بسم الله الرّحمن الرّحيم

دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دانشکده مهندسی برق

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی کنترل

استفاده از الگوریتم ماکزیمم سازی مشاهدات و فیلترذره ای در شناسایی روی خط و کاربرد آن در کنترل سیستم های فضای حالت

نگارش

علی اکبر گرجی درونکلایی

استاد راهنما

دکتر محمدباقر منهاج

زمستان ۱۳۸۶

بسمه تعالي

تاريخ : .....
شماره : .....

فرم اطلاعات پايان نامه
كارشناسي ارشد و دكترا

دانشگاه صنعتي اميركبير
(پلي تكنيک تهران)

معاونت پژوهشي
فرم پروژه تحصيلات تكميلي ۷

مشخصات دانشجو

نام و نام خانوادگي : علي اكبر گرچي درونكلايي دانشجوي آزاد ■ بورسيه ☐ معادل ☐

شماره دانشجويي: ۸۴۱۲۳۱۲۹ دانشكده : برق رشته تحصيلي: كنترل

نام و نام خانودگي استاد راهنما : دكتر محمد باقر منهاج

عنوان به فارسي: استفاده از الگوريتم ماكزيمم سازی مشاهدات و فيلتر ذره ای در شناسايی روی خط و كاربرد آن در كنترل سيستمهای فضای حالت

عنوان به انگليسي:
Using the Expectation Maximization Algorithm and Particle Filtering in Online System Identification and Their Application in the Control of State Space Systems

نوع پروژه: كارشناسی ارشد ☐ **كاربردي** ☐ **بنيادي** ■ **توسعه اي** ■ **نظري**

تاريخ شروع: ۱۳۸۵/۱۲/۱ **تاريخ خاتمه :** ۱۳۸۶/۱۱/۲۸ **تعداد واحد:** ۶

سازمان تامين كننده اعتبار :

واژه هاي كليدي به فارسي : سيستمهای فضای حالت غيرخطّی، تخمين توام پارامتر و حالت، الگوريتم فيلتر ذره ای، الگوريتم ماكزيمم سازی مشاهدات، هموار ساز ذره ای، شبكه عصبی مصنوعی

واژه هاي كليدي به انگليسي :
Nonlinear state space systems, joint parameter and state estimation, particle filter algorithm, EM algorithm, particle smoother, artificial neural network

---

نظرها و پيشنهادها به منظور بهبود فعاليت هاي پژوهشي دانشگاه:

استاد راهنما:

دانشجو:

امضاء استاد راهنما : **تاريخ: ۱۳۸۷/۰۲/۲۸**

نسخه ۱: معاونت پژوهشي
نسخه ۲ : كتابخانه و به انضمام دو جلد پايان نامه به منظور تسويه حساب با كتابخانه و مركز اسنادومدارک علمي

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

و برادر خوبم

در ابتدا خداوند متعال را شاکرم که به من قدرت خواندن، فهمیدن و تعقل را اعطا نمود تا قادربه انجام این پایان نامه باشم. در ادامه لازم می دارم از تمامی کسانی که در طول دوره کارشناسی ارشد در تهیه این گزارش مرا یاری نمودند کمال تشکر را داشته باشم. از جناب آقای دکتر محمد باقر منهاج که در هر دو دوره کارشناسی و کارشناسی ارشد از نظرات و راهنمایی های مشفقانه شان به عنوان استاد راهنما بهره برده ام تشکر و قدر دانی می نمایم چرا که اگر جلسات مشترک با ایشان نبود قطعا قادر به اتمام این پایان نامه نبودم. از اساتید ارجمند آقایان دکتر نیکروش و توحید خواه که زحمت مطالعه و داوری پایان نامه اینجانب را متقبل شدند نیز تشکر می نمایم. از تمامی همکاران عزیزم در پژوهشگاه نیرو، مرکز تحقیقات و توسعه شرکت فارس و خوزستان و تمامی دوستانی که به نحوی در شکل گیری این پایان نامه مرا یاری نمودند نیز ممنون می باشم.

و در انتها، این پایان نامه را تقدیم می کنم به پدر و مادر عزیزم که اگر حمایت همه جانبه معنوی آنها نبود قطعا در جایگاه فعلی قرار نداشتم.

چکیده

سیستمهای فضای حالت غیرخطی گسسته زمان از جایگاه ویژه ای در بسیاری از مسائل عملی نظیر تعقیب هدف، رباتیک، کنترل آماری و پیش بینی سری های زمانی برخوردار می باشد چرا که هر یک از مسائل مورد بحث را می توان با استفاده از یک مدل فضای حالت غیرخطی تشریح نمود. لذا مسئله شناسایی و کنترل این سیستمها اخیرا مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است.

در این پایان نامه هدف بررسی کارکرد الگوریتم ماکزیمم سازی مشاهدات و فیلتر ذره ای در بحث شناسایی و کنترل سیستمهای غیرخطی فضای حالت می باشد. ابتدا مسئله شناسایی به صورت نوعی تخمین توام حالت و پارامتر تعریف می شود و سپس روشهای روی خط شناسایی بحث خواهند شد. در اینجا پس از مروری کلی بر روشهای تخمین حالت روی خط نظیر روش های مبتنی بر کالمن و الگوریتمهای ترتیبی مونت کارلو، روش روی خط ماکزیمم سازی مشاهدات معرفی خواهد شد. جهت بهبود دقت وسرعت همگرایی الگوریتم، از تلقیق روش گرادیان طبیعی بهره گرفته شده و عملکرد روش مورد بحث با الگوریتمهای دوگان مقایسه خواهد شد.

قسمت دیگر این پایان نامه به شناسایی کور وکنترل سیستمهای فضای حالت می پردازد جاییکه شبکه های عصبی شعاعی پایه و چند لایه به عنوان ساختارهای غیرخطّی معرفی می شوند. هدف این بخش بررسی نحوه اعمال الگوریتم ماکزیمم سازی مشاهدات برای تخمین حالتهای مخفی و پارامترهای شبکه های عصبی معرفی شده می باشد. جهت این کار هموارسازهای ذره ای به عنوان ابزاری قوی جهت تخمین پارامتر معرفی می شوند. سپس نشان داده خواهد شد که چگونه می توان از تلفیق هموارساز ذره ای والگوریتم ماکزیمم سازی مشاهدات به عنوان ابزاری قوی در شناسایی کور وکنترل مدل مرجع سیستمهای غیرخطّی و غیرخوشرفتار بهره گرفت. در انتها نیز کاربرد روشهای پیشنهادی در تعقیب چند هدفه، آموزش شبکه های عصبی، تخمین حالت در سیستمهای غیرخطی، پیش بینی سریهای زمانی با فقدان داده و کنترل مدل مرجع سیستمهای غیرخطّی بحث خواهد شد. نتایج شبیه سازی دقت و قابلیت مناسب الگوریتم ماکزیمم سازی مشاهدات را در مسائل شناسایی و کنترل نشان می دهد.

کلید واژه: سیستمهای فضای حالت غیرخطّی، تخمین توام پارامتر و حالت، الگوریتم فیلتر ذره ای، الگوریتم ماکزیمم سازی مشاهدات، هموار ساز ذره ای، شبکه عصبی مصنوعی

فهرست علائم

متغیر اسکالر	a
متغیر برداری	**a**
ماتریسی از متغیرها	A
ترانسپوز ماتریس	A^T
تریس ماتریس	**tr (A)**
تابع توزیع احتمال	**p(.)**
توزیع گوسی با پارامترهای میانگین μ و کوواریانس Σ	$N(\mu, P)$
مشاهدات خروجی	**y**
حالتهای سیستم	**x**
ورودی های خارجی	**u**
Extended Kalman Filter	EKF
Unscented Kalman Filter	UKF
Extended Kalman Smoother	EKS
Sequential Importance Sampling	SIS
Sequential Importance Resampling	SIR
Sequential Monte Carlo	SMC
Markov Chain Monte Carlo	MCMC
Radial Basis Function	RBF
Multi Layer Perceptron	MLP
Expectation Maximization	EM
Joint Probability Data Association Filter	JPDAF

فهرست مطالب

۱- مقدمه ۲

۲- سیستمهای فضای حالت غیر خطّی ۱۳

۲-۱- مسئله شناسایی در سیستمهای فضای حالت غیر خطّی ۱٤

۲-۲- مدل های فضای حالت غیر خطّی در عمل ۱٦

۲-۲-۱- تعقیب هدف ۱۷

۲-۲-۲- مکان یابی ربات متحرّک ۱۹

۲-۲-۳- آموزش شبکه های عصبی ۲۱

۲-۲-۴- پیش بینی سری های زمانی با فقدان داده ۲۲

۲-۳- خلاصه فصل ۲۳

۳- تخمین حالت در سیستمهای فضای حالت غیر خطّی ۲۵

۳-۱- الگوریتم توسعه یافته فیلتر کالمن ۲٦

۳-۲- تخمین حالت غیر خطّی و الگوریتم فیلتر ذرّه ای ۲۸

۳-۲-۱- مشکل انحطاط نمونه ها و الگوریتمهای نمونه برداری مجدد ۳۱

۳-۲-۲- انتخاب مجدد باقی ماندگی ۳۲

۳-۲-۳- الگوریتم مونت کارلو ترتیبی ۳۳

۳-۳- الگوریتمهای هموار سازی ۳٤

۳-۳-۱- الگوریتم هموار ساز توسعه یافته کالمن ۳٦

۳-۳-۲- هموار ساز ذرّه ای ۳۷

۳-۳-۲-۱- الگوریتمهای رفت و برگشتی ۳۸

۳-۳-۲-۲- هموار ساز دو فیلتره ۳۸

۳-۳-۲-۳- هموار ساز ماکزیمم تابع پسین ۳۹

۳-۳-۲-۴- الگوریتمهای سریع هموار ساز ٤۱

۳-۴- نتایج شبیه سازی ٤۳

۳-۴-۱- شبیه سازی با استفاده از الگوریتمهای فیلترینگ (تخمین حالت روی خط) ٤٥
۳-۴-۲- اثر نویز پروسه و خروجی ٤٥
۳-۴-۳- الگوریتمهای هموار ساز ٤٩

۳-۵- خلاصه فصل ٤٩

۴- تخمین پارامتر در سیستمهای فضای حالت غیر خطّی ۵۳

۴-۱- تخمین پارامترها از طریق فیلترهای دوگان ۵۳
۴-۱-۱- **الگوریتم حاشیه ای ذرّه ای جهت تخمین پارامترها** ۵۵

۴-۲- تخمین پارامترها از طریق روشهای تخمین نقطه ای ۵۹

4-3- الگوریتم روی خط EM ٦٣
۴-۳-۱- افزایش سرعت همگرایی بااستفاده از الگوریتم گرادیان طبیعی ٦٦

۴-۴- نتایج شبیه سازی ٦٨

۵- شناسایی کور و کنترل سیستمهای فضای حالت غیرخطی با استفاده از الگوریتم EM و فیلتر ذره ای ۷۲

۵-۱- شبکه های عصبی مصنوعی جهت مدل سازی سیستمهای فضای حالت غیر خطّی ۷۳

۵-۲- تخمین حالت ۷٦

۵-۳- تخمین پارامتر ۷۸
۵-۳-۱- تخمین پارامتر برای رابطه خطّی بین خروجی و پارامتر ۷۸
۵-۳-۲- تخمین پارامتر برای رابطه غیر خطّی بین خروجی و پارامترها ۸۱

۵-۴- کنترل سیستمهای فضای حالت غیر خطّی و غیر خوش رفتار با استفاده ازالگوریتمEM ۸٤
۵-۴-۱- کنترل مدل مرجع ۸٦

۵-۵- خلاصه فصل ۹۲

۶- نتایج شبیه سازی ۹٤

۶-۱- تعقیب چند هدفه برای رباتهای متحرک با استفاده از الگوریتم JPDAF ۹۴

۶-۱-۱- تعقیب برای حرکت بدون مانور ۹۶

۶-۱-۲- تعقیب برای حرکت همواره با مانور ۹۸

۶-۲-.....شناسایی کور سیستمهای فضای حالت غیر خطّی با استفاده از شبکه عصبی MLP آموزش دیده شده با الگوریتمEM..... ۱۰۱

۶-۳- کنترل آماری سیستمهای فضای حالت غیر خطّی و غیر خوش رفتار با استفاده از شبکه های عصبی ۱۰۵

۷- نتیجه گیری و بحث پایانی ۱۱۵

۷-۱- کاربرد شناسایی کور با استفاده از شبکه های عصبی و الگوریتم EM در تعقیب هدف ۱۱۶

۷-۲- طراحی equilizaer کور برای کانالهای غیرخطّی با استفاده از الگوریتم EM و هموارساز ذره ای ۱۱۷

۷-۳- تخمین موقعیت اهداف متحرک بر روی سطوح پیچیده نظیر manifold ها ۱۱۷

7-4- استفاده از الگوریتم EM و فیلتر ذره ای در موقعیت یابی و تعقیب شبکه های سنسوری..... ۱۱۸

۷-۵- استفاده از کنترل آماری بهینه در مسئله موقعیت یابی چند هدفه ربات متحرک ۱۱۸

۷-۶- استفاده از یادگیری ساختاری جهت تعیین ساختار بهینه مدل فضای حالت غیرخطّی..... ۱۱۹

فهرست مراجع..... ۱۲۰

پیوست ۱ ..... ۱۲۶

فهرست اشکال

شکل ۲-۱- نمایش یک ربات دو چرخ تفاضلی در محیط دو بعدی[۹] ۱۹
شکل ۳-۱- تابع توزیع تجمعی برای وزنهای نمونه برداری شده [۱۵]..... ۳۳
شکل ۳-۲- تخمین نقطه ای و کرنال برای تابع توزیع پسین [۱۵]..... ۳۵
شکل ۳-۳- تجمع داده ها حول نقاط مینیمم محلی [۱۵] ۳۶
شکل ۳-۴- دسته بندی درختی ذرات در زیر مجموعه های کوچکتر[۸۱] ۴۲
شکل ۳-۵- محاسبه باند پایین و بالا ذره J ام از میان مجموعه ذرات هر گره [۸۱]..... ۴۳
شکل ۳-۶- خروجی و حالت شبیه سازی شده سیستم غیرخطی با نویز ۴۶
شکل ۳-۷- محاسبه حالتها بدون استفاده از مرحله تخمین حالت همراه با نویز ۴۷
شکل ۳-۸- تخمین حالت با استفاده از الگوریتم توسعه یافته کالمن ۴۷
شکل ۳-۹- تخمین حالت با استفاده از الگوریتم فیلتر ذره ای SIR با تعداد ۵۰۰ ذره ۴۸
شکل ۳-۱۰- اثر تعداد ذرات در دقت تخمین حالت ۴۸
شکل ۳-۱۱- تاثیر واریانس نویز پروسه در افزایش خطای تخمین با استفاده از روش SIR ۵۰
شکل ۳-۱۲- تاثیر واریانس نویز خروجی در دقت تخمین با استفاده از روش SIR ۵۰
شکل ۴-۱- تخمین پارامتر با استفاده از روشهای فیلتر دوگان (الف)، الگوریتم EM (ب) و فیلتر ذره ای حاشیه ای (ج) با فرض مقدار اولیه ۳،۵ برای پارامتر مسئله..... ۷۰
شکل ۶-۱- تراجکتوری حرکتی رباتها در حالت حرکت بدون مانور ۹۷
شکل ۶-۲- نتایج تعقیب اهداف برای (۱): حرکت بدون مانور با استفاده از الگوریتم JPDAF و (۲) تنها با استناد به داده های اندازه گیری ۹۸
شکل ۶-۳- مسیر تولید شده برای اهداف در حالت حرکت همراه با مانور ۹۹
شکل ۶-۴- نتایج تعقیب هدف برای ربات ۱ با استفاده از الگوریتم JPDAF و مدلهای حرکتی مختلف ۱۰۰
شکل ۶-۵- نتایج تعقیب هدف برای ربات ۱ با استفاده از الگوریتم JPDAF و مدلهای حرکتی مختلف ۱۰۰
شکل ۶-۶- نتایج تعقیب هدف برای ربات ۳ با استفاده از الگوریتم JPDAF و مدلهای حرکتی مختلف ۱۰۱
شکل ۶-۷- روند تنظیم پارامترهای شبکه عصبی برای تعداد مختلف ذرات: (الف) محادله خروجی اول و (ب) خروجی دوم ۱۰۳
شکل ۶-۸- تخمین حالت برای سیستم غیرخطی بدون آموزش اولیه شبکه عصبی ۱۰۳
شکل ۶-۹- تخمین حالت برای سیستم غیرخطی با استفاده از خروجی اول وشبکه عصبی آموزش یافته ۱۰۴
شکل ۶-۱۰- تخمین خروجی مفقود با استفاده از تخمین حالت سیستم غیرخطی مدل شده با شبکه عصبی ۱۰۵
شکل ۶-۱۱- خروجی سیستم غیرخطی بدون اعمال قانون کنترلی و با استفاده از ورودی نوسانی ۱۰۷

شکل ۶-۱۲- تراجکتوری های ورودی بدست آمده با استفاده از کنترل کننده عصبی و پس از ۵۰ سیکل آموزشی با استفاده از الگوریتم EM ۱۰۸
شکل ۶-۱۳- تراجکتوری بهینه محاسبه شده با استفاد از الگوریتم EM برای مسئله تعقیب سیگنال مربعی ۱۰۸
شکل ۶-۱۴- خروجی سیستم غیرخطی پس از اعمال قانون کنترلی برای تعقیب سیگنال مربعی و نویز (الف) کم، (ب) متوسط و (ج) زیاد ۱۰۹
شکل ۶-۱۵- خطای آموزش شبکه عصبی با استفاده از الگوریتم EM جهت تعقیب سیگنال سینوسی ۱۱۰
شکل ۶-۱۶- تراجکتوری ورودی بهینه برای تعقیب سیگنال سینوسی با استفاده از کنترل کننده عصبی آموزش دیده شده با EM ۱۱۰
شکل ۶-۱۷- خروجی سیستم غیرخطی با اعمال کنترل کننده جهت تعقیب سیگنال سینوسی با (الف) نویز کم، (ب) نویز متوسط و (ج) نویز زیاد ۱۱۱
شکل ۶-۱۸- تراجکتوری ورودی برای کنترل مدل مرجع یک سیستم غیرخطی و غیرخوش رفتار ۱۱۲
شکل ٦-۱۹- خروجی سیستم غیرخطی غیرخوش رفتار پس از اعمال کنترل کننده همراه با نویز متوسط ۱۱۳

فهرست جداول

جدول ۳-۱- خطای تخمین حالت برای الگوریتمهای مختلف ٤٩
جدول ۳-۲- خطای تخمین حالت با استفاده از الگوریتمهای هموارساز..... ٥١
جدول ۶-۱- سرعت چرخهای ربات برای شبیه سازی (حالت بدون مانور) ٩٧
جدول ۶-۲- خطای تخمین x_t به ازای استفاده از روشهای مختلف ١٠١
جدول ۶-۳- خطای تخمین y_t به ازای استفاده از روشهای مختلف ١٠١

فصل اول

مقدمه

۱- مقدمه

سیستمهای فضای حالت غیر خطّی گسسته زمان از جایگاه ویژه ای در تحقیقات اخیر برخوردار بوده اند به طوری که بسیاری از سیستمهای فیزیکی و کاربردهای واقعی به شکل یک سیستم فضای حالت غیر خطّی قابل بیان می باشند. این مسئله معمولاً در دو حالت کلّی خود را نشان می دهد که بیشتر بستگی به تعریف و جایگاه مفهوم حالت در سیستمهای فیزیکی دارد. در وضعیت نخست، به جهت توجیه فیزیکی حالتها می توان معادلات حاکم بر یک سیستم غیر خطّی را به فرم یک معادله فضای حالت غیر خطّی در نظر گرفت. در این میان مسائل مربوط به تعقیب اهداف [۱-۶] ، موقعیت یابی ربات متحرّک [۷-۹]، تشریح ساختار ژن در بیولوژی [۱۰و۱۱] و یا حتّی پیش بینی بازار بورس و سهام [۱۲] را می توان از جمله معروفترین مواردی در نظر گرفت که توسّط یک سیستم فضای حالت غیر خطّی گسسته زمان تشریح می شوند. از طرفی در بسیاری از مسائل هر چند حالتها توجیه فیزیکی ندارند، امّا به جهت پاره ای از ملاحظات،یک مدل فضای حالت غیر خطّی قادر به ارائه درکی مناسبتر از یک سیستم غیر خطّی می باشد. از این جمله می توان به پیش بینی سریهای زمانی در حضور فقدان داده [۱۳و۱۴] ، یادگیری شبکه های عصبی [۱۵و۱۶] و یا حتی بسیاری از مسائل کنترلی [۱۷و۱۸] اشاره نمود که در آنها از مفهوم حالت به عنوان متغیّری کمکی جهت کسب اطّلاعات مناسب از رفتار سیستم مورد استفاده قرار می گیرد. لذا می توان ادعا نمود که بحث و بررسی این گونه سیستم ها می تواند در کسب درک مناسب از بسیاری از سیستمهای واقعی مثمر ثمر واقع شود.

در حین بررسی یک سیستم فضای حالت غیر خطّی با دو مفهوم کلّی شناسایی و کنترل روبرو هستیم. در بسیاری از متون علمی، شناسائی به صورت تخمین عدم قطعیتهای موجود در یک سیستم فضای حالت تعریف می شود[۱۹]. عدم قطعیت در یک سیستم غیر خطّی فضای حالت می تواند ناشی از وجود ترمهای تصادفی نظیر نویز در رفتار سیستم و یا عدم قطعیت ساختاری سیستم باشد که ناشی از عدم وجود اطّلاعات مناسب و کافی از ساختار دینامیکی ویا خروجی یک مدل فضای حالت می باشد. از طرفی خاصیّت غیر خطّی سیستمهای واقعی نیز خود موجب می شود تا درفاز مدل سازی یک سیستم دچار عدم دقّت شویم. به عنوان مثال در مسائل مربوط به تعقیب هدف، به جهت عدم در اختیار داشتن اطّلاعات مناسب از نوع حرکت هدف، یک مدل ساده نظیر سرعت ثابت برای حرکت هدف در نظر گرفته می شود حال آنکه در بسیاری از موارد نظیر حرکات همراه با مانور این مدلها دچار مشکل می شوند [۲۰]. در کنار مشکلاتی که در بحث شناسایی با آن روبرو هستیم، مسئله کنترل را هم می توان به یکی دیگر از صورت مسئله های موجود در پرداختن

به سیستمهای فضای حالت غیر خطّی در نظر گرفت. مسئله کنترل عمدتاً در مواردی خودر ا نـشان می دهد که هدف بهینه سازی یک شاخص هزینه باشد. در این حالت می بایست ورودی های یک مدل فضای حالت طوری تنظیم شوند تا شاخص مورد بحث بهینه گردد. عمـدتاً بـه جهـت رفتـار آماری سیستمهای فضای حالت غیر خطّی، بحث کنترل در این حوزه به صورت کنترل آماری و یـا کنترل بهینه آماری [۱۷] مورد بررسی قرار می گیرد.

با توجّه به طبیعت یک سیستم فضای حالت غیر خطّی می توان شناسایی سیستم را به سه دسـته کلّی تقسیم بندی نمود. در وضعیت اوّل که متداولترین نوع نیز می باشد، به جهـت وجـود نـویز در خروجی (ناشی از سنسورهای اندازه گیری) و یا دینامیک سیستم (خطای سنسورهای ورودی و یا عدم اطّلاع از ورودی ها) عملاً حالتهای درونی سیستم که توصیف عملی از رفتار یک سیستم غیـر خطّی هستند دیگر با استناد به مدل غیر خطّی قابل محاسبه مستقیم نیستند. در حالت دوم علاوه بـر وجود سیگنالهای تصادفی، ساختار سیستم نیز ممکن است دارای عدم قطعیت باشد نظیـر برخـی از پارامترهای سیستم که مقدار آنها یا مجهول است و یا رفتار متغیّر با زمان دارند. این گونه سیـستمها معمولاً نیمه رؤیت شده [1] هم نامیده می شوند که علاوه بـر حالتهـای سیـستم، پارامترهـای آن نیـز مجهول هستند. در بسیاری از موارد نیز مسئله مشکل تر شده و ممکن است عملاً هـیچ اطّلاعـی از ساختار سیستم در اختیار نباشد. هر چند این مسئله شبیه به حالت دوّم ارزیابی می شود، ولی عـدم اطّلاع از ساختار کلّی سیستم نیاز به پیشنهاد یک سـاختار نمونـه و نیـز ارائـه راهکارهـایی جهـت تخمین پارامترهای این ساختار دارد.

تخمین حالت موضوع بحث بسیاری از متون علمی بوده است. همانطور که عنوان شد به جهـت وجود پدیده نویز در ساختار سیستم غیر خطّی عملاً استناد به مدل فـضای حالـت جهـت محاسـبه مقدار لحظه ای حالتهای سیستم ممکن نیست. لذا مسئله تخمین حالـت بـه صـورت تخمـین تـابع توزیع حالتهای مخفی سیستم با استناد به مشاهدات خروجی و ورودی تعریف می شـود. نخـستین تلاشها جهت تخمین این تابع توزیع به روش معمول فیلتر کالمن باز مـی گـردد [۲۱]. کـالمن ایـن روش را نخستین بار جهت کاربرد فیلترینگ در کانالهای مخابراتی پیشنهاد نمـود ولـی بعـدها ایـن روش بطور گسترده در مسائل گوناگون تخمـین حالـت در سیـستمهای فیزیکـی [۲۲]، مخـابرات [۲۳]، یادگیری روی خط شبکه های عصبی و ساختارهای غیـر خطّـی[۱۵] و کنتـرل آمـاری [۲۴] مورد استفاده قرار گرفت. سادگی پیاده سازی، بهینگی و همگرایی از جملـه خـواص مطلـوب ایـن روش محسوب می شوند. امّا، مشکل عمده روش کالمن ضعف در برابر سیستم های غیر خطّی می

[1] Partially Observable

باشد. نخستین ایده جهت جبران این ضعف استفاده از تقریب خطّی سیستمهای غیر خطّی حول نقطه کار و استفاده از فیلتر توسعه یافته کالمن[1] [۲۲] بود. این ایده موجب شد تا روش پیشنهادی کالمن قابل اعمال به سیستمهای غیرخطی هم باشد هر چند الگوریتم توسعه یافته کالمن در برابر رفتارهای غیر خطّی شدید که موجب می شود تا تابع توزیع حالتها به فرم گوسی نباشد دچار خطای فاحشی می گردد نظیر مسائل مربوط به بینائی کامپیوتری و یا تعقیب هدف. جهت جبران این ضعف نیز استفاده از مخلوط توابع گوسی[2] [۲۵] به عنوان ایده ای دیگر مطرح شد جایی که تابع توزیع حالتها به جای یک تابع گوسی ساده به صورت مخلوطی از توابع گوسی در نظر گرفته می شود. اگرچه این روش جایگاه خوبی را در مسائلی نظیر دسته بندی [۲۶] ایفاء می کند امّا اوّلاً حجم محاسبات آن فوق العاده زیاد است و ثانیاً در مواجهه با توابع توزیع غیر گوسی باز هم چندان موفق عمل نمی کند. با توجّه به اینکه عمده ی خطای موجود در روش کالمن به خطّی سازی سیستم غیر خطّی باز می گردد، روشهایی جهت غلبه بر این مشکل پیشنهاد شده اند نظیر استفاده از بسط مرتبه دوم تیلور سیستم غیرخطی تحت عنوان فیلتر گوسی [۲۷] و یا الگوریتم UKF . الگوریتم UKF که نخستین بار توسّط جولیر [۲۸] پیشنهاد شد در مقایسه با روشهای قبلی از دقّت بسیار بهتری برخوردار است به طوری که از آن در مسائل گوناگونی نظیر شناسایی سیستمهای دینامیکی [۲۹-۳۱] استفاده شده است. ایده اصلی این روش نوعی نمونه برداری قطعی از سیستم غیر خطّی به جای خطّی سازی است طوری که استراتژی انتخاب نمونه ها (همان حالتهای سیستم) طوری است که نهایتاً یک تابع هزینه بهینه گردد. ایده نمونه برداری حالتها به جای خطی سازی در سیستمهای غیرخطی موجب شد تا الگوریتمهای نمونه برداری مونت کارلو [۳۲و۳۳] پای خود را به مسائل تخمین حالت باز کنند. با توجّه به اینکه ایده اصلی تخمین حالت به نوعی تخمین یک تابع توزیع می باشد و الگوریتمهای مونت کارلو نیز توابع توزیع غیر گوسی را با استفاده از نمونه برداری تصادفی با دقّت خوبی تخمین می زنند، این الگوریتمها که درحوزه شناسایی تحت عنوان فیلترینگ غیر خطّی یا فیلتر ذرّه ای [3] شناخته می شوند بیش از پیش مورد توجّه محققین قرار گرفته اند. این دقّت قابل توجّه موجب شده است تا الگوریتمهای فیلتر ذرّه ای [۳۴و۳۵] به طور گسترده ای در مسائلی نظیر تعقیب هدف [۱-۶ و ۳۶-۳۷]، شناسایی سیستمهای غیر خطّی دینامیکی[۳۸] ، کنترل و ترتیب بندی سنسورها[4][۳۹-۴۱] مورد استفاده قرار گیرند. همچنین تلفیق این روش با سایر الگوریتمهای تخمین حالت تحت عنوان الگوریتمهای ترتیبی مونت کارلو[۴۲]،

---

[1] Extended Kalman Filter
[2] Mixture of Gaussians
[3] Particle Filter
[4] Sensor Scheduling

الگوریتمهای حاشیه ای فیلتر ذرّه ای [۴۳] و الگوریتم UPF [1] [۴۴] جهت کاهش حجم عملیات و یا افزایش دقّت از جمله دیگر ایده هایی بوده است کـه درحـوزه شناسـایی سیـستمهای غیرخطـی پیشنهاد شده اند. لذا، می توان ادّعا کرد که دقّت مناسب و نیز سـادگی پیـاده سـازی موجـب شـده است تا فیلتر های ذرّه ای جای الگوریتمهای مبتنی بر کالمن را در بسیاری از مسائل تخمین حالت بگیرند.

تخمین پارامتر نیز یکی از موارد مورد علاقه محققین در سالهای اخیر محسوب می شود. به طور کلّی پارامترهای موجود در ساختار یک سیستم غیر خطّی یا توجیه فیزیکی دارند و یا اینکه معـرّف ساختار مدل هستند نظیر شبکه های عصبی و یا مدل سازهای غیر خطّـی. از دیـدی دیگـر تخمـین پارامترها را می توان به دو صورت متفاوت بررسی نمـود. در حالـت اوّل مقـدار نـامی پارامترهـای سیستم مشخص هستند ولی به جهت تغییر لحظه ای پارامترهـا و در نتیجـه رفتـار متغیّـر بـا زمـان سیستم، نیاز به تخمین لحظه ای پارامترهای سیستم داریم. از دیدی دیگر ممکن است مقـدار نـامی پارامترهای سیستم نیز مشخص نباشد. به عنوان مثال یک شبکه عصبی را در نظر بگیرید کـه رفتـار یک سیستم غیر خطّی را توصیف می کند، واضح است که در این وضعیت مقدار نامی پارامترهـا از ابتدا مشخص نیست.

بطور کلّی می توان مسئله تخمین پارامتر را به دو صورت تعریـف نمـود. در تعریـف اوّل مـی توان پارامترهای سیستم را به نوعی به صورت حالتهای مخفی در نظر گرفت. جهت ایـن کـار مـی توان با افزودن یک نویز مصنوعی به مقدار لحظه ای پارامترها عدم قطعیت موجود در مقدار نـامی پارامترها و رفتار متغییر با زمان آنها را توصیف نمود [۱۸]. در این حالت با سیستمی روبرو هـستیم که دارای یک دسته حالتهای جدید است که شامل حالتهای مخفی و پارامترهـا مـی باشـد. در ایـن وضعیت از الگوریتمهای متداول تخمین حالت می تـوان جهـت تخمـین تـوام پارامترهـا و حالتهـا استفاده نمود. به عنوان مسائل الگوریتمهای دوگان نظیر فیلتر دوگان کالمن[۴۵] و فیلتر دوگـان ذرّه ای [۴۶] در مسائل تخمین پارامتر به طور گسترده ای مورد استفاده قـرار گرفتـه انـد. همچنـین بـه جهت رفتار خطّی پارامترها، تلفیق فیلتر ذرّه ای و فیلتر کالمن تحت عنوان الگـوریتم فیلتـر ذرّه ای حاشیه ای نیز جهت تخمین توام پارامترها و حالتها پیشنهاد شده است جائیکه از الگوریتم فیلتر ذرّه ای جهت تخمین حالتها و روش توسعه یافته کالمن جهت تخمین پارامترها استفاده می شود. علـی رغم سادگی پیاده سازی این گونه روشها، دو ضعف عمده موجب کمرنگ شدن جایگـاه روشـهای دوگان در تخمین پارامترهای سیستم می شود. اوّل حجـم محاسـباتی ایـن روشـها هـست کـه بـه

[1] Unscented Particle Filter

خصوص در سیستم هایی با بعد بالای پارامتر ها عملاً به یک مسئله بسیار مهم تبدیل مـی شـود. از طرفی به جهت در نظر گرفتن یک دینامیک ساده برای پارامترهای سیستم، این روشـها در مـواردی که مقدار نامی پارامترها مشخص نیستند عملاً دچار ضـعف مـی شـوند [۱۸]. ایـن ضـعفها انگیـزه استفاده از روشهای تخمین نقطه ای را بیش از پیش در بین محققین ایجاد نمـود. ایـده اصـلی ایـن روشها تخمین پارامترهای سیستم جهت بهینه سازی یک تابع هزینه می باشد. معروفترین روشی که در این میان مورد استفاده قرار گرفته است، روش ماکزیمم تابع شباهت [۴۷] است که در آن هـدف تنظیم پارامترها جهت ماکزیمم سازی تابع شباهت می باشد. نحوه تلفیق الگوریتم ماکزیمم شـباهت و تخمین حالت جهت انجام تخمین توام حالت و پارامتر نیز یکی دیگر از مـسائل مـورد بحـث در متون علمی بوده است. در این میان، نخستین ایده استفاده از روش دقیق ماکزیمم شباهت است کـه در آن از تابع شباهت بر روی حالتهای مخفی انتگرال گیری می شود. متأسـفانه حـل تحلیلـی ایـن روش عملاً امکان پذیر نبوده و جهت محاسبه مشتقات (بـرای بهینـه سـازی تـابع هزینـه) نیـاز بـه استفاده از روشهای تقریبی داریم. اخیراً فیلترهای ذرّه ای به عنوان ابزاری قدرتمنـد جهـت تخمـین مشتقات تابع شباهت در جبران ضعفهای سایر روشهای تقریبی پیشنهاد شده اند [۴۸]. منتها حجـم عملیاتی این روش هم به حدی بالا است که برای سیستمهایی که بعد پارامتریک آنها بالاست عمـلاً غیر قابل استفاده می باشد. از جمله دیگر روشهایی که جهت انجام تخمـین تـوام پـارامتر و حالـت مورد استفاده قرار می گیرد می توان به روش زیر بهینه مـاکزیمم سـازی مـشاهدات (EM) اشـاره نمود. این الگوریتم نخستین بار توسّط [۴۹و۵۰] پیشنهاد شد و ایده اصلی آن ماکزیمم سـازی یـک باند پائین از تابع شباهت به جای خود تابع شباهت می باشد. این تقریب موجب می شود تـا پیـاده سازی این الگوریتم و نیز حسّاسیت آن نسبت به بعـد سیـستم فـوق العـاده کمتـر شـود. از طرفـی الگوریتم EM همگرایی فرآیند شناسایی را نیز تضمین می کند. مزایای فوق موجب شده اسـت تـا الگوریتم EM بطور موفقیّت آمیزی در مسائل زیادی از جمله شناسایی سیستمهای غیر خطّی[۳۸ و ۵۱]، یادگیری شبکه های عصبی[۵۲] و پیش بینی سریهای زمانی همـراه بـا فقـدان داده [۵۳] بکـار گرفته شود. لذا می توان ادّعا نمود که الگوریتم EM ابزاری بمراتب قویتر و در عین حال ساده تـر را جهت تخمین توام پارامتر و حالت در مقایسه با روشهای ذکر شده قبلی فراهم می نماید.

اخیراً شناسایی کور سیستمهای فضای حالت غیر خطّی یکی دیگر از موارد مورد علاقه محققین بوده است جاییکه ساختار کلّی سیستم غیر خطّی ممکن است مشخص نباشد. نخـستین تلاشـها در این ارتباط به استفاده از مدلهای خطّی دینامیکی باز می گردد جاییکـه یـک سـاختار خطّـی جهـت تشریح رفتار مدل انتقال حالت و خروجی سیستم درنظر گرفته می شود. قهرمانی و هینتون [۱۴] از

الگوریتم EM و هموار ساز توسعه یافته کالمن [1] [۵۴] جهت تخمین توام پارامترها و حالتهای سیستم غیرخطی بهره گرفتند. تفاوت این روش با روشهای معمول در استفاده از هموارساز کالمن به جای فیلتر کالمن بود چرا که عملاً در کاربردهای کور به جهت عدم اطّلاع از ساختار سیستم استفاده از روشهای روی خط معنایی ندارد. در کاربردهای خارج از خط نیز روشهای هموار سازی، تخمین بسیار بهتری را از حالتهای مخفی سیستم نسبت به روش های فیلترینگ فراهم می کند. ضعف موجود در روش قبلی که به استفاده از مدل خطّی باز می گشت موجب شد تا شبکه های عصبی مصنوعی توسّط [۱۳] جهت مدل سازی کور سیستمهای غیر خطّی پیشنهاد شوند. آنها یک شبکه عصبی شعاعی پایه (RBF) را جایگزین معادلات انتقال حالت و خروجی نمودند و سپس با استفاده از الگوریتم EM و هموار ساز کالمن شبکه مورد بحث را آموزش دادند. تا آنجایی که در متون علمی قابل مشاهده می باشد این کاملترین روشی است که تا به حال جهت شناسایی کور مدل های فضای حالت غیر خطّی پیشنهاد شده است. هرچند تلفیق الگوریتم EM با فیلتر های ذره ای موضوع بحث بسیاری از مقالات بوده است [۳۸] امّا هیچ بحثی در ارتباط با نحوه اعمال این الگوریتمها بر روی مدل های غیر خطّی پارامتریک صورت نگرفته است. بدیهی است که افزایش دقّت مدل سازی کور می تواند در بسیاری از مسائل عملی نظیر اکوالایزیشن کور[2] در کانالهای مخابراتی [۵۵] و یا پیش بینی سری های زمانی نقش بسزائی ایفاء نماید.

اگر چه کارهای بسیار زیادی در حوزه تخمین توام حالتها و پارامترها در یک مدل فضای حال غیر خطّی صورت گرفته است امّا هنوز این روشها از برخی مشکلات رنج می برند. نخست اینکه در حوزه شناسایی روی خط، همانطوری که ذکر شد الگوریتم های دوگان در شناسایی سیستمهایی که در آنها اطّلاعی از مقدار نامی پارامترها در دسترس نیست دچار ضعف بوده و لذا الگوریتم های تخمین نقطه ای نظیر EM ترجیح داده می شوند. یکی از مشکلات این روشها کندی همگرایی آنها است حال آنکه در کاربردهای روی خط سرعت همگرایی از اهمیّت بسزایی برخوردار است. از طرفی هیچ مطالعه جامعی جهت مقایسه روشهای مبتنی بر EM و فیلترهای دوگان در متون علمی صورت نگرفته است تا از کارآیی این روشها در تخمین توام حالت و پارامتر اطلاع درستی حاصل شود. اضافه بر این در حوزه شناسایی کور، عمده روشهای پیشنهادی در مواجهه با سیستمهای واقعی دچار مشکل هستند. این وضعیت به جهت استفاده از روش کالمن در فاز تخمین حالت می باشد که در مقابل رفتار غیر خطّی شبکه های RBF دچار ضعف می شود. به این موضوع می توان ضعف قابلیت مناسب تعمیم این شبکه ها را به جهت رفتار خطّی بین خروجی شبکه و پارامترهای

[1] Extended Kalman Smoother
[2] Blind Equalization