



State Estimation of a Crane Using Fuzzy UHF

Mojtaba Masoumnezhad

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

Abolfazl Yastibolaghi

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

Nader Nariman-zadeh

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

Received: 12.31.2019

Accepted: 06.23.2020

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.

Keywords:

FACTS equipment, UPFC, power flow, reactive power control, active power control.

نوع مقاله: پژوهشی (کاربردی)

تخمین مسیر حرکت جرثقیل سقفی با استفاده

از فیلتر UHF فازی

مجتبی معصوم‌نژاد*

استادیار، مهندسی مکانیک، دانشکده فنی چمران، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، رشت، ایران

ابوالفضل یاستی بلاغی

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تاکستان، تاکستان، ایران

نادر نریمان‌زاده

استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۰۳

دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۱۱

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.

واژگان کلیدی:

فیلتر UHF، H^∞ تخمین مسیر جرثقیل، منطق فازی.

* نویسنده مسئول: mmasoumnezhad@tvu.ac.ir

۱. مقدمه

کنترل سیستم‌های دینامیکی پُر کاربرد 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 [۱۱ و ۱۲]. فیلترهای کالمن توسعه یافته EKF^۱ و فیلتر UKF^۲ برای تخمین متغیرهای سیستم‌های غیرخطی بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شدهٔ مخدوش با نویز به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. فیلتر کالمن در تخمین متغیرهای حالت، در صورت معلوم بودن مقادیر کوواریانس نویزهای فرایند و مشاهده‌گر، دارای عملکرد قابل قبولی است؛ به گونه‌ای که منجر به کمترین مقدار ممکن 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 [۳].

عملکرد مناسب فیلتر UKF وابسته به دانستن اطلاعات درست از مقادیر کوواریانس‌های نویز فرایند و مشاهده‌گر است [۴] که طی کل فرایند ثابت فرض می‌شود. در سال ۲۰۱۰، وانگ و همکاران [۵] برای افزایش پایداری و مقاوم بودن فیلتر UKF را با H[∞] ترکیب کردند و فیلتر سیگما H[∞] را ارائه دادند. همچنین در سال ۲۰۱۱، لی و همکاران [۶] با ترکیب تبدیل بی‌رد و فیلتر H[∞] الگوریتم جدیدی را با عنوان UHF مطرح کردند. در سال ۲۰۱۳ معصوم‌نژاد و همکاران [۷] 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 [۸]. در تمامی مقالات، مقادیر کوواریانس نویزهای فرایند و مشاهده‌گر ثابت فرض شده است.

در سیستم‌های دینامیکی با نویزهای شدید هیچ تضمینی برای ثابت ماندن 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 به گونه‌ای تغییر می‌یابد که همواره میانگین مجذور مربعات خطای تخمین به کمترین میزان برسد.

1. Extended Kalman Filter
2. Uncented Kalman Filter

۲. فیلتر UHF

فیلتر H^∞ برای سیستم‌های زمان گسسته غیرخطی در نظر گرفته شده است که در آن راه‌حل جدیدی با تعبیه تکنیک تبدیل آنسنتد روی ساختار فیلتر H^∞ توسعه یافته 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 [۸]. 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 آنسنتد بر روی آن‌هاست.

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 κ ضرایب طراحی هستند که توسط طراح انتخاب می‌شوند. همچنین κ مثبت نیمه‌معین بودن ماتریس کوواریانس را تضمین می‌کند. در مرحله بعد نقاط سیگما را از طریق تابع غیرخطی انتشار می‌دهیم.

$$\chi_{k|k-1}^i = f(\chi_{k-1|k-1}^i) \quad (8)$$

$$\hat{x}_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2L} w^i \chi_{k|k-1}^i \quad (9)$$

$$P_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2L} w^i \left[\chi_{k|k-1}^i - \hat{x}_{k|k-1} \right] \left[\chi_{k|k-1}^i - \hat{x}_{k|k-1} \right]^T + Q \quad (10)$$

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

$$P_{k|k-1}^{yy} \cong E \left[y_k - \hat{y}_{k|k-1} \right] \left[y_k - \hat{y}_{k|k-1} \right]^T \approx H_k P_{k|k-1} H_k^T \quad (11)$$

که می توانند با استفاده از نقاط سیگماها محاسبه شوند.

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

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

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

در آخر میانگین و کوواریانس به روزرسانی شده با توجه به روابط (۱۷-۱۵) محاسبه می شوند.

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

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

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

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

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

برای محاسبه مقدار β^2 در معادله (۱۸) از فرمول ارائه شده در معادله (۱۹) استفاده شده است [۵].
 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 می شود.

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

۳. منطق فازی و کاربرد آن در فیلتر UHF

دنیای واقعی پیچیده تر 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 فرضیه ای نیاز داریم که بتواند دانش بشری را به شکلی سیستماتیک فرموله کرده و آن را به همراه سایر مدل های ریاضی در سیستم های مهندسی قرار دهد.

سیستم های فازی، سیستم های مبتنی بر دانش یا قواعد هستند. قلب یک سیستم فازی پایگاه دانش است که برخی کلمات آن به وسیله توابع تعلق پیوسته مشخص شده اند.

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



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

همان طور که در بخش دوم اشاره شد، عملکرد فیلتر UHF در اصل وابسته به نویزهای فرایند و اندازه گیری با نام های ماتریس کوواریانس نویز فرایند Q و ماتریس کوواریانس نویز اندازه گیری R است؛ بنابراین ضروری است برای عملکرد بهتر فیلتر UHF مرتب با شرایط نویزها تنظیم شوند. دیدگاه های بسیاری برای تنظیم فیلتر UHF طی زمان ارائه شده است.

در الگوریتم جدید، زیرسیستم‌های فازی یک عامل a_k تنظیم شده مناسب را تولید می‌کنند. این α_k به‌عنوان مقیاس ماتریس کوواریانس نوین Q و R استفاده شده و در هر مرحله زمانی یک Q_k^{new} و R_k^{new} تولید می‌کند. این Q_k^{new} و R_k^{new} جدید در فیلتر UHF، برای پیش‌بینی تخمین حالت جدید در هر مرحله زمانی استفاده می‌شود. نخستین اختلاف برگشتی S_k از تمام بردارهای ورودی قابل اندازه‌گیری Z_k را خواهد داد. S_k به‌عنوان ورودی زیرسیستم فازی استفاده شده و وابسته به دانش پایه قوانین فازی است که عامل تنظیم‌شونده مفید α_k را برای جبران ماتریس Q_k تولید می‌کند؛ در نتیجه عملکرد دینامیکی فیلتر را بهبود می‌بخشد.

۳-۱. 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 α_k است. بازه متغیرهای ورودی مفروضه 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 α_k به صورت $[0 \ 100]$ انتخاب شده است.

جدول شماره ۱. جامعه آماری از متغیرهای ورودی و خروجی

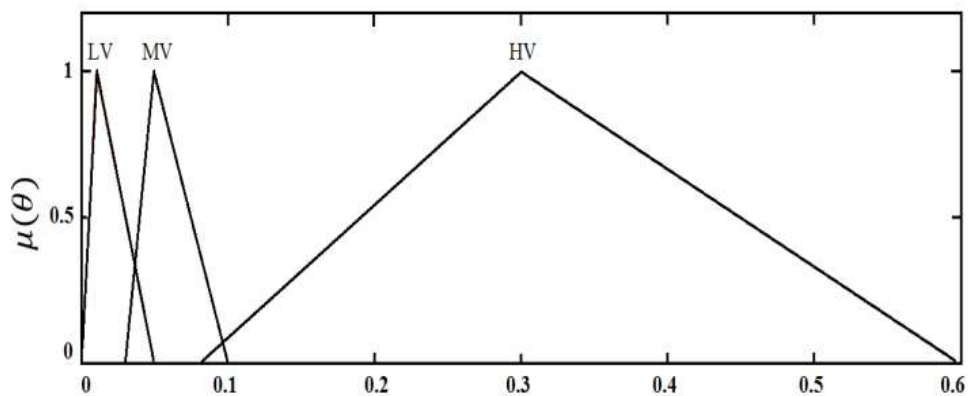
متغیرهای ورودی	جامعه آماری
$xfdk$	$[0 \ 4]$
θfdk	$[0 \ 0.6]$

۳-۲. فازی‌سازی

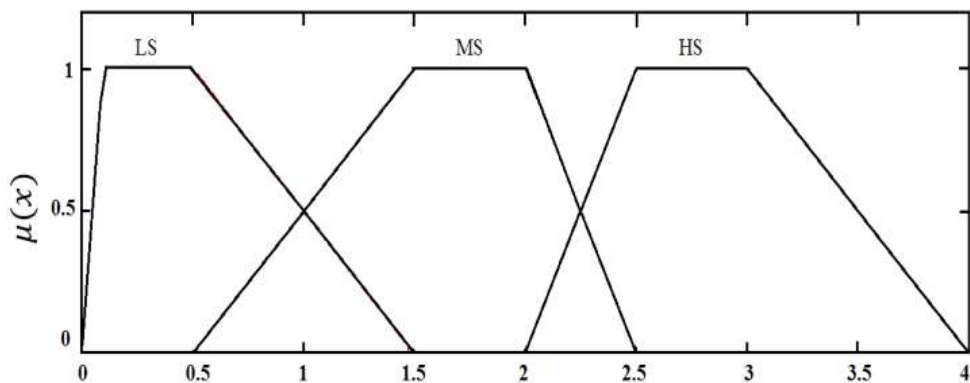
منطق فازی برای هر یک از متغیرهای ورودی به زیرسیستم فازی، یک متغیر زبانی اختصاص می‌دهد. این متغیرهای زبانی با نام‌های ارزش کم (LV^1)، ارزش متوسط (MV^2)، ارزش بالا (HV^3) معرفی می‌شوند. تمامی متغیرهای زبانی به‌کاررفته در توابع عضویت دوزنقه‌ای و مثلثی از متغیرهای ورودی در شکل ۲ و ۳ نشان داده شده‌اند. به‌طور مشابه برای متغیر خروجی تنظیم‌شده فازی با نام عامل انطباق α_k نیز سه متغیر زبانی با نام‌های افزایش کم (IL^1)، افزایش متوسط (IM^1) و افزایش زیاد (IH^2) تعریف

1. Low Value
2. Medium Value
3. High Value
4. Increase Low

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.

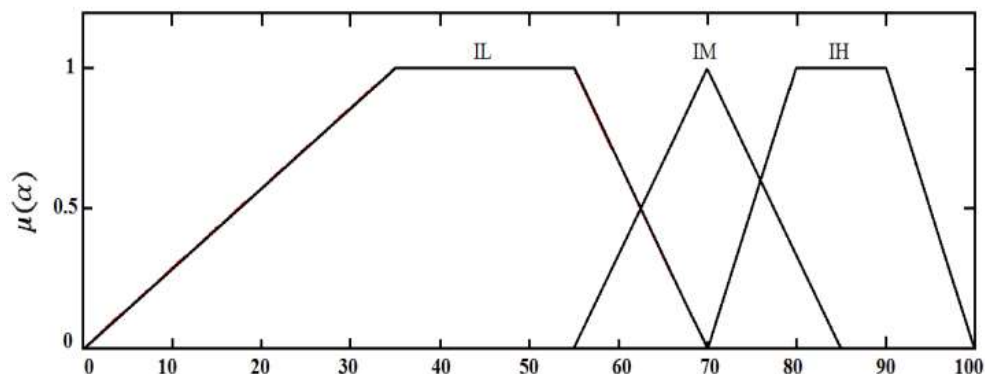


شکل شماره ۲. تابع عضویت از متغیر ورودی x



شکل شماره ۳. تابع عضویت از متغیر ورودی θ

-
1. Increase Medium
 2. Increase High



شکل شماره ۴. تابع عضویت از متغیر خروجی α_k

۳-۴. 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 نُه 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 شماره ۲. بانک فازی

$\bar{x}fd_k$ θfd_k	LV	MV	HV
LV	IL	IL	IM
MV	IM	IM	IH
HV	IM	IH	IH

۴. 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.

۴-۱. الگوریتم فیلتر UHF فازی

الگوریتم فیلتر UHF فازی همانند الگوریتم ارائه‌شده 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 نویز فرایند Q_k

■ معرفی ماتریس کوواریانس نویز 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 \bar{X}_{k-1} با استفاده از رابطه (۲۰) محاسبه می‌شود:

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

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_k^{new} و R_k^{new} با استفاده از رابطه (۲۲) محاسبه می‌شود:

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

حل کردن ماتریس کوواریانس خطا P_k با استفاده از جایگزینی Q_k^{new} به جای Q_k و همچنین R_k^{new} 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.

۵. 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: [۱۱]

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

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

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

چهارچوب 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:

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

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.

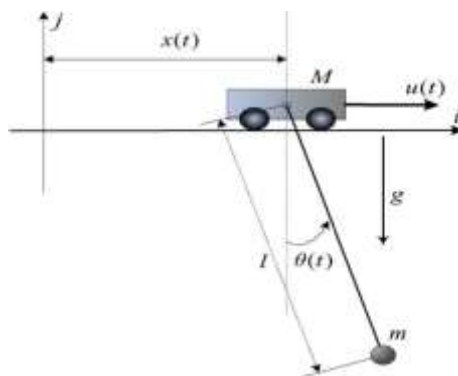
$$X(t) = [d \quad \dot{d} \quad \theta \quad \dot{\theta}]^T \quad (29)$$

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

نویز فرایند W_k و نویز مشاهده گر 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 شماره ۵. شماتیک جرثقیل سقفی

۶. نتایج شبیه‌سازی

در این بخش ابتدا تخمین مسیر حرکت برای یک جرثقیل با استفاده از فیلتر UHF و فیلتر UHF فازی 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.

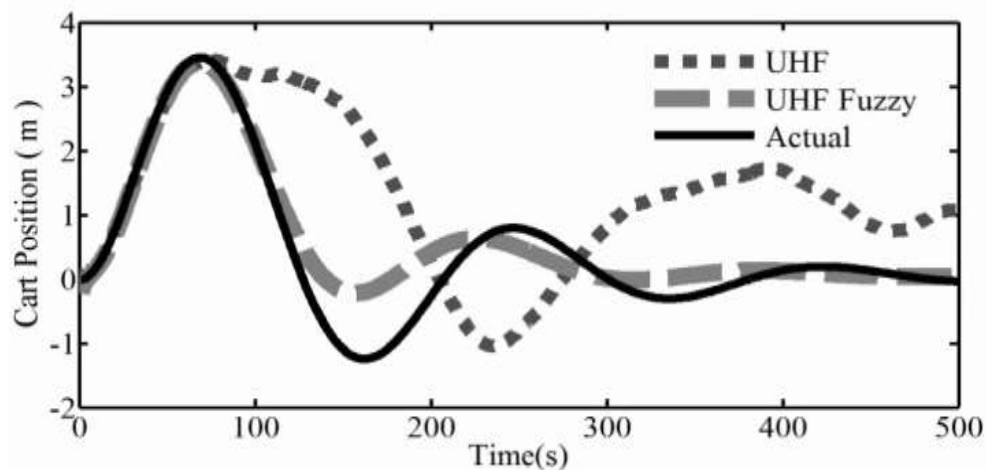
۶-۱. شبیه‌سازی با در نظر گرفتن نویز در حالت طول کابل ثابت

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 به دست آمده در شکل‌های شماره ۶ تا ۱۰ نشان داده شده است. مقادیر حقیقی نشان داده شده در شکل شماره ۶ تا شماره ۹ بر اساس روش مونت کارلو [۱۶] برای ۵۰۰ داده احتمالی با توزیع یکنواخت که به وسیله تابع غیرخطی مدل زمان گسسته جرثقیل انتشار یافته، به دست آمده است.

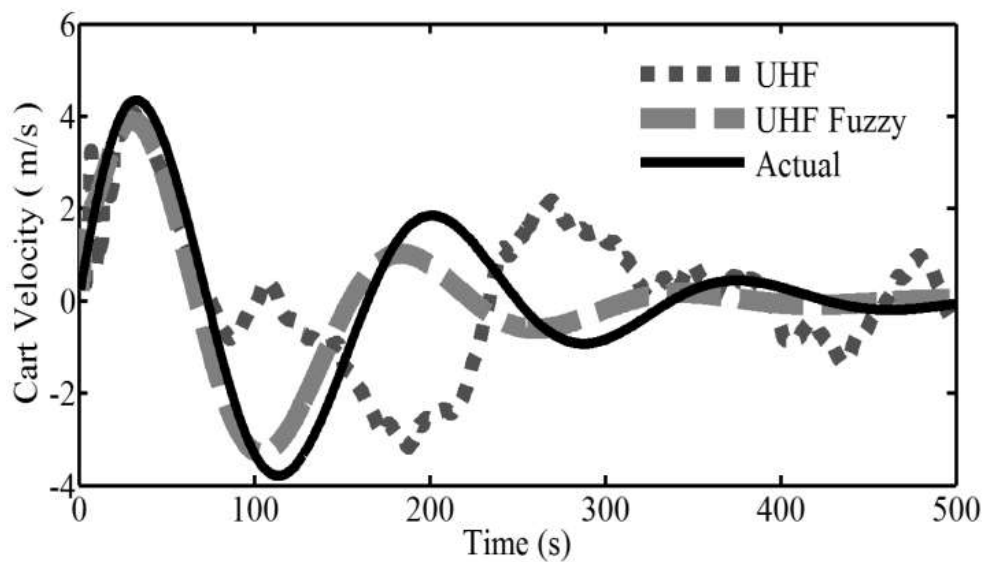
نمودارهای تغییرات متغیرهای حالت سیستم جرثقیل سقفی نشان می‌دهد در صورت وجود

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.

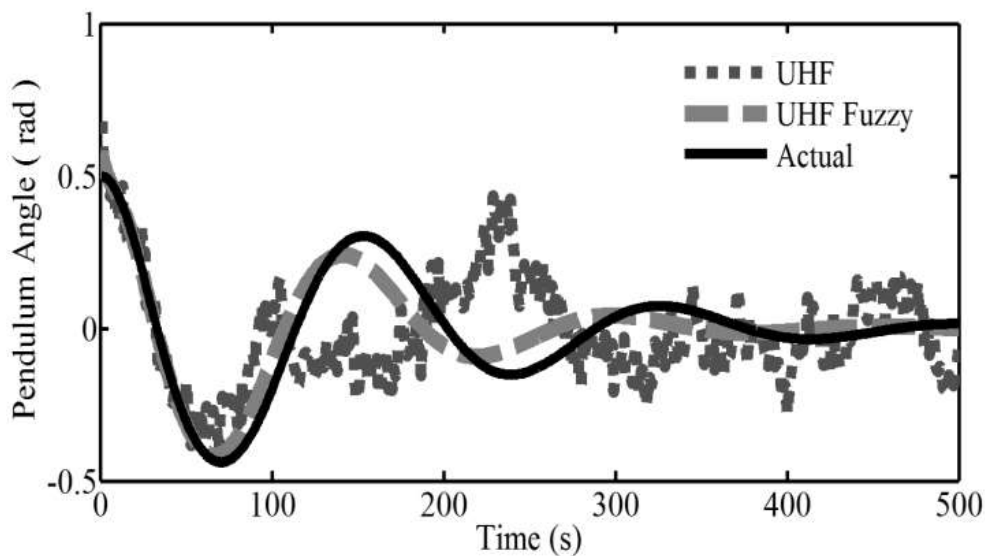
در شکل شماره ۱۰ مقدار میانگین خطاهای چهار متغیر سیستم در طول زمان شبیه‌سازی به‌روشنی نشان داده شده است که با استفاده از روش پیشنهادی برای تخمین پارامترهای سیستم می‌توان خطای سیستم مخدوش نسبت به حالت مطلوب آن را به کمینه رساند.



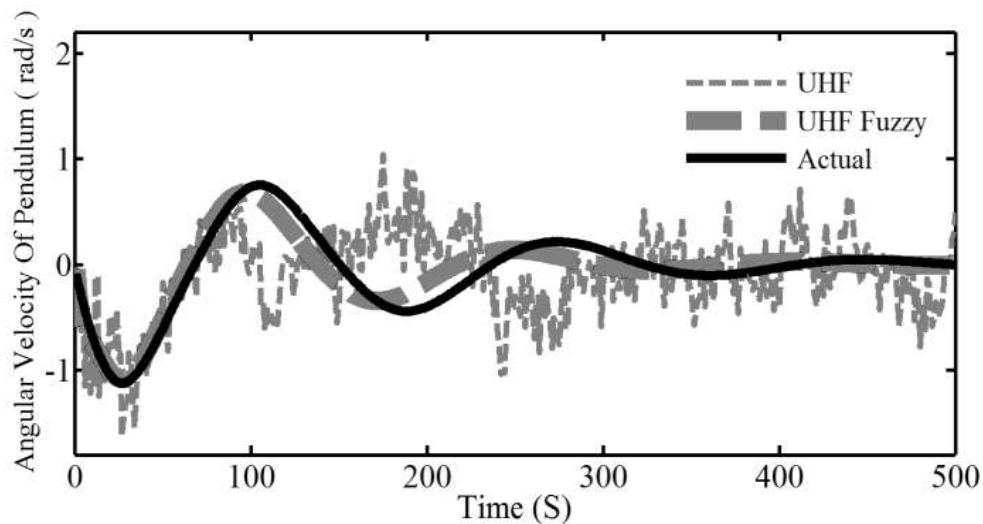
شکل شماره ۶. تغییرات جابه‌جایی جرثقیل برای سه حالت واقعی، UHF و UHF فازی در حالت طول کابل ثابت



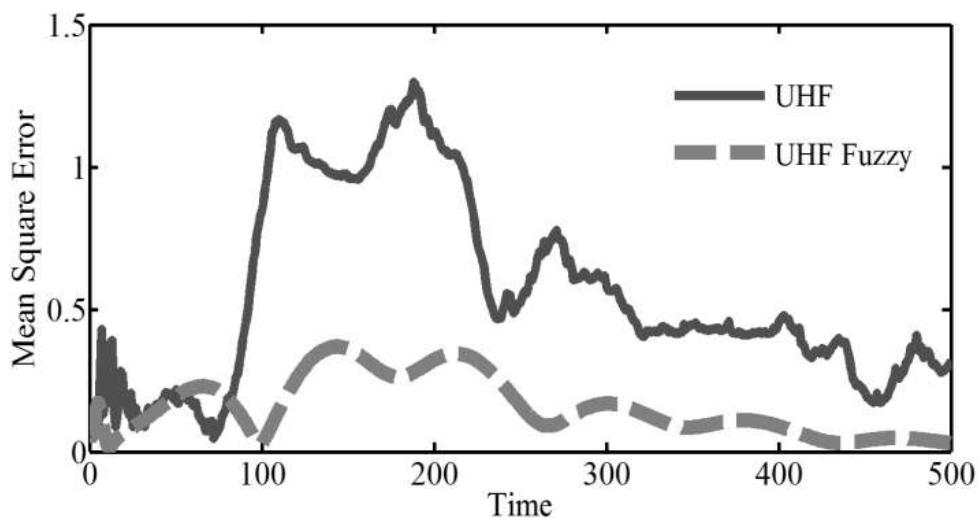
شکل شماره ۷. تغییرات سرعت جرثقیل برای سه حالت واقعی، UHF و UHF فازی در حالت طول کابل ثابت



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



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



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

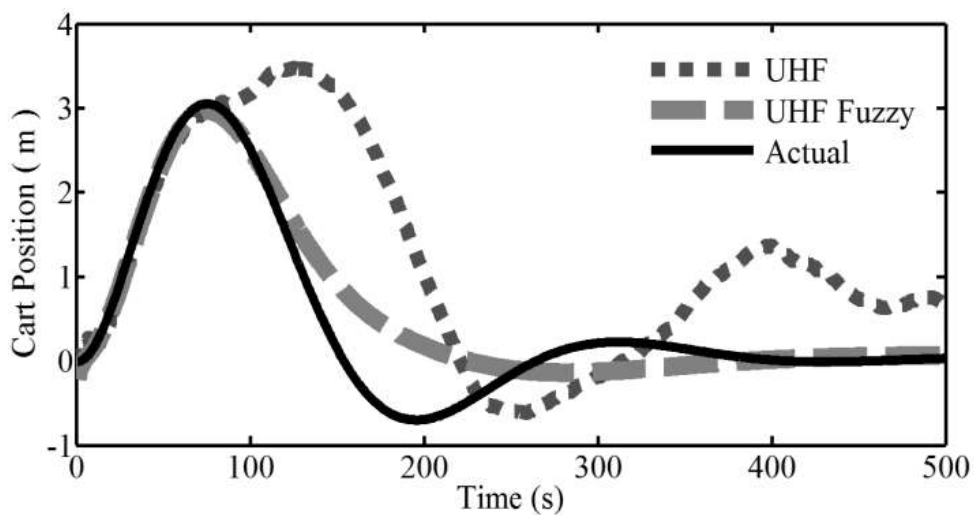
نوع الگوریتم	میانگین خطا	واریانس خطای تخمین
الگوریتم UHF	۰/۳۱۵	۰/۰۳۱۶
الگوریتم UHF فازی	۰/۱۴۲	۰/۰۰۸

۲-۶. شبیه‌سازی با در نظر گرفتن نویز در حالت طول کابل متغیر

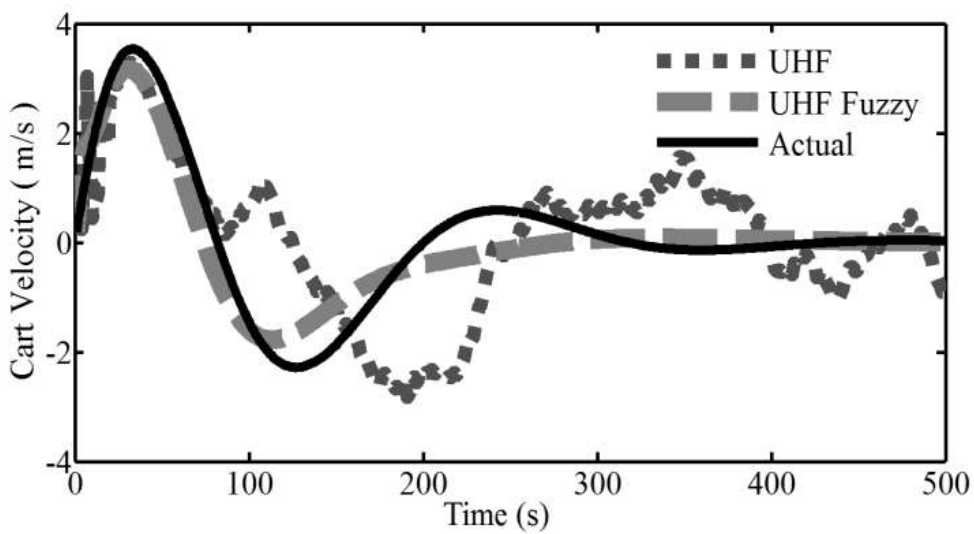
برای حالت طول متغیر کابل در جرثقیل، حرکت رو به بالا/پایین بررسی شده است. نتایج به دست آمده در شکل‌های شماره ۱۱ تا ۱۵ نشان داده شده است. مقادیر حقیقی نشان داده شده در شکل شماره ۱۱ تا شکل شماره ۱۴ بر اساس روش مونت کارلو برای ۵۰۰ داده احتمالی با توزیع یکنواخت به دست آمده است که به وسیله تابع غیر خطی مدل 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 به دست آمده، 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 ۱۲-۱۴ نیز تغییرات سرعت گاری، زاویه و سرعت زاویه‌ای نوسان بار نمایش داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده نوسان سرعت گاری، زاویه و سرعت زاویه‌ای بار برای فیلتر UHF فازی دارای نوسان کمتر و پایداری بیشتری نسبت به فیلتر UHF است.

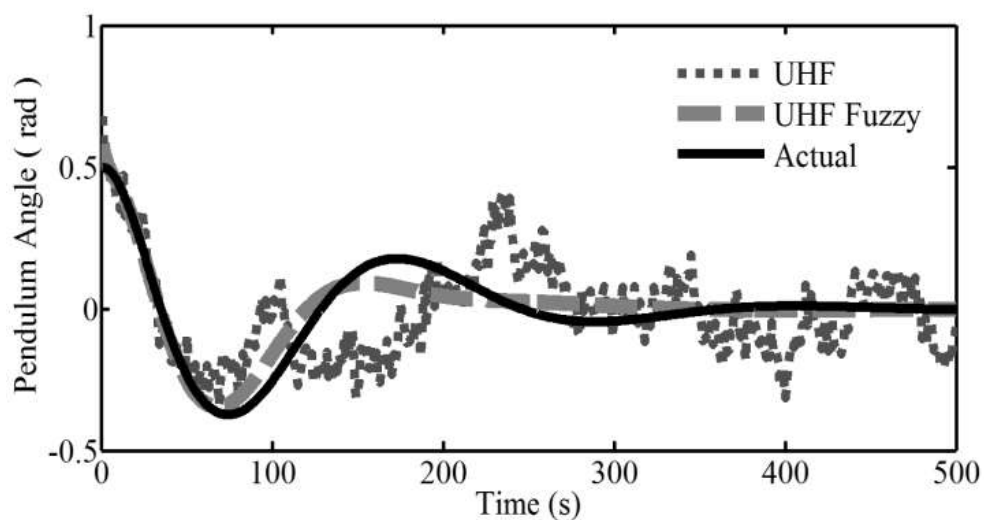
در شکل شماره ۱۵ مقدار میانگین خطاهای چهار متغیر سیستم در طول زمان شبیه‌سازی به‌روشنی نشان داده شده است که با استفاده از روش پیشنهادی برای تخمین پارامترهای سیستم می‌توان خطای سیستم مخدوش نسبت به حالت مطلوب آن را به کمینه رساند.



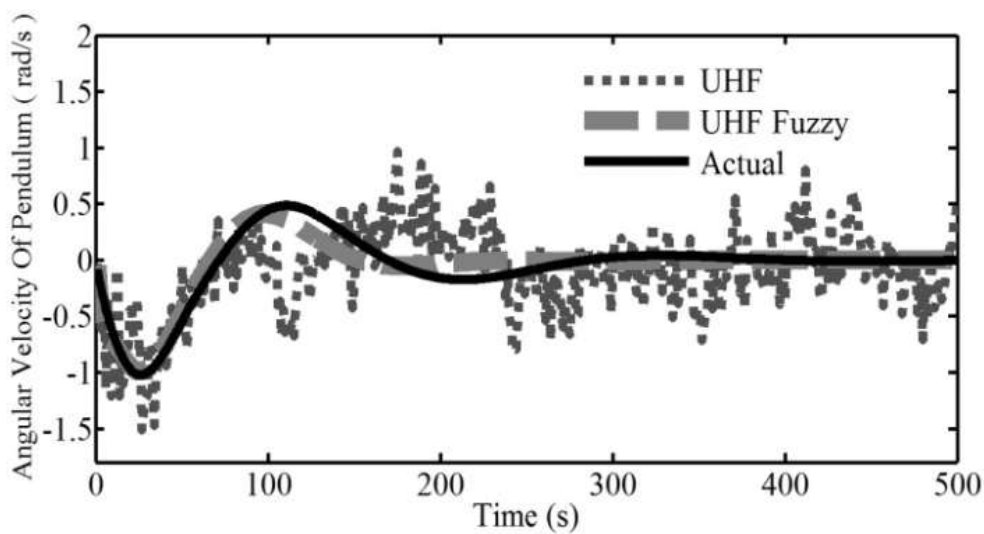
شکل شماره ۱۱. تغییرات جابه‌جایی جرثقیل برای سه حالت واقعی، UHF و UHF فازی برای طول کابل متغیر



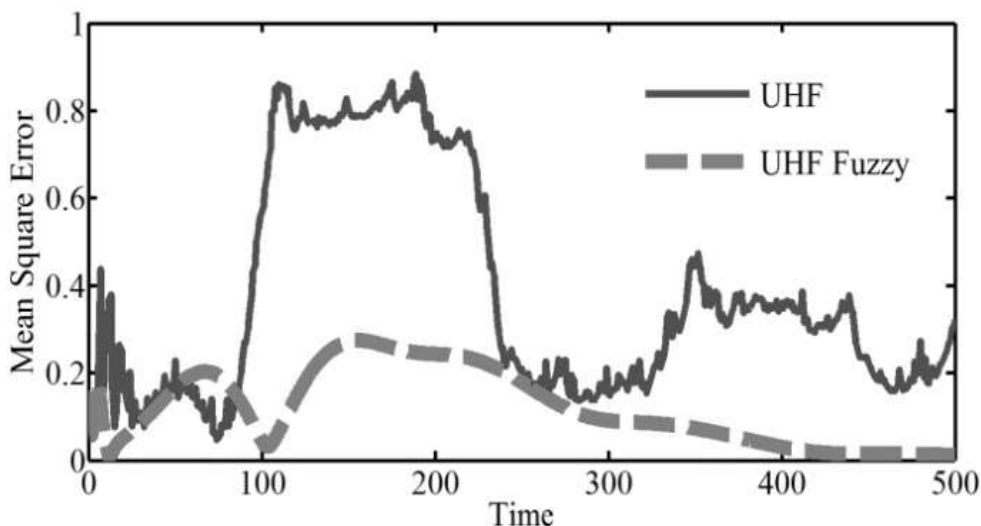
شکل شماره ۱۲. تغییرات سرعت جرثقیل برای سه حالت واقعی، UHF و UHF فازی برای طول کابل متغیر



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



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



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

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

۷. 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 ثابت‌ماندن 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 به دست آمده از نمودارها و مقایسه روش پیشنهادی و UHF دیده می شود، وقتی سیستم با تغییرات نویز همراه باشد، روش فازی توانسته است اثرات نامطلوب ناشی از وجود اغتشاش در سیستم را تا اندازه ای برطرف سازد و میزان خطا در این روش مقدار کمتری نسبت به خطای UHF است؛ در نتیجه الگوریتم UHF دارای پایداری بیشتری در مقایسه با UHF است.

۸. فهرست علائم

بردار متغیر حالت	x	کوواریانس خطای تخمین متغیر حالت	P
بردار اندازه گیری	y	کوواریانس نویز سیستم	Q
پارامتر عملکرد فیلتر که توسط طراح تعیین می شود	β	کوواریانس نویز اندازه گیری	R
عامل اسکالر خروجی سیستم فازی	α	نویز اندازه گیری	v
درجه عضویت توابع فازی	μ	نویز سیستم	w

1. Zhang, C.; Hammad, A. (2012), "Improving lifting motion planning and re-planning of cranes consideration for safety and efficiency", *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 26, No. 2, pp. 396-410.
2. Zhang, X.; Fang, Y.; Sun, N. (2014), "Minimum-Time Trajectory Planning for Underated Overhead Crane Systems With State and Control Constraints", *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, Vol. 61, No. 12, pp. 6915-6925.
3. Wu, X.; He, X. (2015), "Enhanced damping-based anti-swing control method for under actuated overhead cranes", *IET Control Theory Application*, Vol. 9, No.12, pp. 1893-1900.
4. Masoumnezhad, M., (2018), "Robust control for the indefinite model of the semi-active suspension system", *Karafan*, No. 42, pp. 57-79 (in Persian).
5. Masoumnezhad, M.; Moafi, A.; Nariman-zadeh, N. (2012), "Optimal State Estimation of Crane using Improved Kalman Filter", in *22st Annual International Conference on Mechanical Engineering*, Chamran University of Technology, Ahvaz. (in Persian)
6. Simon, D. (2006), *Optima State Estimation, Kalman, H-infinity, and Nonlinear Approaches*, John Wiley & Sons, INC.
7. Jun-hou, W.; Chun-lei, S.; Xing-tai, Y. (2010), "Sigma Point H-infinity Filter for Initial Alignment in Marine Strapdown Inertial Navigation System", *2nd International Conference on Signal Processing Systems (ICSPS)*.
8. Ni, P.; Li, S. (2011), "Unscented H-infinity filter based simultaneous localization and mapping", in *30th Chinese Control Conference (CCC)*, pp. 3942-3946.
9. Masoumnezhad, M.; Moafi, A.; Nariman-zadeh, N. (2013), "Optimal State Estimation of Inverted Pendulum using Unscented H-infinity", in *21st Annual International Conference on Mechanical Engineering*, K.N. Toosi University of Technology, Tehran. (in Persian).
10. M. Masoumnezhad, M., Nahaleh-kah, M., Jamali, A., Nariman-zadeh N. (2015), "Optimal state estimation of a dynamical system corrupted with colored noises using Mixed Kalman/H-infinity filter", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 12, pp. 67 (in Persian).
11. Simandl, M.; Duník, J. (2005), "Sigma point Gaussian sum filter design using square root unscented filters", *IFAC Proceedings Volumes*, Vol. 38, No. 1, pp. 1000-1005.
12. Wang, J-h. and etc., (2010), "Sigma point H-infinity filter for initial alignment in marine strapdown inertial navigation system", *2nd International Conference on Signal Processing Systems*, 5-7 July.
13. Zadeh L.A. (2004), "Probability Theory Should be Based on Fuzzy Logic, A Contentious View. In: Soft Methodology and Random Information Systems", *Advances in Soft Computing*, Vol. 26, Springer, Berlin, Heidelberg.
14. Li, W., Jia, Y. (2010), "H-infinity filtering for a class of nonlinear discrete-time systems based on unscented transform", *Signal Processing*, Vol. 90, No.12, pp.3301-3307.
15. Wu, X., He, X. (2015), "Enhanced damping-based anti-swing control method for under actuated overhead cranes", *IET Control Theory Application*, Vol. 9, No.12, pp. 1893-1900.
16. Hill, Stacy D.; Spall, James C. (2019), "Stationarity and Convergence of the Metropolis-Hastings Algorithm: Insights into Theoretical Aspects", *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 39, pp. 56-67.