



State Estimation of a Crane Using Fuzzy UHF

Mojtaba Masoumnezhad^{1*}, Abolfazl Yastibolaghi², Nader Nariman-Zadeh³

¹ Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Chamran, Rasht Branch, Technical and Vocational University (TVU), Rasht, Iran.

² Master's graduate, Mechanical Engineering, Islamic Azad University of Takestan, Takestan, Iran.

³ Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 12.31.2019

Revised: 06.05.2020

Accepted: 06.23.2020

Keyword:

FACTS equipment

UPFC

Power flow

Reactive power control

Active power control

***Corresponding Author:**

Mojtaba Masoumnezhad

Email:

mmasomnezhad@tvu.ac.ir

ABSTRACT

These days overhead crane is widely used in different industries such as automobile, navigation and also transportation of tools in storerooms. In this paper, a new adaptive strategy of Kalman Filter based on Fuzzy logic in which it tunes the process noise covariance matrix Q is presented. The method proposed attempts to offset some of the assumptions made in UHF formulation and is also robust with respect to the nonlinearities in the dynamic system subjected to non-stationary noises. The matrix Q influences the Kalman gain matrix K and thus, tuning the covariance matrix in-turn amounts to tuning K , thereby improving the filter's performance. Also, this paper considers an important application the state estimation of a Crane, which dynamics are highly nonlinear and the noises affecting it are non-stationary.





دانشگاه فنی و حرفه‌ای
تفاهول و فنی

کارافان

فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای

بهار ۱۳۹۹، دوره ۱۷، شماره ۱، ۱۳۲-۱۱۵

آدرس نشریه: <https://karafan.tvu.ac.ir/>

doi:10.48301/KSSA.2020.112760

20.1001.1.23829796.1399.17.1.79



شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

تخمین مسیر حرکت جرثقیل سقفی با استفاده از فیلتر UHF فازی

مجتبی معصوم‌نژاد^{۱*}، ابوالفضل یاستی بلاغی^۲، نادر نریمان‌زاده^۳

- ۱- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشکده فنی چمران، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، رشت، ایران.
- ۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تاکستان، تاکستان، ایران.
- ۳- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

چکیده

امروزه صنعت جرثقیل سقفی در صنایع خودروسازی، کشتیرانی و حمل بار در انبارها به کار گرفته می‌شود. اغلب مدل‌سازی‌هایی که از سیستم‌های دینامیکی صنعتی صورت می‌گیرد، دارای پارامترهای مخدوش با نویز یا اغتشاش است که مدل جرثقیل سقفی نیز جدا از این قاعده نیست. در این مقاله، راهبرد تطبیقی جدیدی از فیلتر UHF بر پایه منطق فازی برای تنظیم ماتریس کوواریانس نویز فرایند Q ارائه شده است. روش ارائه شده برای بهبود برخی از فرضیه‌های به‌دست‌آمده در فیلتر UHF است. همچنین با توجه به اینکه سیستم دینامیکی غیرخطی تحت نویزهای متغیر است، ماتریس Q متأثر از ماتریس K بهره کالمن بوده و بدین ترتیب ماتریس کوواریانس تنظیم شده و به میزان بهره کالمن می‌رسد و عملکرد فیلتر UHF بهبود می‌یابد. در این مقاله، عملکرد مهمی از تخمین حالت یک جرثقیل سقفی که دینامیک غیرخطی و متأثر از نویزهای متغیر است، در نظر گرفته شده است.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۱۱

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۱۶

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۰۳

کلید واژگان:

فیلتر UHF

فیلتر H^∞

تخمین مسیر جرثقیل

منطق فازی

*نویسنده مسئول: مجتبی معصوم‌نژاد

پست الکترونیکی:

mmasommezhad@tvu.ac.ir



© 2020 Technical and Vocational University, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

مقدمه

کنترل سیستم‌های دینامیکی پُرکاربرد در صنعت از دیرباز مورد توجه بسیاری از مهندسان بوده است. با توجه به استفاده گسترده از جرثقیل سقفی در صنایع، شرایط مختلف کاری آن تاکنون توسط محققان مورد بررسی قرار گرفته است [۱]. در شرایطی که جرثقیل سقفی دارای مدل دینامیکی غیرخطی و متغیر با زمان است، روش‌های مختلف کنترلی برای بهبود عملکرد آن توسط پژوهشگران پیاده‌سازی شده است [۲؛ ۳]. فیلترهای کالمن توسعه‌یافته EKF 1 و فیلتر UKF 2 برای تخمین متغیرهای سیستم‌های غیرخطی بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی مخدوش با نویز به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. فیلتر کالمن در تخمین متغیرهای حالت، در صورت معلومبودن مقادیر کوواریانس نویزهای فرایند و مشاهده‌گر، دارای عملکرد قابل قبولی است؛ به‌گونه‌ای که منجر به کمترین مقدار انحراف استاندارد خطای برآورد می‌شود. در مقایسه با فیلتر کالمن، فیلتر H^∞ نیاز به اطلاعات آماری دقیق در مورد نویزهای سیستم ندارد و در آن تلاش می‌شود تا اثر بدترین اغتشاش ممکن روی خطای برآورد به کمترین میزان برسد؛ در نتیجه در مقابل فقدان قطعیت مدل، دارای پایداری بیشتری است [۴].

عملکرد مناسب فیلتر UKF وابسته به دانستن اطلاعات درست از مقادیر کوواریانس‌های نویز فرایند و مشاهده‌گر است [۵] که طی کل فرایند ثابت فرض می‌شود. در سال ۲۰۱۰، وانگ و همکاران [۶] برای افزایش پایداری و مقاومبودن فیلتر UKF را با H^∞ ترکیب کردند و فیلتر سیگما H^∞ را ارائه دادند. همچنین در سال ۲۰۱۰، لی و همکاران [۷] با ترکیب تبدیل بی‌رد و فیلتر H^∞ الگوریتم جدیدی را با عنوان UHF مطرح کردند. در سال ۲۰۱۴ معصوم‌نژاد و همکاران [۸] تخمین بهینه متغیرهای حالت یک آونگ وارون را با استفاده از فیلتر UHF ارائه کردند. در سال‌های اخیر نیز ترکیب فیلتر کالمن و H^∞ توسط پژوهشگران پیاده‌سازی شده است [۹]. در تمامی مقالات، مقادیر کوواریانس نویزهای فرایند و مشاهده‌گر ثابت فرض شده است.

در سیستم‌های دینامیکی با نویزهای شدید هیچ تضمینی برای ثابت‌ماندن مقادیر کوواریانس نویزهای فرایند و مشاهده‌گر طی زمان وجود ندارد؛ بنابراین مقادیر کوواریانس نویزهای فرایند و مشاهده‌گر در الگوریتم فیلتر کالمن باید پیوسته تغییر یابد تا این فیلتر بتواند تخمین مناسبی از متغیرهای حالت سیستم ارائه دهد. برای دستیابی به این هدف، روش فازی به همراه فیلتر UHF پیشنهاد می‌شود. در فیلتر UHF با استفاده از منطق فازی متناسب با تغییرات تابع خطای تخمین، مقدار کوواریانس نویزهای فرایند و مشاهده‌گر به‌گونه‌ای تغییر می‌یابد که همواره میانگین مجذور مربعات خطای تخمین به کمترین میزان برسد.

فیلتر UHF

فیلتر H^∞ برای سیستم‌های زمان گسسته غیرخطی در نظر گرفته شده است که در آن راه‌حل جدیدی با تعبیه تکنیک تبدیل آنستند روی ساختار فیلتر H^∞ توسعه‌یافته است. برای غلبه بر محدودیت‌های EKF، انتگرال‌های مقاومی که طی استفاده از فیلترینگ غیرخطی با آن مواجه هستیم، با انتخاب ترکیبی از نقاط سیگماهای مشخص، تقریب زده می‌شوند و با به‌کارگیری رویکرد انتشار خطی، خطای آماری به تقریب معادلات اندازه‌گیری پرداخته شده است [۹]. به بیان ساده، الگوریتمی که در این بخش ارائه شده است، شامل به‌کارگیری H^∞ برای مسائل غیرخطی با استفاده از رویکرد انتخاب نقاط سیگماها و نیز پیاده‌سازی تبدیل آنستند بر روی آن‌هاست.

1. Extended Kalman Filter
2. Uncented Kalman Filter

در لحظه آغاز، پارامتر سیستم را با \hat{x}_0 و کوواریانس را با P_{x_0} نمایش می‌دهیم. پارامتر سیستم دارای L عضو است. یک مجموعه نقاط سیگما را بر اساس میانگین و کوواریانس متغیر تصادفی x در لحظه $k-1$ انتخاب می‌کنیم.

$$\chi_{k-1|k-1}^0 = \hat{x}_{k-1|k-1} \quad (۱)$$

$$\chi_{k-1|k-1}^0 = \hat{x}_{k-1|k-1} + (\sqrt{(L+\lambda)P_x})_i \quad (۲)$$

$$\chi_{k-1|k-1}^0 = \hat{x}_{k-1|k-1} - (\sqrt{(L+\lambda)P_x})_i \quad (۳)$$

$$w^0 = \frac{\lambda}{L+\lambda} \quad (۴)$$

$$w^i = \frac{\lambda}{2(L+\lambda)} \quad (۵)$$

$$w_c^0 = \frac{\lambda}{(L+\lambda)} + (1 - \alpha^2 + \beta) \quad (۶)$$

$$\lambda = \alpha^2(L + \kappa) - L \quad (۷)$$

که در آن $i=1, 2, \dots, L$ و L ، بعد بردار متغیر حالت است. X_i مقادیر نقاط سیگماست که بر اساس مقادیر میانگین (\hat{x}) و کوواریانس (p) بردار حالت در لحظه قبل (X_{k-1}) محاسبه می‌شوند. همچنین W_1 ها وزن‌های نرمال وابسته به i امین نقاط سیگما است. α ، β و k ضرایب طراحی هستند که توسط طراح انتخاب می‌شوند. همچنین k ، مثبت نیمه‌معین بودن ماتریس کوواریانس را تضمین می‌کند. در مرحله بعد نقاط سیگما را از طریق تابع غیرخطی انتشار می‌دهیم.

$$\chi_{k|k-1}^i = f(\chi_{k-1|k-1}^i) \quad (۸)$$

$$\hat{x}_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2L} w^i \chi_{k|k-1}^i \quad (۹)$$

$$P_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2L} w^i [\chi_{k|k-1}^i - \hat{x}_{k|k-1}][\chi_{k|k-1}^i - \hat{x}_{k|k-1}]^T + Q \quad (۱۰)$$

با توجه به اینکه ارائه مقادیر به‌روزرسانی شده میانگین و کوواریانس بر اساس تابع اندازه‌گیری خطی شده HK است، اگر تحت چهارچوب تبدیل آنسند این تابع به صورت مجزا موجود نباشد، باید برای حل این مشکل معادلات به‌روزرسانی را به کمک روش آماری بسط خطی خطا، فرموله کنیم. به عبارت دیگر کوواریانس اندازه‌گیری با توجه به رابطه (۱۱) تقریب می‌شود.

$$P_{k|k-1}^{yy} \cong E[y_k - \hat{y}_{k|k-1}][y_k - \hat{y}_{k|k-1}]^T \approx H_k P_{k|k-1} H_k^T \quad (۱۱)$$

که می‌توانند با استفاده از نقاط سیگماها محاسبه شوند.

$$P_{k|k-1}^{yy} = \sum_{i=0}^{2L} w^i [h(\chi_{k|k-1}^i - \hat{y}_{k|k-1})][h(\chi_{k|k-1}^i - \hat{y}_{k|k-1})]^T \quad (12)$$

$$P_{k|k-1}^{yy} = \sum_{i=0}^{2L} w^i [\chi_{k|k-1}^i - \hat{x}_{k|k-1}][h(\chi_{k|k-1}^i - \hat{y}_{k|k-1})]^T \quad (13)$$

$$\hat{y}_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2L} w^i h(\chi_{k|k-1}^i) \quad (14)$$

در آخر میانگین و کوواریانس به‌روزرسانی شده با توجه به روابط (۱۷-۱۵) محاسبه می‌شوند.

$$K_{k|k} = P_{k|k-1}^{xy} (R + P_{k|k-1}^{yy})^{-1} \quad (15)$$

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_{k|k} (y_k - \hat{y}_{k|k-1}) \quad (16)$$

$$P_{k|k} = P_{k|k-1} - [P_{k|k-1}^{xy} P_{k|k-1}] R_{e,k}^{-1} \begin{bmatrix} P_{k|k-1}^{xy} \\ P_{k|k-1}^T \end{bmatrix} \quad (17)$$

که در آن ماتریس $R_{e,k}$ به وسیله معادله (۱۸) تعریف می‌شود.

$$R_{e,k} = \begin{bmatrix} R + P_{k|k-1}^{xy} & P_{k|k-1}^{xy} \\ P_{k|k-1}^{xy} & -\beta^2 + P_{k|k-1} \end{bmatrix} \quad (18)$$

برای محاسبه مقدار β^2 در معادله (۱۸) از فرمول ارائه‌شده در معادله (۱۹) استفاده شده است [۸].

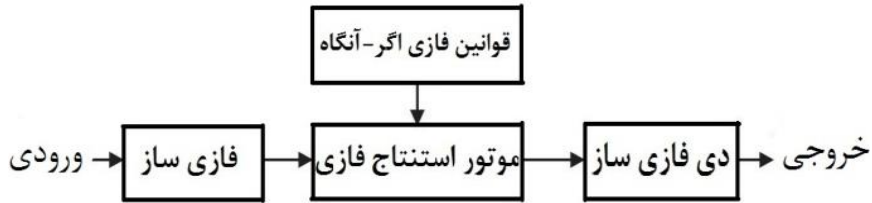
که در معادله (۱۹) عبارت $\max[\text{eig}(A)]$ بیانگر بیشترین مقدار ویژه ماتریس A و Υ پارامتر طراحی بزرگ‌تر از یک است که توسط طراح انتخاب می‌شود.

$$\beta^2 = \gamma \max \left(\text{eig} \left(P_k^- + P_{k|k-1} P_{k|k-1}^{xy} R_{e,k}^{-1} P_{k|k-1} P_{k|k-1}^{xy} \right)^T \right)^{-1} \quad (19)$$

منطق فازی و کاربرد آن در فیلتر UHF

دنیای واقعی پیچیده‌تر از آن است که بتوان توصیف و تعریف دقیقی برای آن به دست داد؛ بنابراین باید برای یک مدل، توصیف تقریبی یا همان فازی که قابل قبول و قابل تجزیه و تحلیل باشد، معرفی شود. با حرکت به سوی عصر اطلاعات، دانش و معرفت بشری بسیار اهمیت یافته است و به فرضیه‌ای نیاز داریم که بتواند دانش بشری را به شکلی سیستماتیک فرموله کرده و آن را به همراه سایر مدل‌های ریاضی در سیستم‌های مهندسی قرار دهد. سیستم‌های فازی، سیستم‌های مبتنی بر دانش یا قواعد هستند. قلب یک سیستم فازی پایگاه دانش است که برخی کلمات آن به وسیله توابع تعلق پیوسته مشخص شده‌اند.

موتور استنتاج الگوریتم فازی که بخش تحلیلی و مفهومی الگوریتم فازی است، با توجه به این قوانین فازی و همچنین ورودی‌های سیستم در هر لحظه، خروجی را تولید می‌کند. بخش دی فازی، به‌عنوان آخرین فاز از فرایند، با توجه به سطحی که در مرحله استنتاج به دست آمده است، مقادیر فازی به مقادیر غیر فازی تبدیل می‌شوند [۱۰]. فرایند الگوریتم فازی در شکل شماره ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱. فرایند به کارگیری الگوریتم فازی در تشخیص و شناسایی خطا

همان‌طور که در بخش دوم اشاره شد، عملکرد فیلتر UHF در اصل وابسته به نویزهای فرایند و اندازه‌گیری با نام‌های ماتریس کوواریانس نویز فرایند Q و ماتریس کوواریانس نویز اندازه‌گیری R است؛ بنابراین ضروری است برای عملکرد بهتر فیلتر UHF مرتب با شرایط نویزها تنظیم شوند. دیدگاه‌های بسیاری برای تنظیم فیلتر UHF طی زمان ارائه شده است.

در الگوریتم جدید، زیرسیستم‌های فازی یک عامل ak تنظیم‌شده مناسب را تولید می‌کنند. این ak به‌عنوان مقیاس ماتریس کوواریانس نویز Q و R استفاده شده و در هر مرحله زمانی یک Q_{knew} و R_{knew} تولید می‌کند. این Q_{knew} و R_{knew} جدید در فیلتر UHF، برای پیش‌بینی تخمین حالت جدید در هر مرحله زمانی استفاده می‌شود. نخستین اختلاف برگشتی Sk از تمام بردارهای ورودی قابل‌اندازه‌گیری Zk را خواهد داد. Sk به‌عنوان ورودی زیرسیستم فازی استفاده شده و وابسته به دانش پایه قوانین فازی است که عامل تنظیم‌شونده مفید αk را برای جبران ماتریس Qk تولید می‌کند؛ در نتیجه عملکرد دینامیکی فیلتر را بهبود می‌بخشد.

انتخاب ورودی‌های زیرسیستم فازی

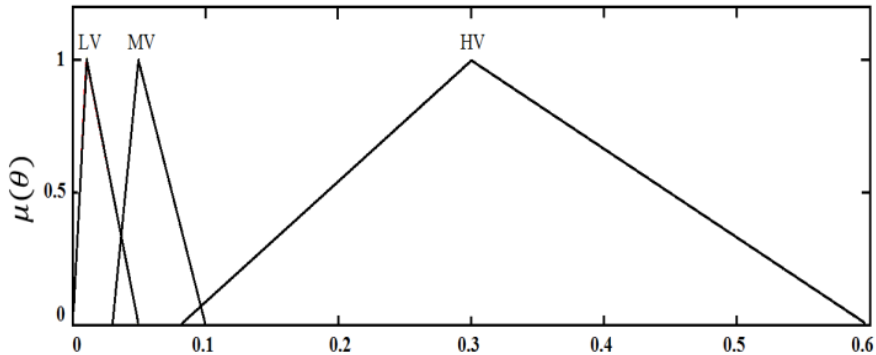
متغیرهای ورودی از نخستین اختلاف پسین دو متغیر موقعیت x و زاویه پاندول جرثقیل θ انتخاب می‌شوند؛ بنابراین ورودی سیستم فازی مقادیر $x - \bar{x}$ و $\theta - \bar{\theta}$ بوده و خروجی آن αk است. بازه متغیرهای ورودی مفروض مربوطه جامعه آماری خوانده می‌شود. این جامعه آماری از محاسبات مقادیر مطلق اولین اختلاف برگشتی موقعیت اندازه‌گیری شده مختصات x و θ به دست می‌آید. جامعه آماری مربوطه از دو متغیر ورودی در جدول شماره ۱ نشان داده شده است. بازه تغییرات متغیر خروجی زیرسیستم فازی αk به صورت $[0 \ 100]$ انتخاب شده است.

جدول ۱. جامعه آماری از متغیرهای ورودی و خروجی

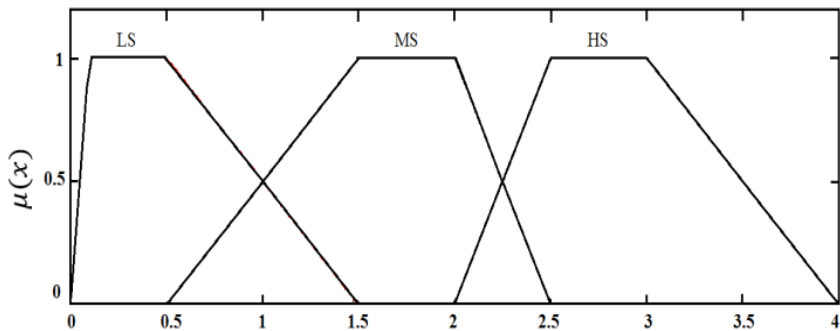
متغیرهای ورودی	جامعه آماری
x_{fdk}	$[0 \ 4]$
θ_{fdk}	$[0 \ 0.6]$

فازی سازی

منطق فازی برای هر یک از متغیرهای ورودی به زیرسیستم فازی، یک متغیر زبانی اختصاص می‌دهد. این متغیرهای زبانی با نام‌های ارزش کم (LV1)، ارزش متوسط (MV2)، ارزش بالا (HV3) معرفی می‌شوند. تمامی متغیرهای زبانی به کاررفته در توابع عضویت دوزنقه‌ای و مثلثی از متغیرهای ورودی در شکل ۲ و ۳ نشان داده شده‌اند. به‌طور مشابه برای متغیر خروجی تنظیم‌شده فازی با نام عامل انطباق α_k نیز سه متغیر زبانی با نام‌های افزایش کم (IL4)، افزایش متوسط (IM5) و افزایش زیاد (IH6) تعریف می‌شود. این سه متغیر زبانی در تابع عضویت دوزنقه‌ای و مثلثی از متغیر خروجی به کار رفته‌اند که در شکل شماره ۴ نشان داده شده‌اند.

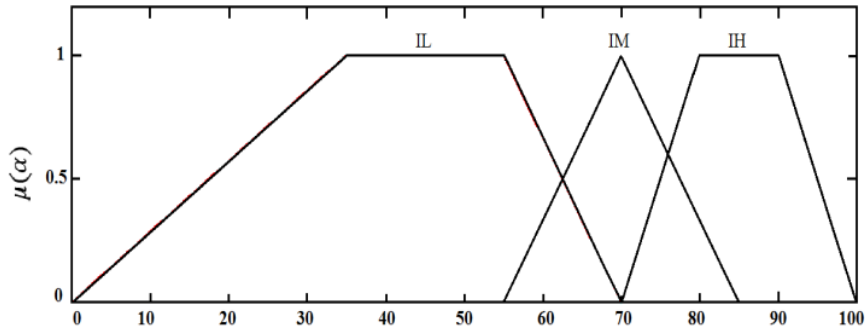


شکل ۲. تابع عضویت از متغیر ورودی x



شکل ۳. تابع عضویت از متغیر ورودی θ

-
1. Low Value
 2. Medium Value
 3. High Value
 4. Increase Low
 5. Increase Medium
 6. Increase High

شکل ۴. تابع عضویت از متغیر خروجی α_k

ساختار پایگاه دانش

پایگاه دانش زیر سیستم فازی به کمک دانش و اطلاعات فنی کاربر انسانی از سیستم دینامیکی مربوطه ساخته می‌شود. این پایگاه شامل نه قانون فازی است که از یک ماتریس زبانی 3×3 نشان داده شده در جدول شماره ۲ به دست آمده است.

خروجی موتور استنتاج فازی از زیرسیستم فازی یک خروجی زیرمجموعه فازی بوده که بسیاری ارزش‌های ممکن α_k را نمایش می‌دهد که می‌توان از آن‌ها برای تنظیم ماتریس Q_k و R_k استفاده کرد.

جدول ۲. بانک فازی

$\hat{x}d_k$	θd_k	LV	MV	HV
LV		IL	IL	IM
MV		IM	IM	IH
HV		IM	IH	IH

نافازی‌سازی

فیلتر UHF به یک مقدار واقعی و بهترین عامل برای تنظیم نیاز دارد؛ بنابراین بهترین و تنها ارزش از طریق عملیات نافازی‌سازی از خروجی‌های زیر مجموعه فازی به دست خواهد آمد. برای این عملیات، از روش مرکزیت استفاده شده است.

الگوریتم فیلتر UHF فازی

الگوریتم فیلتر UHF فازی همانند الگوریتم ارائه شده در بخش دوم است؛ با این تفاوت که در الگوریتم پیشنهادی جدید، برای تنظیم و تطبیق مقادیر کوواریانس Q_k و R_k از منطق فازی استفاده شده است تا در هر مرحله از تخمین، با توجه به مقادیر حاصل از تخمین و مشاهده‌گر به‌عنوان ورودی سیستم فازی، یک عامل تطبیق α_k به دست آید تا با توجه به رابطه (۲) برای به‌روزرسانی مقادیر کوواریانس استفاده شوند. با توجه موارد گفته‌شده در بخش‌های پیشین، مراحل کلی الگوریتم پیشنهادی به صورت زیر خواهد بود:

- معرفی مقادیر اولیه
- معرفی ماتریس کوواریانس نوین فرایند Q_k

- معرفی ماتریس کوواریانس نوین اندازه‌گیری R_k
- معرفی ماتریس کوواریانس خطا P_0
- معرفی بردار حالت X_0
- خواندن ماتریس انتقال حالت A و ماتریس اندازه‌گیری H و داده‌های قابل اندازه‌گیری ماتریس Z_k تخمین حالت قبلی \hat{X}_k^- با استفاده از رابطه (۲۰) محاسبه می‌شود:

$$\hat{X}_k^- = A\hat{X}_{k-1}^- + BU_{k-1} \quad (20)$$

اندازه بردار اختلاف برگشتی S_k با استفاده از رابطه (۲۱) به دست می‌آید:

$$S_k = Z_k - Z_{k-1} \quad (21)$$

با استفاده از بردار S_k به‌عنوان ورودی زیرسیستم فازی عامل تنظیم‌شونده α_k را پیدا می‌کنیم. ماتریس کوواریانس جدید Q_{knew} و R_{knew} با استفاده از رابطه (۲۲) محاسبه می‌شود:

$$Q_k^{new} = \frac{Q_k}{\alpha_k}, \quad R_k^{new} = \frac{R_k}{\alpha_k} \quad (22)$$

حل کردن ماتریس کوواریانس خطا $P-k$ با استفاده از جایگزینی Q_{knew} به جای Q_k و همچنین R_{knew} به جای R_k برای پیدا کردن کوواریانس خطای تخمین $P-k$ با استفاده از رابطه (۲۳) محاسبه می‌شود:

$$P_k^- = AP_{k-1}^- A^T + Q \quad (23)$$

در نهایت این الگوریتم تا جایی که شرایط فیلتر UHF را اغنا کند، ادامه می‌یابد.

تعریف مسئله

جرثقیل مورد نظر در این مقاله به صورت دوبعدی در نظر گرفته شده است. با این فرض که جرثقیل دارای دو چرخ بوده و روی خط راست حرکت می‌کند، جرم حامل M است. جرم (m) متصل به کابل از حامل آویزان است که کابل در طول حرکت دارای زاویه $\theta(t)$ می‌شود. شتاب جاذبه وارده از سوی زمین (g) در نظر گرفته می‌شود. برای حرکت این جرثقیل نیروی F به آن وارد می‌شود که در شکل شماره ۵ نشان داده شده است. در صورتی که جرثقیل‌های مورد مطالعه تنها حرکت صفحه‌ای داشته باشند، حرکت جرثقیل در حالت طول کابل ثابت و متغیر با زمان بررسی می‌شود. مدل دینامیکی زمان پیوسته جرثقیل سقفی نشان داده شده در شکل شماره ۵، بدین صورت است [۲]:

$$(M + m)\ddot{x}(t) - m\ddot{l}(t)\sin\theta(t) - 2m\dot{l}(t)\dot{\theta}(t)\cos\theta(t) - ml(t)\ddot{\theta}(t)\cos\theta(t) + ml(t)\sin\theta(t)\dot{\theta}^2 = F(t) \quad (24)$$

$$\ddot{x}(t)\cos\theta(t) - l(t)\ddot{\theta}(t) - g\sin\theta(t) - 2\dot{l}(t)\dot{\theta}(t) = 0 \quad (25)$$

m=0.2 kg	جرم بار
M=1 kg	جرم گاری
$\frac{m}{2}$	شتاب جاذبه زمین
g=9.81 s^{-2}	
l=1m	طول کابل
X meter	جابه‌جایی گاری
FN	نیروی خارجی وارد بر گاری
rad θ	زاویه نوسان

چهار چوب اصلی مدل فضای حالت دینامیکی برای یک سیستم غیرخطی گسسته به صورت رابطه (۲۶ و ۲۷) است:

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k, v_k) \quad (26)$$

$$y_k = h(x_k, u_k, n_k) \quad (27)$$

که در آن X_k بیانگر متغیر حالت مشاهده‌نشده سیستم و u_k بیانگر خروجی معلوم و v_k نیز بیانگر سیگنال قابل اندازه‌گیری است. تابع f بیانگر معادله حالت و تابع h بیانگر مشاهده‌گر حالت است. مدل دینامیکی زمان گسسته سیستم جرثقیل سقفی به صورت رابطه (۲۸) است:

$$\begin{bmatrix} x_{1,k+1} \\ x_{2,k+1} \\ x_{3,k+1} \\ x_{4,k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{2,k} \times dt + x_{1,k} \\ \dot{d} \times dt + x_{2,k} \\ x_{4,k} \times dt + x_{3,k} \\ \ddot{\theta} \times dt + x_{4,k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \end{bmatrix} \quad (28)$$

که در آن مقادیر موقعیت و سرعت گاری و همچنین زاویه و سرعت زاویه‌ای حرکت بار، متغیرهای بردار طراحی هستند. بردار حالت و بردار مشاهده‌گر به ترتیب از روابط (۲۹ و ۳۰) آورده شده است.

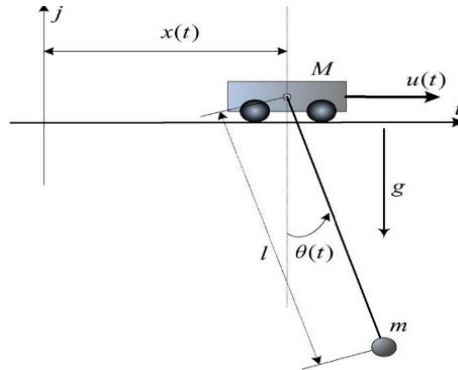
$$X(t) = [d \quad \dot{d} \quad \theta \quad \dot{\theta}]^T \quad (29)$$

$$y(t) = [d \quad \theta]^T \quad (30)$$

نویز فرایند w_k و نویز مشاهده‌گر v_k ، نویزهای گوسی سفید هستند که دارای ماتریس کوواریانس به ترتیب Q و R هستند که به صورت رابطه (۳۱ و ۳۲) است.

$$Q = 0.004 \times \text{diag}\{1 \quad 1 \quad 1 \quad 1\} \quad (31)$$

$$R = 0.01 \times \text{diag}\{1 \quad 1 \quad 1 \quad 1\} \quad (32)$$



شکل ۵. شماتیک جرثقیل سقفی

نتایج شبیه‌سازی

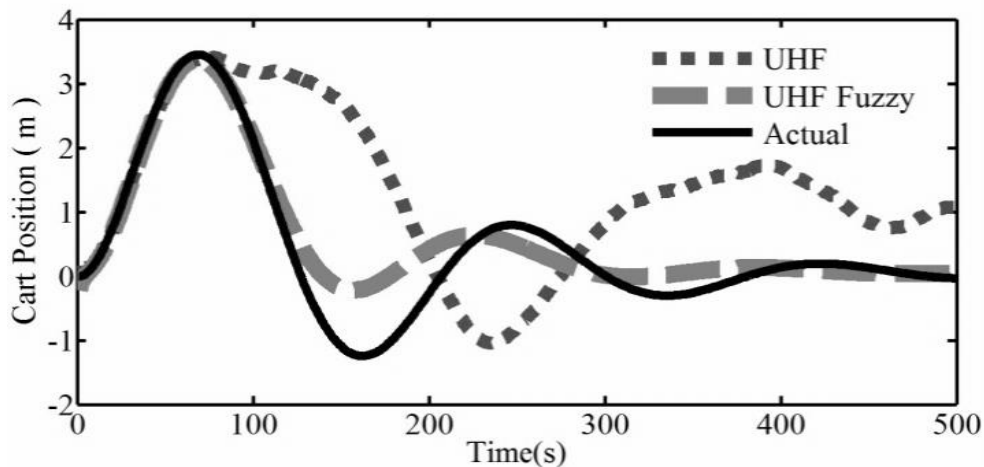
در این بخش ابتدا تخمین مسیر حرکت برای یک جرثقیل با استفاده از فیلتر UHF و فیلتر فازی UHF بررسی شده است. سپس نتایج حاصل در قالب نمودارهای مقایسه‌ای دو روش برحسب زمان برای موقعیت گاری x ، سرعت گاری \dot{x} ، زاویه پاندول جرثقیل θ ، سرعت زاویه‌ای پاندول $\dot{\theta}$ و نمودار خطای حالت و توزیع احتمالی خطای حالت نمایش داده می‌شود.

شبیه‌سازی با در نظر گرفتن نویز در حالت طول کابل ثابت

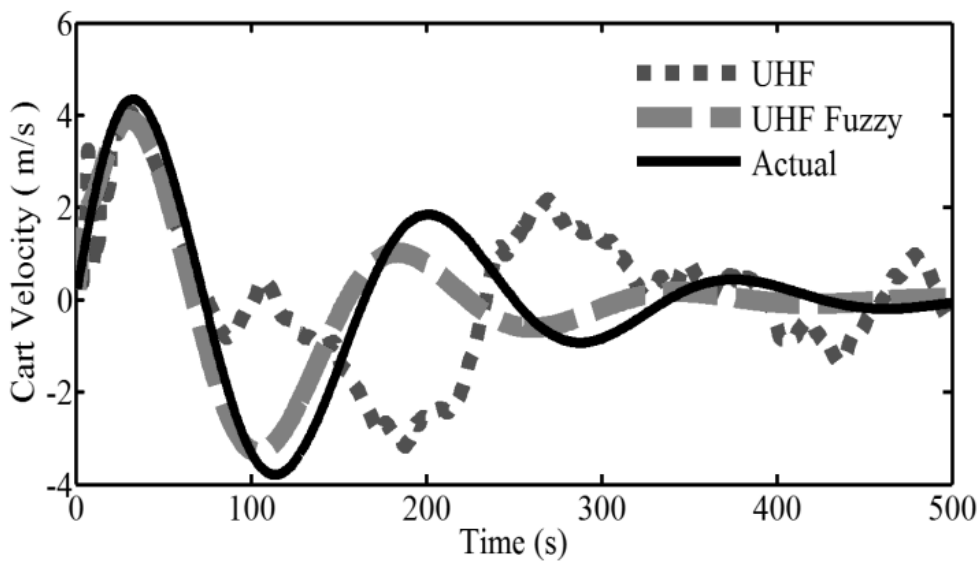
از روابط (۲۴ و ۲۵) برای مدل‌سازی سیستم جرثقیل سقفی استفاده می‌شود. برای حالت طول کابل ثابت با توجه به ثابت بودن طول کابل مقادیر $\dot{l}(t)$ و $\ddot{l}(t)$ برابر صفر خواهند شد. نتایج به‌دست‌آمده در شکل‌های شماره ۶ تا ۱۰ نشان داده شده است. مقادیر حقیقی نشان‌دهنده در شکل شماره ۶ تا شماره ۹ بر اساس روش مونت کارلو [۱۱] برای ۵۰۰ داده احتمالی با توزیع یکنواخت که به وسیله تابع غیرخطی مدل زمان گسسته جرثقیل انتشار یافته، به دست آمده است.

نمودارهای تغییرات متغیرهای حالت سیستم جرثقیل سقفی نشان می‌دهد در صورت وجود نویزهای متغیر در سیستم، فیلتر UHF فازی به‌درستی و با دقت بالاتر نسبت به حالت UHF قادر است متغیرهای حالت سیستم را تخمین بزند. در شکل شماره ۶ تغییرات جابه‌جایی جرثقیل نمایش داده شده است که با توجه به نتیجه به‌دست‌آمده اگر سیستم با نویزهای تصادفی آلوده شود، عملکرد فیلتر UHF فازی برای پایداری سیستم و مقاوم‌بودن آن بهتر و نزدیک‌تر به حالت واقعی سیستم است. در شکل‌های ۷، ۸ و ۹ نیز تغییرات سرعت گاری، زاویه و سرعت زاویه‌ای نوسان بار نمایش داده شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده نوسان سرعت گاری، زاویه و سرعت زاویه‌ای بار برای فیلتر UHF فازی دارای نوسان کمتر و پایداری بیشتری نسبت به فیلتر UHF است.

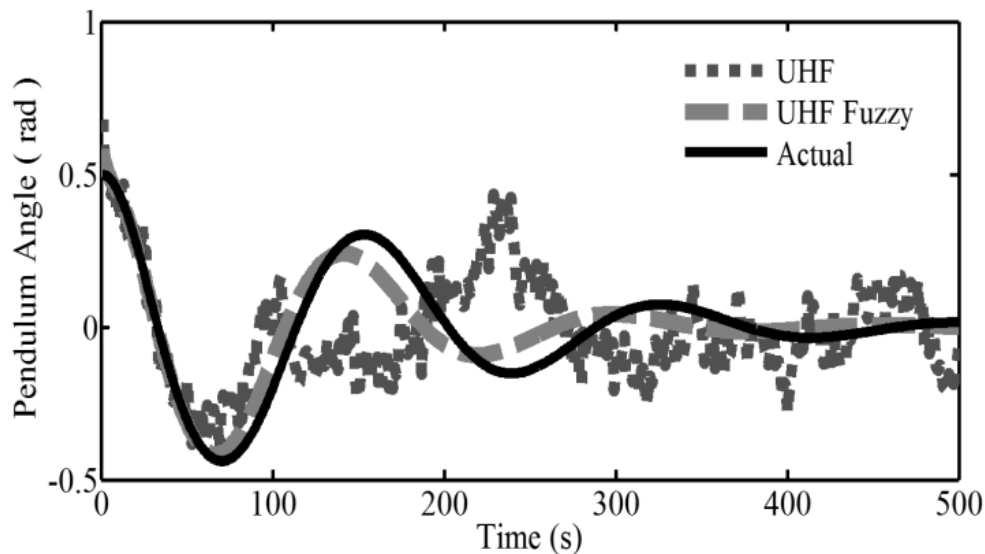
در شکل شماره ۱۰ مقدار میانگین خطاهای چهار متغیر سیستم در طول زمان شبیه‌سازی به‌روشنی نشان داده شده است که با استفاده از روش پیشنهادی برای تخمین پارامترهای سیستم می‌توان خطای سیستم مخدوش نسبت به حالت مطلوب آن را به کمینه رساند.



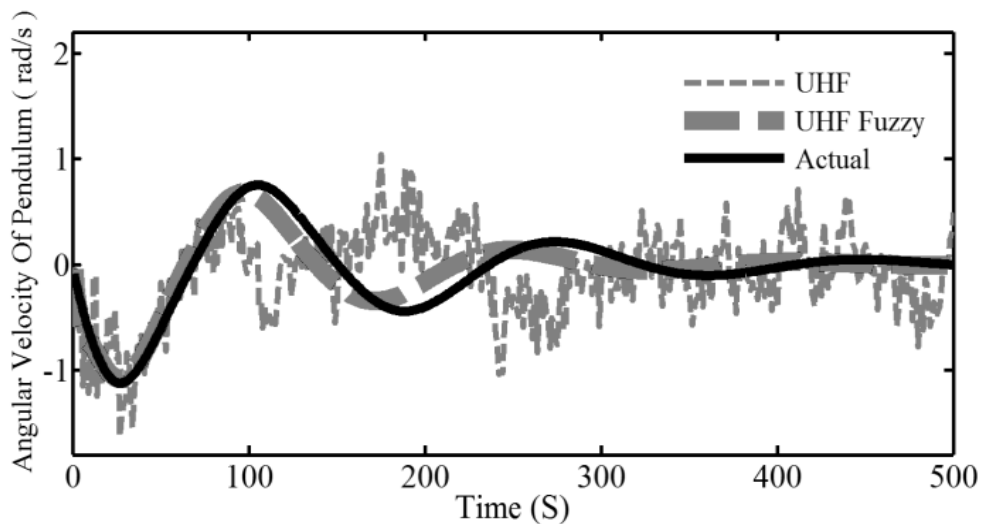
شکل ۶. تغییرات جابه‌جایی جرثقیل برای سه حالت واقعی، UHF و UHF فازی در حالت طول کابل ثابت



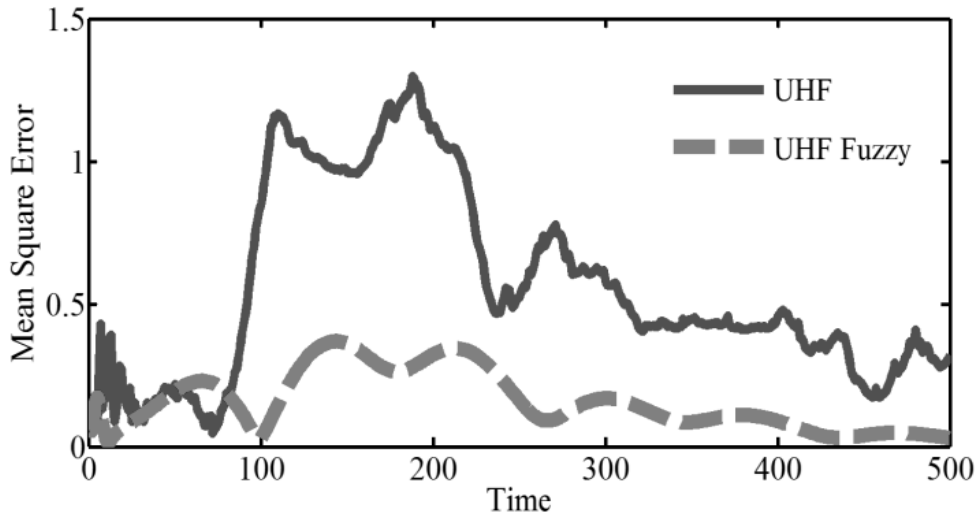
شکل ۷. تغییرات سرعت جرثقیل برای سه حالت واقعی، UHF و UHF فازی در حالت طول کابل ثابت



شکل ۸. تغییرات زاویه نوسان پاندول جرثقیل برای سه حالت واقعی، UHF و UHF فازی در حالت طول کابل ثابت



شکل ۹. تغییرات سرعت زاویه‌ای پاندول جرثقیل برای سه حالت واقعی، UHF و UHF فازی برای طول کابل ثابت



شکل ۱۰. رفتار خطا در طول زمان برای دو حالت UHF و UHF فازی برای طول کابل ثابت

همچنین مقادیر میانگین و واریانس مجذور خطای تخمین برای دو فیلتر UHF و UHF فازی در جدول شماره ۳ نمایش داده شده است که نشان می‌دهد میانگین و واریانس خطا برای حالتی که از UHF فازی استفاده می‌شود، مقدار کمتری است؛ بنابراین روش فازی توانسته است آثار نامطلوب ناشی از وجود اغتشاش در سیستم را تا اندازه‌ای برطرف کند.

جدول ۳. میانگین و واریانس مقادیر خطا در طول زمان برای دو حالت UHF و UHF فازی برای طول کابل ثابت

نوع الگوریتم	میانگین خطا	واریانس خطای تخمین
الگوریتم UHF	۰/۳۱۵	۰/۰۳۱۶
الگوریتم UHF فازی	۰/۱۴۲	۰/۰۰۸

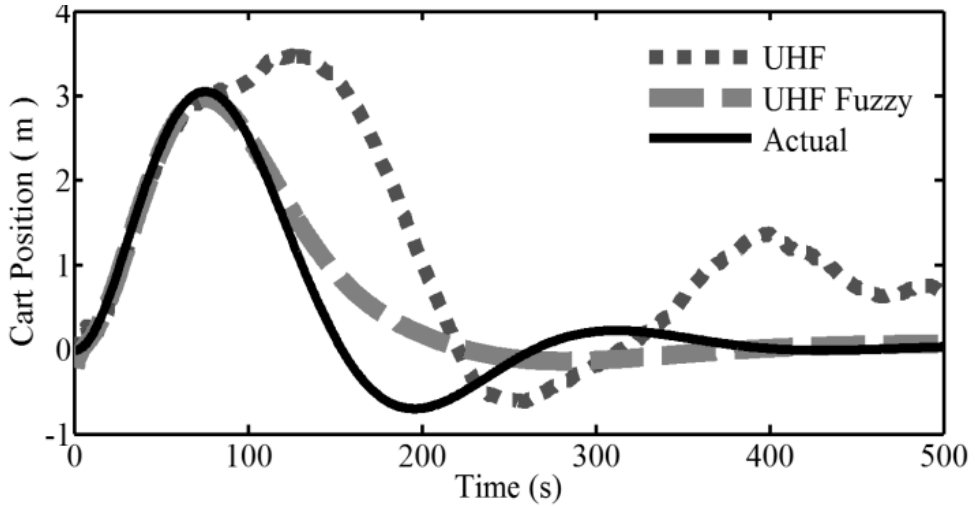
شبیه‌سازی با در نظر گرفتن نویز در حالت طول کابل متغیر

برای حالت طول متغیر کابل در جرثقیل، حرکت رو به بالا/پایین بررسی شده است. نتایج به‌دست‌آمده در شکل‌های شماره ۱۱ تا ۱۵ نشان داده شده است. مقادیر حقیقی نشان داده شده در شکل شماره ۱۱ تا شکل شماره ۱۴ بر اساس روش مونت کارلو برای ۵۰۰ داده احتمالی با توزیع یکنواخت به دست آمده است که به وسیله تابع غیرخطی مدل زمان گسسته جرثقیل انتشار یافته است.

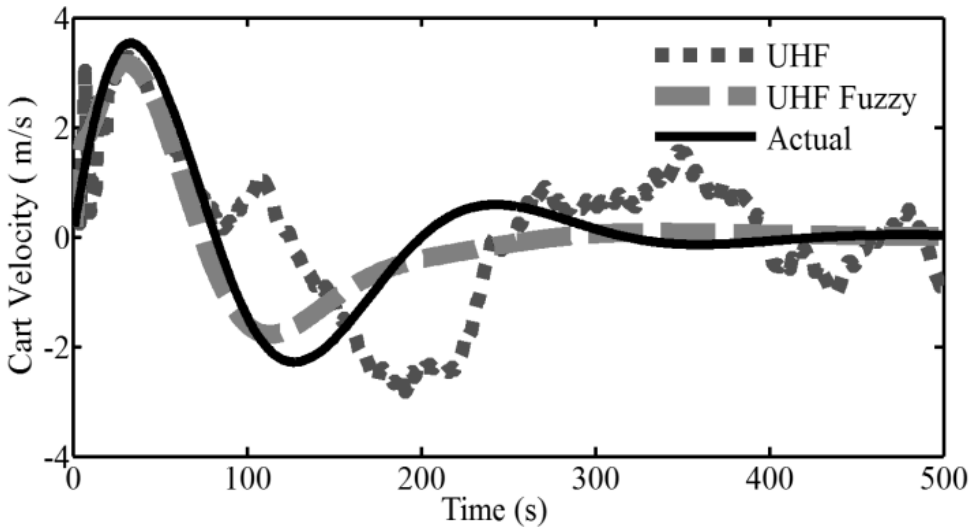
نمودارهای تغییرات متغیرهای حالت سیستم جرثقیل سقفی نشان می‌دهد در صورت وجود نویزهای متغیر در سیستم، فیلتر UHF فازی به‌درستی و با دقت بالاتر نسبت به حالت UHF قادر است متغیرهای حالت سیستم را تخمین بزند. در شکل شماره ۱۱ تغییرات جابه‌جایی جرثقیل نمایش داده شده است که با توجه به نتیجه به‌دست‌آمده، اگر سیستم با نویزهای تصادفی آلوده شود، عملکرد فیلتر UHF فازی برای پایداری سیستم و مقاومت آن بهتر و نزدیک‌تر به حالت واقعی سیستم است. در شکل‌های ۱۴-۱۲ نیز تغییرات سرعت گاری، زاویه و سرعت زاویه‌ای نوسان بار نمایش

داده شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده نوسان سرعت گاری، زاویه و سرعت زاویه‌ای بار برای فیلتر UHF فازی دارای نوسان کمتر و پایداری بیشتری نسبت به فیلتر UHF است.

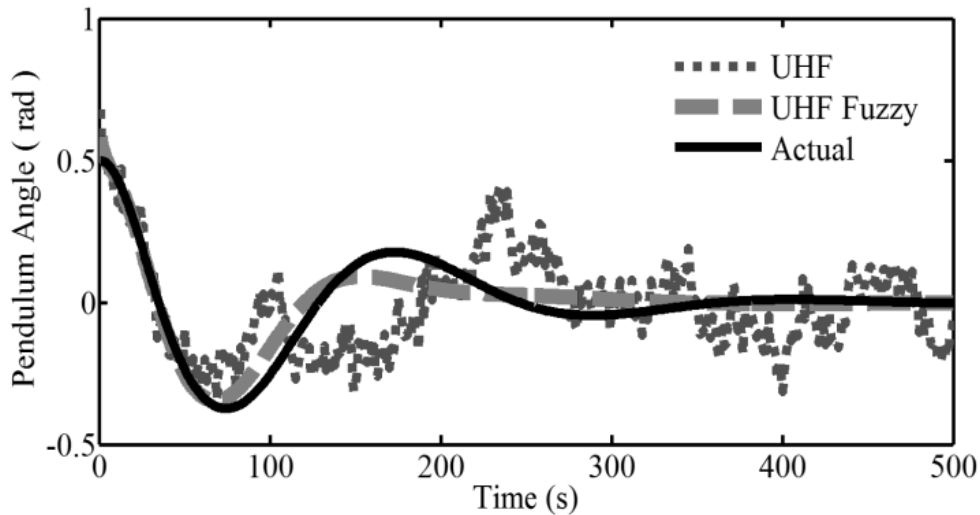
در شکل شماره ۱۵ مقدار میانگین خطاهای چهار متغیر سیستم در طول زمان شبیه‌سازی به‌روشنی نشان داده شده است که با استفاده از روش پیشنهادی برای تخمین پارامترهای سیستم می‌توان خطای سیستم مخدوش نسبت به حالت مطلوب آن را به کمینه رساند.



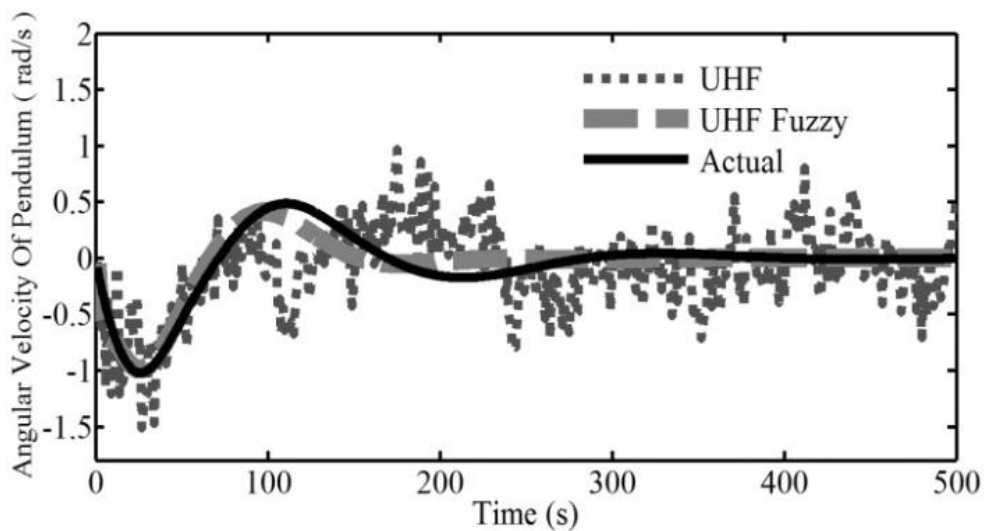
شکل ۱۱. تغییرات جابه‌جایی جرثقیل برای سه حالت واقعی، UHF و UHF فازی برای طول کابل متغیر



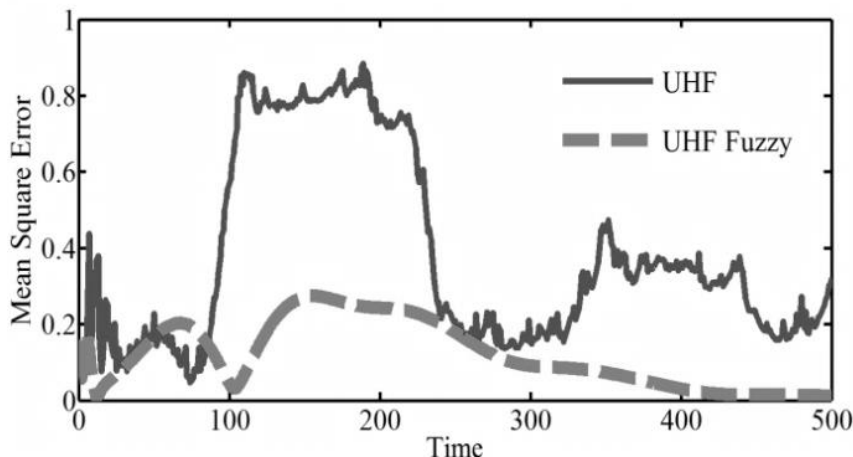
شکل ۱۲. تغییرات سرعت جرثقیل برای سه حالت واقعی، UHF و UHF فازی برای طول کابل متغیر



شکل ۱۳. تغییرات زاویه نوسان پاندول جرثقیل برای سه حالت واقعی، UHF و UHF فازی برای طول کابل متغیر



شکل ۱۴. تغییرات سرعت زاویه‌ای پاندول جرثقیل برای سه حالت واقعی، UHF و UHF فازی برای طول کابل متغیر



شکل ۱۵. رفتار خطا در طول زمان برای دو حالت UHF و UHF فازی برای طول کابل متغیر

همچنین مقادیر میانگین و واریانس مجذور خطای تخمین برای دو فیلتر UHF و UHF فازی در جدول شماره ۴ نمایش داده شده است که نشان می‌دهد میزان خطا برای حالتی که از UHF فازی استفاده می‌شود، اندک‌تر است؛ بنابراین روش فازی توانسته است آثار نامطلوب ناشی از وجود اغتشاش در سیستم را تا اندازه‌ای برطرف کند.

جدول ۴. میانگین و واریانس مقادیر خطا در طول زمان برای دو حالت UHF و UHF فازی برای طول کابل متغیر

نوع الگوریتم	میانگین خطا	واریانس خطای تخمین
الگوریتم UHF	۰/۳۷۷۷	۰/۰۶۳۷
الگوریتم UHF فازی	۰/۱۱۹۲	۰/۰۰۷۵

نتیجه‌گیری

سیستم جرثقیل سقفی نیاز به طراحی کنترلی دارد که بتواند محموله را با کمترین نوسان و بیشترین دقت به نقطه هدف برساند. در این فرایند ممکن است به علت وجود نویزهای شدید و تصادفی اثرات نامطلوبی در سیستم ایجاد شود. بدین منظور، روش‌های مختلفی برای پایداری سیستم ارائه شده است از جمله الگوریتم UHF که عملکرد مناسبی برای مدل‌های دینامیکی غیرخطی دارد. در این الگوریتم، نویزها در طول فرایند ثابت فرض شده است ولی هیچ تضمینی در ثابت ماندن نویزها در طول فرایند وجود ندارد. در این مقاله با تطبیق روش فازی و UHF سعی شده است میانگین مجذور مربعات خطا کاهش یابد. از نتایج به‌دست آمده از نمودارها و مقایسه روش پیشنهادی و UHF دیده می‌شود، وقتی سیستم با تغییرات نویز همراه باشد، روش فازی توانسته است اثرات نامطلوب ناشی از وجود اغتشاش در سیستم را تا اندازه‌ای برطرف سازد و میزان خطا در این روش مقدار کمتری نسبت به خطای UHF است؛ در نتیجه الگوریتم UHF فازی دارای پایداری بیشتری در مقایسه با UHF است.

فهرست علائم

P	کوواریانس خطای تخمین متغیر حالت	x	بردار متغیر حالت
Q	کوواریانس نویز سیستم	y	بردار اندازه‌گیری

پارامتر عملکرد فیلتر که توسط طراح تعیین می‌شود	β	کوواریانس نویز اندازه‌گیری	R
عامل اسکالر خروجی سیستم فازی	α	نویز اندازه‌گیری	v
درجه عضویت توابع فازی	μ	نویز سیستم	w

References

- [1] Zhang, C., & Hammad, A. (2012). Improving lifting motion planning and re-planning of cranes with consideration for safety and efficiency. *Advanced Engineering Informatics*, 26(2), 396-410. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2012.01.003>
- [2] Simandl, M., & Duník, J. (2005). Sigma point Gaussian sum filter design using square root unscented filters. *IFAC Proceedings Volumes*, 38(1), 1000-1005. <https://doi.org/10.3182/20050703-6-CZ-1902.00168>
- [3] Zhang, X., Fang, Y., & Sun, N. (2014). Minimum-time trajectory planning for underactuated overhead crane systems with state and control constraints. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(12), 6915-6925. <https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2320231>
- [4] Wu, X., & He, X. (2015). Enhanced damping-based anti-swing control method for underactuated overhead cranes. *IET Control Theory and Applications*, 9(12), 1893-1900. <https://doi.org/10.1049/iet-cta.2014.1353>
- [5] Masoumnezhad, M. (2017). Robust control for the indefinite model of the semi-active suspension system. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 14(42), 57-79. https://karafan.tvu.ac.ir/article_100505.html?lang=en
- [6] Wang, J.-h., Song, C.-l., Yao, X.-t., & Chen, J.-b. (2010, July 5-7). Sigma point H-infinity filter for initial alignment in marine strapdown inertial navigation system. 2010 2nd International Conference on Signal Processing Systems, Dalian, China. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5555563>
- [7] Li, W., & Jia, Y. (2010). H-infinity filtering for a class of nonlinear discrete-time systems based on unscented transform. *Signal Processing*, 90(12), 3301-3307. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2010.05.023>
- [8] Masoomnejad, M., & Narimanzadeh, N. (2014, April 22-24). *Optimal estimation of state variables of an overhead crane using improved Kalman filter* 22nd Annual International Conference on Mechanical Engineering, Iranian Society of Mechanical Engineers, Iranian Society of Mechanical Engineers and university, Ahvaz, Khozestan, Iran, <https://civilica.com/doc/277225>
- [9] Ni, P., & Li, S. (2011). Unscented H ∞ filter based simultaneous localization and mapping. Proceedings of the 30th Chinese Control Conference.
- [10] Jamali, A., Masoumnezhad, M., Nahaleh, M., & Nariman Zadeh, N. (2015). Optimal state estimation of a dynamical system corrupted with colored noises using Mixed Kalman/H-infinity filter. *Modares Mechanical Engineering*, 14(12), 67-74. <http://mme.modares.ac.ir/article-15-11172-en.html>
- [11] Hill, S. D., & Spall, J. C. (2019). Stationarity and Convergence of the Metropolis-Hastings Algorithm: Insights into Theoretical Aspects. *IEEE Control Systems Magazine*, 39(1), 56-67. <https://doi.org/10.1109/MCS.2018.2876959>