

عنوان

گزارش تحقیق در ادبیات رساله

نام دانشجو

....

استاد راهنما:

دکتر

شهریور ماه ۱۴۰۵

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

چکیده

گسترش سامانه‌های دینامیکی پیچیده و افزایش حجم داده‌های حاصل از تجهیزات اندازه‌گیری، زمینه را برای توسعه روش‌های داده‌محور در تحلیل، کنترل و تخمین حالت فراهم کرده است. در این گزارش، ادبیات مرتبط با طراحی رویکردهای داده‌محور، با تمرکز ویژه بر رویکردهای ورودی-ناشناخته (UIO)، بررسی و تحلیل شده است. ابتدا مبانی نظری رویکردهای داده‌محور، لم بنیادی ویلمز و مفهوم اطلاعات‌پذیری داده‌ها تشریح شده و سپس شرایط کلاسیک وجود UIO و روش‌های مستقیم طراحی UIO از داده‌های اندازه‌گیری‌شده بررسی شده‌اند. همچنین، توسعه این روش‌ها به رویکردهای مرتبه کاهش‌یافته، رویکردهای اغتشاش، سیستم‌های غیرخطی، سیستم‌های به‌هم‌پیوسته و ساختارهای توزیع‌شده مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج مرور ادبیات نشان می‌دهد که تحت فرضیات مناسب، شرایط داده‌محور طراحی UIO می‌تواند با شرایط مدل‌محور معادل باشد و در نتیجه، امکان طراحی رویکرد بدون شناسایی صریح مدل فراهم می‌شود. باین‌حال، نیاز به داده‌های حالت در مرحله آفلاین، حساسیت به نویز و شرایط رتبه‌ای، نامعلوم بودن ساختار ورودی ناشناخته و پیچیدگی محاسباتی در سیستم‌های بزرگ‌مقیاس همچنان از مهم‌ترین چالش‌های موجود هستند. بر این اساس، سه مسیر پژوهشی شامل طراحی UIO داده‌محور مقاوم در برابر نویز، طراحی بدون نیاز به داده‌های حالت و طراحی تطبیقی و توزیع‌شده برای سیستم‌های به‌هم‌پیوسته پیشنهاد شده است.

واژه‌های کلیدی: رویکرد داده‌محور؛ رویکرد ورودی-ناشناخته (UIO)؛ تخمین حالت؛ اطلاعات‌پذیری داده‌ها؛ لم بنیادی ویلمز؛ سیستم‌های دینامیکی؛ رویکرد مقاوم؛ رویکرد توزیع‌شده؛ ورودی ناشناخته؛ سیستم‌های به‌هم‌پیوسته

فهرست مطالب

۱	فصل ۱: مقدمه
۱-۱	مقدمه و اهمیت داده در سیستم‌های کنترلی
۲-۱	دلایل بهره‌گیری از رویکرد داده‌محور
۱-۲-۱	کاهش هزینه و پیچیدگی مدل‌سازی
۲-۲-۱	انعطاف‌پذیری در برابر تغییرات سیستم
۳-۲-۱	استفاده مستقیم از داده‌های تاریخی
۴-۲-۱	کاهش وابستگی به شناخت ساختار ورودی‌های ناشناخته
۳-۱	کنترل و تخمین حالت با داده
۱-۳-۱	لم بنیادی ویلمز
۲-۳-۱	مفهوم اطلاعات پذیری بودن داده‌ها
۴-۱	رویتگرهای ورودی-ناشناخته (UIO)
۱-۴-۱	تعریف و اهمیت
۲-۴-۱	شرایط وجود UIO مدل‌محور
۳-۴-۱	چالش‌های رویکرد مدل‌محور
۵-۱	انگیزه و ضرورت پژوهش
۶-۱	ساختار رساله
۱۷	فصل ۲: مروری بر منابع
۱-۲	مقدمه
۲-۲	تغییر پارادایم: از کنترل مدل‌محور تا رویکردهای داده‌محور
۳-۲	مبانی کلاسیک رویتگرهای ورودی-ناشناخته (UIO) مدل‌محور
۴-۲	طراحی مستقیم رویتگر و UIO داده‌محور
۵-۲	رویتگرهای اغتشاش (DOB)، حالت گسترش‌یافته (ESO) و تطبیقی
۶-۲	رویتگرهای داده‌محور برای سیستم‌های غیرخطی و مبتنی بر یادگیری ماشین
۷-۲	رویتگرهای توزیع‌شده، سیستم‌های بهم‌پیوسته و امنیت سایبری
۸-۲	چالش‌ها، محدودیت‌ها و شکاف‌های تحقیقاتی
۹-۲	جمع‌بندی فصل
۳۳	فصل ۳: جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
۱-۳	مقدمه
۲-۳	جمع‌بندی مبانی نظری و مطالعات انجام‌شده

- ۳-۳- جمع‌بندی مقایسه‌ای مدل‌محور و داده‌محور..... ۳۶
- ۴-۳- نتایج اصلی حاصل از مرور ادبیات..... ۳۸
- ۵-۳- شکاف‌های پژوهشی استخراج‌شده..... ۳۹
- ۳-۵-۱- وابستگی به داده‌های حالت..... ۳۹
- ۳-۵-۲- حساسیت به نویز اندازه‌گیری..... ۳۹
- ۳-۵-۳- نبود معیار کمی برای کیفیت داده..... ۴۰
- ۳-۵-۴- نامعلوم بودن بعد ورودی ناشناخته..... ۴۰
- ۳-۵-۵- پیچیدگی محاسباتی..... ۴۰
- ۳-۵-۶- توسعه به سیستم‌های بزرگ‌مقیاس و توزیع‌شده..... ۴۱
- ۳-۶- جمع‌بندی نهایی و جهت‌گیری پژوهش..... ۴۱
- ۳-۷- پیشنهاد موضوعات پژوهشی..... ۴۲
- ۳-۸- جمع‌بندی پیشنهادها..... ۴۴

مراجع

فهرست اشکال

شکل (۱-۲) دینامیک همگرایی خطای تخمین حالت در یک ریزشبکه DC [۱].....	۲۱
شکل (۲-۲) مقایسه دینامیک خطای تخمین حالت را برای دو طراحی مختلف UIO داده‌محور (با و بدون تنظیم درجات آزادی) [۴].....	۲۲
شکل (۳-۲) خطاهای تخمین جهانی را در دو سناریوی خروجی کامل و کاهش‌یافته در یک بنچ‌مارک شبکه قدرت [۵].....	۲۸

فهرست جداول

جدول (۱-۲) مقایسه شرایط وجود UIO در رویکردهای مدل مبنا و داده‌راند [۴].....	۲۵
جدول (۱-۳) جمع‌بندی تحول رویکردهای طراحی رویتگر.....	۳۶
جدول (۲-۳) جمع‌بندی تحول رویکردهای طراحی رویتگر.....	۳۷
جدول (۳-۳) جمع‌بندی تحول رویکردهای طراحی رویتگر.....	۴۱
جدول (۴-۳) مقایسه سه موضوع پیشنهادی.....	۴۳

فصل ۱:

مقدمه

۱-۱- مقدمه و اهمیت داده در سیستم‌های کنترلی

در دهه‌های اخیر، توسعه سریع فناوری‌های اندازه‌گیری، حسگرهای هوشمند، سامانه‌های پایش، تجهیزات ارتباطی و ظرفیت‌های ذخیره‌سازی داده، موجب افزایش قابل توجه حجم و تنوع داده‌های حاصل از سیستم‌های دینامیکی شده است. سیستم‌های صنعتی، شبکه‌های انرژی، سامانه‌های حمل‌ونقل، فرآیندهای تولیدی، سیستم‌های رباتیکی و شبکه‌های چندعامله به‌طور پیوسته اطلاعاتی از وضعیت داخلی و رفتار ورودی-خروجی خود تولید می‌کنند. این داده‌ها، علاوه بر آنکه برای پایش و تشخیص خطا مورد استفاده قرار می‌گیرند، می‌توانند اطلاعات ارزشمندی درباره دینامیک سیستم، ویژگی‌های کنترلی و قابلیت تخمین حالت آن در اختیار قرار دهند.

در روش‌های کلاسیک کنترل، تحلیل و طراحی کنترل‌کننده یا تخمین‌زن معمولاً بر اساس یک مدل ریاضی از سیستم انجام می‌شود. برای نمونه، در سیستم‌های خطی، ماتریس‌های دینامیکی و ورودی-خروجی مانند A ، B ، C و در صورت وجود اغتشاش، ماتریس توزیع ورودی ناشناخته E ، نقش اساسی در طراحی کنترل‌کننده‌ها و رویتگرها دارند. اگر این ماتریس‌ها به‌صورت دقیق در دسترس باشند، بسیاری از نتایج قدرتمند نظریه کنترل را می‌توان مستقیماً به کار گرفت. با این حال، در سیستم‌های واقعی، دستیابی به چنین مدل دقیقی همواره امکان‌پذیر نیست. پیچیدگی ساختاری، تغییرات پارامتری، غیرخطی بودن، عدم قطعیت، وجود دینامیک‌های ناشناخته و هزینه بالای آزمایش‌های شناسایی از جمله عواملی هستند که استفاده مستقیم از مدل‌های دقیق را دشوار می‌کنند.

در چنین شرایطی، رویکردهای داده‌محور به‌عنوان یک مسیر جایگزین یا مکمل برای روش‌های مدل‌محور مطرح شده‌اند. ایده اصلی این روش‌ها آن است که به جای آنکه ابتدا مدل ریاضی سیستم شناسایی و سپس بر اساس آن کنترل‌کننده یا رویتگر طراحی شود، می‌توان برخی ویژگی‌های موردنیاز برای طراحی را مستقیماً از داده‌های اندازه‌گیری‌شده استخراج کرد. در این چارچوب، داده صرفاً یک ابزار برای

تخمین پارامترهای مدل نیست، بلکه می‌تواند مستقیماً اطلاعات لازم درباره رفتار دینامیکی و خواص کنترلی سیستم را در خود داشته باشد.

اهمیت این دیدگاه زمانی بیشتر آشکار می‌شود که داده‌های کافی و غنی از یک سیستم در اختیار باشد. اگر داده‌ها شرایط لازم از نظر غنای اطلاعاتی را داشته باشند، می‌توان از آنها برای نمایش مجموعه‌ای از رفتارهای ممکن سیستم استفاده کرد. بنابراین، مسئله اصلی از «چگونه مدل سیستم را شناسایی کنیم؟» به «آیا داده‌های موجود اطلاعات کافی برای انجام هدف کنترلی موردنظر را در اختیار دارند؟» تغییر می‌کند. این تغییر دیدگاه، مبنای نظری بسیاری از روش‌های جدید کنترل و تخمین داده‌محور است.

در حوزه تخمین حالت نیز این موضوع اهمیت ویژه‌ای دارد. حالت داخلی سیستم معمولاً مستقیماً قابل اندازه‌گیری نیست و لازم است با استفاده از ورودی‌ها و خروجی‌های موجود تخمین زده شود. هنگامی که علاوه بر ورودی شناخته‌شده، اغتشاش یا ورودی ناشناخته نیز در سیستم وجود داشته باشد، مسئله تخمین حالت پیچیده‌تر می‌شود. رویکردهای ورودی-ناشناخته یا UIO^1 ها دقیقاً با هدف مواجهه با این شرایط توسعه یافته‌اند. از این رو، ترکیب نظریه UIO با چارچوب‌های داده‌محور می‌تواند زمینه‌ای مناسب برای طراحی رویکردهایی فراهم کند که بدون نیاز به در اختیار داشتن مدل صریح سیستم، از اطلاعات موجود در داده‌ها استفاده می‌کنند.

۱-۲- دلایل بهره‌گیری از رویکرد داده‌محور

گذار از روش‌های کاملاً مدل‌محور به روش‌های داده‌محور صرفاً ناشی از افزایش حجم داده‌ها نیست، بلکه نتیجه مجموعه‌ای از محدودیت‌های عملی و نظری در مدل‌سازی سیستم‌های واقعی است. در بسیاری از کاربردهای مهندسی، مدل‌سازی دقیق یک سیستم نیازمند شناخت ساختار فیزیکی، پارامترهای داخلی، روابط بین اجزا و شرایط کاری آن است. حتی در صورت وجود مدل اولیه، پارامترهای آن ممکن است در

¹ Unknown Input Observer

طول زمان تغییر کنند و مدل حاصل با رفتار واقعی سیستم فاصله بگیرد. رویکرد داده‌محور تلاش می‌کند این وابستگی را کاهش داده و مستقیماً از اطلاعات تجربی سیستم استفاده کند.

۱-۲-۱- کاهش هزینه و پیچیدگی مدل‌سازی

یکی از مهم‌ترین مزایای روش‌های داده‌محور، کاهش وابستگی به مدل ریاضی دقیق است. در سیستم‌های بزرگ‌مقیاس، استخراج مدل کامل می‌تواند نیازمند تعداد زیادی معادله، پارامتر فیزیکی و فرضیات ساده‌کننده باشد. این مسئله در شبکه‌های برق هوشمند، سامانه‌های چندعامله، سیستم‌های حمل‌ونقل و فرآیندهای صنعتی پیچیده بیشتر مشاهده می‌شود [۱].

در چنین سیستم‌هایی ممکن است ساختار کلی سیستم شناخته شده باشد، اما برخی پارامترها، دینامیک‌های داخلی یا نحوه توزیع اغتشاش‌ها به صورت دقیق در دسترس نباشند. روش‌های داده‌محور می‌توانند با استفاده از داده‌های ورودی-خروجی یا داده‌های حالت، اطلاعات لازم برای تحلیل یا طراحی را مستقیماً استخراج کنند. در نتیجه، یک مرحله کامل از فرآیند سنتی طراحی، یعنی شناسایی صریح مدل، می‌تواند در برخی چارچوب‌ها حذف یا ساده شود.

۱-۲-۲- انعطاف‌پذیری در برابر تغییرات سیستم

سیستم‌های واقعی معمولاً ثابت و ایده‌آل نیستند. تغییر شرایط کاری، تغییر بار، تغییر پارامترها، فرسودگی تجهیزات و تغییر محیط عملیاتی می‌تواند رفتار دینامیکی سیستم را تحت تأثیر قرار دهد. در یک روش مدل‌محور، چنین تغییراتی ممکن است نیازمند بازتنظیم پارامترهای مدل یا حتی شناسایی مجدد سیستم باشد.

در مقابل، در روش‌های داده‌محور، داده‌های جدید می‌توانند مستقیماً در فرآیند تحلیل و طراحی مورد

استفاده قرار گیرند. بنابراین، در صورت وجود داده‌های مناسب، امکان به‌روزرسانی دانش مربوط به سیستم بدون بازسازی کامل مدل وجود دارد. البته این مزیت به کیفیت، تنوع و غنای داده‌ها وابسته است و نمی‌توان صرفاً با افزایش تعداد داده‌ها تضمین کرد که اطلاعات کافی برای هدف موردنظر وجود دارد.

۱-۲-۳- استفاده مستقیم از داده‌های تاریخی

در بسیاری از کاربردهای عملی، داده‌های ثبت‌شده از عملکرد سیستم طی دوره‌های طولانی در دسترس هستند. این داده‌ها می‌توانند شامل اندازه‌گیری ورودی‌ها، خروجی‌ها و در برخی موارد متغیرهای حالت باشند. استفاده از چنین داده‌هایی امکان تحلیل سیستم را بدون انجام آزمایش‌های اضافی فراهم می‌کند. این ویژگی به‌خصوص در سیستم‌هایی اهمیت دارد که انجام آزمایش‌های کنترلی یا اعمال تحریک‌های خاص به آنها پرهزینه، دشوار یا حتی خطرناک است. در چنین شرایطی، استفاده از داده‌های عملیاتی موجود می‌تواند گزینه مناسبی برای استخراج اطلاعات دینامیکی سیستم باشد.

۱-۲-۴- کاهش وابستگی به شناخت ساختار ورودی‌های ناشناخته

در طراحی UIO، یکی از چالش‌های مهم، شناخت نحوه ورود اغتشاش یا ورودی ناشناخته به سیستم است. در روش مدل‌محور، ماتریس E معمولاً باید مشخص باشد یا دست‌کم ساختار آن باید در طراحی لحاظ شود. در کاربردهای واقعی، ممکن است نه تنها مقدار ورودی ناشناخته، بلکه مسیر ورود آن نیز مشخص نباشد.

یک چارچوب داده‌محور می‌تواند این مسئله را از دیدگاه متفاوتی بررسی کند. به جای فرض اینکه ساختار کامل اغتشاش از ابتدا شناخته شده است، می‌توان پرسید آیا داده‌های موجود به اندازه کافی اطلاعات دارند که وجود یک رویتگر مقاوم در برابر ورودی‌های ناشناخته را تضمین کنند یا خیر. این دیدگاه

یکی از انگیزه‌های اصلی توسعه UIO های داده‌محور محسوب می‌شود.

۱-۳- کنترل و تخمین حالت با داده

روش‌های داده‌محور کنترل و تخمین بر این ایده استوارند که اطلاعات لازم برای توصیف رفتار سیستم را می‌توان مستقیماً از داده‌های حاصل از سیستم استخراج کرد. یکی از مهم‌ترین مبانی نظری این حوزه، لم بنیادی ویلمز است که ارتباط عمیقی میان داده‌های اندازه‌گیری‌شده و رفتارهای ممکن سیستم خطی برقرار می‌کند [۲].

در چارچوب کلاسیک، معمولاً ابتدا مدل:

$$x(t+1) = Ax(t) + Bu(t) \quad (1-1)$$

و سپس بر اساس ماتریس‌های A و B ، ویژگی‌های سیستم بررسی می‌شود. در رویکرد داده‌محور، هدف آن است که بخشی از این اطلاعات مستقیماً از داده‌های جمع‌آوری‌شده استخراج شود. به بیان دیگر، داده می‌تواند به‌عنوان یک نمایش تجربی از رفتار سیستم در نظر گرفته شود.

این موضوع در تخمین حالت اهمیت خاصی دارد، زیرا رویتگر باید بتواند اطلاعات موجود در خروجی‌ها را به اطلاعات مربوط به حالت داخلی تبدیل کند. اگر داده‌ها به اندازه کافی غنی باشند، می‌توان از روابط بین ورودی، خروجی و حالت برای طراحی یک تخمین‌زن استفاده کرد، حتی اگر ماتریس‌های مدل صریح سیستم در دسترس نباشند.

۱-۳-۱- لم بنیادی ویلمز

یکی از نتایج بنیادی در توسعه روش‌های داده‌محور، لم بنیادی ویلمز^۱ است که توسط ویلمز و همکاران در سال ۲۰۰۵ ارائه شد [۲]. این لم نشان می‌دهد که تحت شرایط مناسب، داده‌های یک آزمایش به اندازه کافی غنی می‌توانند تمام رفتارهای یک سیستم خطی زمان‌ناورد را در خود جای دهند.

فرض کنید داده‌های ورودی و خروجی سیستم به صورت:

$$u(0), u(1), \dots, u(T-1) \quad (۲-۱)$$

و

$$y(0), y(1), \dots, y(T-1) \quad (۳-۱)$$

در یک آزمایش ثبت شده باشند. با استفاده از این داده‌ها می‌توان ماتریس‌های هنکل تشکیل داد. به صورت کلی، ماتریس هنکل یک سیگنال u با عمق L به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$H_L(u) = \begin{bmatrix} u(0) & u(1) & \dots & u(T-L) \\ u(1) & u(2) & \dots & u(T-L+1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u(L-1) & u(L) & \dots & u(T-1) \end{bmatrix} \quad (۴-۱)$$

در این چارچوب، شرط مهم تحریک‌پذیری پایدار^۲ است. اگر سیگنال ورودی از مرتبه مناسب به‌طور پایدار تحریک‌کننده باشد، ستون‌های ماتریس هنکل حاصل می‌توانند مجموعه‌ای از رفتارهای سیستم را تولید کنند.

برای سیستم خطی زمان‌ناورد با بعد حالت n ، اگر ورودی به اندازه کافی غنی باشد، یک تراز ورودی-خروجی جدید را می‌توان به صورت ترکیب خطی از داده‌های ثبت‌شده نمایش داد. این ویژگی اساس بسیاری از روش‌های مدرن داده‌محور برای کنترل، شناسایی ضمنی و تخمین حالت است.

^۱ Willems' Fundamental Lemma

^۲ Persistent Excitation

در بیان ساده، لم بنیادی ویلمز این امکان را فراهم می‌کند که به جای استفاده مستقیم از مدل (۱-۱) از داده‌های جمع‌آوری شده برای بازنمایی رفتارهای سیستم استفاده شود. بنابراین، داده به‌نوعی نقش یک مدل تجربی از سیستم را ایفا می‌کند، با این تفاوت که لازم نیست ماتریس‌های دینامیکی به‌صورت صریح محاسبه یا شناسایی شوند.

در مسائل مربوط به UIO، این ویژگی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند؛ زیرا هدف آن است که از روابط موجود در داده‌ها برای طراحی تخمین‌زنی استفاده شود که اثر ورودی ناشناخته را در خطای تخمین حذف یا سرکوب کند.

۱-۳-۲- مفهوم اطلاعات پذیری بودن داده‌ها

مفهوم اطلاعات پذیری^۱ یا «اطلاع‌رسان بودن داده‌ها» یکی دیگر از مفاهیم اساسی در نظریه داده‌محور است. این مفهوم توسط وان وارد و همکاران در چارچوب تحلیل ویژگی‌های سیستمی و طراحی کنترل مطرح و توسعه داده شده است [۲].

ایده اصلی آن است که صرفاً داشتن داده کافی نیست؛ بلکه داده باید اطلاعات لازم برای هدف مشخص موردنظر را در خود داشته باشد. به عبارت دیگر، یک مجموعه داده ممکن است برای شناسایی یک ویژگی خاص کافی باشد، اما برای شناسایی یا تضمین ویژگی دیگری کافی نباشد.

فرض کنید مجموعه‌ای از داده‌های اندازه‌گیری شده در اختیار باشد و مجموعه‌ای از تمام سیستم‌هایی که با این داده‌ها سازگار هستند تعریف شود. داده‌ها برای یک ویژگی مشخص، مانند کنترل‌پذیری، مشاهده‌پذیری یا پایداری، اطلاعات پذیری نامیده می‌شوند اگر تمام سیستم‌های سازگار با داده‌ها دارای آن ویژگی باشند.

این تعریف اهمیت اساسی دارد، زیرا در روش‌های داده‌محور نمی‌توان صرفاً از یک مدل سازگار با داده‌ها

^۱ Informativity

نتیجه‌گیری کرد. اگر چندین سیستم مختلف بتوانند همان داده‌ها را تولید کنند و برخی دارای ویژگی موردنظر و برخی فاقد آن باشند، داده‌های موجود برای تضمین آن ویژگی کافی نیستند.

برای نمونه، اگر هدف بررسی کنترل‌پذیری سیستم باشد، باید داده‌ها به اندازه‌ای غنی باشند که کنترل‌پذیری تمام مدل‌های سازگار با آنها یکسان باشد. همین منطق در مسئله مشاهده‌پذیری و طراحی UIO نیز مطرح می‌شود.

در برخی شرایط، داده‌های حالت و ورودی:

$$(\bar{U}, X) \quad (5-1)$$

برای شناسایی سیستم informative هستند، اگر شرط رتبه‌ای مناسب برقرار باشد، از جمله رابطه:

$$\text{rank} \begin{bmatrix} \bar{X} & \bar{U} \end{bmatrix} = n + m \quad (6-1)$$

که در آن n بعد حالت و m بعد ورودی است. بنابراین، اطلاعات پذیری را می‌توان حلقه ارتباطی میان «داده» و «ویژگی موردنظر سیستم» دانست. این مفهوم در پژوهش حاضر اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا هدف تنها طراحی یک رویتگر سازگار با داده‌های موجود نیست، بلکه باید مشخص شود که آیا داده‌ها اساساً اطلاعات کافی برای تضمین وجود و عملکرد یک UIO را در اختیار دارند یا خیر.

۱-۴- رویتگرهای ورودی-ناشناخته (UIO)

در این بخش به تفصیل به رویتگرهای ورودی-ناشناخته پرداخته خواهد شد.

۱-۴-۱- تعریف و اهمیت

در بسیاری از سیستم‌های دینامیکی واقعی، همه ورودی‌های مؤثر بر سیستم قابل اندازه‌گیری نیستند. بخشی از این ورودی‌ها ممکن است ناشی از اغتشاشات محیطی، خطاهای سنسورها، تغییرات بار، عدم

قطعیتهای مدل، خرابی تجهیزات یا عوامل خارجی باشند. در برخی کاربردهای امنیتی نیز ورودی ناشناخته می تواند ناشی از تغییرات غیرمجاز در سیگنال های سیستم باشد.

اگر این ورودی های ناشناخته مستقیماً در طراحی تخمین زن در نظر گرفته نشوند، ممکن است اثر آنها از طریق خروجی به تخمین حالت منتقل شده و موجب ایجاد خطای قابل توجه شود. بنابراین، یکی از اهداف مهم در طراحی تخمین زن های مقاوم، کاهش یا حذف اثر ورودی های ناشناخته از خطای تخمین است.

رویتگر ورودی-ناشناخته UIO نوعی تخمین زن حالت است که با استفاده از ورودی های شناخته شده و خروجی های اندازه گیری شده، حالت داخلی سیستم را تخمین می زند، در حالی که اثر ورودی های ناشناخته در خطای تخمین حذف می شود یا تحت شرایط مشخص به صفر میل می کند [۳]-[۵].

سیستم خطی گسسته زمان زیر را در نظر بگیرید:

$$x(t+1) = Ax(t) + Bu(t) + Ed(t) \quad (7-1)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (8-1)$$

که در آن بردار حالت سیستم، $x(t) \in R^n$ بردار ورودی شناخته شده، $u(t) \in R^m$ بردار ورودی شناخته شده، $y(t) \in R^p$ بردار خروجی اندازه گیری شده و $d(t) \in R^r$ بردار ورودی ناشناخته است. ماتریس E نحوه ورود ورودی ناشناخته به دینامیک سیستم را مشخص می کند. هدف UIO ساختن تخمینی مانند $\hat{x}(t)$ است به گونه ای که خطای تخمین:

$$e(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (9-1)$$

به صفر همگرا شود یا اثر $d(t)$ بر آن حذف شود. بنابراین، برخلاف رویتگرهای معمولی، UIO به طور صریح مسئله وجود ورودی های ناشناخته را در طراحی لحاظ می کند.

یک ساختار رایج برای UIO را می توان به صورت زیر نوشت [۴]:

$$z(t+1) = A_{UIO}z(t) + B_{UIO}v(t) \quad (10-1)$$

$$\hat{x}(t) = z(t) + D_{UIO} v(t) \quad (11-1)$$

که در آن:

$$v(t) = \begin{bmatrix} u(t)^T & y(t)^T \end{bmatrix}^T \quad (12-1)$$

و $z(t)$ متغیر داخلی رویتگر است. ماتریس‌های A_{UIO} ، B_{UIO} و D_{UIO} به گونه‌ای طراحی می‌شوند که دینامیک خطای تخمین مستقل از ورودی ناشناخته بوده و پایدار باشد.

در نتیجه، طراحی UIO را می‌توان به دو هدف اصلی تفکیک کرد: نخست، حذف اثر ورودی ناشناخته از دینامیک خطای تخمین و دوم، تضمین پایداری و همگرایی این خطا. تحقق همزمان این دو هدف به ساختار سیستم و روابط میان A ، E و C وابسته است.

۱-۴-۲- شرایط وجود UIO مدل محور

در چارچوب مدل محور، وجود UIO به ساختار سیستم و به‌ویژه رابطه میان ماتریس توزیع ورودی ناشناخته E و ماتریس خروجی C وابسته است. نتایج کلاسیک ارائه‌شده در [۳]–[۵] شرایطی را برای وجود یک UIO با دینامیک پایدار ارائه می‌کنند.

برای سیستم (۸-۱)، یکی از شرایط اساسی وجود UIO عبارت است از:

$$\text{rank}(CE) = \text{rank}(E) = r \quad (13-1)$$

این شرط بیان می‌کند که اثر ورودی ناشناخته باید از طریق خروجی‌های سیستم به اندازه کافی قابل تشخیص باشد. اگر بخشی از اثر $Ed(t)$ به گونه‌ای وارد سیستم شود که هیچ اثر قابل استخراجی در خروجی نداشته باشد، حذف آن از خطای تخمین عموماً امکان‌پذیر نخواهد بود.

شرط دیگر مربوط به آشکارسازی دینامیک سیستم است و می‌تواند به شکل یک شرط رتبه‌ای روی

ماتریس‌های مربوط به E ، A و C بیان شود. یکی از نمایش‌های رایج آن به صورت:

$$\text{rank}[ZI - A \quad -E \quad C \quad 0] = n + r \quad (14-1)$$

برای مقادیر Z در خارج یا روی مرز دایره واحد و با توجه به قرارداد دقیق تعریف پایداری، بیان می‌شود. این شرط با مفهوم قابلیت تشخیص بالا^۱ ارتباط دارد. به صورت مفهومی، سیستم قابلیت تشخیص بالا است اگر صفر شدن خروجی، در حضور ورودی ناشناخته، موجب شود حالت سیستم نیز در بلندمدت به صفر میل کند. به بیان دیگر، هیچ مؤلفه پایداری ناپذیری از حالت نباید بتواند در حضور ورودی ناشناخته پنهان باقی بماند.

این شرایط نشان می‌دهند که مسئله UIO صرفاً یک مسئله طراحی ماتریس بهره نیست. قبل از طراحی رویتگر، باید مشخص شود که ساختار سیستم اساساً امکان تخمین حالت مستقل از ورودی ناشناخته را فراهم می‌کند یا خیر.

۱-۴-۳- چالش‌های رویکرد مدل محور

اگرچه نظریه مدل محور UIO دارای مبانی ریاضی قدرتمندی است، استفاده از آن در سیستم‌های واقعی با چالش‌هایی همراه است.

➤ نخست، نیاز به مدل دقیق سیستم یکی از محدودیت‌های اصلی است. طراحی UIO کلاسیک بر اساس ماتریس‌هایی مانند A ، B ، C و E انجام می‌شود. در نتیجه، عدم دسترسی به این ماتریس‌ها یا خطای قابل توجه در آنها می‌تواند مستقیماً بر طراحی رویتگر اثر بگذارد.

➤ دوم، حساسیت شرایط رتبه‌ای به خطاهای عددی و عدم قطعیت است. شرایطی مانند:

$$\text{rank}(CE) = \text{rank}(E) \quad (15-1)$$

^۱ Strong Detectability

در حالت تئوری به صورت دقیق تعریف می‌شوند، اما در کاربرد عددی، داده‌ها و پارامترهای مدل

معمولاً همراه با خطا هستند. بنابراین، تشخیص دقیق رتبه می‌تواند در برخی موارد دشوار باشد.

➤ سوم، ناشناخته بودن ساختار ماتریس E است. در بسیاری از سیستم‌های عملی، محل و نحوه ورود

اغتشاش به سیستم مشخص نیست. در این شرایط، حتی اگر مدل A و C شناخته شده باشد،

تعیین دقیق E ممکن است امکان‌پذیر نباشد.

➤ چهارم، تغییرپذیری سیستم است. اگر پارامترهای سیستم در طول زمان تغییر کنند، UIO

طراحی شده بر اساس مدل اولیه ممکن است عملکرد مطلوب خود را از دست بدهد. در چنین

شرایطی، نیاز به بازطراحی یا به‌روزرسانی مدل مطرح می‌شود.

این محدودیت‌ها انگیزه استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده را افزایش می‌دهند. اگر داده‌ها بتوانند

اطلاعات لازم درباره رفتار سیستم و اثر ورودی‌های ناشناخته را در خود جای دهند، می‌توان طراحی UIO را

مستقیماً در فضای داده انجام داد.

۱-۵- انگیزه و ضرورت پژوهش

با توجه به توسعه روش‌های داده‌محور و محدودیت‌های موجود در مدل‌سازی دقیق سیستم‌های واقعی،

طراحی UIO مستقیماً از داده‌ها می‌تواند یک مسیر مهم برای توسعه روش‌های تخمین حالت باشد. ایده

اصلی پژوهش حاضر آن است که اطلاعات لازم برای طراحی و بررسی وجود UIO تا حد امکان از داده‌های

اندازه‌گیری شده استخراج شود و وابستگی به شناسایی صریح مدل کاهش یابد.

در این چارچوب، چند مسئله اساسی مطرح می‌شود.

i. نخست آنکه باید مشخص شود چه شرایطی باعث می‌شوند داده‌های جمع‌آوری شده اطلاعات کافی

برای طراحی UIO داشته باشند. صرفاً داشتن تعداد زیادی نمونه تضمین نمی‌کند که داده‌ها برای

مسئله موردنظر اطلاعات‌پذیری باشند. بنابراین، بررسی ساختار و غنای داده‌ها بخش مهمی از

مسئله خواهد بود.

ii. دوم، لازم است شرایط داده‌محوری که امکان طراحی UIO را تضمین می‌کنند، با شرایط کلاسیک مدل محور ارتباط داده شوند. چنین ارتباطی از نظر نظری اهمیت زیادی دارد، زیرا نشان می‌دهد روش داده‌محور صرفاً یک روش تجربی نیست، بلکه می‌تواند مبنای ریاضی مشخصی داشته باشد. بر این اساس، اهداف اصلی پژوهش را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

۱. حذف یا کاهش وابستگی به شناسایی صریح مدل: توسعه چارچوبی که بتواند طراحی UIO را مستقیماً بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده انجام دهد، بدون آنکه لازم باشد ابتدا ماتریس‌های مدل سیستم به‌طور کامل شناسایی شوند.

۲. تعیین شرایط اطلاعات‌پذیری برای UIO: استخراج شرایطی که مشخص کنند یک مجموعه داده مشخص آیا اطلاعات کافی برای طراحی یا تضمین وجود UIO در اختیار دارد یا خیر،

۳. برقراری ارتباط میان چارچوب داده‌محور و مدل‌محور: بررسی رابطه میان شرایط داده‌محور و شرایط کلاسیک وجود UIO و نشان دادن اینکه تحت فرضیات مناسب، نتایج داده‌محور با نتایج مدل محور سازگار هستند.

۴. مواجهه با ورودی‌های ناشناخته بدون شناخت کامل ساختار اغتشاش: بررسی اینکه چگونه می‌توان اثر ورودی ناشناخته را با استفاده از اطلاعات موجود در داده‌ها مدیریت کرد، حتی در شرایطی که مدل دقیق کانال اغتشاش در دسترس نباشد.

۵. توسعه روش‌های قابل استفاده برای سیستم‌های بزرگ‌مقیاس: بررسی امکان گسترش چارچوب داده‌محور به سیستم‌های چندبخشی و بهم‌پیوسته، به گونه‌ای که هر زیرسیستم بتواند با استفاده از اطلاعات محلی و اطلاعات دریافتی از همسایه‌ها، حالت‌های موردنیاز خود را تخمین بزند.

۶. بررسی قابلیت توسعه روش به ساختارهای توزیع‌شده: در سیستم‌های بزرگ، انتقال تمام داده‌ها به یک واحد مرکزی ممکن است با هزینه ارتباطی و محاسباتی بالا همراه باشد. ازاین‌رو،

استفاده از ساختارهای توزیع شده می تواند امکان مقیاس پذیری روش را افزایش دهد. اهمیت این پژوهش در این است که فاصله میان نظریه کلاسیک UIO و چارچوب های جدید داده محور را کاهش می دهد. در این دیدگاه، داده صرفاً برای شناسایی تقریبی مدل استفاده نمی شود، بلکه مستقیماً به عنوان مبنای تحلیل اطلاعات پذیری و طراحی رویتگر در نظر گرفته می شود.

۱-۶- ساختار رساله

این رساله در سه فصل اصلی سازمان دهی شده است.

فصل اول، مقدمه، به معرفی زمینه پژوهش و تشریح اهمیت استفاده از داده در سیستم های کنترلی اختصاص دارد. در این فصل، ابتدا محدودیت های رویکردهای مدل محور و مزایای بالقوه روش های داده محور بیان می شوند. سپس مفاهیم بنیادی مرتبط با لم ویلمز و اطلاعات پذیری معرفی شده و ارتباط آنها با کنترل و تخمین حالت مورد بررسی قرار می گیرد. در ادامه، ساختار ریاضی سیستم های دارای ورودی ناشناخته، مفهوم UIO، شرایط کلاسیک وجود آن و مهم ترین محدودیت های طراحی مدل محور تشریح می شوند. در پایان نیز انگیزه، ضرورت و اهداف اصلی پژوهش ارائه می شود.

فصل دوم، مرور ادبیات، به بررسی نظام مند مطالعات انجام شده در زمینه کنترل و تخمین داده محور اختصاص دارد. در این فصل ابتدا مبانی نظری مرتبط با لم بنیادی ویلمز و مفهوم تداوم تحریک^۱ بررسی می شود. سپس مطالعات مربوط به اطلاعات پذیری برای ویژگی های مختلف سیستم، از جمله کنترل پذیری و مشاهده پذیری، مرور خواهند شد. در ادامه، روش های موجود برای طراحی رویتگرهای داده محور و به طور خاص UIO های داده محور بررسی و مقایسه می شوند. همچنین مطالعات مرتبط با رویتگرهای توزیع شده و کاربرد آنها در سیستم های بهم پیوسته مورد توجه قرار می گیرند. در پایان فصل، محدودیت ها و شکاف های موجود در مطالعات پیشین استخراج شده و جایگاه پژوهش حاضر نسبت به آنها مشخص می شود.

^۱ Persistency of Excitation

فصل سوم، جمع‌بندی و پیشنهادات، به جمع‌بندی نتایج و یافته‌های اصلی پژوهش اختصاص دارد. در این فصل مهم‌ترین دستاوردهای نظری و روش‌شناختی مرور شده و ارتباط میان چارچوب داده‌محور، اطلاعات پذیری و طراحی UIO تشریح می‌شود. همچنین محدودیت‌های رویکرد مورد بررسی قرار گرفته و مسیرهای پیشنهادی برای تحقیقات آینده، از جمله توسعه روش‌ها برای سیستم‌های غیرخطی، سیستم‌های دارای نویز، سیستم‌های زمان‌متغیر، ساختارهای توزیع‌شده و کاربردهای مقیاس‌بالاتر ارائه خواهد شد.

فصل ۲:

مروری بر منابع

۲-۱- مقدمه

تخمین دقیق حالت‌های داخلی سیستم‌های دینامیکی، یکی از ارکان بنیادین در طراحی سیستم‌های کنترل پیشرفته، تشخیص خرابی و پایش وضعیت به شمار می‌رود. در دهه‌های گذشته، طراحی رویتگرها عمدتاً بر پایه مدل‌های ریاضی صریح و دقیق استوار بوده است. با این حال، در کاربردهای صنعتی مدرن، دستیابی به مدل‌های دقیق به دلیل وجود عدم قطعیت‌ها، دینامیک‌های پیچیده و هزینه‌بر بودن فرآیند شناسایی سیستم، با چالش‌های جدی مواجه است. ظهور کلان‌داده‌ها و پیشرفت توان محاسباتی، پارادایم جدیدی را تحت عنوان «کنترل و تخمین داده‌محور» پدید آورده است که در آن، طراحی مستقیماً و بدون واسطه‌گری مرحله شناسایی مدل، از روی داده‌های اندازه‌گیری‌شده انجام می‌پذیرد. در این فصل، سیر تکاملی طراحی رویتگرها، با تمرکز ویژه بر رویتگرهای ورودی-ناشناخته (UIO) و رویتگرهای توزیع‌شده، از رویکردهای کلاسیک مدل‌محور تا جدیدترین دستاوردهای داده‌محور، به‌صورت جامع و تحلیلی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه، چالش‌های ذاتی و شکاف‌های تحقیقاتی موجود که مسیر نوآوری‌های این رساله را هموار می‌سازند، استخراج خواهند شد.

۲-۲- تغییر پارادایم: از کنترل مدل‌محور تا رویکردهای داده‌محور

ادبیات کنترل در سال‌های اخیر شاهد گذار تدریجی اما پرشتابی از روش‌های مدل‌محور به روش‌های داده‌محور بوده است. مرورهای جامع نشان می‌دهند که روش‌های مدل‌محور ذاتاً به دقت مدل شناسایی‌شده وابسته‌اند و خطاهای مدل‌سازی می‌توانند منجر به افت شدید عملکرد یا حتی ناپایداری سیستم حلقه بسته شوند [۶]. در مقابل، رویکردهای داده‌محور با حذف مرحله شناسایی صریح، از انعطاف‌پذیری بالاتری برخوردارند [۷]. این تغییر پارادایم در حوزه‌های مختلفی از جمله کنترل پیش‌بین مدل‌آزاد و بهینه‌سازی

داده‌محور نیز بازتاب یافته است [۸].

در سیستم‌های انرژی سایبر-فیزیکی (CPES^۱) و شبکه‌های بزرگ‌مقیاس، روش‌های مبتنی بر لم بنیادی رفتارگرا و یادگیری تقویتی به عنوان دو بازوی اصلی کنترل داده‌محور شناخته می‌شوند [۹]. یکی از مفاهیم کلیدی که در این راستا توسعه یافته است، مفهوم «اطلاع‌بخشی داده‌ها»^۲ است [۲]. این چارچوب نظری نشان می‌دهد که برای حل بسیاری از مسائل تحلیل و کنترل (از جمله پایداری و طراحی رویتگر)، داده‌ها لزومی ندارند که شرط قوی برانگیزش پایدار (PE^۳) را برای شناسایی یکتای سیستم برآورده سازند؛ بلکه کافی است تمام سیستم‌های سازگار با داده‌ها، ویژگی مورد نظر را دارا باشند [۲].

بر اساس نتایج [۳] و [۴]، وجود یک UIO با خطای تخمین همگرای مجانبی، مستلزم برقراری دو شرط اساسی است:

قضیه ۱-۲ (شرایط وجود UIO مدل‌مبنا) [۳] و [۴]: برای سیستم فوق، یک UIO وجود دارد اگر و تنها اگر شرایط زیر برقرار باشند:

شرط مرتبه و ساختار:

$$\text{rank}(CE) = \text{rank}(E) = r \quad (1-2)$$

شرط آشکارسازی قوی برای تمام $z \in \mathbb{C}$ با $|z| \geq 1$ ، شرط رتبه زیر برقرار باشد:

$$\text{rank} \begin{bmatrix} zI - A & -E \\ C & 0 \end{bmatrix} = n + r \quad (2-2)$$

^۱ Cyber-Physical Energy Systems

^۲ Data Informativity

^۳ Persistent Excitation

۲-۳- مبانی کلاسیک رویتگرهای ورودی-ناشناخته (UIO) مدل محور

پیش از ورود به حوزه داده محور، درک شرایط وجود رویتگرهای ورودی-ناشناخته در چارچوب مدل محور ضروری است. در سیستم‌هایی که تحت تأثیر اغتشاشات یا ورودی‌های غیرقابل اندازه‌گیری قرار دارند، رویتگرهای کلاسیک لونبرگر کارایی خود را از دست می‌دهند. نخستین شرایط لازم و کافی برای وجود UIO های مرتبه کامل در سیستم‌های خطی در [۱۰] فرمول‌بندی شد. این شرایط بر پایه جداسازی جبری اثر ورودی ناشناخته و پایدارسازی دینامیک خطای تخمین استوار است.

در [۱۱]، این نتایج برای سیستم‌های گسسته‌زمان توسعه یافت و شرایط آشکارسازی قوی^۱ به عنوان شرط اصلی وجود UIO معرفی گردید. بعدها در [۳]، رویکردی جامع‌تر ارائه شد که نشان داد طراحی UIO مستقل از انتخاب معکوس‌های تعمیم‌یافته ماتریس‌هاست و امکان حضور ورودی ناشناخته در معادلات خروجی را نیز فراهم می‌آورد. بر اساس این مراجع، برای سیستمی با ماتریس‌های (A, E, C) ، وجود UIO مستلزم برقراری شرط رتبه $\text{rank}(CE) = \text{rank}(E)$ و همچنین شرط آشکارسازی قوی سه‌تایی (A, E, C) است.

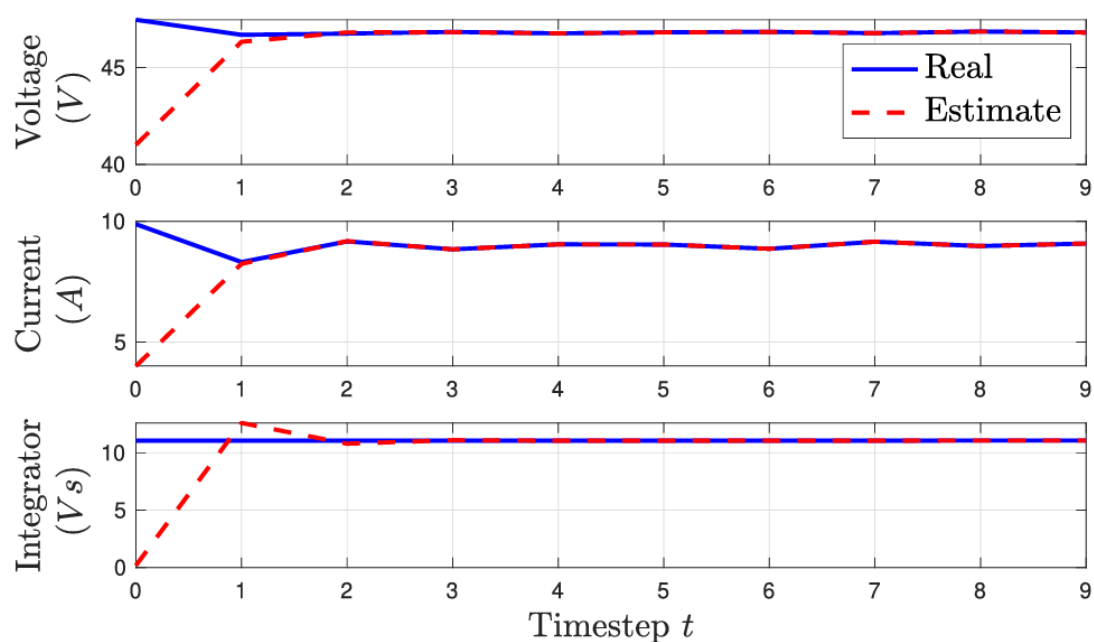
۲-۴- طراحی مستقیم رویتگر و UIO داده محور

طراحی مستقیم UIO از روی داده‌ها، بدون نیاز به شناسایی ماتریس‌های سیستم، یکی از مهم‌ترین دستاوردهای اخیر در ادبیات موضوع است. در [۱]، با بهره‌گیری از نظریه سیستم‌های رفتارگرا و لم بنیادی ویلمز، نخستین فرمول‌بندی داده محور برای UIO ارائه شد. در این روش، با تشکیل ماتریس‌های هانکل از داده‌های تاریخی ورودی، خروجی و حالت، شرط وجود UIO به صورت شمول هسته^۲ ماتریس‌های داده‌های گذشته در داده‌های آینده بیان می‌شود. بر این اساس، شکل (۲-۱) دینامیک همگرایی خطای تخمین حالت

^۱ Strong Detectability

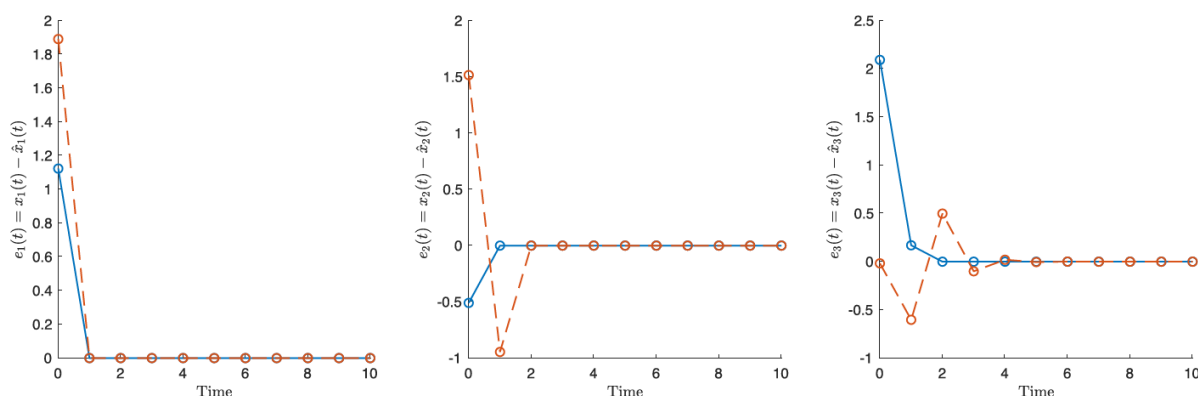
^۲ Kernel Inclusion

در یک ریزشبکه DC را نشان می‌دهد.



شکل (۱-۲) دینامیک همگرایی خطای تخمین حالت در یک ریزشبکه DC [۱]

با این حال، رویکرد [۱] تنها یک جواب خاص برای ماتریس‌های روی‌تگر ارائه می‌داد. در [۴]، این شکاف با ارائه یک پارامترسازی کامل از تمام UIOهای ممکن پر شد. نکته حائز اهمیت در [۴] اثبات این موضوع است که تحت فرضیات ضعیف بر روی داده‌ها، شرایط حل‌پذیری داده‌محور دقیقاً با شرایط مدل‌محور معادل هستند و هیچ‌گونه محافظه‌کاری اضافی تحمیل نمی‌کنند. شکل (۲-۲) نیز مقایسه دینامیک خطای تخمین حالت را برای دو طراحی مختلف UIO داده‌محور (با و بدون تنظیم درجات آزادی) نشان می‌دهد.



شکل (۲-۲) مقایسه دینامیک خطای تخمین حالت را برای دو طراحی مختلف UIO داده‌محور (با و بدون تنظیم درجات آزادی) [۴]

علاوه بر رویکردهای مرتبه کامل، طراحی داده‌محور به رویکردهای مرتبه کاهش‌یافته (rUIO) نیز تعمیم یافته است [۱۲]. در رویکردهای دیگر، از مفاهیمی نظیر زیرفضای توازن^۱ برای طراحی مستقیم رویکردهای تشخیص خطا (FDI^۲) استفاده شده است [۱۳]. همچنین، استفاده از نمایش سیستم‌های دوگان و فرمول‌بندی نامساوی‌های ماتریسی خطی (LMI^۳) برای سنتز رویکردهای داده‌محور در [۱۴] و [۱۵] مورد بررسی قرار گرفته است. معیارهای تشخیص‌پذیری و طراحی رویکر برای سیستم‌های توصیف‌گر^۴ نیز اخیراً در [۱۶] به صورت کاملاً داده‌محور استخراج شده‌اند.

توران و فراری-ترکاته [۱] اولین کار جامع را در زمینه طراحی UIO داده‌راند برای سیستم‌های گسسته‌زمان ارائه دادند. آنها از لم بنیادی ویلمز استفاده کرده و شرایط لازم و کافی برای وجود UIO داده‌راند را بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده ارائه دادند.

داده‌های تاریخی به صورت ماتریس‌های هانکل زیر سازماندهی می‌شوند:

^۱ Parity Subspace

^۲ Fault Detection and Isolation

^۳ Linear Matrix Inequality

^۴ Descriptor Systems

$$U = H_L(\bar{u}), \quad Y = H_L(\bar{y}), \quad X = H_L(\bar{x}) \quad (3-2)$$

که به بلوک‌های گذشته و آینده تقسیم می‌شوند:

$$U = \begin{bmatrix} U_p \\ U_f \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} Y_p \\ Y_f \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} X_p \\ X_f \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

فرض ۱-۲: داده‌های تاریخی $\{[u_i^{-T} d_i^{-T}]^T\}_{i=0}^{T-1}$ از مرتبه $n+2$ به‌طور پایدار تحریک‌پذیر هستند [۱].

لم ۱-۲: اگر فرض ۱-۲ برقرار باشد، $T_c(v^-, x^-) = T_G$ ، یعنی تمام ترازهای سیستم با داده‌های تاریخی سازگار هستند [۱].

لم ۲-۲: یک سیستم LTI به فرم (۲) وجود دارد که تمام ترازهای سازگار با داده‌های تاریخی را تولید می‌کند اگر و تنها اگر:

$$\ker \begin{bmatrix} V_p \\ X_p \\ V_f \end{bmatrix} \quad (5-2)$$

قضیه ۲-۲ (UIO داده‌راند) [۱]: تحت فرض ۱-۲، یک UIO به فرم (۲) با ماتریس‌های داده‌شده در رابطه وجود دارد اگر و تنها اگر شرط بالا برقرار باشد و $X_f \Delta_{X_p}$ پایدار^۱ باشد. تخمین‌های حالت از طریق فرمول تکراری زیر محاسبه می‌شوند:

$$\hat{x}_{t+1} = X_f \Delta \begin{bmatrix} u_t^T & y_t^T & \hat{x}_t^T & u_{t+1}^T & y_{t+1}^T \end{bmatrix}^T \quad (6-2)$$

این روش بر روی ریزشک‌های DC اعمال شده است.

دیسارو و والچر [۴] شرایط لازم و کافی برای وجود UIO داده‌راند را ارائه دادند و اثبات کردند که تحت فرضیات ضعیف روی داده‌های جمع‌آوری شده، شرایط حل‌پذیری داده‌راند معادل شرایط مدل‌مبنا است.

^۱ Schur

داده‌های تاریخی به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} U_p &= [u_d(0) \dots u_d(T-2)], \quad X_p = [x_d(0) \dots x_d(T-2)] \\ X_f &= [x_d(0) \dots x_d(T-1)], \quad Y_p = [y_d(0) \dots y_d(T-2)] \\ Y_f &= [y_d(1) \dots y_d(T-1)] \end{aligned} \quad (7-2)$$

فرض ۲-۲: اندازه r ورودی ناشناخته معلوم است و ماتریس $[U_p^T D_p^T X_p^T]^T$ از رتبه کامل سطری است [۴].

لم ۳-۲: تحت فرض ۲-۲، ترازهای تولیدشده توسط سیستم Σ همان‌هایی هستند که با داده‌های تاریخی سازگارند [۴].

قضیه ۳-۲: تحت فرض ۲-، حقایق زیر معادل هستند [۴]:

i. یک UIO به فرم (۳)-(۴) وجود دارد که $T_\Sigma \subseteq T_\Sigma$

ii. ماتریس‌های T_1, T_2, T_3, T_4 وجود دارند که

$$X_f = \begin{bmatrix} T_1 & T_2 & T_3 & T_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_p \\ Y_p \\ Y_f \\ X_p \end{bmatrix} \quad (8-2)$$

و T_4 پایدار است.

iii. شرایط زیر برقرارند:

$$\ker(X_f) \supseteq \ker \begin{bmatrix} U_p \\ Y_p \\ Y_f \\ X_p \end{bmatrix} \quad (9-2)$$

$$\text{rank} \begin{bmatrix} zX_p - X_f \\ U_p \\ Y_p \end{bmatrix} = n + m + r, \quad \forall z \in C, \quad |z| \geq 1 \quad (10-2)$$

این قضیه نشان می‌دهد که شرایط داده‌راند معادل شرایط مدل مبنا هستند و هیچ محدودیت اضافی تحمیل نمی‌کنند. نتایج این موضوع در جدول (۱-۲) آورده شده است.

جدول (۱-۲) مقایسه شرایط وجود UIO در رویکردهای مدل مبنا و داده‌راند [۴]

داده‌راند	مدل مبنا	شرط
$\ker(X_f) \supseteq \ker \begin{bmatrix} U_p \\ Y_p \\ Y_f \\ X_p \end{bmatrix}$	$\text{Rank}(\text{CE}) = r$	شرط ۱
$\text{rank} \begin{bmatrix} zX_p - X_f \\ U_p \\ Y_p \end{bmatrix} = n + m + r$	$\text{rank} \begin{bmatrix} zI - A & -E \\ C & 0 \end{bmatrix} = n + r$	شرط ۲
$T_4 \text{ Schur}$	$A_{\text{UIO}} \text{ Schur}$	پایداری

۲-۵- رویتگرهای اغتشاش (DOB)، حالت گسترش یافته (ESO) و تطبیقی

در بسیاری از کاربردها، به جای جداسازی کامل ورودی ناشناخته، از رویتگرهای اغتشاش (DOB^1) یا حالت گسترش یافته (ESO^2) برای تخمین همزمان حالت و اغتشاشات استفاده می‌شود. در [۱۷] و [۱۸]، با استفاده از خطی سازی دینامیکی (DL^3) و تطبیق آنلاین پارامترها، رویتگرهای ESO داده‌محوری برای سیستم‌های غیرخطی و غیرآفین طراحی شده‌اند.

^۱ Disturbance Observer

^۲ Extended State Observer

^۳ Dynamic Linearization

تخمین همزمان بهره ورودی ناشناخته و اغتشاشات تجمعی در سیستم‌های دریایی [۱۹]، [۲۰] و مبدل‌های DC-DC [۲۱] از طریق رویکردهای تطبیقی داده‌محور ($DADO^1/DAESO^2$) انجام شده است. در [۲۲]، با ساخت دینامیک معکوس سیستم از روی داده‌ها، یک DOB داده‌محور برای دفع اغتشاش ارائه گردیده است. رویکردهای پیش‌بین برای ربات‌های نرم [۲۳] و تخمین نیروهای تماسی [۲۴]، و همچنین رویکردهای تکانه^۳ مبتنی بر فرآیندهای گاوسی برای سیستم‌های مکانیکی [۲۵]، نشان‌دهنده تنوع کاربردهای DOB داده‌محور هستند.

در حوزه کنترل پیش‌بین (MPC^4) و کنترل تکراری یادگیری (ILC^5)، ترکیب DOB و ESO با ساختارهای داده‌محور برای جبران اغتشاشات و محدودیت‌های ورودی به کار رفته است [۲۶]، [۲۷]، [۲۸]، [۲۹]. همچنین، رویکردهای آبشاری برای تخمین همزمان وضعیت شارژ و سلامت باتری‌ها [۳۰]، و رویکردهای مبتنی بر رویداد-محرك برای سیستم‌های شبکه‌ای [۳۱] و کنترل سرعت موتورهای PMSM^۶ [۳۲] توسعه یافته‌اند. در ربات‌های صنعتی و مفصل انعطاف‌پذیر نیز از DOB‌های داده‌محور مبتنی بر پاسخ فرکانسی (FRF^7) برای جبران خطاهای مسیر و ارتعاشات استفاده شده است [۳۳]، [۳۴].

۲-۶- رویکردهای داده‌محور برای سیستم‌های غیرخطی و مبتنی بر یادگیری ماشین

طراحی رویکر برای سیستم‌های غیرخطی به دلیل نیاز به حل معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی

^۱ Data-Driven Adaptive Disturbance Observer

^۲ Data-Driven Adaptive Extended State Observer

^۳ Momentum

^۴ Model Predictive Control

^۵ Iterative Learning Control

^۶ Permanent Magnet Synchronous Motor

^۷ Frequency Response Function

(PDE^۱) در رویکردهای کلاسیک (مانند رویتگر^۲ KKL) بسیار چالش برانگیز است. استفاده از اپراتور کوپمن و توابع ویژه آن، این امکان را فراهم آورده است که نگاشت‌های تزریقی رویتگر به صورت ترکیب خطی از توابع پایه یادگیری ماشین^۳ شوند [۳۵]، [۳۶]، [۳۷].

علاوه بر این، معماری‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی، از جمله Autoencoderها برای بازسازی فضای حالت [۳۸]، شبکه‌های LSTM^۴ و GRU^۵ برای تخمین زاویه لغزش خودرو [۳۹]، و معماری‌های مبدل^۶ برای تخمین نیروی تایلر [۴۰]، به طور گسترده‌ای برای غلبه بر غیرخطی‌ها به کار رفته‌اند. در [۴۱]، از ساختارهای کانونیکال عصبی (Brunovsky) برای طراحی رویتگر استفاده شده است. همچنین، استفاده از تمایز خودکار^۷ برای تقریب فرم کانونیکال مشاهده‌پذیری [۴۲] و رویکردهای ترتیبی آنلاین برای جلوگیری از بهره‌برداری نادرست از مدل^۸ [۴۳]، از دیگر دستاوردهای این حوزه است. برای سیستم‌های فازی توصیف‌گر با داده‌های خروجی نمونه‌برداری شده نیز رویتگرهای تطبیقی آفلاین در [۴۴] پیشنهاد شده‌اند. در نهایت، کاربرد این روش‌ها در سیستم‌های حساس مانند کنترل وضعیت ماهواره‌ها در [۴۵] اعتبارسنجی شده است.

۲-۷- رویتگرهای توزیع شده، سیستم‌های بهم پیوسته و امنیت سایبری

با گسترش ابعاد سیستم‌ها، رویکردهای متمرکز کارایی خود را از دست می‌دهند. در سیستم‌های

^۱ Partial Differential Equation

^۲ Kazantzis–Kravaris–Luenberger

^۳ machine learning

^۴ Long Short-Term Memory

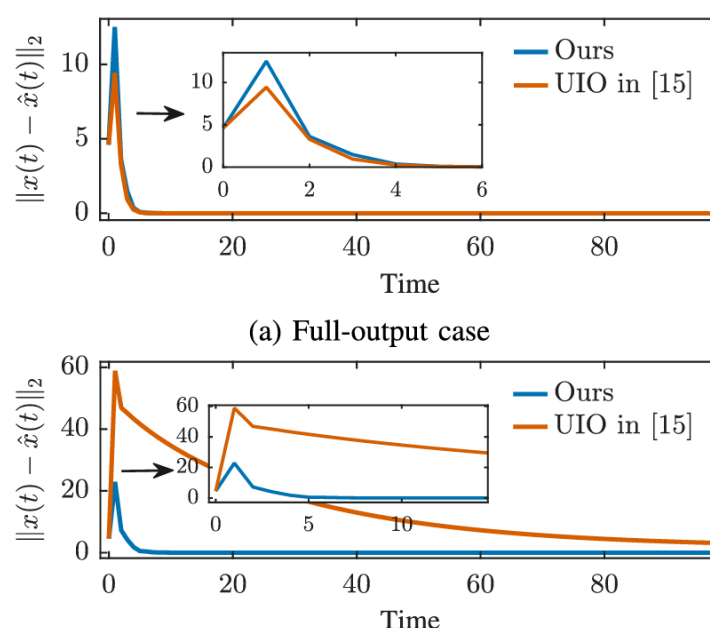
^۵ Gated Recurrent Unit

^۶ Transformer

^۷ Automatic Differentiation

^۸ Model Exploitation

به هم پیوسته، کوپلینگ‌های بین زیرسیستم‌ها معمولاً به عنوان ورودی ناشناخته مدل‌سازی می‌شوند. در [۵]، یک رویکرد توزیع‌شده داده‌محور توسعه یافته است که در آن، به جای نادیده گرفتن اطلاعات همسایه‌ها، خروجی‌های آن‌ها به صراحت در ساختار رویکرد محلی گنجانده می‌شوند تا اثر کوپلینگ‌ها در دینامیک خطا خنثی گردد. این رویکرد، شرایط محافظه‌کارانه روش‌های غیرمتمرکز محض را برطرف می‌سازد. شکل (۲-۳) از مرجع [۵] خطاهای تخمین جهانی را در دو سناریوی خروجی کامل و کاهش‌یافته در یک بنچ‌مارک شبکه قدرت مقایسه می‌کند.



شکل (۲-۳) خطاهای تخمین جهانی را در دو سناریوی خروجی کامل و کاهش‌یافته در یک بنچ‌مارک شبکه قدرت [۵]

توسعه این مفاهیم به سیستم‌های زمان پیوسته در [۴۶] و نسخه‌های کنفرانسی آن [۴۷] انجام شده است. در زمینه امنیت سایبری و تشخیص خرابی، رویکردهای داده‌محور برای مقابله با حملات تزریق داده نادرست (FDI) و انکار سرویس (DoS)^۱ در سیستم‌های چندعاملی [۴۸] و شبکه‌های قدرت [۱۳]، [۴۹] به کار رفته‌اند. بنچ‌مارک‌های استاندارد مانند Hycon2 [۵۰] بستر مناسبی برای ارزیابی این رویکردهای

^۱ Denial of Service

توزیع شده در سناریوهای مختلف شبکه برق فراهم آورده اند.

مرجع [۱۲] روش داده راند را به طراحی رویتگرهای ورودی-ناشناخته مرتبه کاهش یافته (rUIO) گسترش دادند. آنها ابتدا راه حل مدل مبنا را با فرضیه ای متفاوت از ادبیات سنتی یادآوری کردند تا بتوانند آن را به راحتی با سناریوی داده راند تطبیق دهند. شرایط لازم و کافی برای وجود rUIO که ماتریس های آن می توانند از یک مجموعه داده تاریخی به اندازه کافی غنی استخراج شوند، ابتدا استخراج و سپس ثابت شد که با شرایط به دست آمده در چارچوب مدل مبنا معادل هستند.

الف) سیستم های زمان پیوسته

وی و همکاران [۷]، [۱۳] یک رویتگر توزیع شده ورودی-ناشناخته داده راند (D-DUIO) برای سیستم های LTI زمان پیوسته ناشناخته توسعه دادند. آنها ابتدا یک رویکرد مدل مبنا برای طراحی DUIO ارائه دادند، سپس نشان دادند که تحت فرضیات مناسب روی داده های ورودی/خروجی/حالت جمع آوری شده از سیستم زمان پیوسته، امکان هم ادعای وجود D-DUIO و هم استخراج ماتریس های آن بر حسب ماتریس های داده های از پیش جمع آوری شده وجود دارد.

ب) سیستم های به هم پیوسته گسسته زمان

گوی و همکاران [۵] مسئله طراحی رویتگر توزیع شده برای سیستم های به هم پیوسته خطی با دینامیک

ناشناخته را با استفاده از داده های آفلاین بررسی کردند. ایده کلیدی آنها گنجاندن صریح خروجی های همسایه است تا ترم های کوپلینگ در دینامیک خطای محلی لغو شوند، به جای اینکه صرفاً به عنوان ورودی های ناشناخته در نظر گرفته شوند.

سیستم به هم پیوسته با N زیرسیستم به صورت زیر توصیف می شود:

$$S_i : \begin{cases} x_i(t+1) = A_i x_i(t+1) + \sum_{j \in N_i} A_{i,j} x_j(t) \\ y_i(t) = C_i x_i(t) \end{cases} \quad (11-2)$$

رویتگر توزیع شده پیشنهادی به فرم زیر است:

$$O_i: \begin{cases} z_i(t+1) = E_i z_i(t) + L_i y_i(t) + \sum_{j \in N_i} L_{i,j} y_j(t) \\ \hat{x}_i(t+1) = z_i(t+1) + H_i y_i(t+1) \end{cases} \quad (12-2)$$

فرض ۳-۲: ماتریس $\text{col}(X_{p,i}, \tilde{X}_{p,i})$ دارای رتبه کامل سطری است [۵].

قضیه ۴-۲: تحت فرض ۳-۲، یک رویتگر توزیع شده همگرای مجانبی به فرم (۲) وجود دارد اگر و تنها

اگر شرایط زیر برقرار باشند [۵]:

$$D1: \ker(Q_i) \subseteq \ker(X_{f,i})$$

D2: برای حداقل یک جواب K_i از $X_{f,i} = K_i Q_i$ ، ماتریس E_i حاصل که در رابطه تعریف شده، Schur

پایدار باشد.

این شرایط داده‌راند با شرایط مدل‌مبنا معادل هستند.

قضیه ۵-۲: تحت فرض ۳-۲، شرایط داده‌راند (D1) و (D2) در قضیه ۴-۲ با شرایط مدل‌مبنا (M1) و

(M2) در لم ۱ معادل هستند [۵].

این نتیجه نشان می‌دهد که طراحی مستقیم از داده هیچ محافظه‌کاری اضافی نسبت به مسیر مدل‌مبنا

معرفی نمی‌کند.

۲-۸- چالش‌ها، محدودیت‌ها و شکاف‌های تحقیقاتی

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در [۱] تا [۵] و سایر مراجع مرور شده، تحلیل انتقادی ادبیات موضوع

نشان می‌دهد که چالش‌های بنیادین زیر همچنان به عنوان شکاف‌های تحقیقاتی باز مانده‌اند:

۱. نیاز به داده‌های حالت در فاز آفلاین: تقریباً تمامی روش‌های دقیق داده‌محور ([۱]، [۴]، [۵]،

[۴۶]) فرض می‌کنند که در مرحله کالیبراسیون آفلاین، داده‌های حالت $(x(t))$ در دسترس هستند.

در بسیاری از سیستم‌های صنعتی بزرگ‌مقیاس، نصب سنسورهای حالت حتی به‌صورت موقت

غیرممکن یا بسیار پرهزینه است. توسعه روش‌هایی که تنها با داده‌های ورودی-خروجی کار کنند، یک ضرورت اساسی است.

۲. حساسیت ذاتی به نویز و شرایط رتبه: شرایط وجود UIO (مانند شمول هسته و شرایط رتبه ماتریس‌های هانکل) در محیط‌های بدون نویز تعریف شده‌اند. در عمل، نویز اندازه‌گیری باعث می‌شود ماتریس‌ها هرگز رتبه دقیق نظری را نداشته باشند که این امر منجر به خطاهای بزرگ تخمین و ناپایداری رویتگر می‌گردد. فقدان یک چارچوب داده‌محور مقاوم^۱ که کران‌های نویز را در فرمول‌بندی بهینه‌سازی لحاظ کند، به شدت احساس می‌شود.

۳. فرضیات اطلاع‌بخشی و برانگیزش پایدار: بررسی عملی شرط برانگیزش پایدار برای ورودی‌های ناشناخته (که اندازه‌گیری نمی‌شوند) غیرممکن است [۱]. ارائه معیارهای کمی برای سنجش میزان «اطلاع‌بخشی» داده‌ها و طراحی سیگنال‌های تحریک بهینه برای جمع‌آوری داده‌های آفلاین نیازمند تحقیقات بیشتر است.

۴. عدم قطعیت در بعد و ساختار ورودی ناشناخته: در [۴] فرض شده است که بعد ورودی ناشناخته (r) از قبل معلوم است. در عمل، ممکن است تعداد منابع اغتشاش یا ساختار ماتریس توزیع دقیقاً مشخص نباشد.

۵. پیچیدگی محاسباتی و مقیاس‌پذیری: تشکیل ماتریس‌های هانکل با داده‌های تاریخی طولانی برای سیستم‌های با ابعاد بالا، بار محاسباتی سنگینی را در فاز آفلاین تحمیل می‌کند. توسعه الگوریتم‌های بازگشتی و توزیع‌شده برای به‌روزرسانی آنلاین ماتریس‌های رویتگر بدون نیاز به پردازش بلوک داده‌های عظیم، یک چالش باز در سیستم‌های بهم‌پیوسته است.

^۱ Robust Data-Driven UIO

۲-۹- جمع‌بندی فصل

در این فصل، سیر تکاملی طراحی رویتگرهای ورودی-ناشناخته و اغتشاش از پارادایم مدل‌محور به داده‌محور با مرور جامع ۵۰ مرجع کلیدی مورد بررسی قرار گرفت. نشان داده شد که چگونه مفاهیمی نظیر «اطلاع‌بخشی داده‌ها» و «لم بنیادی رفتارگرا»، امکان طراحی مستقیم رویتگر را بدون نیاز به شناسایی صریح مدل فراهم آورده‌اند. مرور مراجع اصلی (۱۱ تا ۵) اثبات کرد که شرایط وجود داده‌محور، تحت فرضیات مناسب، دقیقاً با شرایط کلاسیک مدل‌محور معادل هستند. همچنین، توسعه این مفاهیم به سیستم‌های بهم‌پیوسته، غیرخطی و شبکه‌ای، گامی مهم در جهت کاربرد این روش‌ها در سیستم‌های بزرگ‌مقیاس تلقی می‌شود. با این وجود، چالش‌های اساسی نظیر نیاز به داده‌های حالت آفلاین، حساسیت به نویز، و پیچیدگی محاسباتی، به‌عنوان شکاف‌های تحقیقاتی اصلی شناسایی شدند که مبنا و انگیزه اصلی برای ارائه معماری‌های نوآورانه و رفع این محدودیت‌ها در فصول آتی این رساله را تشکیل می‌دهند.

فصل ۳:

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

۳-۱- مقدمه

مرور انجام‌شده در فصل دوم نشان داد که طراحی رویتگرهای حالت، به‌ویژه برای سیستم‌های دارای ورودی‌های ناشناخته، در سال‌های اخیر از چارچوب‌های کاملاً مدل‌محور به سمت روش‌های داده‌محور حرکت کرده است. در رویکردهای کلاسیک، طراحی رویتگر ورودی-ناشناخته بر اساس مدل ریاضی سیستم و ماتریس‌هایی نظیر A ، B ، C و E انجام می‌شود و وجود رویتگر به شرایط ساختاری و رتبه‌ای مشخصی وابسته است. اگرچه این چارچوب از پشتوانه نظری قدرتمندی برخوردار است، دستیابی به مدل دقیق، تعیین ساختار ورودی‌های ناشناخته و حفظ عملکرد رویتگر در شرایط تغییر پارامترهای سیستم از مهم‌ترین محدودیت‌های آن به شمار می‌روند.

در مقابل، توسعه روش‌های داده‌محور امکان طراحی مستقیم رویتگر را از روی داده‌های اندازه‌گیری‌شده فراهم کرده است. در این چارچوب، داده‌های ورودی، خروجی و در برخی موارد حالت سیستم در قالب ماتریس‌های داده یا ماتریس‌های هنکل سازمان‌دهی شده و اطلاعات مربوط به رفتار سیستم مستقیماً از داده استخراج می‌شود. مبانی نظری این رویکرد بر مفاهیمی نظیر لم بنیادی ویلمز، تحریک‌پذیری پایدار و اطلاعات‌پذیری داده‌ها استوار است. بررسی مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که در شرایط مناسب، شرایط وجود UIO داده‌محور می‌تواند با شرایط کلاسیک مدل‌محور معادل باشد؛ بنابراین، داده‌محوری صرفاً یک جایگزین تجربی برای مدل‌سازی نیست، بلکه می‌تواند دارای مبنای نظری و ریاضی مستقل و قابل تحلیل باشد.

با وجود این پیشرفت‌ها، مرور ادبیات نشان داد که هنوز فاصله قابل توجهی میان چارچوب‌های نظری موجود و الزامات سیستم‌های واقعی وجود دارد. مهم‌ترین مسائل شامل نیاز بسیاری از روش‌ها به داده‌های حالت در مرحله آفلاین، حساسیت شرایط رتبه‌ای به نویز، دشواری ارزیابی تحریک‌پذیری ورودی‌های ناشناخته، نامعلوم بودن بعد و ساختار ورودی ناشناخته و افزایش هزینه محاسباتی در سیستم‌های

بزرگ‌مقیاس است.

از این‌رو، هدف این فصل آن است که یافته‌های اصلی حاصل از مرور ادبیات را یکپارچه کرده، دستاوردها و محدودیت‌های رویکردهای موجود را جمع‌بندی نماید و بر اساس شکاف‌های شناسایی‌شده، چند مسیر مشخص برای طراحی رویکردهای داده‌محور پیشنهاد دهد.

۳-۲- جمع‌بندی مبانی نظری و مطالعات انجام‌شده

بررسی منابع نشان می‌دهد که تحول طراحی رویتگر را می‌توان در سه مرحله اصلی دنبال کرد. در مرحله نخست، طراحی رویتگرها عمدتاً بر اساس مدل ریاضی صریح سیستم انجام می‌شد. در این رویکرد، شناخت ساختار دینامیکی سیستم و ماتریس توزیع ورودی ناشناخته از الزامات اصلی طراحی محسوب می‌شد.

در مرحله دوم، با توسعه نظریه سیستم‌های رفتارگرا و لم بنیادی ویلمز، امکان استفاده مستقیم از داده‌های حاصل از سیستم برای بازنمایی رفتار دینامیکی فراهم شد. در این مرحله، مسئله شناسایی صریح مدل تا حد زیادی کنار گذاشته شد و داده به‌عنوان یک نمایش تجربی از رفتار سیستم مورد استفاده قرار گرفت.

در مرحله سوم، این چارچوب به طراحی مستقیم UIO، رویتگرهای مرتبه کاهش‌یافته، رویتگرهای توزیع‌شده، رویتگرهای سیستم‌های غیرخطی، رویتگرهای اغتشاش و کاربردهای امنیت سایبری گسترش یافته است. مطالعات مرور شده نشان می‌دهند که این توسعه باعث شده است رویتگر داده‌محور از یک چارچوب محدود به سیستم‌های خطی متمرکز، به حوزه‌ای گسترده‌تر با کاربرد در سیستم‌های به‌هم‌پیوسته، شبکه‌های قدرت، سیستم‌های چندعامله و سامانه‌های غیرخطی تبدیل شود.

این جمع‌بندی در جدول (۳-۱) آورده شده است.

جدول (۱-۳) جمع‌بندی تحول رویکردهای طراحی رویتگر

مرحله	رویتگر	مبنای طراحی	نیاز به مدل صریح	مهم‌ترین ویژگی	محدودیت اصلی
۱	رویتگر مدل محور	مدل ریاضی سیستم	زیاد	پشتوانه نظری قوی	وابستگی به A، B، C و E
۲	UIO کلاسیک	شرایط رتبه‌ای و آشکارسازی قوی	زیاد	حذف اثر ورودی ناشناخته	نیاز به شناخت ساختار اغتشاش
۳	رویتگر داده محور	داده‌های ورودی/خروجی/حالت	کاهش یافته	حذف مرحله شناسایی صریح مدل	وابستگی به کیفیت و غنای داده
۴	UIO داده محور	ماتریس‌های داده و شرایط هسته	کاهش یافته	طراحی مستقیم از داده	حساسیت به نویز و رتبه
۵	UIO مرتبه کاهش یافته	داده و زیرفضاهای مناسب	کاهش یافته	کاهش پیچیدگی تخمین	شرایط ساختاری و داده‌ای
۶	رویتگر داده محور توزیع شده	داده‌های محلی و همسایه‌ها	کاهش یافته	مناسب سیستم‌های بزرگ مقیاس	هزینه و محدودیت ارتباطی
۷	رویتگر داده محور غیر خطی/یادگیری	داده و روش‌های یادگیری	کم	قابلیت مواجهه با غیرخطی‌ها	تضمین نظری و وابستگی به داده

۳-۳- جمع‌بندی مقایسه‌ای مدل محور و داده محور

یکی از مهم‌ترین نتایج حاصل از بررسی ادبیات، تفاوت اساسی میان نحوه برخورد دو پارادایم مدل محور و داده محور با مسئله تخمین حالت است. در روش مدل محور، ابتدا ساختار و پارامترهای سیستم تعیین شده و سپس طراحی رویتگر بر مبنای آن انجام می‌شود. در مقابل، در روش داده محور تلاش می‌شود اطلاعات

لازم برای طراحی مستقیماً از داده‌های حاصل از سیستم استخراج شود.

این تفاوت به معنای حذف کامل نیاز به دانش سیستم نیست؛ بلکه نوع دانش مورد نیاز تغییر می‌کند. در روش داده‌محور، مسئله اصلی از تعیین دقیق پارامترهای مدل به بررسی کفایت و اطلاعات‌پذیری داده منتقل می‌شود. به همین دلیل، کیفیت داده، تنوع شرایط کاری، ساختار ماتریس‌های داده و رتبه آنها نقش تعیین‌کننده‌ای در امکان‌پذیری طراحی دارند.

مقایسه رویکرد مدل‌محور و داده‌محور در طراحی UIO در جدول (۲-۳) بیان شده است.

جدول (۲-۳) جمع‌بندی تحول رویکردهای طراحی رویتگر

معیار	رویکرد مدل‌محور	رویکرد داده‌محور
مدل ریاضی	مورد نیاز	در بسیاری از روش‌ها مورد نیاز نیست
ماتریس‌های A, B, C	مورد نیاز	به‌صورت صریح مورد نیاز نیستند
ماتریس E	معمولاً مورد نیاز	می‌تواند به‌صورت ضمنی از داده استخراج شود
داده‌های تجربی	برای اعتبارسنجی	مبنای اصلی طراحی
شناسایی سیستم	معمولاً مرحله مقدماتی	می‌تواند حذف یا کاهش یابد
شرط اصلی	شرایط ساختاری و رتبه‌ای مدل	شرایط رتبه‌ای و اطلاعات‌پذیری داده
انعطاف در برابر تغییر سیستم	محدودتر	بالقوه بیشتر
حساسیت به نویز	وابسته به مدل و اندازه‌گیری	حساسیت قابل توجه به داده
نیاز به داده حالت	الزامی نیست	در بسیاری از روش‌های موجود در مرحله آفلاین لازم است
مقیاس‌پذیری	وابسته به پیچیدگی مدل	چالش‌برانگیز در داده‌های حجیم
قابلیت توسعه توزیع‌شده	امکان‌پذیر	مسیر پژوهشی مهم
مبنای نظری	نظریه کلاسیک کنترل	نظریه سیستم‌های رفتارگرا و اطلاعات‌پذیری

۳-۴- نتایج اصلی حاصل از مرور ادبیات

بررسی مجموعه مطالعات انجام‌شده چند نتیجه اساسی را آشکار می‌کند.

- ❖ نخست، طراحی UIO داده‌محور از نظر نظری امکان‌پذیر بوده و در مطالعات اصلی، شرایط لازم و کافی برای وجود آن از طریق داده‌های تاریخی استخراج شده است. همچنین نشان داده شده است که تحت فرضیات مناسب، شرایط داده‌محور با شرایط مدل‌محور متناظر هم‌ارز هستند. بنابراین، داده‌محوری لزوماً به معنای قربانی کردن تضمین‌های نظری روش‌های کلاسیک نیست.
- ❖ دوم، مفهوم اطلاعات‌پذیری نقش کلیدی در انتقال از «وجود داده» به «کفایت داده» دارد. تعداد زیاد نمونه‌ها به‌تنهایی تضمین‌کننده قابلیت طراحی رویتگر نیست. داده‌ها باید اطلاعات لازم درباره ویژگی موردنظر سیستم را در خود داشته باشند. این موضوع به‌طور مستقیم با طراحی UIO ارتباط دارد، زیرا ممکن است یک مجموعه داده برای تحلیل یک ویژگی سیستم کافی باشد، اما برای تضمین وجود رویتگر کافی نباشد.
- ❖ سوم، مطالعات اخیر نشان داده‌اند که چارچوب داده‌محور قابلیت توسعه به رویتگرهای مرتبه کاهش‌یافته، سیستم‌های غیرخطی، رویتگرهای اغتشاش و ساختارهای توزیع‌شده را دارد. این موضوع نشان‌دهنده ظرفیت بالای این حوزه برای توسعه روش‌های جدید است.
- ❖ چهارم، کاربرد روش‌های داده‌محور در سیستم‌های به‌هم‌پیوسته اهمیت ویژه‌ای دارد. در این سیستم‌ها، کوپلینگ میان زیرسیستم‌ها می‌تواند به‌عنوان ورودی ناشناخته در نظر گرفته شود، اما برخی روش‌های جدید با استفاده از خروجی همسایه‌ها تلاش کرده‌اند اطلاعات کوپلینگ را به‌طور مستقیم وارد ساختار رویتگر کنند. این موضوع می‌تواند زمینه مناسبی برای توسعه روش‌های توزیع‌شده فراهم آورد.

۳-۵- شکاف‌های پژوهشی استخراج‌شده

مهم‌ترین بخش حاصل از مرور ادبیات، شناسایی محدودیت‌هایی است که هنوز در مطالعات موجود به‌صورت کامل برطرف نشده‌اند. بر اساس بررسی انجام‌شده در فصل دوم، شش شکاف اصلی قابل استخراج است.

۳-۵-۱- وابستگی به داده‌های حالت

بخش قابل توجهی از روش‌های دقیق UIO داده‌محور فرض می‌کنند که در مرحله جمع‌آوری یا کالیبراسیون آفلاین، داده‌های حالت سیستم در دسترس است. در بسیاری از سیستم‌های صنعتی، نصب حسگر برای اندازه‌گیری تمام متغیرهای حالت امکان‌پذیر یا اقتصادی نیست. بنابراین، توسعه رویتگرهایی که صرفاً بر اساس داده‌های ورودی و خروجی قابل طراحی باشند، یک نیاز پژوهشی مهم است.

۳-۵-۲- حساسیت به نویز اندازه‌گیری

شرایطی مانند رتبه کامل، شمول هسته و روابط رتبه‌ای در محیط ایده‌آل و بدون نویز به‌صورت دقیق قابل تعریف هستند؛ اما داده‌های واقعی همواره با خطای اندازه‌گیری و نویز همراه‌اند. در نتیجه، یک تغییر کوچک در داده می‌تواند ساختار رتبه‌ای ماتریس‌های مورد استفاده در طراحی را تغییر دهد. از این منظر، توسعه UIO داده‌محور مقاوم در برابر نویز و عدم قطعیت یکی از مهم‌ترین مسیرهای تحقیقاتی محسوب می‌شود. در مرور انجام‌شده نیز فقدان یک چارچوب مقاوم که کران نویز را مستقیماً در فرآیند طراحی وارد کند، به‌عنوان یک شکاف مهم مطرح شده است.

۳-۵-۳- نبود معیار کمی برای کیفیت داده

اگرچه مفهوم اطلاعات‌پذیری چارچوب نظری مناسبی برای بررسی کفایت داده ارائه می‌کند، تعیین میزان کافی بودن داده برای یک مسئله عملی همچنان چالش‌برانگیز است. به‌خصوص، در مورد ورودی ناشناخته، بررسی مستقیم تحریک‌پذیری پایدار آن امکان‌پذیر نیست، زیرا این ورودی اندازه‌گیری نمی‌شود. بنابراین، توسعه معیارهای کمی برای ارزیابی کیفیت داده پیش از طراحی رویتگر می‌تواند ارزش پژوهشی قابل توجهی داشته باشد.

۳-۵-۴- نامعلوم بودن بعد ورودی ناشناخته

بخشی از مطالعات موجود بعد ورودی ناشناخته را از قبل معلوم فرض می‌کنند. این فرض در کاربردهای عملی همیشه برقرار نیست. در یک سیستم واقعی ممکن است تعداد منابع اغتشاش، محل ورود آنها یا حتی تعداد کانال‌های ورودی ناشناخته مشخص نباشد. بنابراین، طراحی رویتگری که بتواند با بعد یا ساختار نامعلوم ورودی ناشناخته مواجه شود، یک مسئله باز محسوب می‌شود.

۳-۵-۵- پیچیدگی محاسباتی

تشکیل ماتریس‌های هنکل با استفاده از داده‌های تاریخی طولانی، به‌خصوص برای سیستم‌های بزرگ‌مقیاس، می‌تواند هزینه محاسباتی قابل توجهی ایجاد کند. این مسئله در کاربردهای آنلاین که لازم است داده‌های جدید به‌طور مداوم وارد فرآیند تخمین شوند، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. توسعه روش‌های بازگشتی، کاهش مرتبه داده و به‌روزرسانی آنلاین می‌تواند راهکاری برای کاهش این مشکل باشد.

۳-۵-۶- توسعه به سیستم‌های بزرگ‌مقیاس و توزیع شده

روش‌های متمرکز با افزایش تعداد متغیرهای سیستم و زیرسیستم‌ها با محدودیت‌های محاسباتی و ارتباطی مواجه می‌شوند. در سیستم‌های به‌هم‌پیوسته، استفاده از اطلاعات محلی و خروجی همسایه‌ها می‌تواند ساختار مناسب‌تری برای طراحی روی‌تگر فراهم کند. با وجود پیشرفت‌های اخیر در این زمینه، ترکیب همزمان داده‌محوری، مقاومت در برابر نویز، ورودی ناشناخته و ساختار توزیع‌شده همچنان نیازمند بررسی بیشتر است.

جمع‌بندی شکاف‌های تحقیقاتی و مسیر پیشنهادی در جدول (۳-۳) بیان شده است.

جدول (۳-۳) جمع‌بندی تحول رویکردهای طراحی روی‌تگر

ردیف	شکاف شناسایی شده	محدودیت روش‌های موجود	جهت پیشنهادی
۱	نیاز به داده حالت	نیاز به اندازه‌گیری حالت در مرحله آفلاین	طراحی UIO با داده ورودی-خروجی
۲	نویز اندازه‌گیری	اختلال در شرایط رتبه‌ای	طراحی UIO داده‌محور مقاوم
۳	کفایت نامشخص داده	نبود معیار کمی مناسب	شاخص اطلاعات‌پذیری داده
۴	بعد نامعلوم ورودی ناشناخته	فرض معلوم بودن r	تخمین همزمان ساختار اغتشاش
۵	حجم زیاد داده	هزینه تشکیل ماتریس هنکل	روش‌های بازگشتی و کاهش مرتبه
۶	سیستم‌های بزرگ‌مقیاس	محدودیت محاسبات و ارتباطات	روی‌تگر داده‌محور توزیع‌شده
۷	سیستم‌های غیرخطی	محدودیت روش‌های خطی	توسعه UIO داده‌محور غیرخطی
۸	تغییرات زمانی سیستم	افت عملکرد روی‌تگر ثابت	طراحی تطبیقی و آنلاین

۳-۶- جمع‌بندی نهایی و جهت‌گیری پژوهش

برآیند مرور ادبیات نشان می‌دهد که طراحی روی‌تگر داده‌محور از یک ایده اولیه برای حذف نیاز به مدل صریح، به یک چارچوب نظری نسبتاً منسجم تبدیل شده است. لم بنیادی ویلمز امکان استفاده از داده‌های

غنی برای بازنمایی رفتار سیستم را فراهم کرده و مفهوم اطلاعات‌پذیری نیز معیار نظری مهمی برای تعیین کفایت داده نسبت به هدف موردنظر ارائه کرده است. در حوزه UIO نیز مطالعات موجود نشان داده‌اند که تحت شرایط مناسب، امکان طراحی مستقیم رویتگر از روی داده وجود داشته و شرایط داده‌محور می‌توانند با شرایط کلاسیک مدل‌محور هم‌ارز باشند.

با این حال، وضعیت فعلی ادبیات نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از نتایج موجود هنوز بر فرض‌هایی مانند در دسترس بودن داده‌های حالت، داده‌های بدون نویز، معلوم بودن بعد ورودی ناشناخته و وجود داده‌های غنی و مناسب استوار است. این فرض‌ها در محیط‌های واقعی همواره برقرار نیستند. از این‌رو، فاصله اصلی میان وضعیت فعلی پژوهش و نیازهای کاربردی را می‌توان در طراحی رویتگرهای داده‌محور مقاوم، کم‌داده، بدون نیاز به حالت، قابل تطبیق و قابل توسعه به سیستم‌های بزرگ‌مقیاس خلاصه کرد. بر این اساس، مسیر پژوهشی مناسب می‌تواند از طراحی یک رویتگر داده‌محور پایه آغاز شده و سپس به سمت افزایش مقاومت در برابر نویز، کاهش وابستگی به داده حالت، قابلیت سازگاری با تغییرات سیستم و در نهایت توسعه ساختار توزیع‌شده حرکت کند. این مسیر با شکاف‌های استخراج‌شده از ادبیات و اهداف اولیه تعریف‌شده برای پژوهش حاضر، به‌ویژه کاهش وابستگی به شناسایی صریح مدل، تعیین شرایط اطلاعات‌پذیری و توسعه روش برای سیستم‌های بزرگ‌مقیاس، سازگاری مناسبی دارد.

۳-۷- پیشنهاد موضوعات پژوهشی

بر اساس جمع‌بندی فوق، سه عنوان زیر می‌توانند به‌عنوان مسیرهای مشخص برای پژوهش در حوزه طراحی رویتگر داده‌محور پیشنهاد شوند.

❖ **پیشنهاد اول:** طراحی رویتگر ورودی-ناشناخته داده‌محور مقاوم در برابر نویز با استفاده از

اطلاعات‌پذیری داده‌ها

محور اصلی: در این موضوع، هدف توسعه یک چارچوب داده‌محور برای طراحی UIO است که برخلاف روش‌های ایده‌آل موجود، نویز اندازه‌گیری و عدم قطعیت داده‌ها را مستقیماً در فرآیند طراحی لحاظ کند. معیارهای رتبه‌ای و شرایط شمول هسته می‌توانند به شرایط مقاوم یا بهینه‌سازی شده تبدیل شوند تا روی‌تگر در حضور نویز نیز عملکرد قابل قبولی داشته باشد.

❖ **پیشنهاد دوم:** طراحی روی‌تگر ورودی-ناشناخته داده‌محور بدون نیاز به اندازه‌گیری حالت با یادگیری

ساختار سیستم از داده‌های ورودی-خروجی

محور اصلی: در این موضوع، تلاش می‌شود وابستگی روش‌های موجود به داده‌های حالت در مرحله آفلاین حذف شود. تنها داده‌های ورودی و خروجی سیستم در اختیار روی‌تگر قرار گرفته و اطلاعات لازم برای طراحی تخمین‌زن از روابط موجود در این داده‌ها استخراج می‌شود.

❖ **پیشنهاد سوم:** طراحی روی‌تگر ورودی-ناشناخته داده‌محور تطبیقی و توزیع‌شده برای سیستم‌های

به‌هم‌پیوسته با پارامترهای متغیر

محور اصلی: این موضوع چند شکاف مهم ادبیات را به‌صورت همزمان مورد توجه قرار می‌دهد: سیستم‌های بزرگ‌مقیاس، تغییرات زمانی، ورودی‌های ناشناخته و محدودیت ارتباطی. در این چارچوب، هر زیرسیستم می‌تواند روی‌تگر محلی خود را بر اساس داده‌های محلی و اطلاعات دریافتی از همسایه‌ها به‌روزرسانی کند.

با توجه به مطالب بیان شده، جدول (۳-۴) مقایسه سه موضوع پیشنهادی را بیان می‌کند.

جدول (۳-۴) مقایسه سه موضوع پیشنهادی

موضوع	مسئله اصلی	داده مورد نیاز	ویژگی کلیدی	سطح توسعه
موضوع ۱	نویز و عدم قطعیت	ورودی، خروجی و در صورت دسترسی حالت	مقاومت در برابر نویز	مقاوم

موضوع ۲	نبود داده حالت	ورودی و خروجی	عدم نیاز به اندازه‌گیری حالت	کم‌داده
موضوع ۳	مقیاس بزرگ و تغییرات سیستم	داده محلی و همسایه‌ها	تطبیقی و توزیع‌شده	پیشرفته

۳-۸- جمع‌بندی پیشنهادها

از میان مسیرهای فوق، هر سه موضوع مستقیماً از شکاف‌های شناسایی‌شده در مرور ادبیات استخراج می‌شوند و از تکرار ساده کارهای موجود فاصله دارند. موضوع اول عمدتاً بر مشکل نویز و عدم قطعیت، موضوع دوم بر حذف نیاز به داده‌های حالت و موضوع سوم بر مقیاس‌پذیری، ساختار توزیع‌شده و تغییرات زمانی تمرکز دارد. در نتیجه، این سه مسیر می‌توانند به‌عنوان سه گزینه مستقل برای تعریف مسئله اصلی رساله یا به‌عنوان مراحل توسعه تدریجی یک چارچوب جامع طراحی روی‌تگر داده‌محور در نظر گرفته شوند.

با توجه به اینکه در فصل دوم، نیاز به داده‌های حالت، حساسیت به نویز، نامشخص بودن ساختار ورودی ناشناخته و پیچیدگی محاسباتی به‌عنوان شکاف‌های اصلی صریحاً شناسایی شده‌اند، پیشنهاد می‌شود ساختار فصل‌های بعدی رساله بر یکی از این سه مسیر و با تأکید بر ارائه شرایط نظری، الگوریتم طراحی، اثبات همگرایی و اعتبارسنجی شبیه‌سازی استوار شود.

مراجع

- [1] M. S. Turan and G. Ferrari-Trecate, "Data-driven unknown-input observers and state estimation," *IEEE Control Systems Letters*, vol. 6, pp. 1424–1429, 2022.
- [2] H. J. van Waarde, J. Eising, H. L. Trentelman, and M. K. Camlibel, "Data informativity: A new perspective on data-driven analysis and control," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 65, no. 11, pp. 4753–4768, 2020.
- [3] M. Darouach, "Complements to full order observer design for linear systems with unknown inputs," *Applied Mathematics Letters*, vol. 22, pp. 1107–1111, 2009.
- [4] G. Disarò and M. E. Valcher, "On the equivalence of model-based and data-driven approaches to the design of unknown-input observers," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 70, no. 3, pp. 2074–2081, 2025.
- [5] Y. Gui, B. Chen, Z. Wang, and L. Yu, "Data-driven distributed observer for interconnected systems," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 33, 2026.
- [6] Z. S. Hou, Z. Wang, "From model-based control to data-driven control: Survey, classification and perspective", *Information Sciences*, vol. 235, pp. 3-35, 2013.
- [7] ع. خاکی صدیق، س. نصرالهی، "مروری بر مفاهیم و روش‌های طراحی سیستم‌های کنترل داده‌راند"، *مجله کنترل*، ۱۴۰۲.
- [8] M. M. Morato, M. S. Felix, "Data Science and Model Predictive Control: A Survey of Recent Advances on Data-Driven MPC Algorithms", *Journal of Process Control*, 2024.
- [9] W. Liu, M. Zhang, Q. Xu, L. Xie, "Survey on data-driven control and its application in cyber-physical energy systems", *Cyber-Physical Energy Systems*, vol. 1, pp. 28-48, 2025.
- [10] M. Darouach, M. Zasadzinski, and S. J. Xu, "Full-Order Observers for Linear Systems with Unknown Inputs", *IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL*, vol. 39, 1994.
- [11] M. E. Valcher, "State Observers for Discrete-Time Linear Systems with Unknown Inputs", *IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL*, vol. 44, 1999.
- [12] G. Disaro, M. E. Valcher, "Data-driven reduced-order unknown-input observers", *European Journal of Control*, vol. 80, 2024.
- [13] S. X. Ding, S. Yin, Y. Wang, Y. Yang, B. Ni, "Data-Driven Design of Observers and Its Applications", *Preprints of the 18th IFAC World Congress*, 2011.
- [14] R. Adachi, Y. Wakasa, "Design of Full State Observer Based on Data-Driven Dual System Representation", *IEICE Trans. Fundamentals*, 2022.
- [15] V. K. Mishra, H. J. Waarde, N. Bajcinca, "Data-Driven Criteria for Detectability and Observer Design for LTI Systems", *2022 IEEE 61st Conference on Decision and Control (CDC)*, 2022.
- [16] Y. Zhang, Y. Wang, K. Huang, Z. Sun, T. Fernando, "Data-Driven Observers Design for Descriptor Systems", 2026.

- [17] D. Xu, B. Jiang, P. Shi, "Adaptive Observer Based Data-Driven Control for Nonlinear Discrete-Time Processes", *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 11, 2014.
- [18] R. Chi, X. Guo, N. Lin, B. Huang, "Dynamic Linearization and Extended State Observer-Based Data-Driven Adaptive Control", *IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS: SYSTEMS*, vol. 53, 2023.
- [19] Z. Peng, D. Wang, J. Wang, "Data-Driven Adaptive Disturbance Observers for Model-Free Trajectory Tracking Control of Maritime Autonomous Surface Ships", *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, vol. 32, 2021.
- [20] Z. Peng, M. Lv, L. Liu, D. Wang, "Data-Driven Learning Extended State Observers for Nonlinear Systems: Design, Analysis and Hardware-in-Loop Simulations", *IEEE/CAA JOURNAL OF AUTOMATICA SINICA*, vol. 10, 2023.
- [21] J. Yue, Z. Liu, H. Su, "Data-Driven Adaptive Extended State Observer-Based Model-Free Disturbance Rejection Control for DC–DC Converters", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 71, 2024.
- [22] Y. Eun, J. Lee, H. Shim, "Data-Driven Inverse of Linear Systems and Application to Disturbance Observers", *IEEE Control Systems Letters* paper presented, 2023.
- [23] D. Muller, J. Feilhauer, J. Wicker, "Data-Driven Predictive Disturbance Observer for Quasi Continuum Manipulators", 2022 IEEE 61st Conference on Decision and Control (CDC), 2022.
- [24] C. D. Samtina, R. L. Truby, D. Rus, "Data–Driven Disturbance Observers for Estimating External Forces on Soft Robots", *IEEE ROBOTICS AND AUTOMATION LETTERS*, vol. 5, 2020.
- [25] G. Evangelisti, S. Hirche, "Data-Driven Momentum Observers With Physically Consistent Gaussian Processes", *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS*, vol. 40, 2024.
- [26] H. Chen, H. Luo, B. Huang, B. Jiang, O. Kaynak, "Data-driven designs of observers and controllers via solving model matching problems", *Automatica*, 2023.
- [27] M. Farbood, Z. Echreshavi, M. Shasadeghi, S. Mobayen and P. Skruch, "Disturbance Observer-Based Data Driven Model Predictive Tracking Control of Linear Systems," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 88597-88608, 2023.
- [28] Y. Hui, R. Chi, B. Huang and Z. Hou, "Extended State Observer-Based Data-Driven Iterative Learning Control for Permanent Magnet Linear Motor With Initial Shifts and Disturbances," in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 51, no. 3, pp. 1881-1891, March 2021.
- [29] R. Chi, Y. Wei, W. Tao, J. Xing, "Observer-based data-driven iterative learning control", *International Journal of Systems Science*, 2020.
- [30] C. Hametner, S. Jakubek and W. Prochazka, "Data-Driven Design of a Cascaded Observer for Battery State of Health Estimation," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 6, pp. 6258-6266, 2018.
- [31] M. Shen, X. Wang, J. H. Park, Y. Yi and W. -W. Che, "Extended Disturbance-Observer-Based Data-Driven Control of Networked Nonlinear Systems With Event-Triggered Output," in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 53, no. 5, pp. 3129-3140, May 2023.

- [32] X. Lin *et al.*, "Observer-Based Prescribed Performance Speed Control for PMSMs: A Data-Driven RBF Neural Network Approach," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 20, no. 5, pp. 7502-7512, 2024.
- [33] Y. Lin, H. Zhao and H. Ding, "A Data-Driven Approach for Online Path Correction of Industrial Robots Using Modified Flexible Dynamics Model and Disturbance State Observer," in *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 28, no. 6, pp. 3410-3421, Dec. 2023
- [34] D. Lee, J. Song, A. Karimi, S. Oh, "Frequency Response Data-Driven Disturbance Observer Design for Flexible Joint Robots", *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, col. 73, 2026.
- [35] A. Ni, W. Tang, "Data-Driven Observer Synthesis for Autonomous Limit Cycle Systems through Estimation of Koopman Eigenfunctions", 2025.
- [36] W. Tang, "Data-Driven State Observers for Measure-Preserving Systems", 2025.
- [37] W. Tang, "Data-driven state observation for nonlinear systems based on online learning", *Process Systems Engineering*, 2023.
- [38] M. Pinto, J. A. Gallegos, F. Nunez, "Data-driven Observers based on Autoencoder Neural Networks", 2024 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA), 2024.
- [39] M. Repka, A. L. Gratzner, J. Fojtasek, T. Straka, P. Portes and A. Schirrer, "Combining Model-Based and Data-Driven Observer Designs for Sideslip Angle Estimation," in *IEEE Access*, vol. 13, pp. 151838-151849, 2025.
- [40] M. Ghorbani, A. Hosseinzadeh, M. Pirani, A. Khajepour, "Robust Transformer-Enhanced Tire Force Estimation: Combining Model-Based Observer and Deep Learning", *IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS*, vol. 31, 2026.
- [41] L. Ecker and M. Schöberl, "Indirect Data-Driven Observer Design Using Neural Canonical Observer Structures," in *IEEE Control Systems Letters*, vol. 7, pp. 1706-1711, 2023.
- [42] J. Feidler, D. Gerbet, K. Robenack, "Data-Driven Observer Design for Nonlinear Systems Using Automatic Differentiation", 94th Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics (GAMM), 2024.
- [43] M. Vu, Y. Huang, S. Zeng, "Data-driven control of nonlinear systems: An online sequential approach", *Systems & Control Letters*, vol. 193, 2024.
- [44] S. -J. Huang and Y. -X. Hao, "Sampled-Output-Data-Driven-Based Adaptive Observer Design and Offline Fault Estimation for T-S Fuzzy Descriptor Systems," in *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 32, no. 8, pp. 4426-4435, 2024.
- [45] M. Russo, "Data-Driven Design of Robust Observers for Nonlinear Systems and Application to Satellite Attitude Control", *POLITECNICO DI TORINO*, Master's degree, 2021.
- [46] Y. Wei, G. Disaro, W. Liu, J. Sun, M. E. Valcher, G. Wang, "Distributed data-driven unknown-input observers", *Automatica*, 2026.
- [47] Y. Wei, G. Disaro, W. Liu, J. Sun, M. E. Valcher, G. Wang, "Distributed Data-driven Unknown-input Observers for State Estimation", 2024.

- [48] Y. Zhang, B. Lei, M. Rajabinezhadm C. Ding, S. Zuo, "Observer-Based Data-Driven Consensus Control for Nonlinear Multi-Agent Systems Against Denial-of-Service and False Data Injection Attacks", *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 148, 2026.
- [49] P. F. Odgaard, B. Lin and S. B. Jorgensen, "Observer and Data-Driven-Model-Based Fault Detection in Power Plant Coal Mills," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, no. 2, pp. 659-668, 2008.
- [50] S. Riverso, "Hycon2 Benchmark: Power Network System", 2012.