) = A_{21}' e_1(t) + A_{22}' e_y(t) - G_n e_y(t) - v \end{cases} \quad (۲۱-۳)$$

با انتخاب $G_I = A_{12}'$ و $G_n = A_{22}' - A_{22}^S$ که می‌تواند هر ماتریس پایدار با ابعاد مناسب باشد، آنگاه

$$\begin{cases} \dot{e}_1(t) = A_{11}' e_1(t) \\ \dot{e}_y(t) = A_{21}' e_1(t) + A_{22}^S e_y(t) - v \end{cases} \quad (۲۲-۳)$$

که در این شرایط و قالب نامی؛ برای $v \equiv 0$ به دلیل این که قطب‌های سیستم ترکیبی به دست آمده، که از $\sigma(A_{11}') \cup \sigma A_{22}^S$ حاصل می‌شوند، در نیمه سمت چپ صفحه مختلط واقع شده و سیگنال خطای ما به شکل پایدار مجانبی خواهد بود. و نیز در فرم اصلی مشاهده‌گر اوتکین، عمل

کلیدزنی v باعث شناسایی خطا می‌شود.

۴-۲-۳ مشاهده‌گر اسلوتین

اسلوتین و همکارانش برای برطرف کردن مشکلات روی‌تگر اوتکین یک روش جدید پیشنهاد کردند، آن‌ها یک جمله خطی به روی‌تگر به صورت زیر اضافه کردند:

$$\dot{\hat{X}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) - G_1(e_y) + G_n v \quad (23-3)$$

که در معادله بالا $G_1 \in R^{n \times p}$ است. در این حالت بهره G_1 باید به طوری مناسب انتخاب گردد.

در این روی‌تگر معادله خطای تخمین به صورت زیر حاصل می‌شود.

$$\dot{e}(t) = (A - G_1 C)e(t) + G_n v \quad (24-3)$$

برای تحلیل پایداری معادله‌ی فوق تابع مثبت معین لیاپانوف به صورت زیر پیشنهاد می‌شود.

$$V = e^T p e \quad (25-3)$$

که در معادله فوق $P \in R^{n \times n}$ یک ماتریس مثبت معین و متقارن است. با مشتق‌گیری از V معادله زیر حاصل می‌گردد.

$$\dot{V} = \dot{e}^T p e + e^T p \dot{e} = e^T (P(A - G_1 C) + (A - G_1 C)^T P)e + 2e^T P G_n v \quad (26-3)$$

اگر ماتریس P و بهره‌ی G_1 طوری انتخاب شوند که معادله فوق منفی شود در این حالت دینامیک خطا معادله‌ی (۲۴-۳) به صورت مجانبی پایدار خواهد بود.

در روی‌تگر اوتکین پایداری و همگرایی حالت‌ها با انتخاب مناسب دو پارامتر ρ و $G_{n,1}$ تحقق می‌یافت ولی در روی‌تگر اسلوتین با انتخاب صحیح ماتریس P و بهره G_1 پایداری بررسی می‌شود.

۳-۲-۵ مشاهده گر والکت و زاک

مسئله در نظر گرفته شده توسط والکت و زاک^{۲۵}، شامل تخمین حالات سیستم توصیف شده در معادلات (۷-۳) است؛ به طوری که با علی‌رغم وجود عدم قطعیت و اغتشاش، بتوان خطا را به طور نمایی به صفر متمایل کرد. بدین صورت:

$$f(x, u, t) = B\xi(x, t) \quad (۲۷-۳)$$

که در آن تابع ناشناخته و محدود $\xi: R^n \times R_+ \rightarrow R^m$ طوری فرض می‌شود که بتوان گفت:

$$\|\xi(x, t)\| \leq \rho \quad \forall x \in R^n, t \geq 0 \quad (۲۸-۳)$$

البته در اینجا فرض دیگری هم داریم و آن این که $G \in R^{n \times p}$ وجود دارد، به طوری که $A_0 = A - GC$ دارای مقادیر ویژه پایدار بوده و هم‌چنین زوج لیاپانوف (P, Q) برای A_0 وجود داشته باشد به طوری که محدودیت ساختاری

$$C^T F^T = PB \quad (۲۹-۳)$$

بتواند شرایط $F \in R^{m \times p}$ را برآورده کند.

حال با توجه به شرایط فوق، قالب مشاهده گر پیشنهادی به صورت زیر است:

$$\hat{\dot{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) - G(C\hat{x}(t) - y(t)) + v \quad (۳۰-۳)$$

حال خطایی را به صورت $e(t) = \hat{x}(t) - x(t)$ تعریف می‌کنیم، و

²⁵ Wallcot & Zak

$$v = \begin{cases} -\rho \frac{P^{-1}C^T F^T F C e}{\|F C e\|} & \text{if } F C e \neq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3-31)$$

با انتخاب تابع لیاپانوف پیشنهادی به صورت $V(e) = e^T(t) P e(t)$ ، به راحتی می توان نشان داد که از برای $e \neq 0$ خواهیم داشت: $\dot{V}(e) < 0$ & $V(e) > 0$ بنابراین، $e(t) \rightarrow 0$.

حال در اینجا مشکل مهمی که پیش رو داریم ارضای زوج (F, P) جهت برآورده کردن شرایط زیر است:

(۱) P یک ماتریس لیاپانوف برای A_0 باشد، که خود وابسته به انتخاب G است.

(۲) F طوری باشد که بتواند ساختار $C^T F^T = P B$ را برآورده کند.

یک شرط کافی برای وجود چنین P این است که تابع انتقال تعریف شده و اصلاح شده زیر دارای

$$G(s) = F C (S I - A_0)^{-1}$$

قسمت حقیقی مثبت باشد.

یک الگوریتم برای طراحی P که توسط والکت و زاک (۱۹۹۸) داده شده است که می توان به طور خلاصه در ادامه به آن ها اشاره نمود.

(۱) انتخاب یک طیفی از ماتریس A_0 وانگهی انتخاب مقدار تطبیق و صحیح G

(۲) حل نمادین محدودیت ساختاری و به دست آوردن یک عبارت متقارن برای P_F که در سرتاسر F برقرار باشد.

(۳) محاسبه نمادین $Q(P_F)$ در سرتاسر P_F با استفاده از عبارت $-(P_F A_0 + A_0^F P_F)$

(۴) انتخاب عناصر F و P_F به طوری که این یقین را پیدا کنیم که $Q(P_F)$ حتماً مثبت متقارن خواهد بود.

۳-۲-۶ مشاهده‌گر ادواردز و اسپرین

سیستم زیر را در نظر بگیرید، که خطاهای عملگر و حسگر به این سیستم تزریق شده است [۵].

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Mf_a(x, u, t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) + f_s(x, u, t) \end{aligned} \quad (۳۲-۳)$$

که در آن $A \in R^{n \times n}$ و $B \in R^{n \times m}$ ، $C \in R^{p \times n}$ ، $q \leq p \leq n$ ، $x \in R^n$ ، $u \in R^m$ ، $y \in R^p$ می‌باشند و نیز فرض می‌کنیم که ماتریس‌های C و M دارای مرتبه کامل می‌باشند. فرض دیگر ما این است که تابع نامعلوم $f : R^n * R^m * R_+ \rightarrow R^n$ ولی دارای مقدار محدود به صورت $\|f(x, u, t)\| \leq a$ باشد که در آن a یک مقدار معلوم می‌باشد. ادواردز و اسپرین اثبات کردند که اگر معادلات سیستم تعریف شده‌ی فوق دارای دو شرط زیر باشند:

$$Rank(CM) = q \quad (A, C, M) \text{ مینیمم فاز باشند}$$

در این صورت می‌توان سیستم فوق را به فرم کانونیکال زیر که به فرم کانونیکال رویتگر مودلغزشی معروف است درآورد و (A, C, M) را به صورت زیر نوشت:

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 \end{bmatrix}, M = \begin{bmatrix} 0 \\ M_2 \end{bmatrix}, C = [0 \quad T] \quad (۳۳-۳)$$

که در آن $T \in R^{p \times p}$ و نرمال بوده و بخش A_3 به فرم زیر است:

$$A_3 = \begin{bmatrix} A_{31} \\ A_{32} \end{bmatrix} \quad (۳۴-۳)$$

که در آن $A_{31} \in R^{p-q}$ و $A_{32} \in R^q$ می‌باشد. با توجه به ساختار بالا جفت (A_1, A_{31}) آشکار پذیر و مودهای رویت ناپذیر آن صفرهای نامتغیر (A, C, M) می‌باشد و ماتریس M_2 را نیز می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$M_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ M_0 \end{bmatrix} \quad (35-3)$$

که در آن $M_0 \in R^{q \times q}$ مربعی و معکوس پذیر می باشد

ادوارد و اسپرجن روینگر مود لغزشی خود را برای سیستم (3-32) به صورت زیر پیشنهاد دادند.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= A\hat{x}(t) + Bu(t) - G_l(e_y) + G_n v \\ \hat{y}(t) &= (t) \end{aligned} \quad (36-3)$$

که V یک ترم خطی ناپیوسته از خطای تزریقی متغیر می باشد و به فرم زیر است:

$$v = -\rho \frac{e_y}{\|e_y\|} \quad (37-3)$$

که $e_y(t) = \hat{y}(t) - y(t)$ می باشد و همچنین برای تابع اسکالر ρ می توان گفت که حد بالای دامنه سیگنال خطا و همچنین عدم قطعیت های پارامتری سیستم می باشد. که بعداً به طور مفصل برای نحوه ی محاسبه آن توضیح خواهیم داد.

ماتریس گین G_l و G_n نیز قابل محاسبه می باشند که G_n به صورت زیر تعریف می شود.

$$G_n = \begin{bmatrix} -LT^T \\ T^T \end{bmatrix} P_0^{-1} \quad (38-3)$$

که ماتریس $P_0 \in R^{p \times p}$ مثبت معین متقارن می باشد و ماتریس L به صورت زیر تعریف می شود:

$$L = \begin{bmatrix} L^0 & 0 \end{bmatrix} \in R^{(n-p)p} \quad (39-3)$$

که $L^0 \in R^{(n-p) \times (p-q)}$ می باشد.

۳-۳ فرم همراه مشاهده گر مود لغزشی

سیستم‌های دینامیکی داده شده در (۷-۳) و (۸-۳) را در نظر بگیرید که $rank(CD) = q$

طبق تغییر مختصات خطی $x \rightarrow Tx$ که در بالا داشتیم مختصات جدید سیستم عبارت است از:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = A_{11}x_1(t) + A_{12}x_2(t) + B_1u(t) \\ \dot{x}_2(t) = A_{21}x_1(t) + A_{22}x_2(t) + B_2u(t) + Df(x, u, t) \\ y = x_2 \end{cases} \quad (۴۰-۳)$$

که در آن $x_1 \in R^{n-p}, x_2 \in R^p$ و ماتریس A_{11} دارای مقادیر ویژه پایدار است. مختصات

جدید سیستم بالا، به عنوان یک سنگ بنا برای طراحی مود لغزشی به کار می‌رود. سیستم دینامیکی

مشاهده گر زیر را در نظر بگیرید:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_1(t) &= A_{11}\hat{x}_1(t) + A_{12}\hat{x}_2(t) + B_1u(t) - A_{12}e_y(t) \\ \dot{\hat{x}}_2(t) &= A_{21}\hat{x}_1(t) + A_{12}\hat{x}_2(t) + B_2u(t) - (A_{22} - A_{22}^S)e_y(t) + v \\ \hat{y}(t) &= \hat{x}_2(t) \end{aligned} \quad (۴۱-۳)$$

که در آن هر A_{22}^S ماتریس پایدار بوده و بردار گسسته v به صورت زیر قابل تعریف است:

$$v = \begin{cases} -\rho \|D_2\| \frac{P_2 e_y(t)}{\|P_2 e_y(t)\|} & \text{if } e_y \neq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۴۲-۳)$$

که $P_2 \in R^{p \times p}$ ماتریس لیاپانوف برای A_{22}^S بوده و مقدار عددی ρ به صورت زیر انتخاب می-

شود:

$$\|f_i(t)\| < \rho \quad (۴۳-۳)$$

اگر بردار خطاهای تخمینی تحت عناوین $e_1(t) = \hat{x}_1(t) - x_1(t)$ و $e_y(t) = \hat{y}(t) -$

$y(t)$ تعریف کنیم، به طور مستقیم می‌توان نشان داد که:

$$\dot{e}_1(t) = A_{11}e_1(t) \quad (44-3)$$

$$\dot{e}_y(t) = A_{21}e_1(t) + A_{22}^s e_y(t) + v - D_2 f(x, u, t) \quad (45-3)$$

بازسازی سیگنال خطای محرک

در طول لغزش $e_y(t) = 0$ و $\dot{e}_y(t) = 0$. لذا با توجه به معادله بالا:

$$0 = A_{21}e_1(t) + v_{eq} - D_2 f(x, u, t) \quad (46-3)$$

که در آن v_{eq} ارائه کننده میانگین جز گسسته v است، و با توجه به اینکه A_{11} پایدار است؛ لذا $e_1 \rightarrow 0$ پس:

$$v_{eq} \rightarrow D_2 f(x, u, t) \quad (47-3)$$

حال با عبور دادن سیگنال حاصل از یک فیلتر پایین گذر، شکل خطا بازسازی می شود.

فرض کنید که جز گسسته معادله (۲۴-۳) توسط رابطه زیر جایگزین شود:

$$v_\delta = -\rho \|D_2\| \frac{P_2 e_y(t)}{\|P_2 e_y(t)\| + \delta} \quad (48-3)$$

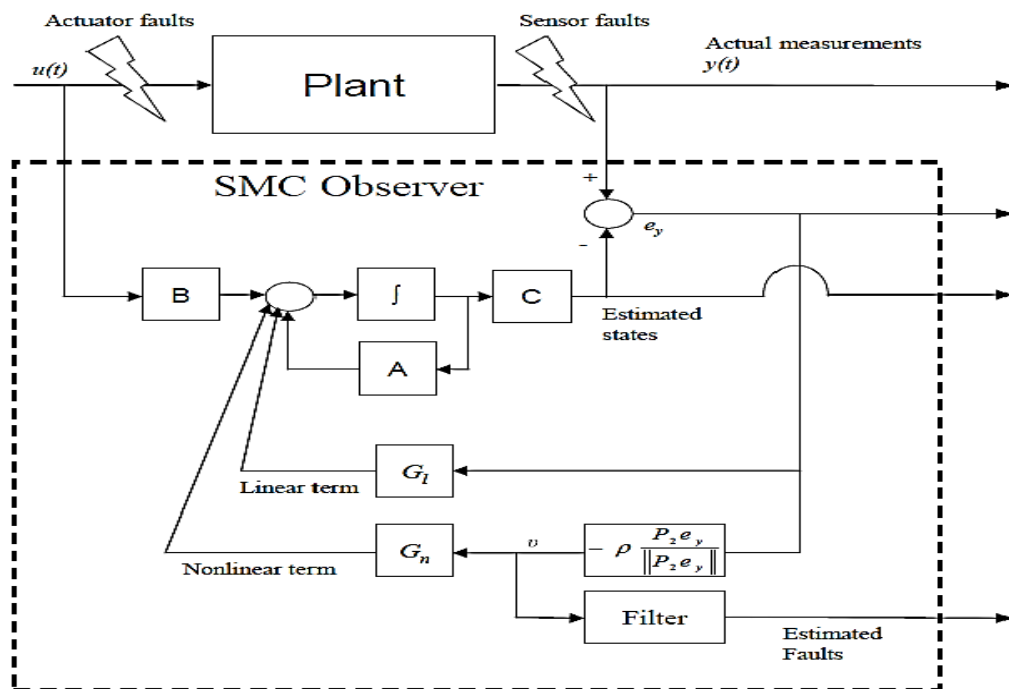
که در آن δ یک عدد کوچک مثبت است. می توان نشان داد که خطای نهایی بازسازی شده، به صورت زیر بوده و تنها به $e_y(t)$ وابسته است.

$$f(x, u, t) = -\rho \|D\| (D_2^T D_2)^{-1} D_2^T \frac{P_2 e_y(t)}{\|P_2 e_y(t)\| + \delta} \quad (49-3)$$

که معادله فوق سیگنال خطای محرک را برای ما بازسازی می کند.

و در آخر شکل ۱-۳ مدل بلوکی جهت طراحی مشاهده گر مود لغزشی، به منظور تشخیص و

جداسازی خطا را به ما نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱: مدل بلوکی مشاهده‌گر مود لغزشی به منظور تشخیص و جداسازی خطا

۳-۴ توضیح مدل فازی تاکاگی سوگنو

انگیزه اصلی ما برای استفاده از روش مدل‌سازی فازی، این است که در این سیستم، مدل‌سازی محلی نسبت به مدل‌سازی همه‌جایی^{۲۶}، راحت‌تر است. دلیل آن این است که در مدل‌سازی محلی ارتباط کمتر و اثر متقابل‌ها ساده‌تر هستند. به عبارت دیگر، با تقسیم شرایط کاری سیستم به چندین ناحیه از نقاط تعادل، هر ناحیه از سیستم به وسیله‌ی مدل‌های خطی محلی، ارائه می‌شوند. نواحی کاری متفاوت، می‌توانند ساختارهای مدل محلی متفاوت (ناهمگن) و یا یکسان (همگن) داشته باشند. در حقیقت، فرض می‌کنیم که تمامی نواحی کاری سیستم، به صورت کامل با این نواحی پوشش داده می‌شوند.

²⁶ Global

در این قسمت ما از مدل دینامیک فازی نامعین، که در ادامه آورده شده است، برای توصیف یک سیستم غیرخطی پیچیده با ورودی‌های نامشخص، که شامل مدل‌های خطی تحلیلی محلی، با توابع عضویت فازی هستند، استفاده می‌کنیم.

مدل سیستم فازی نامعین پیشنهادی ما به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \sum_{i=1}^M \mu_i(\xi) ((A_i + \Delta A_i)x + B_i w + R_i \bar{w} + D_i) \\ y &= \sum_{i=1}^M \mu_i(\xi) C_i x \end{aligned} \quad (5-3)$$

که در آن: $\sum_{i=1}^M \mu_i(\xi) = 1$ و $0 \leq \mu_i(\xi) \leq 1$ به ازاء هر $i \in I_M$

همچنین $x \in R^n$ بردار حالت و $w \in R^m$ بردار ورودی، $\bar{w} \in R^q$ که $q < n$ شامل ورودی‌های نامشخص و $y \in R^p$ خروجی‌های اندازه‌گیری شده است. ماتریس‌های $A_i \in R^{n \times n}$ و $B_i \in R^{n \times m}$ به ترتیب معرف ماتریس حالت و ماتریس ورودی، که به تأمین مدل محلی وابسته هستند، می‌باشند. ماتریس $R_i \in R^{n \times q}$ پراکندگی ورودی‌های نامعین و $D_i \in R^n$ معرف نقطه‌ی کار سیستم است. و در نهایت ξ ، به اصطلاح بردار تصمیم‌گیری نامیده می‌شود، که ممکن است به برخی از زیر مجموعه‌های ورودی‌های شناخته شده و یا متغیرهای اندازه‌گیری شده، برای تعریف نواحی کاری بستگی داشته باشد.

ماتریس‌های ΔA_i ماتریس‌های زمان متغیر ناشناخته هستند، با بعد مناسب که عدم قطعیت‌های پارامتریک را در مدل توصیف می‌کند. این مدل عدم قطعیت‌ها، به‌عنوان عدم قطعیت‌های تطبیق نیافته، شناخته می‌شوند.

ما همچنین فرض می‌کنیم که ورودی ناشناخته \bar{w} ، کران‌دار است.

$$\|\Delta A_i\| \leq \delta_i \text{ و } \|\bar{w}\| \leq \rho \quad (51-3)$$

توابع فعال سازی $\mu_i(\xi)$ صفر و یک^{۲۷} نیستند. در نتیجه مدل های محلی بسیاری در هر زمان فعال می شوند. ضرایب $i \in \{1, 2, \dots, M\}$ مشارکت هر مدل محلی را در مدل همه جایی تعیین می کند. عدد M با در نظر گرفتن یک عدد مشخص از نواحی کاری به صورت مستقیم انتخاب می شود. ماتریس های A_i و B_i و C_i و D_i و R_i با استفاده از خطی سازی مستقیم یک مدل غیرخطی حول نقطه کار به دست می آیند. از نقطه نظر عملی ماتریس های فوق، رفتار محلی سیستم را حول ناحیه \bar{A} ، توصیف می کنند.

۳-۵ مشاهده گر مود لغزشی فازی

در این قسمت می خواهیم در مورد رویکرد مود لغزشی فازی نامعین^{۲۸}، صحبت کنیم. رویکرد فوق مبتنی بر یک ترکیب غیرخطی از رویکردهای ورودی نامعین محلی است. ساختار پیشنهاد شده شامل جملات لغزشی برای جبران سازی عدم قطعیت ها و ورودی نامعین هستند. رویکرد فازی مود لغزشی پیشنهادی که با استفاده از مدل تاکاگی سوگنو در رابطه ی (۳-۵۰) آورده شده است، به صورت زیر نوشته می شود:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= \sum_{i=1}^M \mu_i(\xi) (A_i \hat{x} + B_i w + D_i + G_i (y - \hat{y}) + v_i + \alpha_i) \\ \hat{y} &= \sum_{i=1}^M \mu_i(\xi) C_i \hat{x} \end{aligned} \quad (52-3)$$

در رابطه ی بالا v_i خطاهایی که در اثر ورودی های نامعین و α_i عدم قطعیت های مدل را جبران می کنند، که در ادامه ساختارهای مشخص آن ها را توصیف خواهیم کرد. هدف ما تعیین ماتریس های

²⁷ Boolean

²⁸ Sliding mode unknown input fuzzy observer

بهره G_i و متغیرهای $v_i \in R^n$ و $\alpha_i \in R^m$ است. که همگرایی مجانبی x به \hat{x} را موجب می‌شود.

برای برقراری شرایط پایداری مجانبی روی تگر فازی اشاره شده در رابطه‌ی (۵۱-۳) خطای تخمین خروجی و حالات را تعریف می‌کنیم:

$$e = x - \hat{x}$$

$$r_y = y - \hat{y} = \sum_{i=1}^M \mu_i(\xi) C_i e \quad (53-3)$$

با استفاده از روابط (۵۰-۳) و (۵۲-۳) دینامیک خطای تخمین حالت به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\dot{e} = \sum \sum \mu_i(\xi) \mu(\xi) (\bar{A}_{ij} e + \Delta A_i x + R_i \bar{w} - v_i - \alpha_i) \quad (54-3)$$

که در رابطه‌ی بالا داریم: $\bar{A}_{ij} = A_i - G_i C_j$

قضیه ۱:

خطای تخمین حالت که در رابطه‌ی (۵۷-۳) نشان داده شده است، به صورت مجانبی همه جایی به صفر همگرا است. اگر یک ماتریس مثبت معین متقارن $p \in R^{n \times n}$ و ماتریس‌های $W_i \in R^{n \times p}$ و اعداد مثبت β_1 و β_2 و β_3 که شرایط زیر را به ازاء همه‌ی آنها و زها ارضا نماید وجود داشته باشد، در نتیجه:

$$\begin{bmatrix} A_i^T P + P A_i - C_i^T W_j^T - W_j C_i + (\beta_2 \delta_i^2 + \beta_3) I & P \\ P & -\beta_1 I \end{bmatrix} < 0 \quad (55-3)$$

بهره‌های G_i و جملات v_i و α_i از روی تگر فازی اشاره شده در رابطه‌ی (۵۲-۳) به صورت روابط اشاره شده در زیر محاسبه می‌شود:

$$if .r_y \neq 0 \left\{ \begin{array}{l} v_i = \rho^2 \beta_3^{-1} \frac{\|PR_i\|^2}{2r_y^T r_y} P^{-1} \sum_{j=1}^M \mu_j(\xi) C_j^T r_y \\ \alpha_i = \beta_1(1 + \beta_2) \delta_i^2 \frac{\hat{x}^T \hat{x}}{2r_y^T r_y} P^{-1} \sum_{j=1}^M \mu_j(\xi) C_j^T r_y \end{array} \right\} \quad (56-3)$$

$$if .r_y = 0 \left\{ \begin{array}{l} v_i = 0 \\ \alpha_i = 0 \end{array} \right\}$$

$$G_i = P^{-1} W_i \quad (57-3)$$

اثبات قضیه فوق و همچنین اثبات همگرایی مجانبی رویترگ تاکاگی سوگنو در مرجع [۴۸] آمده است.

در مورد ماتریس خروجی ($C_i = C$) داریم:

$$\dot{e} = \sum_{i=1}^M \mu_i(\xi) (\bar{A}_{ij} e + \Delta A_i x + R_i \bar{u} - v_i - \alpha_i) \quad (58-3)$$

و کفایت تا اندیس‌های i را با i در شرایط رابطه (۵۵-۳) جایگزین کنیم.

در این فصل انواع روش‌های مود لغزشی را توضیح دادیم و معادلات ریاضی آن را بیان کردیم و در نهایت با استفاده از این روش‌ها ساختار اصلی رویترگ مود لغزشی را که با استفاده از فازی سعی در بهبود عملکرد آن داشتیم طراحی کردیم. این رویترگ می‌تواند عدم قطعیت و همین‌طور خطای عملگر را به خوبی تشخیص دهد. در فصل آینده برای درک بهتر مطالب گفته شده و آزمایش روش پیشنهادی، مثالی در مورد وسیله نقلیه خواهیم زد، و با توجه به نتایج و تخمین‌هایی که زده خواهد شد، در مورد صحت عملکرد این روش بحث خواهیم کرد.

چهارم

شبیه‌سازی مدل دینامیکی

وسیله‌ی نقلیه

۱-۴ مقدمه

در فصل قبل در مورد سیستم فازی و رویکرد مود لغزشی بحث کرده و ساختار آن را معرفی کردیم. در این بخش به منظور نشان دادن صحت عملکرد رویکرد مود لغزشی طراحی شده در قسمت‌های قبل و تایید روابط به دست آمده، در مثالی غیرخطی، سعی بر تخمین سیستم ورودی و بررسی نتایج داریم.

۲-۴ مثالی برای خودرو دینامیکی

مدل‌های مختلف برای هدایت اتوماتیک خودرو در مقاله‌های [۴۹]، [۵۰]، [۵۱] بررسی شده است. در مرجع [۴۹] مدل اتصال، از حرکات طولی و عرضی در یک وسیله نقلیه مطرح شده است. در این پایان‌نامه فقط حرکات طولی وسیله دینامیکی را به کار برده‌ایم.

معادلات غیرخطی سیستم به قرار زیر است:

$$\begin{aligned} \dot{u} &= vr - fg + \frac{(fk_1 - k_2)}{M} u^2 + c_f \frac{v + ar}{Mu} \delta + \frac{T}{M} \\ \dot{v} &= -ur - \frac{(c_f + c_r)}{Mu} v + \frac{(bc_r + ac_f)}{Mu} r + \frac{c_f \delta + T\delta}{M} \\ \dot{r} &= \frac{(bc_r - ac_f)}{I_z u} v - \frac{(b^2 c_r + a^2 c_f)}{I_z u} r + \frac{aT\delta + ac_f \delta}{I_z} \end{aligned} \quad (1-4)$$

که در آن u ، v و r به ترتیب، سرعت طولی، سرعت عرضی و میزان انحراف است. و همچنین δ زاویه فرمان و T نیروی ترمز است.

همچنین مشخصه‌های پارامترهای ثابت مربوط به سیستم در جدول ۱-۴ آمده است:

جدول ۱-۴: مقادیر پارامترهای معادلات سیستم وسیله نقلیه

1480 kg	جرم کامل خودرو	M
2350 kg.m^2	ممان اینرسی	I_z
$9/81 \text{ m/s}^2$	شتاب گرانش	g
$0/02$	ضریب اصطکاک چرخش	f
$1/05 \text{ m}$	فاصله مرکز تا محور جلو	a
$1/63 \text{ m}$	فاصله مرکز تا محور عقب	b
135000 N/rad	ضریب سختی گوشه‌ای لاستیک‌های جلو	c_f
95000 N/rad	ضریب سختی گوشه‌ای لاستیک‌های عقب	c_r
$0/005 \text{ N.s}^2/\text{m}^2$	ضریب لیف آئرو دینامیکی	k_1
$0/41 \text{ N.s}^2/\text{m}^2$	ضریب درگ آئرو دینامیکی	k_1

دینامیک غیرخطی سیستم خودرو را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= F(x(t), w(t)) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (2-4)$$

که در آن F یک تابع غیرخطی از بردار حالت $x = [u, v, r]$ است، w جمع دو ورودی δ و T و $y(t)$ برابر u است.

روند کار در این پایان‌نامه به این صورت است که ابتدا سیستم فوق را با یک مدل فازی تاکاگی-سوگنو ارزیابی کرده، و سپس مدل غیرخطی (۲-۴) را حول نقطه‌ی کار $[x^{(i)}, w^{(i)}]$ خطی سازی می‌کنیم و در نهایت مجموعه‌ی مدل‌های خطی را در یک مدل فازی تاکاگی سوگنو ادغام خواهیم کرد [۴۸].

مدل تاکاگی سوگنو ارائه شده به شرح زیر است:

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^N \mu_i(y_1)(A_i x + B_i w + D_i) \quad (3-4)$$

$$A_i = \left. \frac{\partial F}{\partial x} \right|_{x=x^{(i)}, w=w^{(i)}} \quad B_i = \left. \frac{\partial F}{\partial w} \right|_{x=x^{(i)}, w=w^{(i)}} \quad (4-4)$$

$$D_i = F(x^{(i)}, w^{(i)}) - A_i x^{(i)} - B_i w^{(i)}$$

مدل بالا بر اساس مدل غیرخطی (۴-۱) ساخته شده است. با توجه به اینکه پارامترهای مدل‌های مختلف کاملاً شناخته شده است، ولی در واقع برخی از پارامترها، نامعین هستند، به عنوان مثال، این نامعینی در مورد ضرایب سختی گوشه‌ای (C_r و C_f) کاملاً صدق می‌کند. این عدم قطعیت می‌تواند به‌عنوان نوسانات جمع شونده‌ی کران‌دار^{۲۹} مدل شود:

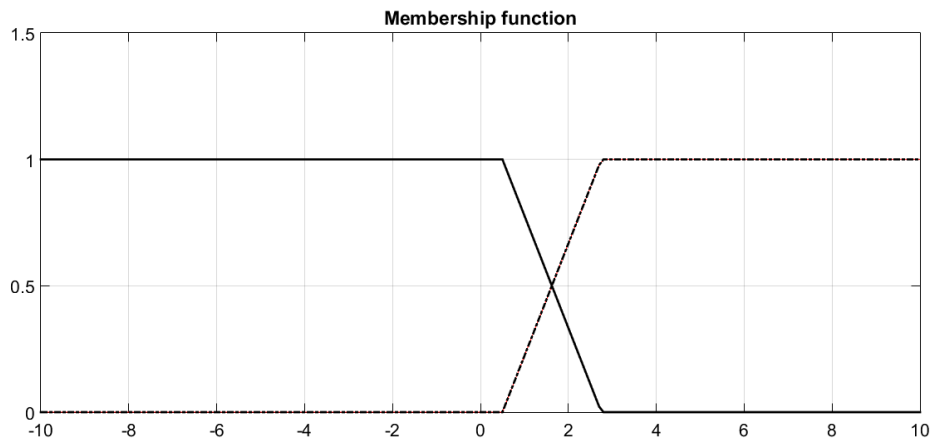
$$c_f = c_{f0} + \Delta c_f \quad \text{و} \quad c_r = c_{r0} + \Delta c_r \quad (5-4)$$

که در آن $|\Delta c_f| < d_f$ و $|\Delta c_r| < d_r$ است. بنابر این، این عدم قطعیت‌ها به صورت رابطه‌ی زیر در نظر گرفته شده‌اند:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \sum_{i=1}^2 \mu_{i=1}(y_1)((A_i + \Delta A_i)x + B_i w + D_i) \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (6-4)$$

همین‌طور که مشاهده می‌کنید دو مدل محلی برای انتخاب توابع فازی برای این مثال انتخاب شده است. که با انتخاب این تعداد توابع برای سیستم فازی مصالحه‌ی خوبی بین کیفیت مدل و پیچیدگی آن برقرار شد. توابع عضویت دوزنقه‌ای که در شکل ۴-۱ نشان داده شده است، توابع فازی سیستم است که توانسته نقاط تعادل سیستم را به خوبی به هم مرتبط سازد، که این توابع به سرعت طولی، - در مثال خودرو دینامیکی - بستگی دارد.

²⁹ Bounded additive perturbations

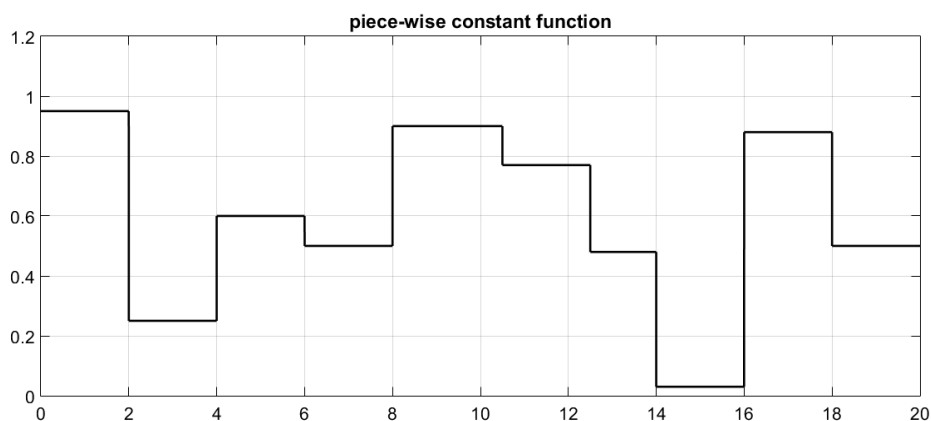


شکل ۴-۱: توابع عضویت

نامعینی‌های مدل مذکور عبارتند از:

$$\Delta A_{i,(j,k)} = \theta A_{i,(j,k)} \eta \quad j, k \in \{1,3\} \text{ و } i \in \{1,2\} \quad (7-4)$$

که در آن نشان دهنده (j, k) امین عنصر از A_i و $\theta = 0.2$ است. تابع $\eta(t)$ یک تابع تکه‌ای ثابت^{۳۰} است که دامنه‌ی آن به طور یکسان در بازه‌ی زمانی $(0, 1)$ توزیع شده است و تغییرات زمانی آن در شکل ۴-۲ نشان داده شده است.



شکل ۴-۲: تابع تکه‌ای ثابت

³⁰ Piece-Wise constant function

حال بعد از خطی سازی حول دو نقطه تعادل، معادلات خطی شده فضای حالت سیستم، به صورت

زیر حاصل می‌شود:

$$A_1 = \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -3 & 0 \\ 2 & 1 & -6 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} -3 & 2 & 2 \\ 5 & -8 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & -4 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix}$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 1 \\ 0.25 \end{bmatrix}$$

$$R_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.5 \\ 2 \end{bmatrix}$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

که با توجه به معادله‌ی (۳-۵۷) که در بخش قبلی در مورد آن بحث کردیم، بهره‌ی مشاهده‌گر مود

لغزشی (G_1 و G_2) برابر است با:

$$G_1 = \begin{bmatrix} 0.55 & 2.18 \\ 1.58 & -0.67 \\ 0.18 & -0.93 \end{bmatrix}$$

$$G_2 = \begin{bmatrix} 2.62 & 1.04 \\ -1.34 & 1.29 \\ 2.22 & -2.19 \end{bmatrix}$$

۳-۴ تشخیص خطا برای مدل وسیله‌ی نقلیه

در این قسمت می‌خواهیم با استفاده از تولید مانده‌ها^{۳۱} وقوع خطا را در سیستم تشخیص دهیم، همان‌طور که در رابطه‌ی (۴-۶) گفته شد. یک سیگنال مانده‌ای ایده آل، سیگنالی است که در زمانی که هنوز خطا رخ نداده است، بدون خطا و صفر باقی بماند؛ و هنگامی که به سیستم خطا اعمال شد، خطا می‌بایست تخمین زده شود. تخمین خطا؛ نوع خطا، مدت زمان، دامنه و حتی تکامل احتمالی آن را تعیین می‌کند. در مراجعی که از آن‌ها استفاده کردیم روش‌های تشخیص خطای مختلفی وجود

³¹ Residuals

دارد. در این پایان نامه قصد بر تشخیص خطاهای عملگر را داریم. که به عنوان عدم قطعیت های مدل - سازی در نظر گرفته می شوند.

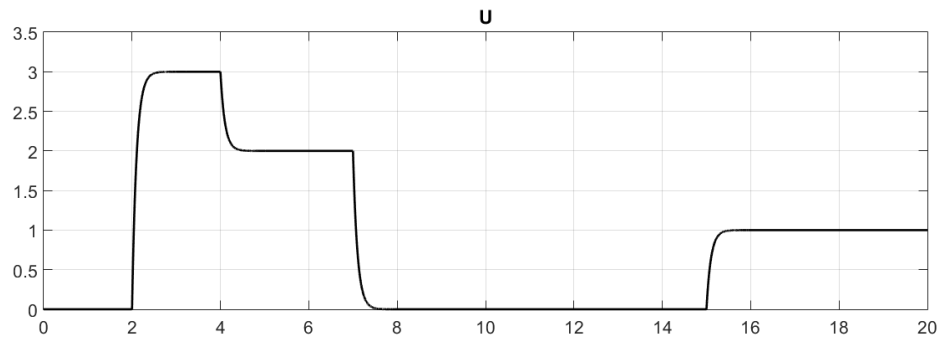
توجه به این مسئله ضروری است که پیاده سازی روی تگر فازی مود لغزشی، منجر به یک مشکل عملی می شوند. زمانی که خطای تخمین y_i به سمت صفر می رود دامنه ی α_i و v_i ممکن است به صورت بیکران افزایش یابند. به این مشکل می توان با استفاده از روش زیر غلبه کرد.

$$if \cdot \|r_y\| \geq \varepsilon \left\{ \begin{array}{l} v_i = \rho^2 \beta_3^{-1} \frac{\|PR_i\|^2}{2r_y^T r_y} P^{-1} \sum_{j=1}^2 \mu_j C_j^T r_y \\ \alpha_i = \beta_1 (1 + \beta_2) \delta_i^2 \frac{\hat{x}^T \hat{x}}{2r_y^T r_y} P^{-1} \sum_{j=1}^2 \mu_j C_j^T r_y \end{array} \right. \quad (8-4)$$

$$if \cdot \|r_y\| \leq \varepsilon \left\{ \begin{array}{l} v_i = 0 \\ \alpha_i = 0 \end{array} \right\}$$

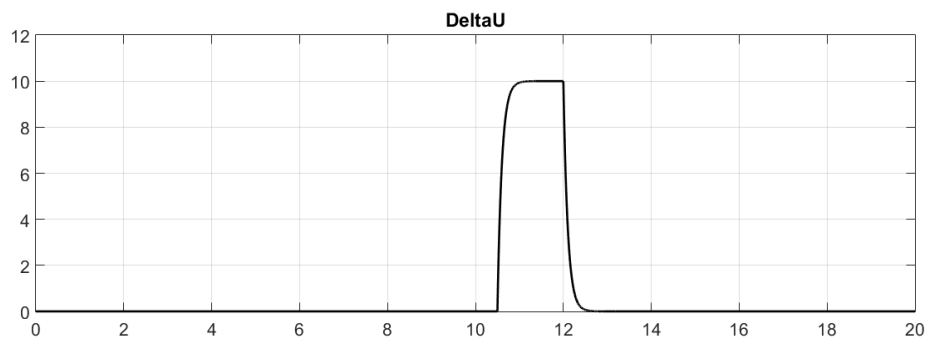
زمانی که خطای تخمین خروجی، به صورت $\|r_y\| \leq \varepsilon$ در بیاید، جملات α_i صفر می شود. ε مقدار آستانه ایست که توسط طراح تعیین می شود. در این مورد خطای تخمین، نمی تواند به صورت مجانبی به صفر همگرا شود، اما در یک همسایگی کوچک از صفر وابسته به انتخاب مقدار ε تعیین می شود. برای مثال در این پایان نامه ε را برابر 0.001 در نظر می گیریم.

ورودی سیستم را به صورت دلخواه و با مقداری تصادفی به سیستم وارد کردیم، که در شکل زیر مقادیر آن، قابل مشاهده هستند. سیستم نباید ورودی را علی رغم این که دلخواه و سلیقه ای بوده به عنوان خطا شناسایی کند.



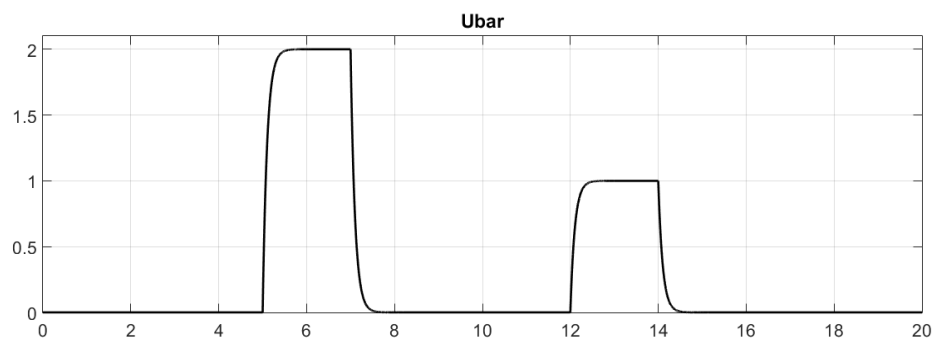
شکل ۳-۴: ورودی سیستم وسیله نقلیه

خطای نامعینی ورودی را با ورودی سیستم (شکل ۳-۴) جمع کرده و به صورت موقتی در ثانیه‌ی ۱۰/۵ تا ۱۲ به سیستم می‌دهیم.



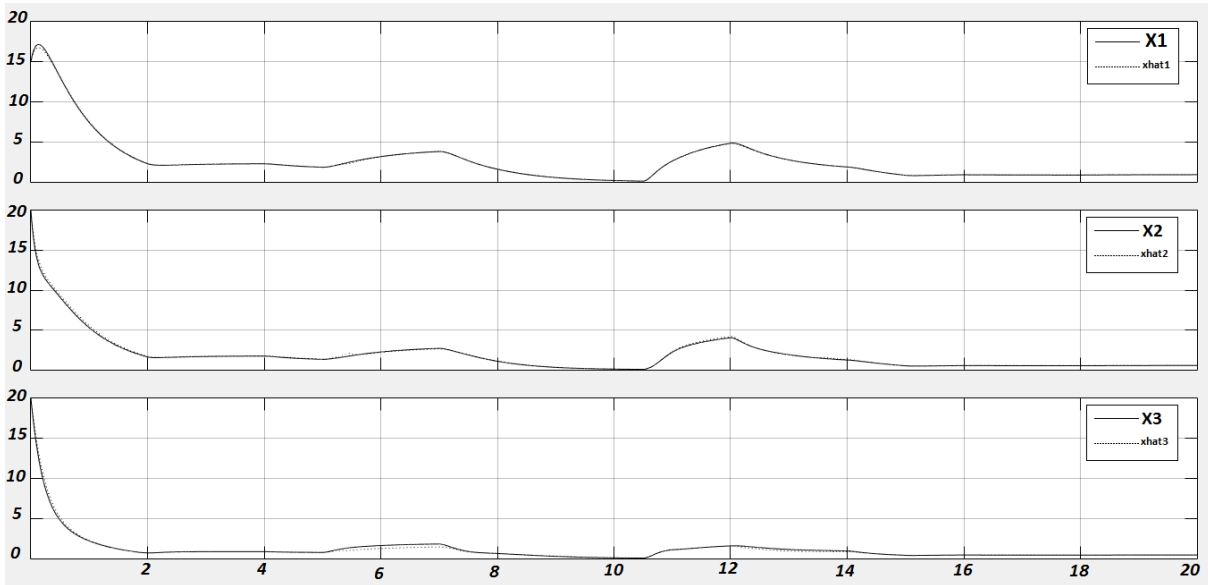
شکل ۴-۴: خطای محرک

و همچنین خطای عملگر را نیز که یک خطای موقتی است در ثانیه‌های ۵ تا ۷ و همچنین ۱۲ تا ۱۴ به سیستم وارد می‌کنیم.

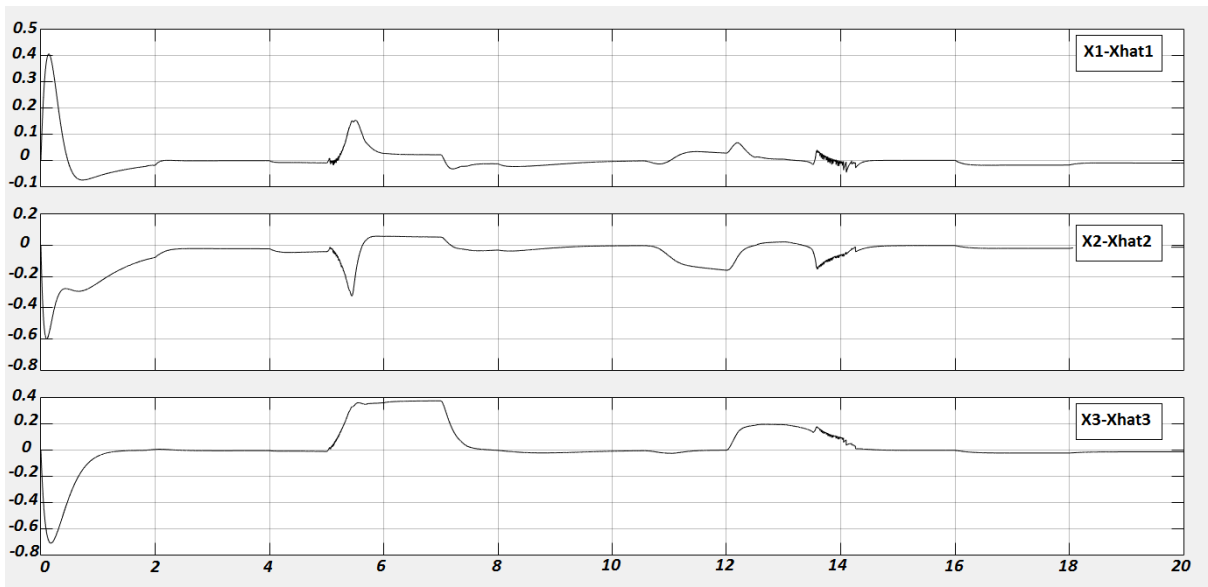


شکل ۵-۴: خطای عملگر

در شکل (۴-۶) می‌بینیم که روی‌تگر به راحتی می‌تواند حالات سیستم را تخمین بزند.



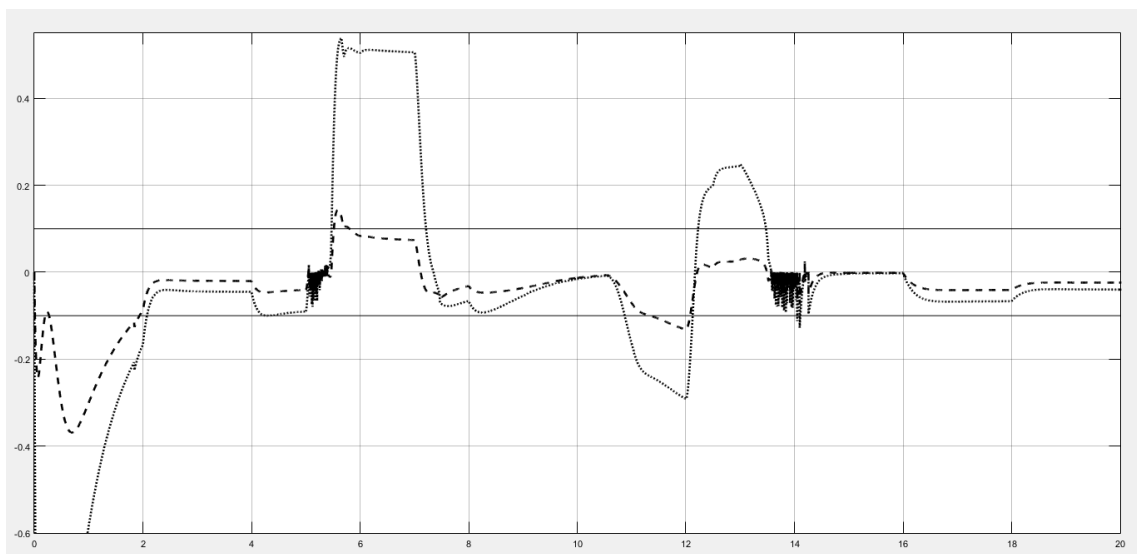
شکل ۴-۶: حالات سیستم و تخمین آن



شکل ۴-۷: خطای تخمین حالات

در شکل (۴-۷) به ترتیب از بالا به پایین خطاهای سرعت طولی، سرعت عرضی و خطای میزان انحراف خودرو به خوبی تخمین زده شده است.

و در شکل (۴-۸) نیز مشاهده می‌کنیم که رویتر توانسته است در زمانی که خطا به سیستم اعلام شده است، آن را به درستی تشخیص دهد. در ثانیه ۱۰/۵ تا ۱۲ خطای محرک و در ثانیه‌های ۵ تا ۷ و همچنین ۱۲ تا ۱۴ خطای عملگر را در سیستم تشخیص خطا می‌توان مشاهده نمود.



شکل ۴-۸: تشخیص خطای خروجی

همان‌طور که در شکل ۴-۸ مشاهده می‌کنید، سیستم توانسته است خطای محرک و عملگر را به خوبی تشخیص دهد. در عمل از خطاهایی با مقدار کم و ناچیز که برای سیستم مشکلی ایجاد نمی‌کند صرف نظر شده و برای خطاهای بزرگ حد آستانه‌ای تعریف می‌کنیم. که در این مثال حد آستانه را ۰/۱ در نظر گرفته‌ایم. در نتیجه ی این عمل، مشاهده می‌کنیم که رویتر اختلاف خروجی را در زمانی که آستانه‌ی خطا از حد انتظار ما کمتر است در نظر نمی‌گرفته و سیستم به کار خود ادامه می‌دهد. چنانچه خطا قابل قبولی رخ دهد که از حد آستانه‌ی تعریف شده، بیشتر باشد، سیستم خطا را شناسایی کرده و خروجی سیستم رویتر را دنبال نمی‌کند. در نتیجه با توجه به رابطه‌ی (۳-۵۳) سیستم خطا را تشخیص می‌دهد.

۴-۴ نتیجه‌گیری مثال وسیله نقلیه

با توجه به نتایج شبیه‌سازی، همان‌طور که مشاهده می‌شود، توانستیم با استفاده از روش رویتگر مود لغزشی فازی، حالات و خروجی یک سیستم غیرخطی را با دقت بالایی تخمین زده و نیز انواع خطای موجود در قسمت محرک سیستم را نیز با دقت قابل قبولی تشخیص دهیم.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱ مروری بر کارهای انجام شده

در این پایان نامه، تشخیص خطا به وسیله‌ی رویتگر مود لغزشی مطالعه و بررسی گردید و بر روی مدل سیستم فازی نامعین پیاده سازی شد.

در فصل اول به توضیح خطا و انواع آن و همچنین نگاه مختصری به تاریخچه‌ی خطا پرداختیم، و سپس اهمیت تشخیص خطا مورد بحث قرار دادیم.

در فصل دوم پیش در آمدی در مورد تشخیص خطا و انواع روش‌های آن گفته شد، و همچنین انواع رویتگرهای تخمین خطا و نحوه‌ی عملکرد آن‌ها بیان شد.

در فصل سوم ابتدا به معرفی و توضیح مفهوم مود لغزشی و سپس به روند طی شده در طراحی رویتگرها و اثبات پایداری آن‌ها پرداختیم. در ادامه انواع رویتگرهای مود لغزشی که توسط لیونبرگر، اوتکین، استولین، والکت و زاک و ادوارد و اسپرجن طراحی شده بودند، را بررسی و مقایسه کردیم. و در نهایت با تکیه بر روش پیشنهادی والکت و زاک به طراحی روش پیشنهادی پرداختیم.

در فصل چهارم شبیه‌سازی تشخیص خطا را بر روی وسیله نقلیه که یک سیستم کاملاً غیرخطی و ناپایدار بوده انجام دادیم، که روش مذکور با قدرت بالا و مناسبی توانست متغیرهای حالت و خطای وارد شده را به سیستم را برای ما تخمین بزند.

۲-۵ پیشنهادها

- استفاده از بانک رویتگرها به جای یک رویتگر
- تشخیص و بازسازی خطای حسگر به همراه خطای عملگر
- ترکیب منطق فازی و شبکه‌های عصبی به منظور تشخیص بهتر و دقیق‌تر خطا
- استفاده‌ی مستقیم از مدل غیرخطی سیستم بدون استفاده از خطی سازی
- استفاده از الگوریتم‌های هوشمند مانند PSO برای پیدا کردن توابع فازی بهینه

مراجع

- [¹] R. Isermann and P. Ballé, "Trends in the application of model-based fault detection and diagnosis of technical processes," *Control engineering practice*, vol. 5, pp. 709-719, 1997.
- [²] D. M. Himmelblau, *Fault detection and diagnosis in chemical and petrochemical processes* vol. 8: Elsevier Science Ltd, 1978.
- [³] G. David, "An introduction to observers," *IEEE Transactions on automatic control*, vol. 16, pp. 596-602, 1971.
- [⁴] R. J. Patton, "Robust model-base fault diagnosis: The state of the art," 1994.
- [⁵] R. N. Clark, "A simplified instrument failure detection scheme," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, pp. 558-563, 1978.
- [⁶] J. Wünnenberg and P. Frank, "Sensor fault detection via robust observers," in *System fault diagnostics, reliability and related knowledge-based approaches*, ed: Springer, 1987, pp. 147-160.
- [⁷] H. Hohmann, "Automatische Überwachung und Fehlerdiagnose an Werkzeugmaschinen," 1977.
- [⁸] D. Filbert, "Fault diagnosis in nonlinear electromechanical systems by continuous time parameter estimation," *ISA Transactions*, vol. 24, pp. 23-27, 1985.
- [⁹] P. M. Frank, "Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy: A survey and some new results," *automatica*, vol. 26, pp. 459-474, 1990.
- [¹⁰] J. Chen and R. J. Patton, *Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems* vol. 3: Springer Science & Business Media, 2012.
- [¹¹] J. Gertler, *Fault detection and diagnosis in engineering systems*: CRC press, 1998.
- [¹²] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, K. Yin, and S. N. Kavuri,

- "A review of process fault detection and diagnosis: Part I: Quantitative model-based methods," *Computers & chemical engineering*, vol. 27, pp. 293-311, 2003.
- [١٣] T. P. Del Titolo and D. R. Dottore , "Model-based fault diagnosis in dynamic systems using identification techniques," 2002.
- [١٤] E. S. Sogomonyan and M. Gossel, "Concurrently self-testing embedded checkers for ultra-reliable fault-tolerant systems," in *VLSI Test Symposium, 1996., Proceedings of 14th*, 1996, pp .138-144.
- [١٥] J. J. Gertler, "Survey of model-based failure detection and isolation in complex plants," *IEEE Control systems magazine*, vol. 8, pp. 3-11, 1988.
- [١٦] J. M. Hereford, "Fault-tolerant sensor systems using evolvable hardware," *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, vol. 55, pp. 846-853, 2006.
- [١٧] S. Lee and P. White, "Higher-order time–frequency analysis and its application to fault detection in rotating machinery," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 11, pp. 637-65 ,1997.
- [١٨] X. Ding, L. Guo, and P. Frank, "A frequency domain approach to fault detection of uncertain dynamic systems," in *Decision and Control, 1993., Proceedings of the 32nd IEEE Conference on*, 1993, pp. 1722-1727.
- [١٩] E. Chow and A. Willsky, "Analytical redundancy and the design of robust failure detection systems," *IEEE Transactions on Automatic control*, vol. 29, pp. 603-614, 1984.
- [٢٠] X. Ding, L. Guo, and T. Jeinsch, "A characterization of parity space and its application to robust fault detection," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 44, pp. 337-343, 1999.
- [٢١] P. S. Kim and E. H. Lee, "A new parity space approach to fault detection for general systems," in *International Conference on High Performance Computing and Communications*, 2005 ,pp. 535-540.
- [٢٢] A. Lakhal, A. Tlili, and N. B. Braiek, "Neural network observer for nonlinear systems application to induction motors," *International Journal of Control and Automation*, vol. 3, pp. 1-16, 2010.

- [۲۳] 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 Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, vol. 38, pp. 875-880, 2008.
- [۲۴] P. Bergsten, R. Palm, and D. Driankov, "Observers for Takagi-Sugeno fuzzy systems," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, vol. 32, pp. 114-121, 2002.
- [۲۵] G. J. Ducard, *Fault-tolerant flight control and guidance systems: Practical methods for small unmanned aerial vehicles*: Springer Science & Business Media, 2009.
- [۲۶] C. Edwards, S. K. Spurgeon, and R. J. Patton, "Sliding mode observers for fault detection and isolation," *Automatica*, vol. 36, pp. 541-553, 2000.
- [۲۷] J.-J. Slotine, J. Hedrick, and E. Misawa, "On sliding observers for nonlinear systems," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 109, pp. 245-252, 1987.
- [۲۸] B. Walcott, "State observation of nonlinear control systems via the method of Lyapunov," *Deterministic control of uncertain systems*, p. 333, 1990.
- [۲۹] R. Isermann, *Fault-diagnosis systems: an introduction from fault detection to fault tolerance*: Springer Science & Business Media, 2006.
- [۳۰] S. Ekici, S. Yildirim, and M. Poyraz, "A transmission line fault locator based on Elman recurrent networks," *Applied soft computing*, vol. 9, pp. 341-347, 2009.
- [۳۱] Q. R. Butt, A. I. Bhatti, M. R. Mufti, M. A. Rizvi, and I. Awan, "Modeling and online parameter estimation of intake manifold in gasoline engines using sliding mode observer ",*Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 32, pp. 138-154, 2013.
- [۳۲] C. Edwards and S. Spurgeon, *Sliding mode control: theory and applications*: CRC Press, 1998.
- [۳۳] V. I. Utkin, *Sliding modes in control and optimization*: Springer

Science & Business Media, 2013.

- [٣٤] X.-G. Yan, C. Edwards, and S. K. Spurgeon, "Decentralised robust sliding mode control for a class of nonlinear interconnected systems by static output feedback," *Automatica*, vol. 40, pp. 613-620, 2004.
- [٣٥] R. Sreedhar, B. Fernandez, and G. Masada, "Robust fault detection in nonlinear systems using sliding mode observers," in *Control Applications, 1993., Second IEEE Conference on*, 1993, pp. 715-721.
- [٣٦] M. Comanescu and L. Xu, "Sliding-mode MRAS speed estimators for sensorless vector control of induction machine," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, pp. 146-153, 2006.
- [٣٧] A. Benchaib, A. Rachid, E. Audrezet, and M. Tadjine, "Real-time sliding-mode observer and control of an induction motor," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 46, pp. 128-138, 1999.
- [٣٨] M. Ghanes and G. Zheng, "On sensorless induction motor drives: sliding-mode observer and output feedback controller," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, pp. 3404-3413, 2009.
- [٣٩] C. Picardi and F. Scibilia, "Sliding-mode observer with resistances or speed adaptation for field-oriented induction motor drives," in *IECON 2006-32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, 2006, pp. 1481-1486.
- [٤٠] S. Solvar, V. Le, M. Ghanes, J.-P. Barbot, and G. Santomenna, "Sensorless second order sliding mode observer for induction motor," in *2010 IEEE International Conference on Control Applications*, 2010, pp. 1933-1938.
- [٤١] S. Baev, I. Shkolnikov, Y. Shtessel, and A. Poznyak, "Parameter identification of non-linear system using traditional and high order sliding modes," in *2006 American Control Conference*, 2006.
- [٤٢] H. Shraim, B. Ananou, L. Fridman, H. Noura, and M. Ouladsine, "Sliding mode observers for the estimation of vehicle parameters, forces and states of the center of gravity," in *Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control*, 2006, pp. 1635-1640.

- [٤٣] R. A. McCann, M. S. Islam, and I. Husain, "Application of a sliding-mode observer for position and speed estimation in switched reluctance motor drives," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 37, pp. 51-58, 2001.
- [٤٤] M. S. Islam, I. Husain, R. J. Veillette, and C. Batur, "Design and performance analysis of sliding-mode observers for sensorless operation of switched reluctance motors," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 11, pp. 383-389, 2003.
- [٤٥] V. Utkin, "Principles of identification using sliding regimes," in *Soviet Physics Doklady*, 1981, p. 271-276.
- [٤٦] H. Yang and M. Saif, "Fault detection in a class of nonlinear systems via adaptive sliding observer," in *Systems, Man and Cybernetics, 1995. Intelligent Systems for the 21st Century., IEEE International Conference on*, 1995, pp. 2199-2204.
- [٤٧] G. G. Yen and L.-W. Ho, "Intelligent fault tolerant control using artificial neural networks," in *Neural Networks, 2000. IJCNN 2000, Proceedings of the IEEE-INNS-ENNS International Joint Conference on*, 2000, pp. 266-271.
- [٤٨] A. Akhenak, M. Chadli, J. Ragot, and D. Maquin, "Design of sliding mode unknown input observer for uncertain Takagi-Sugeno model," in *Control & Automation, 2007. MED'07. Mediterranean Conference on*, 2007, pp. 1-6.
- [٤٩] J. Zhang and S. Xu, "Nonlinear observer design for automatic steering of vehicles," in *Intelligent Transportation Systems, 2002. Proceedings. The IEEE 5th International Conference on*, 2002, pp. 179-182.
- [٥٠] A. Akhenak, M. Chadli, J. Ragot, and D. Maquin, "Fault detection and isolation using sliding mode observer for uncertain Takagi-Sugeno fuzzy model," in *Control and Automation, 2008 16th Mediterranean Conference on*, 2008, pp. 286-291.
- [٥١] M. Chadli, A. Elhajjaji, and M. Oudghiri, "Robust output fuzzy control for vehicle lateral dynamic stability improvement," *International Journal of Modelling, Identification and Control*, vol. 3, pp. 247-257, 2008.

Abstract:

As well as passing the time and progress in science, control systems become more complicated, security and reliability of these systems are taken into consideration. Due to problems and damages of operator fault in a system, this thesis tries to detect such a fault and its goal is estimation of system input states. Fault detection is done through sliding mode observer which its performance has been improved by fuzzy logic. Proposed method is a fuzzy system in which with consideration of uncertainties, it has more similarity to the main system. Finally, validation of proposed method is proved by Implementation of the method on a dynamic vehicle model, fault detection and estimation of its states.

Keyword: fault detection, fuzzy logic, sliding mode, observer, uncertainty



Shahrood University of Technology

Faculty Electrical Engineering

MSc thesis in Science in Electrical Engineering

Fault diagnosis using sliding mode observer for a system based on the uncertain fuzzy model

By: Seyed Hossein Haddadi

Supervisor:

Dr. Mohammad ali Sadrnia

August 2016