

فیلتر کالمن توسعه یافته جمعی چند نرخي تأخیردار برای تخمین وضعیت با ترکیب سنسورهای ژيروسکوپ و ستاره

نرگس صادق زاده نخودبریز^۱ بیژن سلطانی^۲ میلاد پسند^۳ حمید رادمنش^۴

۱- استادیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی قم- قم- ایران

sadeghzadeh@qut.ac.ir

۲- محقق- پژوهشکده سامانه‌های حمل و نقل فضایی- پژوهشگاه فضایی ایران- تهران- ایران

bsoltani@eri.ac.ir

۳- محقق- پژوهشکده سامانه‌های حمل و نقل فضایی- پژوهشگاه فضایی ایران- تهران- ایران

۴- استادیار- دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی تهران احد تهران مرکز، تهران، ایران

H.radmanesh@iauctb.ac.ir

چکیده: در این مقاله، اطلاعات سنسورهای وضعیت ژيروسکوپ و ستاره به منظور تخمین وضعیت و با وجود زمان نمونه برداری چندنرخي و تأخیر اندازه گیری در سنسور ستاره ترکیب می شوند. در این راستا، نیاز است تا فیلتر کالمن توسعه یافته (EKF) اصلاح شود به نحوی که به دلیل کاهش حجم محاسبات، نیازی به تکرار گام‌های قبلی پس از رسیدن داده تأخیردار و با نرخ نمونه برداری متفاوت نباشد همچنین الگوریتم در صورت عدم وجود داده سنسور ستاره به دلیل نرخ پایین نمونه برداری، بتواند به کار خود ادامه دهد و پس از رسیدن داده بتواند به نحوی بهینه عملکرد خود را اصلاح نماید. برای این منظور و با هدف به دست گیری تأخیرهای اندازه گیری، از پیش بینی مدل اندازه گیری همانند آنچه در مرجع [۷] پیشنهاد شده است، استفاده می گردد و برای مسئله تخمین وضعیت با استفاده از فیلتر کالمن توسعه یافته و با وجود سنسورهای چندنرخي ژيروسکوپ و ستاره و در حضور تأخیر اندازه گیری در سنسور ستاره، بسط و توسعه داده می شود. سپس، توسط شبیه سازی و همچنین با استفاده از داده های آفلاین جمع آوری شده از سنسورهای واقعی، صحت روش مورد ارزیابی قرار می گیرد.

کلمات کلیدی: تخمین وضعیت، داده های چندنرخي، ترکیب اطلاعات سنسوری، سنسور ستاره، سنسور ژيروسکوپ

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.20.3.149

تاریخ ارسال مقاله : ۱۴۰۱/۰۳/۱۳

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۲۰

نام نویسنده‌ی مسئول: نرگس صادق زاده نخودبریز

نشانی نویسنده‌ی مسئول: قم- بلوار شهید خداکرم، دانشگاه صنعتی قم

۱- مقدمه

در مسئله تخمین وضعیت، زوایای چرخش یک وسیله نسبت به یک مختصات مبنا با استفاده از اطلاعات سنسورهای چون سنسورهای اینرسی و سنسورهای وضعیت، تخمین زده می‌شود. روش‌های بر اساس مدل با به کارگیری مدل دینامیکی و/یا سینماتیکی وسیله، یک پیش‌بینی از وضعیت به دست می‌آورند و سپس تخمین پیش‌بینی شده با استفاده از اندازه‌گیری‌های سنسوری به روزرسانی می‌شوند [۳]. تحقیقات قابل توجه و رو به گسترشی به مسیله تخمین وضعیت اختصاص یافته است (نظیر [۱۳] و [۱۴]). این تحقیقات، به صورت معمول از رهیافت‌های تصادفی (روش بیزین) فیلتر کالمن و فیلتر کالمن توسعه یافته استفاده می‌نمایند. روش‌های تصادفی از آن جهت کارآمد هستند که معادلات سینماتیکی مورد استفاده برای پیش‌بینی تخمین، شامل اندازه‌گیری‌های نویز ژيروسکوپ هستند که این نویزها غالباً توسط یک توزیع احتمالاتی با تابع چگالی احتمال معلوم، مدل می‌شوند.

از آنجایی که سنسورهای اینرسی ارزان قیمت که به صورت معمول مورد استفاده قرار می‌گیرند، از سنسورهای اضافی نظیر سنسور ستاره به عنوان اطلاعات مکمل برای جبران خطاها و نویزهای سنسوری در سنسور ژيروسکوپ استفاده می‌شود [۲]. اگرچه سنسورهای ستاره در مقایسه با ژيروسکوپها اطلاعات صحیح‌تری را در اختیار می‌گذارند، حجم بالای محاسبات لازم برای پردازش اطلاعات در آنها منجر به کاهش سرعت محاسبات و در نتیجه کاهش نرخ نمونه‌برداری و تأخیر در اندازه‌گیری‌های سنسورهای ستاره می‌شود که مسئله تخمین وضعیت را به تخمین وضعیت با داده‌های چند نرخی^۲ و تأخیردار، تغییر می‌دهد.

هر چند مسئله کنترل سیستم‌ها با وجود تأخیر در تحقیقات بسیاری نظیر [۱۷] و [۱۸] مورد توجه بوده است، مسئله تخمین حالت با اندازه‌گیری‌های تأخیردار و چندنرخی در برخی تحقیقات اخیر نظیر [۶]، [۱۰]، [۱۵] و [۱۶] مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. در مرجع [۷] تنها به مسئله تأخیر اندازه‌گیری در فرآیند تخمین پرداخته می‌شود که در آن اندازه‌گیری‌های تأخیردار با استفاده از تخمین‌های فعلی و زمان‌های پیشین فیلتر کالمن برونیایی می‌شوند تا اندازه‌گیری زمان فعلی را پیش‌بینی نمایند و یک گین بهینه برای این اندازه‌گیری برونیایی شده استخراج می‌شود. [۱۵] و [۱۶] یک پیش‌بینی کننده آبشاری^۳ خروجی و یک مشاهده‌گر وضعیت که تأثیر تأخیرها و زمان‌های نمونه‌برداری را جبران‌سازی می‌کند، پیشنهاد می‌دهند به نحوی که در [۱۵] سیستم تأخیردار چند نرخی به یک سیستم بدون تأخیر و تک نرخی تبدیل می‌شود. به علاوه، در این مرجع از تئوری تصویرسازی^۴ و تکرار حالت‌ها و یک فیلتر حالت خطی بهینه بازگشتی^۵ غیرافزونه برای این امر استفاده می‌شود. در [۶] فیلترهای کالمن مختلف برای هر نوع اندازه‌گیری استفاده شده و تخمین‌ها با توجه به

همبستگی بین آنها در گام بعدی با یکدیگر ترکیب می‌شوند. ماتریس کوواریانس متقابل خطاهای تخمین فیلترهای کالمن محاسبه می‌شوند و در فرآیند ترکیب اطلاعات وارد می‌شوند.

در این مقاله و با هدف به دست‌گیری تأخیرهای اندازه‌گیری، از پیش‌بینی مدل اندازه‌گیری همانند آنچه در مرجع [۷] پیشنهاد شده است، استفاده می‌گردد. این راهکار برای استفاده در مسئله تخمین وضعیت با وجود سنسورهای چندنرخی ژيروسکوپ و ستاره و با وجود تأخیر در اندازه‌گیری‌های سنسور ستاره، بسط و توسعه داده می‌شود و صحت روش توسط داده‌های شبیه‌سازی و داده‌های جمع‌آوری شده از سنسورهای واقعی، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

ساختار این مقاله به صورت زیر است:

در بخش دوم، سینماتیک وضعیت سیستم با استفاده از پارامترهای کواترنین و همچنین مدل اندازه‌گیری ژيروسکوپ و سنسور ستاره ارائه می‌شود. در بخش سوم، روش پیشنهادی ارائه می‌گردد که در آن پس از ارائه مدل اندازه‌گیری پیش‌بینی شده، فیلتر کالمن توسعه یافته برای این کاربرد، اصلاح و بهینه می‌شود. در بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی و همچنین داده‌های آفلاین جمع‌آوری شده از سنسورهای واقعی، ارائه می‌گردد. بخش پنجم به ارائه نتیجه‌گیری می‌پردازد.

۲- سینماتیک سیستم و مدل اندازه‌گیری

۲-۱- مدل سیستم و کواترنین

برای تعریف سینماتیک وضعیتی سیستم در ابتدا بردارهای وضعیت، سرعت زاویه‌ای و شتاب زاویه‌ای جسم را به صورت زیر تعریف می‌شوند:

بردار چهارتابی \mathbf{q} کواترنیون واحد است که وضعیت جسم را در محور اینرسی (\mathbf{W}) نمایش می‌دهد:

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} q_0 \\ \bar{\mathbf{q}} \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

وضعیت جسم در محور اینرسی بر حسب میزان چرخش حول سه محور اصلی X و Y و Z به ترتیب با زوایای رول^۶ (φ) ، پیچ^۷ (θ) و یاو^۸ (ψ) نمایش داده می‌شود. در صورتی که ترتیب چرخش جسم به صورت ۳-۲-۱ یا به عبارتی دیگر چرخش ابتدا حول محور Z سپس Y و سپس X باشد، می‌توان از تبدیل زیر برای تبدیل زوایای اوایلر به بردار کواترنین واحد استفاده نمود:

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi/2)\cos(\theta/2)\cos(\psi/2) + \sin(\varphi/2)\sin(\theta/2)\sin(\psi/2) \\ \sin(\varphi/2)\cos(\theta/2)\cos(\psi/2) - \cos(\varphi/2)\sin(\theta/2)\sin(\psi/2) \\ \cos(\varphi/2)\sin(\theta/2)\cos(\psi/2) + \sin(\varphi/2)\cos(\theta/2)\sin(\psi/2) \\ \cos(\varphi/2)\cos(\theta/2)\sin(\psi/2) - \sin(\varphi/2)\sin(\theta/2)\cos(\psi/2) \end{bmatrix} \quad (2)$$

گیری، بایاس^{۱۳} و دریفت^{۱۴} نیز در مدل اندازه‌گیری ژيروسکوپ لحاظ می‌شوند.

مدل اندازه‌گیری سنسور ستاره:

سنسورهای وضعیت در تعیین وضعیت ماهواره، نظیر سنسور ستاره، سنسورهای با دقت بالا هستند که اندازه‌گیری از وضعیت جسم نسبت به محور اینرسی فراهم می‌آورند. مدل اندازه‌گیری این سنسورها در ادامه آورده شده است:

$$\mathbf{y}_{q,k} = \mathbf{q}_k \otimes \mathbf{v}_{q,k} \quad (5)$$

که \otimes مبین ضرب در حوزه کوانترنیم است و برای سادگی در این کار با یک جمع ساده و نرمالیزه کردن پس از آن مدل می‌شود. \mathbf{v}_q نیز یک نویز سفید گوسی با میانگین صفر و ماتریس کوواریانس \mathbf{R}_{v_q} است.

آنچه در این نوع سنسورها مسئله‌ساز است، نرخ پایین نمونه‌برداری (۵، تا ۱۰ هرتز) آنها است که به دلیل زمان بیشتر مورد آنها برای پردازش اطلاعات می‌باشد. در مقایسه با این سنسورها، ژيروسکوپ‌ها می‌توانند اندازه‌گیری‌هایی با پهنای باند زیاد در حد کیلوهرتز فراهم آورند [۶]. این امر سبب می‌شود تا داده‌های سنسورهای وضعیت به صورت معمول با تأخیر زمانی دریافت شود. بر این اساس مدل اندازه‌گیری این سنسورها به صورت بعد با وجود d تعداد نمونه تأخیر به صورت بعد بیان شود:

$$\mathbf{y}'_{q,k} = \mathbf{q}_{k-d} \otimes \mathbf{v}_{q,k-d} \quad (6)$$

مدل اندازه‌گیری ژيروسکوپ:

$$\boldsymbol{\omega}_{m,k} = \boldsymbol{\omega}_k + \mathbf{b}_k + \mathbf{n}_k \quad (7)$$

که در آن \mathbf{n}_k نویز اندازه‌گیری سفید گوسی با میانگین صفر و ماتریس کوواریانس $\sigma_n^2 \mathbf{I}_3$ است و \mathbf{b}_k مبین برداریست که بایاس و دریفت را به صورت همزمان مدل می‌کند.

به منظور اضافه کردن مدل بایاس و دریفت به حالت‌های سیستم و در نتیجه تخمین و جداسازی آن از اندازه‌گیری ژيروسکوپ، از مدل وینر که در ادامه آورده می‌شود، استفاده می‌گردد:

$$\mathbf{b}_k = \mathbf{b}_{k-1} + \boldsymbol{\eta}_{b,k-1} \quad (8)$$

که در آن $\boldsymbol{\eta}_{b,k}$ نویز سفید گوسی با میانگین صفر و ماتریس کوواریانس $\sigma_b^2 \mathbf{I}_3$ است یا $\boldsymbol{\eta}_b \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \sigma_b^2 \mathbf{I}_3)$.

۳- روش پیشنهادی

در این بخش به ارایه روش پیشنهادی در این مقاله پرداخته می‌شود. ایده اصلی این روش در پیش‌بینی اندازه‌گیری زمان فعلی جهت استفاده در مشاهده‌گر فیلتر کالمن می‌باشد. این پیش‌بینی با استفاده از اندازه‌گیری دریافتی تأخیردار، پیش‌بینی تخمین زمان فعلی و تخمین به روز شده d نمونه قبل است. موضوع پیش‌بینی اندازه‌گیری زمان فعلی در مواجهه با تأخیر اندازه‌گیری در فیلتر کالمن پیشتر نیز

با استفاده از المان‌های این بردار می‌توان ماتریس چرخش $\mathbf{R}(\mathbf{q})$ را، برای نگاشت یک بردار در محور جسم (${}^B \mathbf{r}$) به یک بردار در محور اینرسی (${}^W \mathbf{r}$)، به صورت زیر تعریف کرد:

$$\mathbf{R} \left(\mathbf{q} = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 + q_0q_3) & 2(q_1q_3 - q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 - q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 + q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 + q_0q_2) & 2(q_2q_3 - q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

به علاوه داریم: ${}^W \mathbf{r} = \mathbf{R}(\mathbf{q}) {}^B \mathbf{r}$

همچنین بردار سرعت زاویه‌ای $\boldsymbol{\omega} = (\omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z)^T$ ، سرعت زاویه‌ای جسم را محور جسم و حول سه محور اصلی X و Y و Z نشان می‌دهد که بردار شتاب زاویه‌ای متناظر با آن به صورت $\boldsymbol{\alpha} = (\alpha_x \quad \alpha_y \quad \alpha_z)^T$ نمایش داده می‌شود.

با توجه به تعاریف فوق، در ادامه سینماتیک گسسته-زمان حرکت جسم تعریف می‌شود [۱]-[۵]:

$$\boldsymbol{\omega}_k = \boldsymbol{\omega}_{k-1} + T\boldsymbol{\alpha}_{k-1} + T\boldsymbol{\eta}_{\boldsymbol{\omega},k-1} \quad (1-4)$$

$$\boldsymbol{\alpha}_k = \boldsymbol{\alpha}_{k-1} + \boldsymbol{\eta}_{\boldsymbol{\alpha},k-1} \quad (2-4)$$

$$\mathbf{q}_k = \boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{\omega}_{k-1})\mathbf{q}_{k-1} \quad (3-4)$$

که در آن $\boldsymbol{\eta}_{\boldsymbol{\omega},k}$ نویز گوسی سفید با میانگین صفر و ماتریس کوواریانس $\sigma_{\boldsymbol{\omega}}^2 \mathbf{I}_3$ است و T زمان نمونه‌برداری می‌باشد و \mathbf{I}_3 یک ماتریس واحد 3×3 است. به علاوه داریم:

$$\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{\omega}) = \exp \left\{ \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -\boldsymbol{\omega}^T \\ \boldsymbol{\omega} & -[\boldsymbol{\omega} \times] \end{bmatrix} T \right\} \quad (4-4)$$

همچنین ماتریس ضرب خارجی $[\boldsymbol{\omega} \times]$ به صورت بعد تعریف می‌شود:

$$[\boldsymbol{\omega} \times] = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (5-4)$$

۲-۲- مدل اندازه‌گیری

سنسورهای مورد استفاده در این گزارش، سنسورهای ردیاب-ستاره^۹ و ژيروسکوپ^{۱۰} می‌باشند که به ترتیب وضعیت جسم در محور اینرسی و سرعت زاویه‌ای جسم در محور جسم را اندازه‌گیری می‌کنند. در مدل ریاضی سنسور ستاره تنها نویز اندازه‌گیری در نظر گرفته می‌شود حال آنکه به دلیل استفاده از سنسورهای اینرسی ممز^{۱۱} علاوه بر نویز اندازه-

که در آن $\hat{\mathbf{q}}_k^-$ تخمین به پیش‌بینی شده کواترین با استفاده از سینماتیک ارایه شده در رابطه (۳-۴) و $\hat{\mathbf{q}}_{k-d}^+$ تخمین به روزرسانی شده در زمان نمونه برداری داده سنسور ستاره (نمونه زمانی $k-d$) است. به منظور نرمال‌سازی، این اندازه‌گیری پیش‌بینی شده با استفاده از رابطه $\|\hat{\mathbf{y}}_{q,k}\| / \|\hat{\mathbf{y}}_{q,k}\|$ پیش از استفاده در فیلتر کالمن به روزرسانی می‌شود. رابطه (۹) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\hat{\mathbf{y}}_{q,k} = \mathbf{q}_k \otimes \hat{\mathbf{v}}_{q,k} \quad (10)$$

که در آن $\hat{\mathbf{v}}_{q,k}$ ، تخمین نویز اندازه‌گیری در زمان فعلی می‌باشد. به بیان دیگر، عدم قطعیت‌های موجود در پیش‌بینی اندازه‌گیری، به صورت تاثیر نویز در اندازه‌گیری لحاظ می‌شود. همان‌طور که پیشتر نیز عنوان گردید، ضرب کواترین رابطه (۱۰) با جمع برداری $\hat{\mathbf{y}}_{q,k} = \mathbf{q}_k + \hat{\mathbf{v}}_{q,k}$ تقریب زده می‌شود.

در ادامه به منظور سادگی محاسبات، معادلات سیستم و اندازه‌گیری را به فرم کلی معادلات فضای حالت نوشته و پس از آن فیلتر کالمن توسعه یافته با وجود تأخیر و زمان نمونه برداری چند نرخي را برای آن استخراج می‌نماییم. با تعریف $\mathbf{x}_k = [\boldsymbol{\omega}_k^T \quad \boldsymbol{\alpha}_k^T \quad \mathbf{q}_k^T \quad \mathbf{b}_k^T]^T$ به عنوان بردار حالت از معادلات (۱-۴) تا (۳-۴) و رابطه (۸)، خواهیم داشت:

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{f}(\mathbf{x}_{k-1}) + \boldsymbol{\eta}_{k-1} \quad (11)$$

که در آن $\boldsymbol{\eta}_{k-1} \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}_{13 \times 1}, \mathbf{Q}_\eta)$ و $\mathbf{Q}_\eta = blk - diag(T^2 \sigma_{\eta_a}^2 \mathbf{I}_3, \sigma_{\eta_b}^2 \mathbf{I}_3, \mathbf{0}_{4 \times 4}, \sigma_b^2 \mathbf{I}_3)$ تابع برداری $\mathbf{f}(\mathbf{x}_{k-1})$ از معادلات (۱-۴) تا (۳-۴) و (۸) به سادگی قابل حصول است. به نحوی مشابه و با استفاده از رابطه (۷) داریم:

$$\mathbf{y}_{1,k} = \mathbf{C}_1 \mathbf{x}_k + \mathbf{n}_k \quad (12)$$

که در آن $\mathbf{y}_{1,k} = \boldsymbol{\omega}_{m,k}$ و $\mathbf{C}_1 = [\mathbf{I}_3 \quad \mathbf{0}_{3 \times 3} \quad \mathbf{0}_{3 \times 4} \quad \mathbf{I}_3]$. علاوه داریم:

$$\mathbf{y}_{2,k} = \mathbf{C}_2 \mathbf{x}_k + \hat{\mathbf{v}}_{q,k} \quad (13)$$

که در آن $\mathbf{y}_{2,k} = \hat{\mathbf{y}}_{q,k}$ و $\mathbf{C}_2 = [\mathbf{0}_{3 \times 3} \quad \mathbf{0}_{3 \times 3} \quad \mathbf{I}_4 \quad \mathbf{0}_{3 \times 3}]$ می‌توان با فرض گوسی بودن، مشخص نویز $\hat{\mathbf{v}}_{q,k}$ را به صورت بعد به دست آورد:

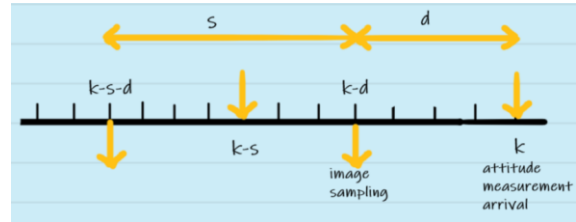
$$\hat{\mathbf{v}}_{q,k} \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}_{4 \times 4}, \hat{\mathbf{R}}_{v,k}) \quad (14)$$

جایی که

$$\hat{\mathbf{R}}_{v,k} = \mathbf{C}_2 \mathbf{P}_k^- \mathbf{C}_2^T + \mathbf{C}_2 \mathbf{P}_{k-d}^+ \mathbf{C}_2^T + \mathbf{R}_{v,q} - \mathbf{C}_2 (\mathbf{P}_{k-d}^+ \mathbf{A}_c^T + \mathbf{A}_c \mathbf{P}_{k-d}^+) \mathbf{C}_2^T \quad (15)$$

که در آن \mathbf{P}_k^- ماتریس کوواریانس پیش‌بینی فیلتر کالمن در زمان نمونه برداری فعلی و \mathbf{P}_{k-d}^+ ماتریس کوواریانس به روز رسانی شده

مورد بررسی قرار گرفته است (مرجع [۷]). آنچه در این کار متمایز است، استفاده همزمان از داده های چند نرخي سنسور ستاره و سنسور ژيروسکوپ و در نظرگیری همزمان تأخیر سنسور ستاره است. برای این منظور، زمان نمونه برداری سنسور ستاره به برابر sT ، که s یک عدد صحیح مثبت است و $d < s$ ، در نظر گرفته می‌شود و T زمان نمونه برداری ژيروسکوپ است. در شکل ۱ می‌توان نحوه نمونه برداری و رسیدن داده‌های سنسور ستاره را در مقایسه با زمان‌های نمونه برداری اصلی سیستم که مربوط به ژيروسکوپ است، مشاهده نمود.



شکل (۱): نحوه نمونه برداری داده ها و تأخیر سنسور ستاره

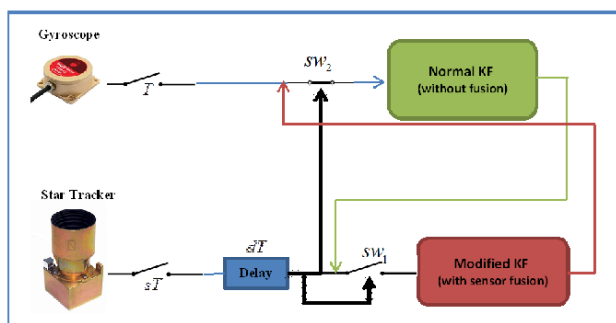
۳-۱- فیلتر کالمن توسعه یافته جمعی چند نرخي تأخیردار

با توجه به استفاده از نمایش کواترین برای وضعیت، نیاز است تا همواره به محدودیت این نمایش و لزوم نرمال بودن بردار کواترین نمایش‌دهنده وضعیت توجه داشت. با توجه به وجود محاسبات به روزرسانی در فیلتر کالمن، تضمینی برای نرمال ماندن تخمین به دست آمده نمی‌باشد. برای مواجهه با این امر، در تحقیقات موجود دو روش عمده تحت عنوان فیلتر کالمن توسعه یافته جمعی^{۱۴} (AEKF) و فیلتر کالمن توسعه یافته ضربی^{۱۵} (MEKF) ارایه شده است. فارغ از مقایسه عمیق این دو روش و انتخاب روش دقیق‌تر، در این تحقیق به دلیل سریعتر بودن سرعت همگرایی روش و سراسرتر بودن توسعه آن به حالت چندنرخي و تأخیردار، استفاده از AEKF پیشنهاد می‌شود. آنچه در این روش حائز اهمیت است، آن است که بردار تخمین زده شده کواترین پس از هر نمونه زمانی تخمین، نرمالیزه می‌شود. این روش تحت عنوان نرمالیزاسیون اجباری (BF)^{۱۶} نامگذاری می‌شود [۸] و [۹].

همانطور که پیشتر نیز عنوان گردید، به منظور استفاده از داده‌های تأخیردار سنسور ستاره، در هر زمان نمونه برداری که داده‌های این سنسور دریافت می‌شود، با فرض معلوم بودن زمان اصلی نمونه برداری، اندازه‌گیری زمان فعلی پیش‌بینی می‌شود. قابل ذکر است که به دلیل استفاده از روش AEKF، از جمع معمول برداری در فضای اقلیدسی برای این پیش‌بینی استفاده می‌کنیم و پس از انجام پیش‌بینی، نرمالیزاسیون انجام می‌شود. پیش‌بینی اندازه‌گیری سنسور ستاره به صورت بعد است:

$$\hat{\mathbf{y}}_{q,k} = \mathbf{y}'_{q,k} + \hat{\mathbf{q}}_k^- - \hat{\mathbf{q}}_{k-d}^+ \quad (9)$$

زمان نمونه برداری، بسته به این که آیا اطلاعات سنسور ستاره در دسترس است یا خیر، تنها یکی از آنها فعال می شود. بر این اساس فیلتر کالمن معمولی در صورت عدم وجود اطلاعات سنسور ستاره، در حال کار است و پس نمونه برداری و طی زمان پردازش (dT) ، SW_1 فعال شده و موجب فعال سازی فیلتر کالمن اصلاح شده می شود که روابط آن در بالا بیان گردید و طبیعتاً این فیلتر نیازمند دریافت اطلاعات زمان قبلی فیلتر کالمن نرمال و اندازه گیری های دریافتی می باشد. در این حالت اتصال با باز شده سویچ به صورت نرمال بسته SW_2 با فیلتر کالمن نرمال قطع می شود. آنچه ذکر آن قابل اهمیت است که فاز پیشگویی در دو فیلتر کالمن اصلاح شده و نرمال یکسان است و به دلیل کاهش پیچیدگی دیاگرام در شکل آورده نشده است. به علاوه، طبیعی است که سویچ ها صرفاً برای نمایش روند کلی کار قرار داده شده اند و در برنامه نویسی روندی متفاوت برای پیاده سازی خواهیم داشت. به عنوان نمونه از دستور شرطی if در زبان برنامه نویسی برای پیاده سازی این مورد، استفاده می شود.



شکل (۲): شماتیک کلی روش پیشنهادی

به منظور وضوح بیشتر روش پیشنهادی، در جدول ۱، شبه کد روش پیشنهادی خلاصه شده است.

جدول (۱): شبه کد روش پیشنهادی برای فیلتر کالمن توسعه یافته چندنرخي در تخمین وضعیت با وجود سنسورهای ستاره و ژيروسکوپ

گام صفر: مقداردهی اولیه در $k=0$ به $\hat{\mathbf{x}}_0^+$ و \mathbf{P}_0^+

در هر زمان نمونه برداری $k=0$:

گام اول: پیش بینی تخمین

۱-۱- پیش بینی حالت با استفاده از مدل بیان شده در رابطه (۱۱) به صورت

$$\hat{\mathbf{x}}_k^- = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}^+)$$

۱-۲- پیش بینی کوواریانس توسط رابطه (۲۱).

گام دوم: به روزرسانی تخمین:

حالت اول: اگر تنها اندازه گیری ژيروسکوپ در دسترس است: در این حالت با فرض در اختیار داشتن مدل اندازه گیری (۱۲) از فیلتر کالمن توسعه یافته استفاده می شود.

حالت دوم: اگر اندازه گیری سنسور ستاره و سنسور ژيروسکوپ در اختیار باشد:

۲-۱- محاسبه \mathbf{A}_c توسط رابطه (۱۶).

فیلتر کالمن در زمان نمونه برداری $k-d$ است. به علاوه، ماتریس \mathbf{A}_c از رابطه بعد به دست می آید:

$$\mathbf{A}_c = \prod_{j=1}^{d-1} \mathbf{A}_{k-j} (\mathbf{I} - \mathbf{K}_{k-j} \mathbf{C}_1) \mathbf{A}_{k-d} \quad (16)$$

که در آن \mathbf{K}_{k-j} بهره فیلتر کالمن در نمونه زمانی $k-j$ است و \mathbf{A}_{k-j} ماتریس سیستم است که با استفاده از خطی سازی تابع برداری $\mathbf{f}(\mathbf{x}_{k-j-1})$ در معادله (۱۱) حول $\hat{\mathbf{x}}_{k-j-1}^+$ به دست می آید. به عبارت دقیق تر داریم:

$$\mathbf{A}_{k-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & T\mathbf{I}_3 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_3 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \phi(\hat{\omega}_{k-1}^+) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I}_3 \end{bmatrix} \quad (17)$$

بر این اساس به روز رسانی حالت های سیستم در زمان نمونه برداری فعلی که در آن داده های سنسور ستاره و ژيروسکوپ به صورت همزمان در اختیار است به صورت بعد خواهد بود:

$$\hat{\mathbf{x}}_k^+ = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k \left(\begin{bmatrix} \mathbf{y}_{1,k} \\ \mathbf{y}_{2,k} \end{bmatrix} - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}_k^- \right) \quad (18)$$

که $\mathbf{C} = [\mathbf{C}_1^T \quad \mathbf{C}_2^T]^T$ همچنین $\hat{\mathbf{x}}_k^+$ تخمین پسین یا به روزرسانی شده و $\hat{\mathbf{x}}_k^-$ تخمین پیشین یا پیش بینی شده توسط مدل است. در این حالت بهره کالمن \mathbf{K}_k از رابطه بعد محاسبه می شود:

$$(19)$$

$$\mathbf{K}_k = (\mathbf{P}_k^- \mathbf{C}^T - \mathbf{N}^T) (\mathbf{C} \mathbf{P}_k^- \mathbf{C}^T + \mathbf{R}_k - \mathbf{C} \mathbf{N}^T - \mathbf{N} \mathbf{C}^T)^{-1}$$

که در آن داریم:

$$\mathbf{R}_k = \text{blk-diag}(\sigma_n^2 \mathbf{I}_3, \hat{\mathbf{R}}_{v,k}) \quad \text{و} \quad \mathbf{N} = \mathbf{C} \mathbf{P}_k^- - \mathbf{C} \mathbf{P}_k^+ \mathbf{A}_c^T$$

به علاوه، ماتریس کوواریانس خطای تخمین \mathbf{P}_k^+ با استفاده از رابطه بازگشتی بعد به روزرسانی می شود:

$$\mathbf{P}_k^+ = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{C}) \mathbf{P}_k^- (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{C})^T + \mathbf{K}_k \mathbf{R}_k \mathbf{K}_k^T + (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{C}) \mathbf{N}^T \mathbf{K}_k^T + \mathbf{K}_k \mathbf{N} (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{C})^T \quad (20)$$

قابل ذکر است که \mathbf{P}_k^- همانند فیلتر کالمن معمول با استفاده از انتشار کوواریانس توسط مدل سینماتیکی سیستم قابل حصول است. به عبارتی واضح تر:

$$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{A}_k \mathbf{P}_{k-1}^+ \mathbf{A}_k^T + \mathbf{Q}_\eta \quad (21)$$

توجه ۱: قابل ذکر است که در نمونه های زمانی که داده سنسور ستاره در اختیار نمی باشد، فیلتر کالمن توسعه یافته با داده سنسور ژيروسکوپ به تنهایی به تخمین وضعیت می پردازد.

بر این اساس شماتیک کلی روش پیشنهادی در شکل ۲ برای وضوح بیشتر روش نمایش داده شده است. همان طور که در این شکل قابل مشاهده است، دو فیلتر کالمن به صورت همزمان وجود دارند که در هر

مقدار در نظر گرفته می‌شود. Run-Run یا Turn-on bias stability حضور یک بایاس اولیه در سنسور در زمان شروع به کار را نمایش می‌دهد که این مقدار می‌تواند از یک شروع تا شروع بعدی سنسور بسته به تغییرات دمایی، فیزیکی، مکانیکی و الکتریکی نوسان داشته باشد. تغییرات مقدار اولیه بایاس (در صورت یکسان بودن شرایط) در طول عمر کاری سنسور تحت عنوان Turn-on bias stability شناخته می‌شود. بر این اساس از این معیار تنها تغییرات احتمالی بایاس در شروع به کارهای مختلف را می‌توان استنتاج نمود و معیاری از مقدار اولیه بایاس را در اختیار قرار نمی‌دهد.

۴-۲- نتایج شبیه‌سازی با داده‌های شبیه‌سازی شده

در این بخش به ارائه نتایج شبیه‌سازی الگوریتم با داده‌های تولیدی از محیط شبیه‌سازی و سینماتیک سیستم پرداخته می‌شود. برای این منظور دو حالت مختلف بدون تأخیر و زمان نمونه‌برداری کوتاه و حالت تأخیردار و زمان نمونه‌برداری زیاد برای سنسور ستاره در نظر گرفته می‌شود و کیفیت تخمین‌ها مورد مقایسه قرار می‌گیرند تا بتوان در بخش بعد نتایج تخمین با داده‌های واقعی را مورد ارزیابی بهتر قرار داد. شکل ۳ نمایش‌دهنده اندازه‌گیری سنسور ستاره بر حسب زوایای اوپلر همراه با تخمین وضعیت جسم متحرک است در شرایطی است که زمان نمونه‌برداری سنسور ستاره و ژيروسکوپ هر دو 0.02sec بوده و سنسور ستاره تأخیری در اندازه‌گیری ندارد. شکل ۴ نتیجه تخمین سرعت زاویه‌ای و اندازه‌گیری سنسور ژيروسکوپ را نمایش می‌دهد و میزان بایاس و دریافت تخمین زده شده برای ژيروسکوپ در شکل ۵ قابل نمایش است. همچنین بردار خطای تخمین وضعیت در شکل ۶ نمایش داده شده است.

حال، به منظور بررسی اثر تأخیر و زمان نمونه‌برداری متفاوت سنسور ستاره، زمان نمونه‌برداری ژيروسکوپ 0.02sec و سنسور ستاره 2sec بوده و سنسور ستاره دارای تأخیر 1sec در نظر گرفته می‌شود. شکل ۷ نمایش‌دهنده اندازه‌گیری سنسور ستاره بر حسب کوتاهترین همراه با تخمین وضعیت جسم متحرک است. شکل ۸ نتیجه تخمین سرعت زاویه‌ای و اندازه‌گیری سنسور ژيروسکوپ را نمایش می‌دهد و میزان بایاس و دریافت تخمین زده شده برای ژيروسکوپ در شکل ۹ قابل نمایش است. همچنین بردار خطای تخمین وضعیت در شکل ۱۰ نمایش داده شده است.

۲-۲-۲- محاسبه $\hat{\mathbf{R}}_{v,k}$ توسط رابطه (۱۵).

۳-۲-۲- محاسبه \mathbf{K}_k توسط رابطه (۱۹).

۴-۲-۲- به روزرسانی تخمین (محاسبه $\hat{\mathbf{X}}_k^+$) توسط رابطه (۱۸).

۵-۲-۲- به روزرسانی کوواریانس تخمین (محاسبه \mathbf{P}_k^+) توسط رابطه (۲۰).

۴- شبیه‌سازی الگوریتم

در این بخش به ارائه نتایج شبیه‌سازی الگوریتم در محیط متلب با داده‌های شبیه‌سازی شده و همچنین داده‌های آفلاین جمع‌آوری شده از سنسور ژيروسکوپ موجود در واحد اندازه‌گیری اینرسی (IMU) مدل STIM300 و سنسور ستاره مدل می‌پردازیم.

برای این منظور، در ابتدا، به تحلیل مشخصات عملکردی ژيروسکوپ به منظور به دست آوردن برآوردی نسبتاً مناسب از مشخصات نویز اندازه‌گیری پرداخته می‌شود.

۴-۱- تحلیل مشخصات عملکردی ژيروسکوپ از

روی دیتاشیت مربوطه

برای این منظور و با توجه به وابستگی روش فیلتر کالمن توسعه یافته به مشخصات نویز، در ابتدا بایستی مشخصات نویز از روی دیتاشیت سنسور ژيروسکوپ استخراج شود. با توجه به جدول مشخصات واحد اندازه‌گیری اینرسی (IMU) مدل STIM300 با توجه به ARW^{17} می‌توان به مشخصه نویز در فرکانس‌های میانی پی برد. در نظر بگیرد:

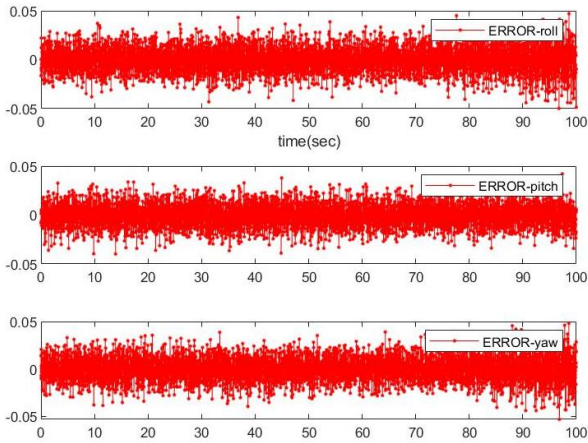
$$\sigma_v = ARW \left[rad / s^{1/2} \right] \quad (22)$$

در این حالت واریانس نویز ژيروسکوپ، σ_n^2 ، را می‌توان به صورت بعد محاسبه نمود:

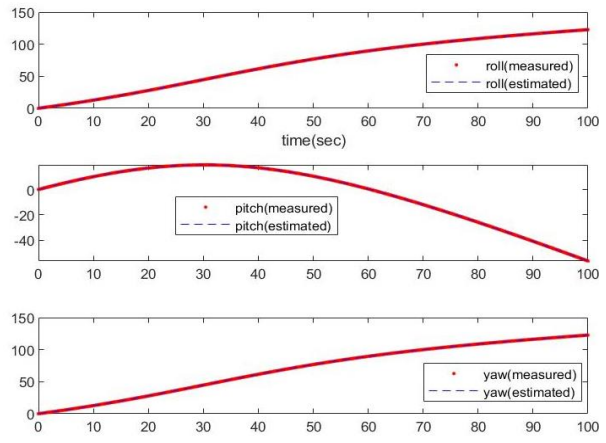
$$\sigma_n^2 = \frac{\sigma_v^2}{T} \quad (23)$$

که برای سنسور مورد استفاده بعد از تبدیلات لازم برابر با $\sigma_n^2 = 9.52 \times 10^{-8}$ خواهد بود.

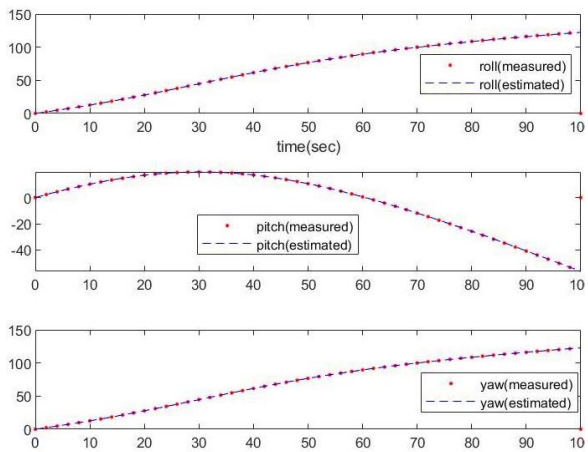
قابل ذکر است که در این مقدار در نظر گرفته شده نویزهای فرکانس بالا ناشی از اجزای الکترونیکی فرکانس بالا که در جدول مشخصات عملکردی با Angle white noise مشخص می‌شود و همچنین نویزهای فرکانس پایین که در جدول با Rate random walk مشخص می‌شود به دلیل مشخص نشدن در جداول دیتاشیت نادیده گرفته شده‌اند. In-Run bias stability یا Bias instability معیاری برای میزان انحراف بایاس در طول عملکرد سنسور در طی زمان و در شرایطی است که تغییرات دمایی وجود ندارد. بر این اساس می‌توان واریانس نویز در دینامیک در نظر گرفته شده برای بایاس در معادله (۸) را تنظیم نمود. این مقدار بر اساس مقدار ارائه شده $0.5 \text{ } ^\circ/h$ برای Bias instability و با توجه به این که حداکثر میزان انحراف در طول زمان نشان می‌دهد، σ_b به صورت تقریبی برابر با نصف این



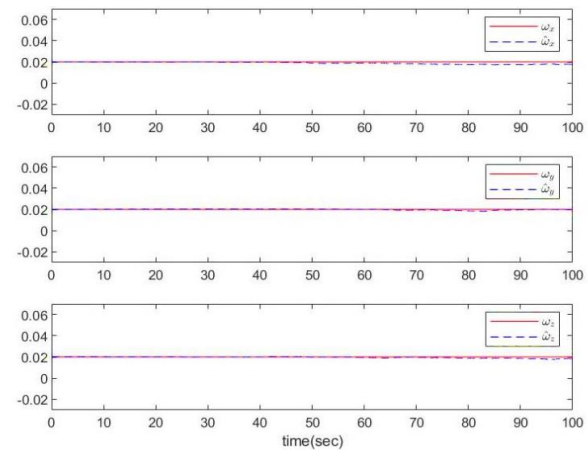
شکل (۶): بردار خطای تخمین وضعیت با داده‌های شبیه‌سازی بدون تأخیر و با زمان نمونه‌برداری ۰,۰۲ ثانیه سنسور ستاره



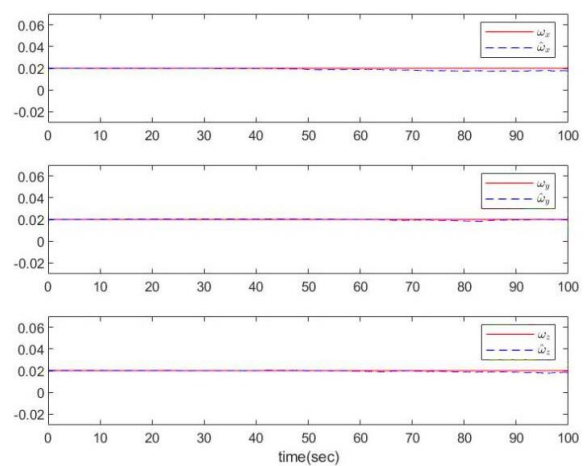
شکل (۳): تخمین وضعیت و اندازه‌گیری سنسور ستاره با داده‌های شبیه‌سازی بدون تأخیر و با زمان نمونه‌برداری ۰,۰۲ ثانیه



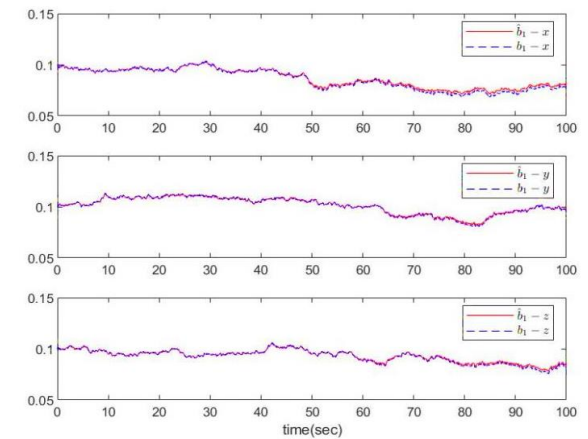
شکل (۷): تخمین وضعیت و اندازه‌گیری سنسور ستاره با داده‌های شبیه‌سازی با تأخیر ۱ و زمان نمونه‌برداری ۲ ثانیه سنسور ستاره



شکل (۴): تخمین سرعت زاویه‌ای و اندازه‌گیری سنسور ژيروسکوپ با داده‌های شبیه‌سازی بدون تأخیر و با زمان نمونه‌برداری ۰,۰۲ ثانیه



شکل (۸): نتیجه تخمین سرعت زاویه‌ای و اندازه‌گیری سنسور ژيروسکوپ با داده‌های شبیه‌سازی با تأخیر ۱ و زمان نمونه‌برداری ۲ ثانیه سنسور ستاره



شکل (۵): بایاس و دررفت تخمین زده شده برای ژيروسکوپ با داده‌های شبیه‌سازی بدون تأخیر و با زمان نمونه‌برداری ۰,۰۲ ثانیه

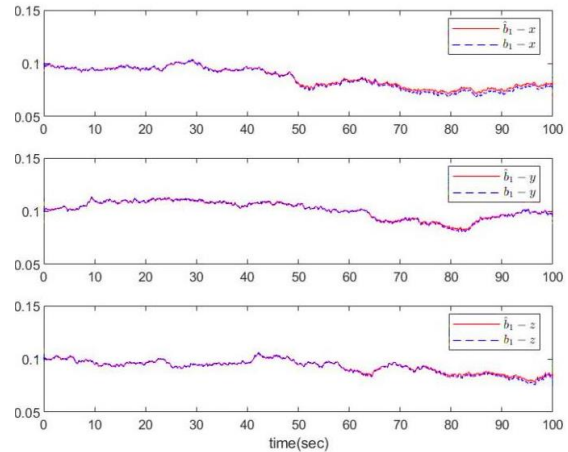
دقیق زمان‌های نمونه‌برداری در سنسورهای ژيروسکوپ و ستاره و به علاوه ارزیابی زمان‌های نمونه‌برداری و دریافت داده‌ها در سنسور ستاره و در نتیجه محاسبه تأخیر پردازش، الگوریتم مورد نظر پیاده‌سازی شده است.

در شکل ۱۱ نتیجه تخمین وضعیت در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده و خروجی سینماتیک سیستم برای داده‌های تجربی قابل مشاهده است. تخمین سرعت زاویه‌ای در مقایسه با خروجی سنسور ژيروسکوپ در شکل ۱۲ آورده شده است و نهایتاً نتیجه تخمین بایاس سنسور ژيروسکوپ در شکل ۱۳ برای داده‌های جمع‌آوری شده نمایش داده شده است. همان‌طور که از شکل ۱۱ مشخص است، نتیجه تخمین وضعیت، با اندازه‌گیری‌ها و خروجی سینماتیک هماهنگی کامل دارد. قابل ذکر است که اندازه‌گیری‌ها در واقع با تأخیر دریافت می‌شوند اما در رسم آنها، اندازه‌گیری مربوط به هر زمان در همان زمان رسم شده است. نتیجه تخمین سرعت زاویه‌ای در مقایسه با خروجی سنسور ژيروسکوپ شکل ۱۲ نمایش داده شده است این هماهنگی نیز به وضوح قابل نمایش است. سپس، شکل ۱۳ نتیجه تخمین بایاس سنسور ژيروسکوپ را نمایش می‌دهد.

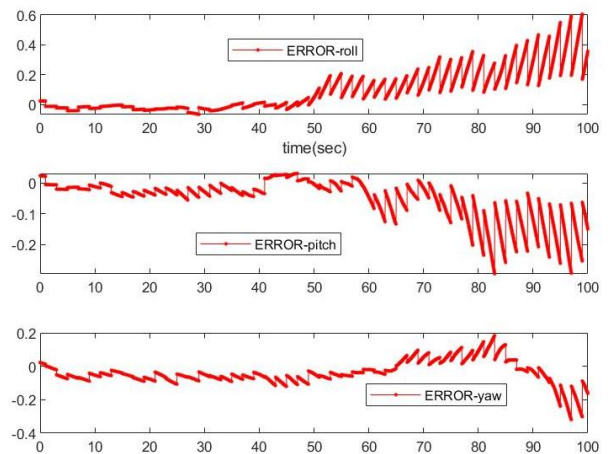
۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، فیلتر کالمن توسعه یافته برای استفاده در تخمین وضعیت با وجود داده‌های چند نرخي سنسورهای ستاره و ژيروسکوپ و در حضور تأخیر در اندازه‌گیری سنسور ستاره بسط و توسعه داده شد. برای این منظور از ایده اصلی پیش‌بینی مدل اندازه‌گیری زمان حال سنسور ستاره و به دنبال آن پیش‌بینی مدل نویز اندازه‌گیری زمان فعلی استفاده گردید و سپس روابط فیلتر کالمن برای این منظور ارائه شد. به دنبال آن صحت روش ارائه شده با داده‌های شبیه‌سازی و داده‌های واقعی ارزیابی و مورد تأیید قرار گرفت. قابل ذکر است که برای استفاده از داده‌های واقعی مشخصات نویز سنسور ژيروسکوپ به دقت و از روی دیتا شیت سنسور مربوطه محاسبه گردید.

پیاده‌سازی روش ارائه شده بر روی یک میکروکنترلر نظیر میکروهای سری ARM به منظور ارزیابی قابلیت پیاده‌سازی روش در کاربردهای واقعی به عنوان ادامه این تحقیق، مد نظر قرار دارد. همچنین به عنوان ادامه کار می‌توان وجود انواع عیوب سنسوری را با استفاده از روش پیشنهادی بررسی نمود و الگوریتم را برای این منظور توسعه داد.



شکل (۹): بایاس و دریافت تخمین زده شده برای ژيروسکوپ با داده‌های شبیه‌سازی با تأخیر ۱ و زمان نمونه‌برداری ۲ ثانیه سنسور ستاره



شکل (۱۰): بردار خطای تخمین وضعیت با داده‌های شبیه‌سازی با تأخیر ۱ و زمان نمونه‌برداری ۲ ثانیه سنسور ستاره

بدون ارزیابی عددی و محاسبه مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE^{۱۸}) خطای تخمین و تنها از مقایسه شکل‌ها پرواضح است که هر چند وجود تأخیر اندازه‌گیری کیفیت تخمین وضعیت را تضعیف می‌کند، اما این تخمین همچنان دقت خوبی داشته و همگرا است.

توجه ۲: روش‌های مختلف دیگر، نظیر آنچه در مرجع [۱۰] ارائه شده است، در به دست‌گیری تأخیر و چندنرخي بودن سنسورها نیز پیشتر مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار گرفتند که غالباً به واگرایی تخمین در حضور تأخیرهای بزرگ منجر شد.

۴-۳- نتایج شبیه‌سازی الگوریتم با داده‌های آفلاین از سنسورهای واقعی

در این بخش به ارزیابی تخمین‌گر پیشنهادی با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده از سنسور ژيروسکوپ موجود در واحد اندازه‌گیری اینرسی (IMU) مدل STIM300 و سنسور ستاره مدل پرداخته می‌شود. برای این منظور داده‌های ارسالی ارزیابی شده و پس از محاسبه

Filters for Photogrammetry based Gyroscope Drift and Robot Attitude Estimation”, ISA Transactions, vol. 53, no. 2, pp. 524–532, 2014.

[3] N. Sadeghzadeh-Nokhodberiz, J. Poshtan, “Distributed Interacting Multiple Filters for Diagnosis and Identification of Robotic Sensor Faults”, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Systems, vol. 7, no. 47, pp. 1383 – 1393, 2017.

[4] N. Sadeghzadeh--Nokhodberiz, J. Poshtan, A. Wagner, E. Nordheimer, E. Badreddin, “Distributed Observers for Pose Estimation in the Presence of Inertial Sensory Soft Faults”, ISA Transactions, vol. 53, no. 4, pp. 1307–1319, 2014.

[5] Z. Zhou, C. Zeng, X. Tian, Q. Zeng, X. Lu. "A quaternion-based indirect Gaussian particle filter for nonlinear attitude estimation", Review of Scientific Instruments vol. 92, no. 5, 2021.

[6] A. Khosravani, T. Jochen, M. Robert, H. Tarek, “Recursive attitude estimation in the presence of multi-rate and multi-delay vector measurements”, In 2015 American Control Conference (ACC), pp. 3199-3205. IEEE, 2015.

[7] T. D. Larsen, N. A. Andersen, O. Ravn, N. K. Poulsen. "Incorporation of time delayed measurements in a discrete-time Kalman filter" , In Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No. 98CH36171), vol. 4, pp. 3972-3977. IEEE, 1998.

[8] I. Y. Bar-Itzhack, J. Deutschmann, F. Markley. "Quaternion normalization in additive EKF for spacecraft attitude determination", In Navigation and Control Conference, pp. 2706. 1991.

[9] J. L. Crassidis, F. L. Markley, Y. Cheng. "Survey of nonlinear attitude estimation methods." Journal of guidance, control, and dynamics, vol. 30, no. 1, pp. 12-28, 2007.

[10] A. Fatehi, B. Huang. "Kalman filtering approach to multi-rate information fusion in the presence of irregular sampling rate and variable measurement delay", Journal of Process Control vol. 53, pp. 15-25, 2017.

[11] J. Cemenska, Sensor Modelling and Kalman Filtering Applied to Satellite Attitude Determination, MSc Dissertation, University of California at Berkeley, 2004.

[12] Y. Yang, Z. Zhou, “Attitude estimation: with or without spacecraft dynamics?”, Advances in Aircraft and Spacecraft Science, vol. 4, no. 3, pp. 335-351, 2017.

[13] N.S. Nokhodberiz, H. Nemati, A. Montazeri, “Event-triggered based state estimation for autonomous operation of an aerial robotic vehicle”, IFAC-PapersOnLine, vol. 52, no.13, 2348-2353, 2019.

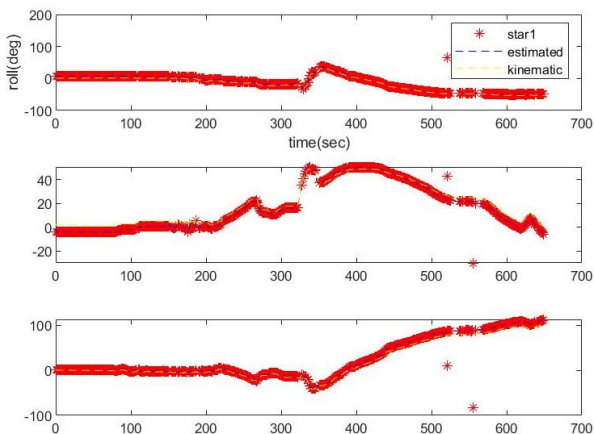
[14] A. Moutinho , M. Figueir^oa, J.R. Azinheira, “Attitude estimation in so (3): a comparative uav case study”, Journal of Intelligent & Robotic Systems, vol. 80, no.3, pp. 375-384, 2015.

[15] H. Lin, S. Sun, “Estimator for multirate sampling systems with multiple random measurement time delays”, IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 67, no.3, pp. 1589-1596, 2022.

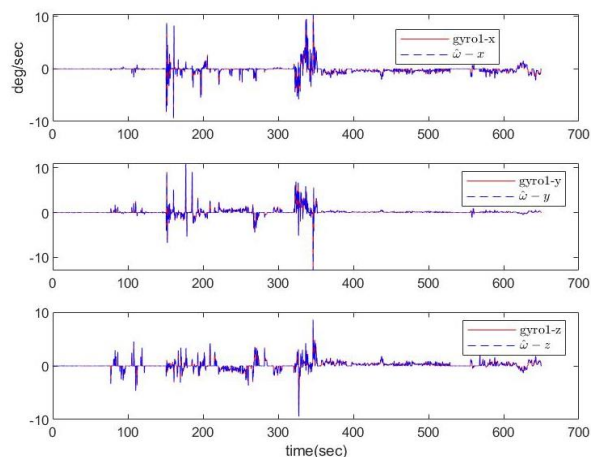
[16] A. Comellini, D. Casu, E. Zenou, . V. Dubanchet, C. Espinosa, “Incorporating delayed and multi-rate measurements in navigation filter for autonomous space rendezvous”, Journal of Guidance, Control, and Dynamics, vol. 43, no.6, 1164-1172, 2020.

[17] مسعود شفیعی، حمیدرضا احمدزاده، ایمان خادمی، "کنترل H_∞

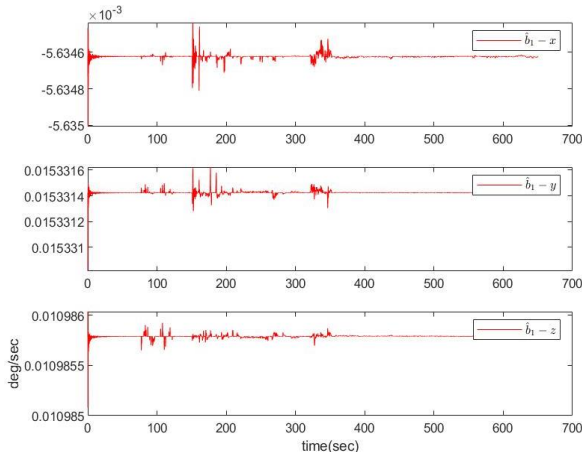
مقاوم آموزشپذیر تکرارشونده برای سیستمهای تأخیردار زمانی همراه با عدم قطعیت پارامتری: رویکرد تئوری سیستمهای دوبعدی"، مجله



شکل (۱۱): تخمین وضعیت (زوایای اویلر) در مقایسه با اندازه گیری سنسور ستاره و خروجی مدل سینماتیکی بر حسب درجه



شکل (۱۲): تخمین سرعت زوایای در مقایسه با اندازه گیری سنسور ژيروسکوپ



شکل (۱۳): تخمین بایاس سنسور ژيروسکوپ

مراجعه:

[1] J. Sola, Quaternion kinematics for the error-state Kalman filter, arXiv preprint arXiv:1711.02508. 2017 Nov 3.

[2] N. Sadaghzadeh N., J. Poshtan, A. Wagner, E. Nordheimer, E. Badreddin, “Cascaded Kalman-Particle

انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران - جلد نوزدهم - شماره سوم -
صفحه ۲۰۱-۲۱۳، سال ۱۴۰۱.

[۱۸] سید حمید هاشمی پور، "طراحی رویتگر تطبیقی پیش‌بین برای سیستم‌های دارای تأخیر هم‌زمان در ورودی و حالت همراه با نامعینی"، مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران - جلد نوزدهم - شماره دوم - صفحه ۲۳۳-۲۴۲، سال ۱۴۰۱.

-
- ¹ Extended Kalman Filter
 - ² Multi-rate measurements
 - ³ Cascaded
 - ⁴ Projection
 - ⁵ Non-augmented recursive optimal linear state filter
 - ⁶ roll
 - ⁷ pitch
 - ⁸ yaw
 - ⁹ Star-Tracker
 - ¹⁰ Gyroscope
 - ¹¹ MEMS
 - ¹² Bias
 - ¹³ Drift
 - ¹⁴ Additive Extended Kalman Filter (AEKF)
 - ¹⁵ Multiplicative Extended Kalman Filter (MEKF)
 - ¹⁶ Brute Force Normalization
 - ¹⁷ Angular Random Walk
 - ¹⁸ Root Mean Square Error

