دانشگاه صنعتی سهند
نشریه سامانه‌های غیرخطی در مهندسی برق
جلد ۳- شماره ۱ - تابستان ۱۳۹۴
صفحه ۱۰۱ الی ۱۲۱
ISSN: 2322-3146
http://jnsee.sut.ac.ir

ارائه الگوریتم SLAM اینرسی سه بعدی کارآمد برای پهپاد و پیاده‌سازی آن در محیط شبیه‌سازی براساس اطلاعات پروازی واقعی

عسکر عزیزی[۱]، حمید نوری سولا[۲]، امین صادقی امامقلی[۳] و امیر ریخته گر غیاثی[٤]

[۱]کارشناس ارشد مهندسی برق-کنترل، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز،
a.azizi.tu@gmail.com

[۲]کارشناس ارشد مهندسی برق-کنترل، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز،
hamidnourisola@yahoo.com

[۳]کارشناس ارشد مهندسی برق-کنترل، دانشکده هوا و فضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران،
aammiinn.sadeghi@gmail.com

[٤]**نویسنده مسئول**، استادیار مهندسی برق-کنترل، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، گروه کنترل، دانشگاه تبریز، تبریز،
agiasi@tabrizu.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله:۱۳۹۳/۱۱/۲۷ تاریخ پذیرش مقاله:۱۳۹۴/۵/۱)

چکیده

موقعیت‌یابی و نقشه‌سازی همزمان (SLAM) مشکلی اساسی در زمینه‌ی ناوبری ربات‌های متحرک است و حل آن یکی از جذاب‌ترین موضوعات کاری محققین بوده وامروزه یکی از بخش‌های مهم سیستم‌های ناوبری را تشکیل می‌دهد. در این مقاله یک الگوریتم SLAM اینرسی کارآمد برای یک پهپاد یا یک وسیله‌ی هوابرد ارائه شده است. ساختار SLAM اینرسی مذکور برای به‌کارگیری دو نوع سنسور Range/Bearing و Bearing-only مناسب بوده و نیازی به سیستم‌های موقعیت‌یاب خارجی همچون GPS و یا هر نوع اطلاعات از قبل تهیه شده ندارد. این مطالعه سیستمی جامع ارایه می‌کند به طوریکه علاوه بر بهبود کارایی و دقت SLAM سه بعدی، بر دو مشکل اساسی نیز که در تحقیقات قبلی توجه کمی به آن‌ها شده است غلبه می‌کند؛ اول اینکه کلیه درجات آزادی را برای پهپاد در نظر می‌گیرد یعنی تغییرات موقعیت پهپاد تنها در دو جهت y و x محدود نشده و بلکه تغییرات ارتفاع پهپاد نیز در نظر گرفته می‌شود، دوم اینکه محدودیتی برای موقعیت نشانه‌ها وجود نداشته، یعنی سیستم برپایه سنسورهای اینرسی قادر است تمام نشانه‌ها را در ارتفاعات متفاوت مشاهده کند. نهایتاً با استفاده از اطلاعات پروازی یک هواپیمای واقعی،صحت عملکرد الگوریتم با ارایه نتایج شبیه‌سازی‌ها به اثبات رسیده است.

واژه های کلیدی

سیستم ناوبری اینرسی،
مکان‌یابی و نقشه‌سازی همزمان،
هواپیمای بدون سرنشین،
فیلتر کالمن توسعه یافته.

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]

[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.6.6]

Sahand University ofTechnology

Journal of Nonlinear Systems in Electrical Engineering

Vol.3, No.1,

Summer 2015

ISSN: 2322 – 3146

http://jnsee.sut.ac.ir

Presentation of 3D and Efficient Inertial SLAM Algorithm for UAV and Its Implementation based on actual flight data in Simulation Environment

Askar Azizi[1], Hamid Nourisola [2], Amin Sadeghi-Emamgholi[3] and Amir Rikhtehgar Ghiasi[4]

[1]M.Sc. in Electrical Control Engineering, Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran a.azizi.tu@gmail.com

[2] M.Sc. in Electrical Control Engineering, Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Iran, hamidnourisola@yahoo.com

[3] M.Sc. in Aerospace Engineering, Department of Electrical control Engineering, Faculty of Aerospace, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran, aammiinn.sadeghi@gmail.com

[4] **Corresponding Author**, Assistant Prof., Faculty of electrical and computer engineering, university of Tabriz, Tabriz, Iran, agiasi@tabrizu.ac.ir

ABSTRACT

Keywords

Inertial navigation system,

Extended Kalman filter,

Unmanned Aerial Vehicle,

Simultaneous Localization and Mapping

Simultaneous localization and mapping (SLAM) is an important problem in a manipulator navigation robot and solving this problem is one of the interesting topics for researchers. This problem shapes important part of the navigation and guidance. In this paper, one practical inertial SLAM algorithm is presented. Construction of the inertial SLAM is suitable for using two types of sensor Range / bearing and Bearing-only and do not need GPS or any prior knowledge of its position. This paper presents general system of UAV and improves the performance and accuracy of the 3D SLAM. In addition, this method solves two main problems that previous researches have not studied; first, all degrees of freedom (DOFs) for UAV is considered. On the other hand, UAV position changes are not limited in both X and Y axes and elevation changes are considered. Second, there is no limit in landmark positions. This means that the system can observe all of the landmarks with inertial sensor in every elevation. Finally, using the actual aircraft flight data, the accuracy of the algorithm has been proven by the results of the simulations.

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-1

[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.6.6]

۱- مقدمه

با توجه به کاربردهای گوناگون و مفید هواپیماهای بدون سرنشین (پهپادها)[1]، اعم از کاربردهای نظامی و غیرنظامی، در سال‌های اخیر محققان زیادی در این زمینه به مطالعه و بررسی پرداخته‌اند [۱-۳]. با تکامل تئوری SLAM[2] [۴ و ۶]، کاربردهای این تئوری در پیاده‌سازی‌های عملی در محیط‌های مختلف به موضوعی جذاب تبدیل شده است. امروزه یکی از کاربردهای مهم SLAM، در پهپادها می‌باشد [۷ و ۸]. یک پهپاد، معمولاً برای اکتشاف یک محیط ناشناخته و همچنین ترسیم نقشه‌ای از محیط همراه با نشانه‌های[3] واقع در آن، که باید مورد شناسایی قرار گیرند، به‌کارگرفته می‌شود. اما پهپاد بایستی این کارها را بدون استفاده از تجهیزات مکان‌یابی مانند سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS)[4] یا هر گونه اطلاعات زمینی از قبل تهیه شده، انجام دهد.

پهپادها با استفاده از تکنیک SLAM ناوبری می‌کنند. تکنیک SLAM، تخمین همزمان مکان پهپاد ونشانه‌های مشاهده شده را فراهم می‌کند [۹]. در تکنیک SLAM، برای تخمین‌های ذکر شده، روش‌های فیلتری متعددی ارائه شده است که متعارف‌ترین آن‌ها فیلتر کالمن توسعه یافته (EKF)[5] است [۱۰]. فیلتر EKFیک راه حل محبوب برای SLAM است که کاربردهای روزافزون آن را می‌توان در ربات‌های عمل‌کننده در محیط‌های سرپوشیده[6] و داخلی [۵]، ربات های زمینی در محیط‌های بیرونی و فضاهای باز[7] [۶ و ۱۱]، وسایل نقلیه‌ی زیرآبی [۱۲ و ۱۳] و وسایل نقلیه‌ی هوایی [۱۴] مشاهده کرد. روش EKF به‌طور کامل نقشه‌های موقعیت پهپاد و نشانه‌ها را از قبل تخمین می‌زند و این بیانگر کارآیی مناسب آن است [۱۱، ۱۲ و ۱۵]. این الگوریتم برای مکان‌یابی وسیله‌ی متحرک، روشی منحصربه فرد ارایه می‌دهد و شامل کاربردهای زیادی است، از جمله: اکتشافات سیاره‌ای و یا در جاهایی که سیستم GPS آسیب دیده باشد یا در مکان‌هایی‌که سیگنال‌های GPS نمی‌توانند دریافت شوند. اما مهم‌تر از همه، الگوریتم SLAM می‌تواند برای مقاوم کردن سیستم ناوبری استفاده شود [۱۶]. برای این‌که بتوان این الگوریتم را در ناوبری استفاده کرد بایستی بتواند نشانه‌ها را بازنگری کندکه این کار به خاطرهمبستگی‌های[8] آماری که پهپاد را به نشانه‌ها مرتبط می‌کند دارای دو تأثیر مهم است: الف) بهبود تخمین مکان نشانه‌ها، ب) بهبود تخمین مکان پهپاد. بنابراین پهپاد یا باید محیط ناشناخته‌ی بیشتری را برای پیدا کردن نشانه های جدید کاوش کند و یا بایستی نشانه‌های شناسایی شده را بازنگری[9] کند تا کیفیت مکان‌یابی را بهبود بخشد [۹]. در کاربردهای عملی به ویژه در مورد یک پهپاد، معمولاً از یک سیستم ناوبری اینرسی (INS)[10] استفاده می‌شود اما در این حالت، با توجه به ماهیت فرضی[11] مکان INS احتمال افزایش خطاهای مکان‌یابی وجود دارد و این نقص، مدت زمان عملیاتی پهپاد را محدود می‌کند. برای رفع نقص مطرح شده سیستم ناوبری اینرسی به الگوریتم SLAM مجهز شده و از آن با عنوان سیستم ناوبری SLAM یاد می‌شود که توانایی تصحیح خطاهای INS را با استفاده از نقشه‌ای که به‌صورت آنلاین در حال تولید شدن است، دارد [۱۷-۲۱]. در این سیستم موقعیت وسیله و نقشه‌ی نشانه‌ها به‌طور همزمان و فقط با استفاده از مشاهدات نسبی مکان نشانه‌ها نسبت به مکان وسیله، تخمین‌زده می‌شوند. در برخی موارد نیز از الگوریتم SLAM برای تکمیل سایر سیستم های ناوبری مانند GPS استفاده می‌شود که با این کار دقت و مقاومت سیستم GPS در هنگام افت سیگنال‌های دریافتی از ماهواره افزایش داده می‌شود [۱۸]. در دهه‌ی اخیر الگوریتم SLAM برای ناوبری مورد توجه بوده است به‌طوری‌که چندین پیاده‌سازی برای SLAM در وسیله‌های زمینی [۲۲ و ۲۳]، زیرآبی [۲۴ و ۲۵] و بر روی یک وسیله‌ی هوابرد بدون سرنشین (پهپاد) [۲۶-۳۰] پیاده شده است.

1- UAVs: Unmanned Aerial Vehicle
2- SLAM: Simultaneous Localization and Mapping
1- Landmarks
2- GPS: Global Positioning System
3- EKF: Extended Kalman Filter
4- Indoor Robots
5- Outdoor Robots
6- Correlations
7- Re- Observe
8- INS: Inertial Navigation System
9- Dead-reckoning nature

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.6.6]

در این مقاله کلیه روابط و همبستگی های الگوریتم SLAM اینرسی سه بعدی برای پیاده‌سازی بر روی یک پهپاد با شش درجه آزادی استخراج و تحلیل شده و الگوریتمی برای امکان پیاده‌سازی در شرایط واقعی، با استفاده از اطلاعات پروازی یک هواپیمای واقعی، ارائه شده است. در واقع در این مقاله سیستم جامعی برای پهپاد طراحی شده است به‌طوریکه علاوه بر افزایش کارایی و دقت SLAM سه بعدی، بر دو مشکل اساسی نیز که در تحقیقات قبلی توجه کمی به آن‌ها شده است غلبه می‌کند؛ اول اینکه کلیه درجات آزادی را برای پهپاد در نظر می‌گیرد یعنی تغییرات موقعیت پهپاد تنها در دو جهت y و x محدود نشده و بلکه تغییرات ارتفاع پهپاد نیز در نظر گرفته می‌شود، دوم اینکه محدودیتی برای موقعیت نشانه‌ها وجود نداشته، یعنی سیستم برپایه سنسورهای اینرسی قادر است تمام نشانه‌ها را در ارتفاعات متفاوت مشاهده کند.

تحقیق حاضر در هفت قسمت تدوین شده است به‌طوری که بعد از مقدمه در بخش دوم به بیان الگوریتم SLAM اینرسی، روابط پایه‌ی مورد نیاز برای فیلترهای کالمن و سیستم ناوبری اینرسی پرداخته شده است. در قسمت سوم مدل مشاهده و مدل سنسورهای نشانه‌ها/ عوارض زمینی بیان شده است. در قسمت چهارم سنسورهای range bearing و bearing only در SLAM اینرسی برای شرایط تک وسیله‌ای ارائه شده است و بخش پنجم به بیان الگوریتم ارایه شده در این مقاله پرداخته است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در بخش ششم گنجانده شده‌اند و در نهایت، بخش هفتم به ارایه نتیجه‌گیری‌ها اختصاص داده شده است.

۲- الگوریتم SLAM اینرسی

در این بخش الگوریتم SLAM اینرسی معرفی شده و عملکرد آن تجزیه و تحلیل می‌شود و همچنین تاثیر عملکرد آن روی حالت مطلوب تخمین زده شده و معادلات مدل مشاهده و فرآیند که ارتباط بین حالت تخمین زده شده و سنسورهای on-board را توصیف می‌کنند، بررسی می‌شود. قبل از هر چیز باید به این نکته توجه کرد که عملیات نقشه‌سازی و مکان‌یابی بسته به مقیاس و ابعاد محیطی که مورد کاوش قرار می‌گیرد، متفاوت بوده و دارای معادلات و شرایط مجزایی است. لذا در حالت کلی دو نوع مقیاس محیطی برای SLAM در نظر گرفته می‌شود؛ الف- SLAM محلی[1]، ب- SLAM جهانی[2]. در SLAM جهانی، موقعیت پهپاد و نشانه‌های زمینی نسبت به مرکز کره‌ی زمین تخمین زده می‌شوند. اما در SLAM محلی، فقط نیاز است که موقعیت نشانه‌ها نسبت به هم در نقشه‌ی تولید شده مشخص شوند بنابراین در این حالت بایستی موقعیت پهپاد نسبت به مختصات محلی عوارض زمینی معلوم باشد. در ادامه ابتدا معادلات SLAM جهانی ارائه می‌شود و بعد معادلات SLAM محلی و نیز هر جا که نیاز به تفکیک معادلات دو مقیاس نسبت به هم است، به‌طور واضح به آن اشاره شده است.

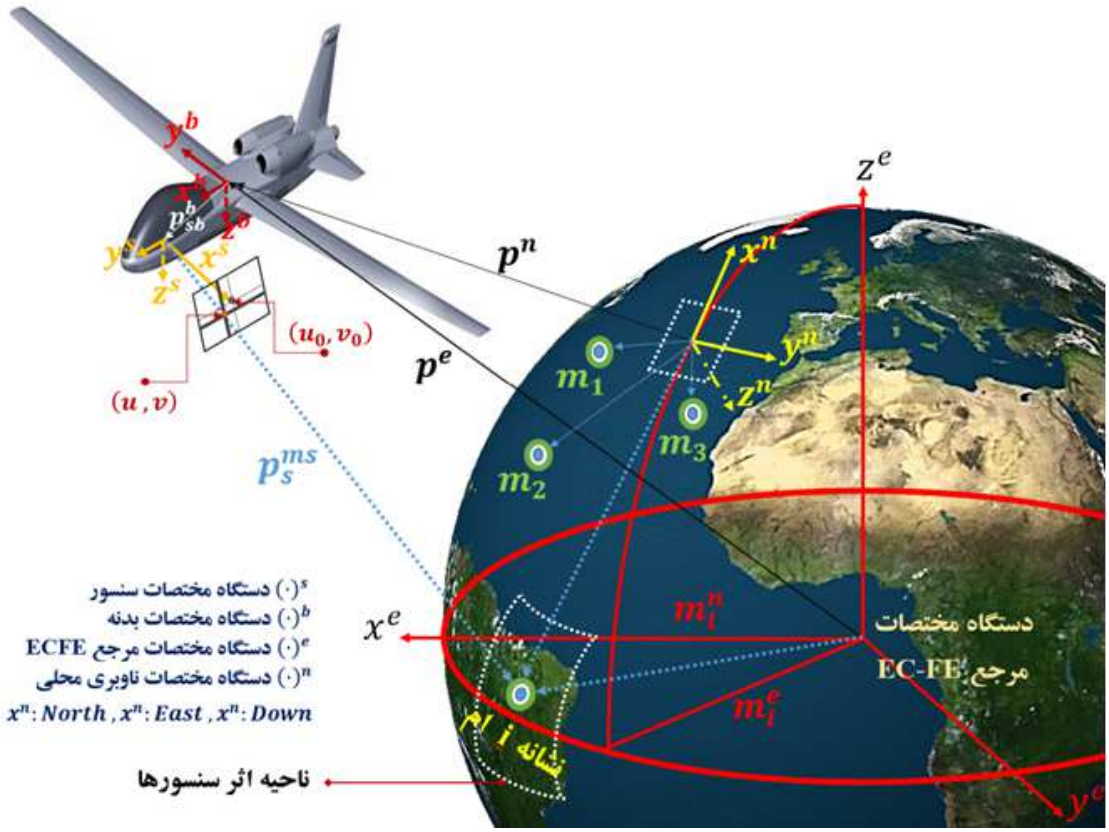
بردار حالت تخمین زده شده‌ی $\hat{x}_{global}(k)$ در گام زمانی k، شامل موقعیت سه بعدی پهپاد (p^e)، سرعت پهپاد (v^e) و زاویای اویلر ($\Psi^n=[\phi \quad \theta \quad \psi]^T$)، بایاس خروجی سنسورهای واحد اندازه‌گیری اینرسی (IMU)[3] یعنی δf^b و δw_{ib}^b، و N تا موقعیت سه بعدی نشانه‌ها در محیط (m_i^e)، می‌شود [۳۱-۳۳]:

$$\hat{x}_{global}(k)=[p^e, v^e, \Psi^n, \delta f^b, \delta w_{ib}^b, m_1^e, m_2^e, ..., m_N^e] \quad (۱)$$

به‌طوری که $i=1,2,...,N$، بالانویس e بیانگر بردارهای دستگاه مختصات ECEF[4] است، بالانویس b بردارهای دستگاه مختصات بدنه را نشان می‌دهد و بالانویس n به بردارهای دستگاه مختصات ناوبری محلی[5] اشاره دارد. پارامترهای دستگاه مختصات بدنه توسط ماتریس دوران C_b^n به پارامترهای دستگاه مختصات ناوبری محلی تبدیل می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده، ارتباط مربوط بین دستگاه‌های مختصات مرجع و بردارهای یکه در الگوریتم SLAM اینرسی استفاده می‌شوند، تشریح شده است.

1- Local SLAM
2- Global SLAM
3- IMU: Inertial Measurement Unit
4- ECEF:Earth-Centered, Earth-Fixed
۵- Local-Level Navigation Frame

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.6.6]



شکل ۱: بردارها و دستگاه‌های مرجع در الگوریتم SLAM اینرسی.

زوایای اویلر برای نمایش وضعیت پلتفرم مورد استفاده قرار می‌گیرند تا تعداد پارامترها در تخمین‌گر کاهش یابد. بنابراین فرض می‌شود که زاویه‌ی Pitch پهپاد برای جلوگیری از تکینگی زاویه‌ی اویلر در $\theta=90^\circ$ محدود شده است. تخمین حالت $\hat{x}_{global}(k)$ با معادله‌ی دینامیکی غیرخطی درجه‌ی اول به‌صورت رو به جلو در زمان با معادله‌ی زیر پیش‌بینی می‌شود.

$$\dot{\hat{x}}_{global}(t) = F_{global}[\hat{x}_{global}(t), u(t)] + G_{global}[N(t)] \tag{۲}$$

بطوری که تابع $F_{global}[.,.]$ تابع مدل فرآیند پیوسته در زمان است، تابع $G_{global}[.]$ تابع ورودی پیوسته در زمان است که برای وارد کردن نویز به بردار حالت سیستم استفاده می‌شود، $u(t)$ ورودی سیستم است که از داده‌های سنسورهای اینرسی تشکیل می‌شود و $N(t)$ بردار نویز فرآیند است که از خطاهای نویز سنسورهای اینرسی تشکیل می‌شود و میانگین صفر و کوواریانس Q دارد و برداری ناهمبسته است. معادلات مدل فرآیند برای مکان، سرعت و وضعیت وسیله مبتنی بر معادلات ناوبری اینرسی با شش درجه‌ی آزادی هستند که در آن چهارچوب دستگاه مختصات اینرسی زمین اعمال می‌شود[۳۱-۳۳]:

$$\dot{p}^e = v^e \tag{۳}$$

$$\dot{v}^e = C_b^e \hat{f}^b - C_b^e \delta f^b - C_b^e w_{accel} - 2(w_{ie}^e \times v^e) + g_l^e \tag{۴}$$

$$\dot{\Psi}^n = E_b^n (\hat{w}_{ib}^b - \delta w_{ib}^b - w_{gyro} - C_n^b w_{ie}^n) \tag{۵}$$

به‌طوری که در آن w_{ie}^e و w_{ie}^n بردارهای سرعت زاویه‌ای زمین هستند که به‌ترتیب در دستگاه‌های مختصات ECEF و ناوبری محلی اندازه‌گیری می‌شوند، E_b^n ماتریس تبدیل سرعت زاویه‌ای دستگاه مختصات بدنه به دستگاه مختصات ناوبری محلی بوده و g_l^e شدت میدان جاذبه‌ی محلی (گرانش محلی) است. C_b^n ماتریس دوران از دستگاه مختصات بدنه به ناوبری محلی و C_b^e ماتریس دوران از دستگاه

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.6.6]

مختصات بدنه به ECEF هستند به‌طوری که می‌توانند براساس مکان معلوم دستگاه مختصات ناوبری محلی از طریق رابطه‌ی زیر محاسبه شوند:

$$C_b^e = C_n^e C_b^n \tag{۶}$$

بردارهای $\hat{f}^b$ و $\hat{w}_{ib}^b$ به‌ترتیب مقدار بردار ویژه‌ی نیروی شتاب‌سنج و مقدار سرعت زاویه‌ای ژیروسکوپ هستند (به‌طوری‌که $u(t)=[\hat{f}^b(t),\hat{w}_{ib}^b(t)]^T$)، δf^b و δw_{ib}^b به‌ترتیب خروجی‌های شتاب‌سنج و ژیروسکوپ هستند و w_{accel} و w_{gyro} به‌ترتیب مقادیر نویز شتاب‌سنج و ژیروسکوپ هستند که:

$$w(t)=[w_{accel}(t),w_{gyro}(t)]^T \tag{۷}$$

سرعت‌های زاویه‌ای واقعی w_{ib}^b و شتاب واقعی f^b به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$f^b = \hat{f}^b - \delta f^b - w_{accel} \tag{۸}$$

$$w_{ib}^b = \hat{w}_{ib}^b - \delta w_{ib}^b - w_{gyro} \tag{۹}$$

کم و زیاد شدن جزئی خروجی‌های ژیروسکوپ‌ها و شتاب‌سنج‌ها به‌دلیل تغییرات دمایی و انحراف خروجی، به‌ویژه در IMU های کم هزینه، اتفاق می‌افتد. با توجه به این‌که معمولاً میزان این کم و زیاد شدن‌ها در مقایسه با خروجی‌های on/off سوئیچ‌های بزرگ و نسبتاً ثابت، کوچک است خروجی‌های شتاب‌سنج‌ها و ژیروسکوپ‌ها ثابت فرض می‌شوند. مدل‌های فرآیند خروجی‌های شتاب‌سنج‌ها و ژیروسکوپ‌ها از طریق روابط زیر حاصل می‌شوند:

$$\delta \dot{f}^b = 0 \tag{۱۰}$$

$$\delta \dot{w}_{ib}^b = 0 \tag{۱۱}$$

سرانجام موقعیت‌های نشانه‌های نقشه در دستگاه مختصات ECEF تخمین زده می‌شوند و همچنین به‌عنوان حالتی از عوارض زمینی ساکن و بی‌حرکت، ثابت فرض می‌شوند و مدل فرآیند i^{th} به‌صورت زیر ارایه می‌شود:

$$\dot{m}_i^e = 0 \tag{۱۲}$$

معادلات (۳)، (۵)، (۱۰) و (۱۲) می‌توانند به‌صورت گسسته در زمان و به شکل بازگشتی با فرض یک مرحله انتگرال‌گیری اویلری مرتبه اول، نیز بیان شوند:

$$\hat{x}_{global}(k) = F_{global}[\hat{x}_{global}(k-1),u(k),k] + G_{global}[N(k)] \tag{۱۳}$$

به‌طوری که تابع $F_{global}[.,.,k]$ تابع انتقال حالت غیرخطی و $G_{global}[.,k]$ تابع انتقال مدل ورودی در زمان k است، بنابراین مدل گسسته‌ی فرآیند به‌صورت زیر به‌دست می‌آید[۳۱-۳۳]:

$$p^e(k) = p^e(k-1) + v^e \Delta t \tag{۱۴}$$

$$v^e(k) = v^e(k-1) + [C_b^e \hat{f}^b - C_b^e \delta f^b - C_b^e w_{accel} - 2(w_{ie}^e \times v^e) + g_l^e]\Delta t \tag{۱۵}$$

$$\Psi^n(k) = \Psi^n(k-1) + [E_b^n(\hat{w}_{ib}^b - \delta w_{ib}^b - w_{gyro} - C_n^b w_{ie}^n)]\Delta t \tag{۱۶}$$

$$\delta f^b(k) = \delta f^b(k-1) \tag{۱۷}$$

$$\delta w_{ib}^b(k) = \delta w_{ib}^b(k-1) \tag{۱۸}$$

$$m_i^e(k) = m_i^e(k-1) \tag{۱۹}$$

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]

[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.6.6]

که Δt اختلاف زمانی بین بخش‌های گسسته k و k-1 است.

در این‌جا معادلات بالا در مقیاس SLAM محلی ارائه می‌شوند که در آن با انتخاب دستگاه مختصات ناوبری محلی به‌عنوان یک دستگاه مختصات اینرسی مرجع و با صرف نظر کردن از شتاب‌های مرکزگرا[1]، اثر کوریولیس[2] و سرعت زاویه‌ای که توسط چرخش کره‌ی زمین ایجاد می‌شود، معادلات ناوبری اینرسی به حالت‌های مدل فرآیند پهپاد ساده می‌شوند. معادلات مدل فرآیند پهپاد به شکل پیوسته در زمان در زیر آورده شده‌اند:

$$\dot{p}^n = v^n \tag{۲۰}$$

$$\dot{v}^n = C_b^n \hat{f}^b - C_b^n \delta f^b - C_b^n w_{accel} + g^n \tag{۲۱}$$

$$\dot{\Psi}^n = E_b^n (\hat{w}_{ib}^b - \delta w_{ib}^b - w_{gyro}) \tag{۲۲}$$

به‌طوری که با توجه به جاذبه‌ی گرانشی در دستگاه مختصات ناوبری محلی، $g^n = [0, 0, g]^T$ بردار شتاب بوده و $g = 9.81 m/s^2$ است. بنابراین نشانه‌های نقشه‌ی عوارض زمینی در دستگاه مختصات ناوبری محلی ارجاع داده می‌شوند و مدل فرآیند آن‌ها به‌صورت زیر است:

$$\dot{m}_i^n = 0 \tag{۲۳}$$

بنابراین شکل کامل معادلات مدل فرآیند گسسته در زمان در SLAM محلی به‌صورت زیر هستند:

$$p^n(k) = p^n(k-1) + v^n \Delta t \tag{۲۴}$$

$$v^n(k) = v^n(k-1) + [C_b^n \hat{f}^b - C_b^n \delta f^b - C_b^n w_{accel} + g^n]\Delta t \tag{۲۵}$$

$$\Psi^n(k) = \Psi^n(k-1) + [E_b^n (\hat{w}_{ib}^b - \delta w_{ib}^b - w_{gyro})]\Delta t \tag{۲۶}$$

$$\delta f^b(k) = \delta f^b(k-1) \tag{۲۷}$$

$$\delta w_{ib}^b(k) = \delta w_{ib}^b(k-1) \tag{۲۸}$$

$$m_i^n(k) = m_i^n(k-1) \tag{۲۹}$$

۳- مدل مشاهده و مدل سنسورهای نشانه‌های زمینی

معادلات مدل مشاهده، ارتباط بین مشاهده‌ی سنسور از یک نشانه‌ی نقشه در دستگاه مختصات سنسور زمینی برای حالت‌های تخمین‌زده شده در SLAM را توصیف می‌کند. روابط (۳۰) و (۳۱) به‌ترتیب، به مشاهده‌ی $z_i(k)$ حالت‌های تخمین زده شده SLAM جهانی و محلی مربوط می‌شوند.

$$z_i(k) = H_{i,global}\left(p^e(k), \Psi^n(k), m_i^e(k), k\right) + v(k) \tag{۳۰}$$

$$z_i(k) = H_{i,local}\left(p^n(k), \Psi^n(k), m_i^n(k), k\right) + v(k) \tag{۳۱}$$

به‌طوری که $H_{i,global}(.,.,.,k)$ و $H_{i,local}(.,.,.,k)$ توابعی از مکان نشانه‌ها، موقعیت پهپاد و زوایای اویلر هستند و $v(k)$ تابع نویز

1- Centripetal
2- Coriolis effect

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.6.6]

غیرهمبسته با میانگین صفر و کواریانس R است. مشاهدات زمینی می‌توانند از انواع سنسورهای مختلف مانند رادار، یک دوربین بصری یا فاصله‌یاب لیزری به‌دست آیند. الگوریتم SLAM نیازمند این است که نشانه‌های نقطه‌ای بتوانند از داده‌های سنسوری مشاهدات استخراج شوند تا نقشه برداری نشانه‌های زمینی ادامه یابد. در شرایط داشتن اهداف بزرگی که نمی‌توانند به‌عنوان یک نقطه در داده‌های سنسورها در نظر گرفته شوند، مرکز جرم هدف پیدا می‌شود یا چندین نقطه‌ی دیگر می‌توانند برای نمایش فقط یک هدف، استفاده شوند. مشاهده‌ی سنسوری می‌تواند به دو نوع تفکیک شود؛ الف: مشاهدات range bearing و ب: مشاهدات bearing only هنگامی که هر دو نوع مشاهدات حاصل می‌شوند مدل مشاهده به‌صورت زیر خواهد بود [۳۴-۳۶]:

$$z_i(k)=\begin{bmatrix}\rho_i\\ \varphi_i\\ \vartheta_i\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\sqrt{(x_i^s)^2+(y_i^s)^2+(z_i^s)^2}\\ \tan^{-1}\left(\dfrac{y_i^s}{x_i^s}\right)\\ \tan^{-1}\left(\dfrac{z_i^s}{\sqrt{(x_i^s)^2+(y_i^s)^2}}\right)\end{bmatrix} \tag{۳۲}$$

به‌طوری‌که ρ_i، φ_i و ϑ_i زاویه‌های اویلر مشاهده شده نسبت به نشانه‌ها بوده و x_i^s، y_i^s و z_i^s مختصات کارتزین $p_{ms,i}^s$ هستند که موقعیت نسبی نشانه iام نسبت به سنسور می‌باشد و در دستگاه مختصات سنسور اندازه‌گیری می‌شود. برای نشان دادن یک مشاهده‌ی bearing only، دو قالب وجود دارد که می‌توان از آن‌ها استفاده کرد. مشاهده‌ی $z_i(k)$ می‌تواند به‌وسیله‌ی زاویه‌های $azimuth(\varphi_i)$ و $elevation(\vartheta_i)$ نمایش داده شود:

$$z_{i,ang}(k)=\begin{bmatrix}\varphi_i\\ \vartheta_i\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\tan^{-1}\left(\dfrac{y_i^s}{x_i^s}\right)\\ \tan^{-1}\left(\dfrac{z_i^s}{\sqrt{(x_i^s)^2+(y_i^s)^2}}\right)\end{bmatrix} \tag{۳۳}$$

به‌طوریکه R_{ang} کوواریانس نویز زاویه‌ای است. برای دوربین بصری، مشاهده به‌صورت مطلوب‌تری به شکل پیکسل‌هایی در تصویر دوربین نمایش داده می‌شود:

$$z_{i,pix}(k)=\begin{bmatrix}u\\ v\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}f_u\left(\dfrac{y_i^s}{x_i^s}\right)+u_0\\ f_v\left(\dfrac{z_i^s}{x_i^s}\right)+v_0\end{bmatrix} \tag{۳۴}$$

جایی‌که u_0, v_0, f_u, f_v پارامترهای کالیبراسیون برای دوربین هستند و R_{pix} کوواریانس نویز پیکسل است. ارتباط بین مختصات پیکسل و زاویه‌های azimuth و elevation با رابطه‌ی (۳۵) داده شده است:

$$\begin{bmatrix}\varphi\\ \vartheta\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\tan^{-1}\dfrac{(u-u_0)}{f_u}\\ \tan^{-1}\left(\dfrac{(v-v_0)}{f_v}\cos\varphi\right)\end{bmatrix} \tag{۳۵}$$

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.6.6]

موقعیت نسبی نشانه iام نسبت به سنسور یعنی $p^s_{ms,i}$ که در دستگاه مختصات سنسور اندازه‌گیری می‌شود، به‌صورت رابطه‌ی زیر داده می‌شود:

$$p^s_{ms.i} = C^s_b C^b_n \left[m^n_i - p^n - C^n_b p^b_{sb} \right] = C^s_b C^b_e \left[m^e_i - p^e - C^e_b p^b_{sb} \right] \quad (۳۶)$$

که در آن C^s_b ماتریس دوران از دستگاه مختصات بدنه به دستگاه مختصات سنسور است، p^b_{sb} آفست (انحراف) سنسور از مرکز جرم وسیله است که در دستگاه مختصات بدنه اندازه‌گیری می‌شود و $C^b_e = \left(C^e_b\right)^T$ است.

٤- سنسورهای range bearing و bearing only در SLAM اینرسی

هنگامی که مشاهدات هر دو سنسور مذکور موجود باشند، الگوریتم SLAM اینرسی چهار مرحله را انجام می‌دهد [۳۷].

I. مرحله‌ی پیش‌بینی که در آن معادلات مدل فرآیند به‌صورت روبه جلو در زمان برای پیش‌بینی کردن بردار حالت تخمین زده شده و ماتریس کوواریانس حالت در یک گام پیش‌بینی EKF محاسبه می‌شود.

II. وابسته‌سازی داده‌ها برای شناسایی جدید بودن نشانه‌های مشاهده شده.

III. مقداردهی اولیه‌ی یک نشانه، به‌طوری‌که موقعیت نشانه‌ی جدید، محاسبه شده و به بردار حالت تخمین زده اضافه شده و عدم قطعیت موقعیت اولیه آن به ماتریس کوواریانس حالت اضافه می‌شود.

IV. به‌روز رسانی حالت که در آن به‌ازای هر مشاهده یک گام به‌روز رسانی در EKF برای اصلاح مقدار حالت تخمین زده شده و به‌روز رسانی ماتریس کوواریانس حالت، انجام می‌گیرد.

شکل ۲ مرور اجمالی بر الگوریتم SLAM اینرسی range/ bearing ارایه داده است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود الگوریتم بازگشتی است، پیش‌بینی حالت EKF یعنی بلوک ۱ هنگامی که داده‌ی سنسور اینرسی آماده و در دسترس باشد، اجرا می‌شود. بخش وابسته‌سازی داده یعنی بلوک ۲، بخش مقداردهی اولیه‌ی نشانه یا بلوک ۳ و بخش به‌روز رسانی حالت EKF یا بلوک ۴ هنگامی که مشاهدات سنسورهای زمینی صورت می‌گیرد، اجرا می‌شوند.

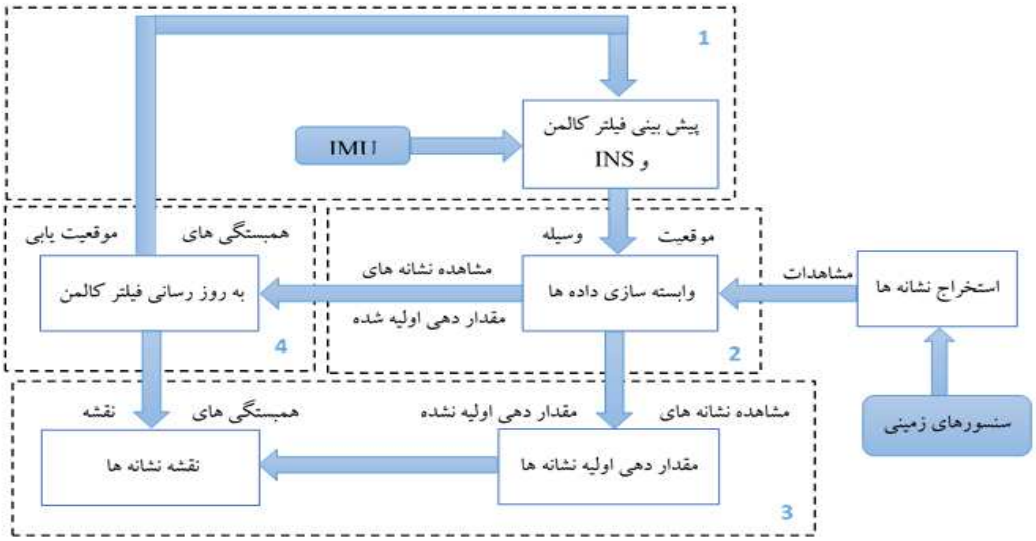
٤-۱- پیش‌بینی حالت

هر لحظه که یک مقدار جدیدی از سنسورهای اینرسی گرفته می‌شود مرحله‌ی پیش‌بینی حالت به‌طور بازگشتی اجرا می‌شود. در SLAM جهانی، بردار حالت تخمین زده شده یعنی $\hat{x}_{global}(k+1)$ از تخمین حالت گام زمانی قبلی با استفاده از روابط (۱۴) تا (۱۹) پیش‌بینی می‌شود. ماتریس کوواریانس حالت در گام زمانی k بعد از پیش‌بینی، یعنی $p^-(k+1)$ مانند رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$p^-(k+1) = \nabla F_{global}\, p(k) \nabla F^T_{global} + \nabla G_{global} Q(k) \nabla G^T_{global} \quad (۳۷)$$

که در آن ∇F_{global} و ∇G_{global} به‌ترتیب ژاکوبین‌های تابع انتقال حالت $F_{global}(.,.,k)$ نسبت به بردار حالت $\hat{x}_{global}(k+1)$ و تابع انتقال مدل ورودی $G_{global}(.,.,k)$ نسبت به ورودی نویز $N(k+1)$ هستند.

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.6.6]



شکل ۲: مرور اجمالی بر الگوریتم SLAM اینرسی range/ bearing.

در SLAM محلی، بردار حالت تخمین زده شده یعنی $\hat{x}_{local}(k+1)$ با استفاده از روابط (۲۴) تا (۲۹) به‌صورت رو به جلو پیش‌بینی می‌شود.

$$p^{-}(k+1)=\nabla F_{local}\,p(k)\nabla F_{local}^{T}+\nabla G_{local}Q(k)\nabla G_{local}^{T} \tag{۳۸}$$

جای‌که ∇F_{local} و ∇G_{local} به‌ترتیب ژاکوبین‌های تابع انتقال حالت $F_{local}(.,.,k)$ نسبت به بردار حالت $\hat{x}_{local}(k+1)$ و تابع انتقال مدل ورودی $G_{local}(.,.,k)$ نسبت به ورودی نویز $w(k+1)$ هستند.

٤-۲- مقداردهی اولیه‌ی نشانه

هنگامی که اولین مشاهده‌ی range/ bearing از یک نشانه‌ی خاص به‌دست می‌آید، موقعیت آن نشانه با استفاده از تابع مقداردهی اولیه‌ی $J_1\left[\hat{x}(k),J_2\left(z_i(k)\right)\right]$ به‌صورت رابطه‌ی (۳۹) برای SLAM جهانی و رابطه‌ی (۴۰) برای SLAM محلی، محاسبه می‌گردد:

$$J_{1,global}\left[\hat{x}_{global}(k),J_2\left(z_i(k)\right)\right]\rightarrow m_i^e=p^e+C_n^eC_b^np_{sb}^b+C_n^eC_b^nC_s^bp_{ms}^s \tag{۳۹}$$

$$J_{1,local}\left[\hat{x}(k)_{local},J_2\left(z_i(k)\right)\right]\rightarrow m_i^n=p^n+C_b^np_{sb}^b+C_b^nC_s^bp_{ms}^s \tag{۴۰}$$

به‌طوری‌که برای هر دوی SALM جهانی و SLAM محلی، $J_2\left(z_i(k)\right)$ به‌صورت زیر است:

$$J_2\left(z_i(k)\right)\rightarrow p_{ms,i}^s=\begin{bmatrix}\rho_i\cos(\phi_i)\cos(\vartheta_i)\\ \rho_i\sin(\phi_i)\cos(\vartheta_i)\\ \rho_i\sin(\vartheta_i)\end{bmatrix} \tag{۴۱}$$

سپس بردار حالت و ماتریس کوواریانس حالت با اضافه شدن موقعیت نشانه‌ی جدید تکمیل می‌شوند:

$$\hat{x}_{global,aug}(k)=\begin{bmatrix}\hat{x}_{global}(k)\\ m_i^e(k)\end{bmatrix} \tag{۴۲}$$

$$p_{global,aug}(k)=\begin{bmatrix}I & 0\\ \nabla J_x & \nabla J_z\end{bmatrix}\begin{bmatrix}p_{global}(k) & 0\\ 0 & R_x\end{bmatrix}\begin{bmatrix}I & 0\\ \nabla J_x & \nabla J_z\end{bmatrix}^T \tag{۴۳}$$

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.6.6]

روابط (۴۱) و (۴۲) برای SLAM جهانی بوده و برای SLAM محلی این معادلات به‌صورت زیر هستند:

$$\hat{x}_{local,aug}(k)=\begin{bmatrix}\hat{x}_{local}(k)\\ m_i^e(k)\end{bmatrix} \tag{۴۴}$$

$$p_{lcal,aug}(k)=\begin{bmatrix}I & 0\\ \nabla J_x & \nabla J_z\end{bmatrix}\begin{bmatrix}p_{local}(k) & 0\\ 0 & R_x\end{bmatrix}\begin{bmatrix}I & 0\\ \nabla J_x & \nabla J_z\end{bmatrix}^T \tag{۴۵}$$

به‌طوری‌که ∇J_x و ∇J_z به‌ترتیب ژاکوبین‌های تابع مقداردهی اولیه‌ی J_1 نسبت به تخمین حالت $\hat{x}(k)$ و مشاهده‌ی $z_i(k)$ هستند.

٤-۳- وابسته‌سازی داده

وابسته‌سازی داده، فرآیند تطبیق مشاهدات صورت گرفته توسط سنسورهای زمینی از نشانه‌ها با موقعیت‌های سه بعدی تخمین زده شده‌ی نشانه‌های درون نقشه است. اعتبار وابسته‌سازی‌های بالقوه بین مشاهدات و نشانه‌ها با استفاده از معیار فاصله‌ی Mahalanobis (γ) [۳۸] در فضای سنسور ارزیابی می‌شود:

$$\gamma_i=v_i^T(k)S_i^{-1}(k)v_i(k) \tag{۴۶}$$

به‌طوری‌که $v_i(k)$ و $S_i(k)$ نوآوری[1] و کوواریانس نوآوری برای یک مشاهده از نشانه iام در نقشه در بخش زمانی k هستند. هنگام بررسی کردن وابسته‌سازی یک مشاهده‌ی داده شده با نشانه های مقداردهی اولیه شده در نقشه، γ_i برای هر نشانه مقداردهی اولیه شده محاسبه می‌شود. تطابق‌هایی که در درون یک آستانه‌ی تعریف شده از γ_i مطابق با سطح ۹۵٪ از اطمینان قرار می‌گیرند، قابل قبول در نظر گرفته می‌شوند، که در این‌صورت مشاهده با یک نشانه‌ی مشخص شده در نقشه وابسته‌سازی می‌شود و یک گام به‌روز رسانی حالت EKF اجرا می‌شود. اگر مشاهده در داخل آستانه‌ی یک نشانه موجود در نقشه‌ی قرار نگیرد این‌گونه فرض می‌شود که نشانه قبلاً دیده نشده است و بنابراین داده‌ی مشاهده‌ای برای مقداردهی اولیه‌ی نشانه درون نقشه استفاده می‌شود.

هنگامی‌که مشاهدات نشانه‌ها به‌خوبی در مختصات سنسور نسبت به عدم قطعیت جهت‌گیری و موقعیت وسیله، قرار داده می‌شوند، این روش وابسته‌سازی داده به‌خوبی کار می‌کند. در شرایطی که نشانه‌ها خیلی متراکم هستند، نه تنها ممکن است در نظر گرفتن مطابقت‌های نشانه‌های منحصربه‌فرد با مشاهدات سنسورهای منحصربه‌فرد لازم باشد بلکه امکان دارد در نظر گرفتن سازگاری مشترک چندین نشانه با چندین مشاهده به‌طور همزمان نیز لازم باشد تا بر ابهامات وابسته‌سازی غلبه شود.

٤-٤- به‌روز رسانی بردار حالت

پس از این‌که یک نشانه در بردار حالت، مقداردهی اولیه شد، مشاهدات بعدی صورت گرفته از این نشانه برای به‌روز رسانی همه‌ی عناصر بردار حالت که شامل موقعیت وسرعت پهپاد، خروجی‌های سنسورهای اینرسی و موقعیت نشانه مذکور و سایر نشانه‌های محیط می‌شود، استفاده می‌گردند. تخمین حالت در مرحله‌ی به‌روز رسانی EKF، به‌روز می‌شود. به‌طوری‌که تخمین حالت و ماتریس کوواریانس حالت بعد از به‌روز رسانی برای SLAM جهانی به‌صورت زیر می‌باشند [۳۰]:

$$\hat{x}_{global}^{+}(k+1)=\hat{x}_{global}^{-}(k+1)+N(k+1)v(k+1) \tag{۴۷}$$

$$\hat{p}_{global}^{+}(k+1)=\hat{p}_{global}^{-}(k+1)-N(k+1)S_i(k+1)N(k+1)^T \tag{۴۸}$$

$$v_i(k+1)=z_i-H_{i,global}\left(\hat{x}_{global}^{-}(k+1)\right) \tag{۴۹}$$

1- Innovation

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.6.6]

$$S_i(k+1) = \nabla H_{i,global}\,\hat{p}^{-}_{global}(k+1)\nabla H^{-}_{i,global} + R(k+1) \quad (۵۰)$$

$$N(k+1) = \hat{p}^{-}_{global}(k+1)\nabla H^{T}_{i,global} S_i^{-1}(k+1) \quad (۵۱)$$

جایی‌که $H_{i,global}\left(\hat{x}^{-}_{global}(k+1)\right)$ مشاهده‌ی نشانه‌ی پیش‌بینی شده هست که از موقعیت و وضعیت تخمین زده شده‌ی پهپاد و مکان نقشه‌ی تخمین زده شده با استفاده از معادلات (۳۱) و (۳۵) محاسبه می‌شود. تابع $\nabla H_{i,global}$ ژاکوبین تابع مشاهده نسبت به بردار حالت پیش‌بینی شده است. برای SLAM محلی نیز با تغییر پارامترهای SLAM جهانی به پارامترهای SLAM محلی روابط (۴۶) تا (۵۰) برقرار می‌باشد.

۵- الگوریتم SLAM اینرسی ارایه شده در این مقاله و پیاده‌سازی شده در شبیه سازی‌ها

الگوریتم ارایه شده برای هر دو شرایط استفاده از سنسورهای range/bearing و bearing only به‌کار می‌رود. مراحل این الگوریتم در زیر به تفصیل بیان شده است.

I. در اولین گام و با در نظر گرفتن مقادیر اولیه، حالت بعدی برای بردار حالت و ماتریس کواریانس پیش‌بینی می‌شود. پیش‌بینی حالت‌ها با کمک حالت‌های قبل و مشتق بردار حالت قبل و ماتریس‌های ژاکوبین F و G و به‌خصوص با کمک داده‌های دریافتی از شتاب‌سنج و ژیروسکوپ، صورت می‌گیرد.

II. در مرحله بعد که سنسور زمینی مشاهده‌ای را ارائه می‌دهد، سیستم به وابسته‌سازی داده‌ها می‌پردازد. یعنی باید تشخیص داده شود که این نشانه قبلاً مشاهده شده است یا نه؟

III. اگر نشانه‌ی مشاهده شده،یک نشانه‌ی جدید باشد در آن‌صورت مکان تقریبی آن در مختصات پهپاد و در مختصات مرجع (جهانی یا محلی) محاسبه شده و به نقشه ایجاد شده، اضافه می‌شود.

IV. اگر تشخیص داده شود که نشانه‌ی مشاهده شده، قبلاً رویت شده است، در آن‌صورت سیستم با درنظر گرفتن هر دو مشاهده‌ی جدید و قدیم برای آن نشانه، سعی به بهبود مکان تخمین زده شده برای آن نشانه می‌کند.

V. در آخرین گام از اولین حلقه، الگوریتم، بردار حالت و ماتریس کواریانس را به‌روز می‌کند. یعنی بر اساس مشاهدات صورت گرفته، ماتریس کوواریانس و بردار حالت متشکل از موقعیت، سرعت، زوایای اویلر و مقادیر شتاب و چرخش تخمین‌زده شده به‌روز می‌شوند. در واقع یک بردار نوآوری براساس مشاهدات، ایجاد کرده و با استفاده از روابط ارائه شده، به‌روز رسانی صورت می‌گیرد.

VI. الگوریتم دوباره به مرحله‌ی اول بازگشته و این حلقه را تا پایان مسیر تکرار می‌شود (در شبیه سازی ۱۰۰ ثانیه پرواز، این حلقه ۱۰۰۰ بار تکرار می‌شود یعنی گام مشاهدات ۰/۱ ثانیه در نظر گرفته شده است).

در شکل ۳ شماتیکی از این الگوریتم آورده شده است.

٦- نتایج شبیه‌سازی‌ها

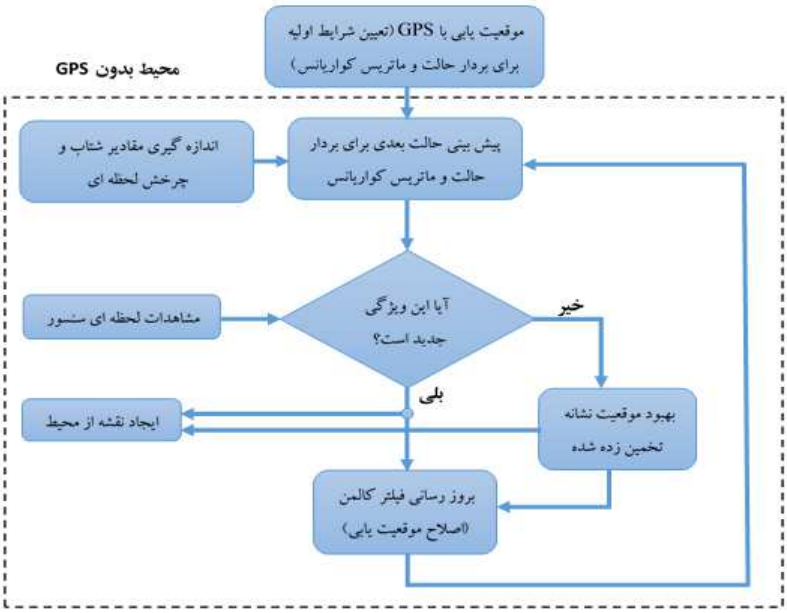
قبل از پیاده سازی الگوریتم SLAM، باید یک سری پیش‌نیازها از جمله شرایط اولیه، موقعیت واقعی نشانه‌ها مشخص شوند.

٦-۱- اندازه‌گیری مقادیر شتاب و چرخش و شرایط اولیه

همان‌طور که قبلاً اشاره شد در الگوریتم SLAM اینرسی برای پهپاد، مقادیر لحظه‌ای شتاب و چرخش بدنه به‌عبارت دیگر خروجی‌های واحد IMU، مورد نیاز است که در عمل این مقادیر به کمک شتاب‌سنج‌ها و ژیروسکوپ‌ها به‌صورت آنی اندازه‌گیری می‌شوند ($\left[\hat{f}^b(t) \quad \hat{w}^b_{ib}(t)\right]$). به‌منظور شبیه‌سازی، یک پایگاه داده از این مقادیر برای مسیر پرواز به مدت ۱۰۰ ثانیه تهیه شد و در هر لحظه با

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.6.6]

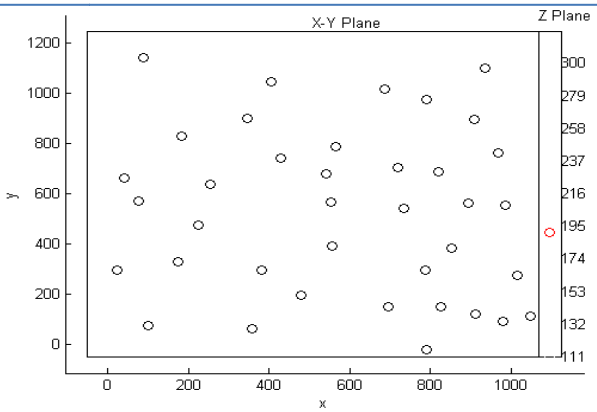
مراجعه به این پایگاه داده‌های عملی که مشابه با اندازه‌گیری در دنیای واقعی است، می‌توان به خروجی‌های شتاب‌سنج‌ها و ژیروسکوپ‌ها



شکل ۳: شماتیکی از الگوریتم ارایه شده در این مقاله.

دسترسی پیدا کرد. برای آن‌که الگوریتم SLAM اینرسی به‌خوبی قادر به تخمین مکان پهپاد باشد، اطلاع از مکان اولیه‌ی پهپاد، تأثیر بسزایی در عملکرد صحیح الگوریتم دارد. به‌همین منظور در ابتدا با شروع شبیه‌سازی برای چند ثانیه فرض بر آن است که سیستم GPS فعال باشد و سیستم به کمک آن مکان‌یابی را انجام دهد و موقعیت اولیه‌ی خود را تخمین بزند. بعد از گذشت این چند ثانیه دیگر سیگنال GPS در دسترس نبوده و الگوریتم با در اختیار داشتن مقادیر اولیه، برای بردار حالت و ماتریس کوواریانس شروع به‌کار می‌کند. در واقع علاوه بر شبیه‌سازی الگوریتم SLAM اینرسی پیشنهادی، برای تعیین صحیح شرایط اولیه، از داده‌های GPS استفاده کرده است که این کار به‌علت انتقال داده‌های GPS به الگوریتم SLAM و بازخوانی داده‌های GPS توسط الگوریتم فیلتر کالمن توسعه یافته، باعث سختی دوچندان کار و صرف زمان بیشتر می‌شود. افزایش زمان ناشی از این است که الگوریتم با شروع فرآیند، GPS را برای به‌دست آوردن مقادیر اولیه بررسی می‌نماید و تا زمانی که مقادیر اولیه را به‌دست نیاورده باشد این فرایند تکرار می شود و بعد از تعیین مقادیر اولیه، GPS از چرخه خارج می شود. هرچند که می‌توانستیم شرایط اولیه را به شکل دستی وارد کنیم اما برای آن‌که سیستم کاملاً با واقعیت تطابق داشته باشد و امکان پیاده‌سازی عملی مهیا باشد، این قابلیت به الگوریتم اضافه شد. در اجرای برنامه این امکان فراهم شده است که نقاط نشانه‌ها به شکل دلخواه و با ارتفاع‌های متفاوت تعریف شوند که با این کار موقعیت واقعی نقاط نشانه‌ها به نقشه اضافه می‌شوند (شکل ۴) و همان‌طور که مشاهده می‌شود موقعیت ها را می‌توان به دلخواه در راستای محورهای x و y و نیز با تغییر مکان دایره قرمز رنگ در راستای z انتخاب کرد.

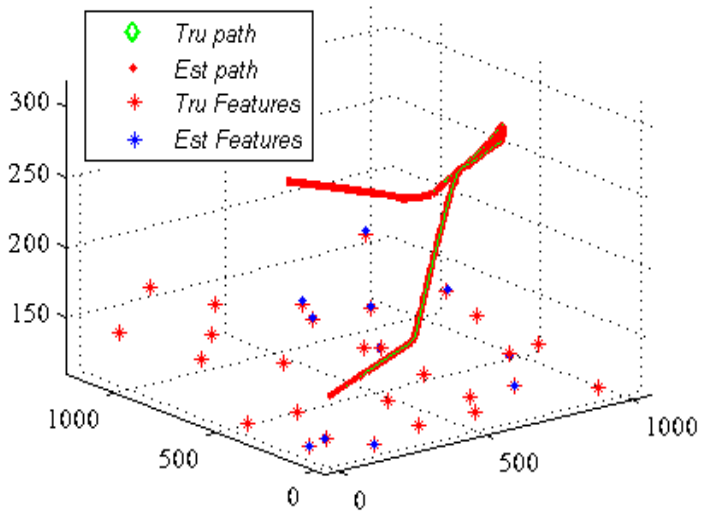
[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.6.6]



شکل۴: تعریف موقعیت واقعی نشانه ها با ارتفاع های متفاوت، به‌طوری‌که ابتدا با تغییر موقعیت دایره قرمز رنگ در نوار عمودی سمت راست شکل، ارتفاع موقعیت نشانه را مشخص می‌کنیم و بعد با اضافه کردن دایره سیاه در صفحه سمت چپ شکل موقعیت x و y نقطه مورد نظر را تعیین می‌کنیم.

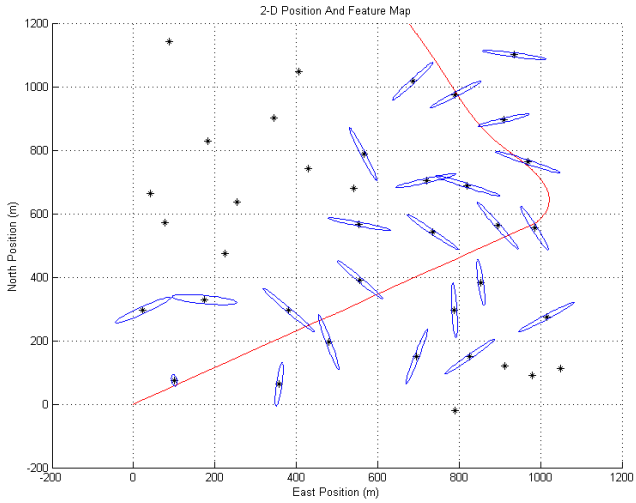
٦-۲- نتایج

در این بخش ترسیم نقشه‌ی انجام گرفته برای مکان‌های تخمین زده شده‌ی نشانه‌ها و تخمین مسیر حرکت (شامل حرکت انتقالی و چرخشی) پهپاد به همراه تخمین سرعت‌های آن نشان داده شده است که در همه‌ی آن‌ها موارد تخمین زده شده با مقادیر واقعی مقایسه شده‌اند تا بدین صورت عملکرد سیستم شبیه‌سازی شده مشخص گردد.با شروع فرآیند، نشانه‌ها به کمک سنسورهای پهپاد مشاهده می‌شوند (مکان‌های تخمین زده شده برای نشانه‌ها). سنسوری که برای این سیستم در نظر گرفته می‌شود به‌صورت یک فاصله‌سنج با محدوده‌ی ۳۰۰ متر تعریف شده است. یعنی این سنسور که بر بدنه هواپیما سوار است، تا شعاع کروی به اندازه‌ی ۳۰۰ متر قادر به دریافت اطلاعات از مکان نسبی نقاط نشانه ها می‌باشد. شکل ۵ نمای سه بعدی مسیر حرکت پهپاد به همراه نشانه‌های تخمین زده شده را نشان می‌دهد. در این شکل هم مسیر واقعی حرکت پهپاد و هم مسیر تخمین زده ترسیم شده است. به‌طوری که مشاهده می‌گردد الگوریتم به‌خوبی مسیر پهپاد را تخمین زده است. همچنین در این شکل موقعیت واقعی نشانه‌ها و موقعیت تخمین زده شده‌ی آن‌ها نیز نشان داده شده است.



شکل ۵: نمای سه بعدی از نقشه ترسیمی توسط الگوریتم SLAM اینرسی.

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.6.6]



شکل ۶: نمای دوبعدی از محدوده مکان نشانه های تخمین‌زده شده و همچنین مسیر حرکت تخمین زده شده پهپاد توسط الگوریتم.

در شکل ۶ محدوده‌یموقعیت نشانه‌های تخمین زده شده و همچنین مسیر حرکت تخمین‌زده شده توسط الگوریتم SLAM اینرسی نشان داده شده است. درواقع آنچه که سیستم با روش SLAM فراهم می‌آورد، در این نمای دو بعدی نشان داده می‌شود. خط قرمز رنگ مسیر حرکت تخمین‌زده شده را نشان می‌دهد. نقاط سیاه رنگ همان نشانه‌های حقیقی تعریف شده می‌باشند و شکل‌های بیضی مانند، در واقع محدوده‌ای را نشان می‌دهند که توسط الگوریتم به‌عنوان نشانه مشاهده شده‌اند که این محدوده‌ها توسط ماتریس کوواریانس برای هر نقطه‌ی نشانه تعیین شده‌اند.

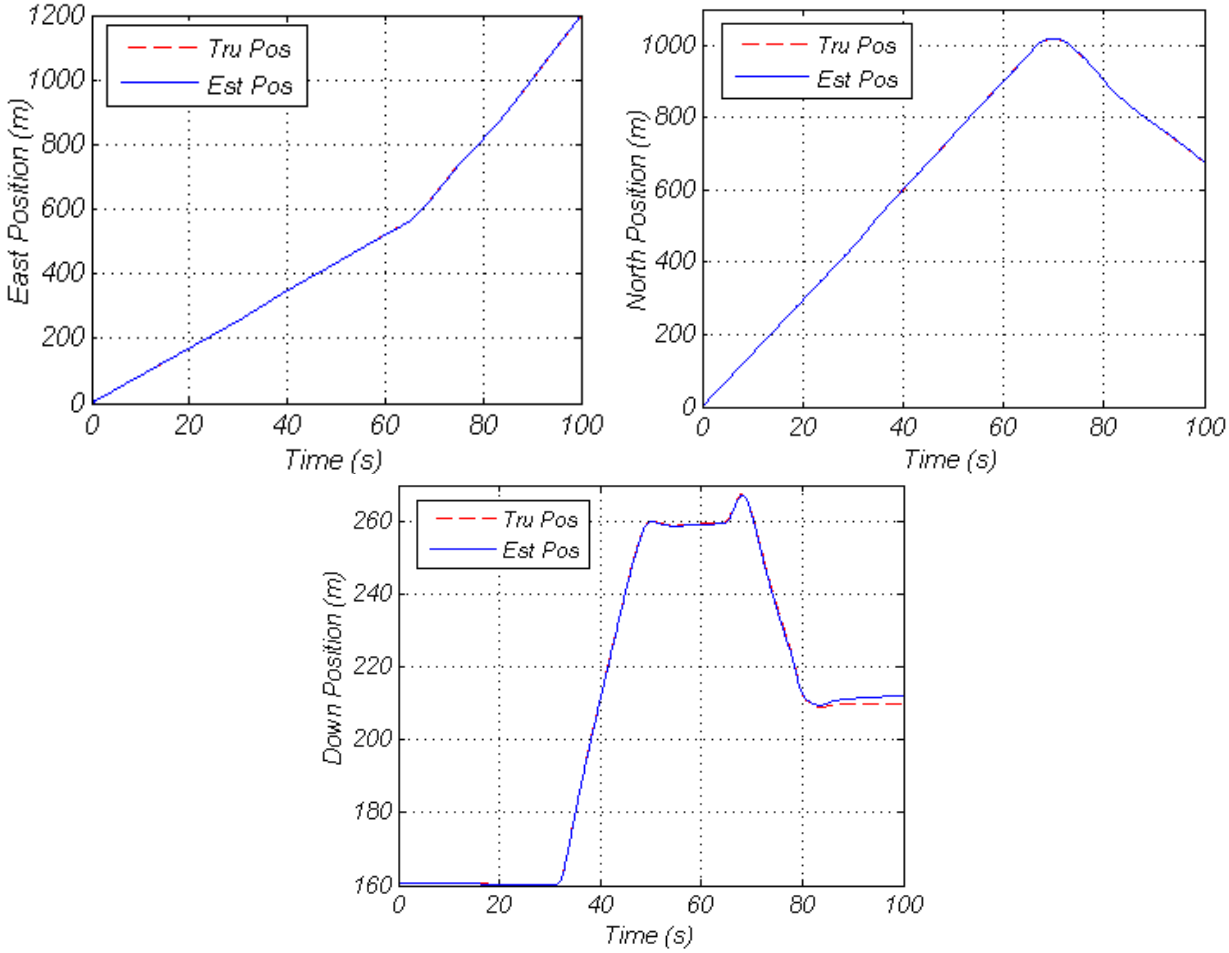
در حقیقت این شکل توصیفی بر مکان‌یابی و نقشه‌سازی همزمان می‌باشد که همان SLAM نامیده می‌شود و در این کار از آن به‌عنوان الگوریتم SLAM اینرسی یاد می‌شود. این شکل به‌خوبی کارایی مناسب سیستم طراحی شده را به اثبات می‌رساند. علاوه بر این‌که سیستم به‌درستی مکان پهپاد را تخمین زده، در زمینه نقشه‌سازی از محیط نیز به‌خوبی عمل نموده است و کلیه‌ی نشانه‌هایی که در محدوده‌ی عملکرد سنسور قرار داشته‌اند را به‌خوبی تشخیص داده است.

در منحنی‌های شکل ۷ برای بهتر مشخص شدن عملکرد مطلوب سیستم طراحی شده برای تعیین موقعیت پهپاد، مکان تخمینی توسط الگوریتم با مکان واقعی پهپاد مقایسه شده است و میزان خطای آن‌ها در شکل ۸ نشان داده شده اند. همان‌طور که از شکل‌های مذکور مشخص است خطا مقدار ناچیزی است و بیشتر در تغییر جهت‌های مسیر هواپیما (ثانیه ۶۵) مشاهده می‌شود و البته چنانچه مسیر به حالت عادی برگردد خطا نیز به صفر میل خواهد کرد و این تأییدی بر قدرت بالای سیستم طراحی شده را برای تعیین موقعیت پهپاد با کمک الگوریتم است. در شکل ۹ اندازه‌ی سرعت پهپاد در دو حالت واقعی و تخمین زده شده نشان شده است و در شکل ۱۰ سرعت در هر یک از راستاها مقایسه شده است. اندازه سرعت با رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

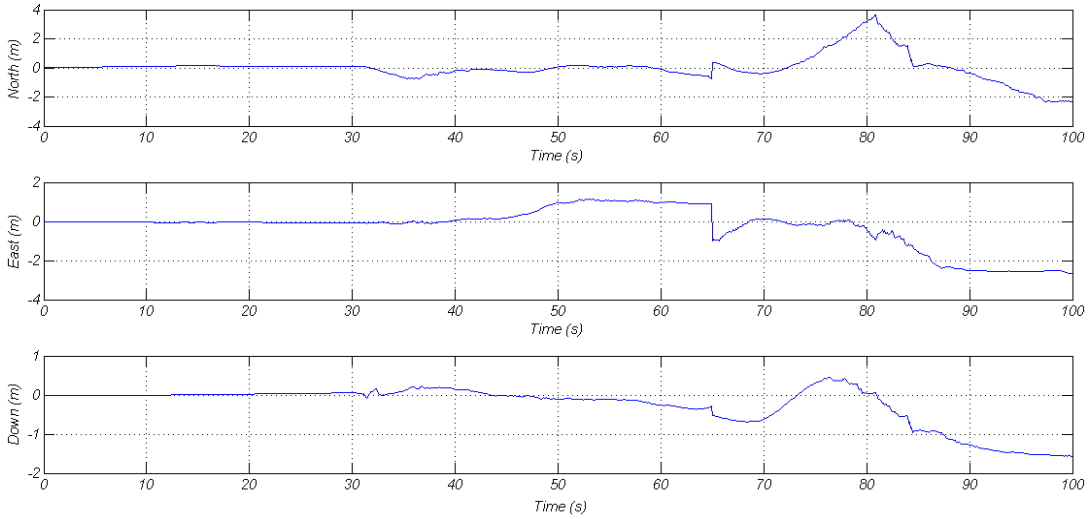
$$v_{mag} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \qquad (۵۲)$$

در شکل ۱۱ هم زوایای اویلر واقعی و تخمین زده شده مقایسه شده‌اند و میزان خطای ناچیز مشاهده شده اثباتی بر قدرت بالای الگوریتم می‌باشد.

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.6.6]

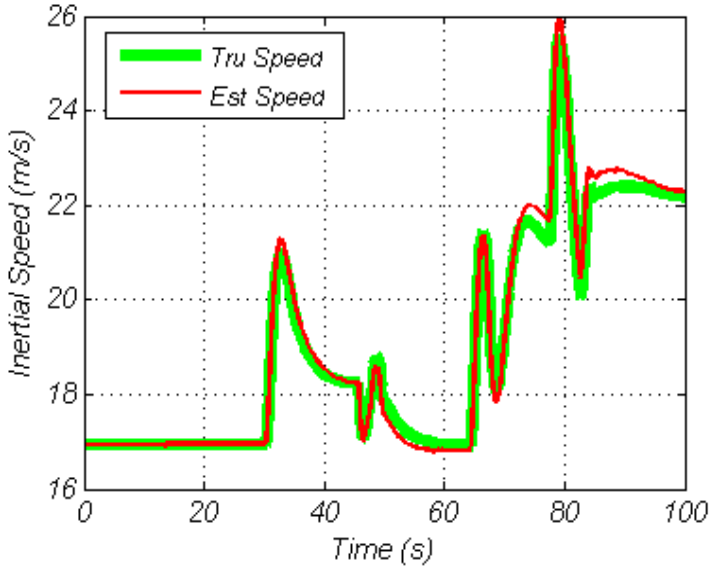


شکل ۷: مقایسه مکان واقعی پهپاد با مکان تخمین زده شده توسط الگوریتم برای حرکت در راستاهای شرق، شمال و راستای پایین.

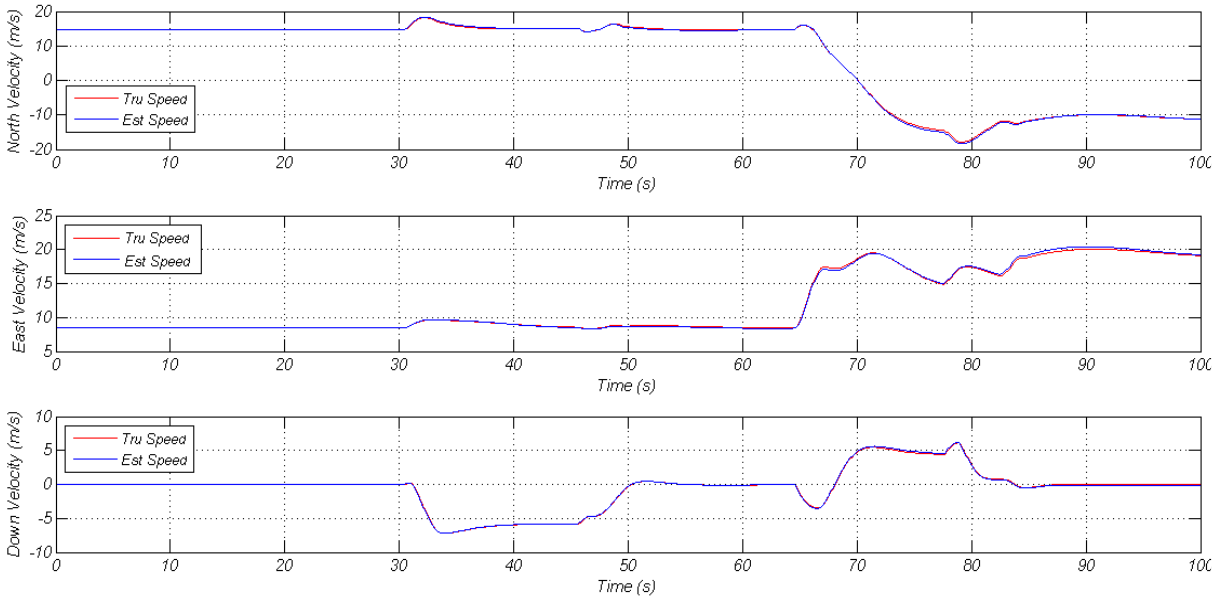


شکل ۸: منحنی های خطاهای بین موقعیت واقعی پهپاد و موقعیت تخمین زده شده توسط الگوریتم.

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.6.6]

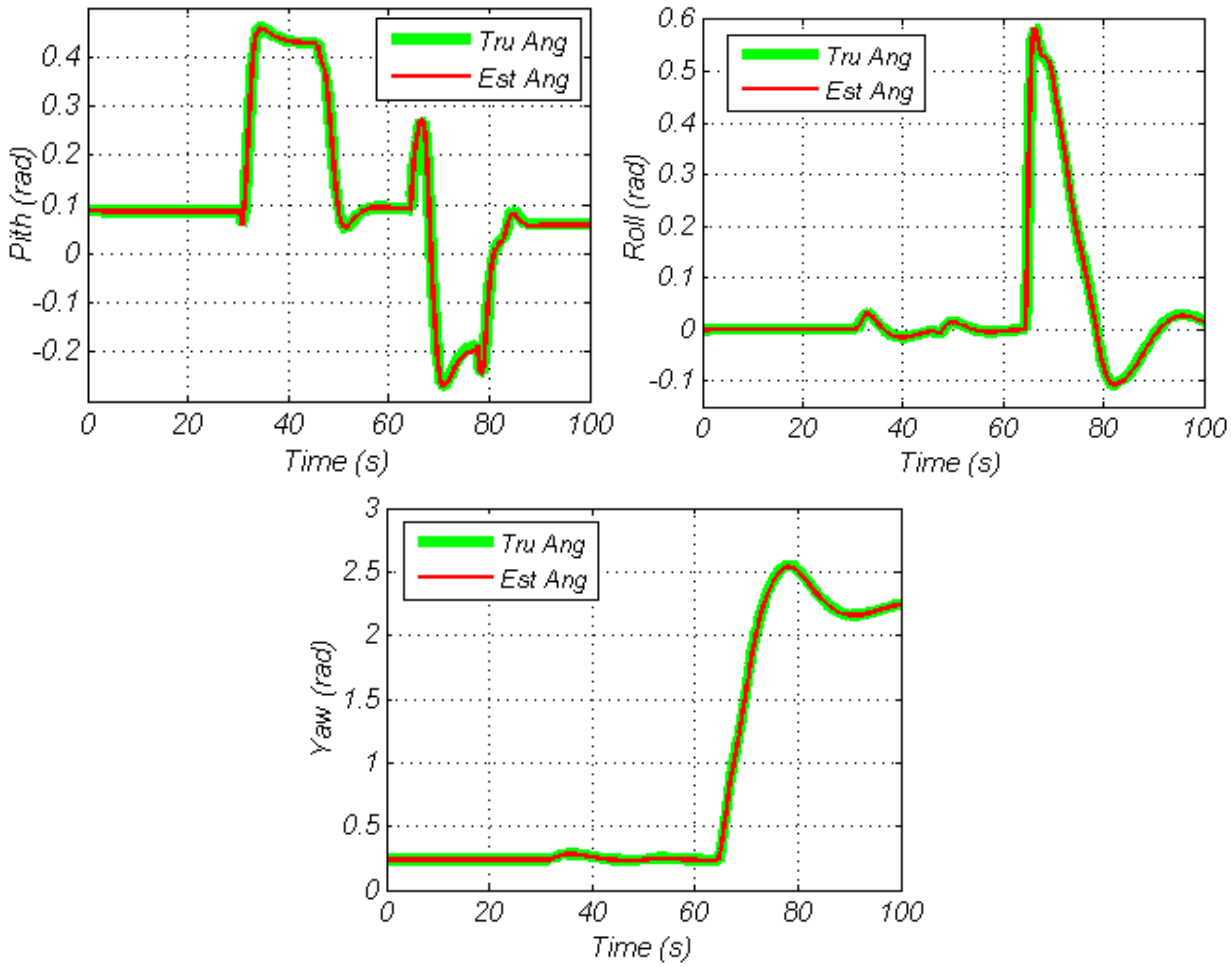


شکل ۹: مقایسه اندازه سرعت واقعی پهپاد با مقدار تخمین زده شده توسط الگوریتم.



شکل ۱۰: مقایسه سرعت‌های واقعی پهپاد با مقادیر تخمین زده شده توسط الگوریتم؛ در راستاهای شرق، شمال و راستای پایین.

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.6.6]



شکل ۱۱: مقایسه زوایای واقعی پهپاد با مقادیر تخمین زده شده توسط الگوریتم؛ زوایای Pitch، Roll و Yaw.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله کلیه روش‌ها و معادلات پایه برای پیاده سازی SLAM اینرسی مبتنی بر سنسورهای اینرسی بر روی یک پهپاد، بسط و توسعه داده شد. معادلات بنیادی که سنسورهای اینرسی و ناوبری اینرسی را مدل‌سازی می‌کنند، تجزیه و تحلیل شدند؛ دو کاربرد متفاوت برای زمانی‌که مکان‌یابی و نقشه‌سازی در یک چهارچوب جهانی از دستگاه مختصات مرجع یا در یک چهارچوب محلی اختیاری از دستگاه مختصات مرجع صورت می‌گیرد، تحلیل شدند.الگوریتم SLAM اینرسی ارایه شده برای شرایطی که مشاهدات بر پایه‌ی سنسورهای range/bearingصورت می‌گیرند، بررسی شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها گواه بر کارآیی مطلوب سیستم طراحی شده دارند. الگوریتم طراحی شده هم در زمینه‌ی تعیین موقعیت پهپاد و هم در زمینه‌ی نقشه‌سازی از نشانه‌های زمینی با خطای کم، کارآیی قابل قبولی را ارایه کرده است.

در این پژوهش، الگوریتم ارایه شده در شرایط سه بعدی بر روی یک پهپاد با تمام درجات آزادی (شش درجه آزادی) پیاده شده و کلیه روابط مورد نیاز را استخراج و تحلیل شد. نکته قابل توجه در سیستم پیشنهادی، عدم محدودیت در ارتفاع نشانه‌های زمینی است. در کلیه کارهای قبلی که در زمینه SLAM برای پهپاد صورت گرفته، همواره از این فرض استفاده شده که کلیه نشانه‌ها در ارتفاع پایین‌تری از پهپاد قرار دارند و به نوعی درجه آزادی مربوط به تغییرات ارتفاع پرواز پهپاد را از بین می‌برند (برای سادگی کار) و همواره پهپاد را در یک ارتفاع خاص در نظر می‌گیرند. اما در سیستم ارائه شده در این مقاله نشانه‌ها از لحاظ میزان ارتفاع هیچ محدودیتی ندارند. تعیین

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.6.6]

موقعیت اولیه پهپاد در دقت تخمین‌های الگوریتم تأثیر به‌سزایی دارد که ما این مسأله را با اضافه کردن حلقه‌ای به الگوریتم جهت بررسی GPSبرای به‌دست آوردن شرایط اولیه، در چند ثانیه ابتدایی الگوریتم مرتفع کردیم.

مراجع

[1] Simunek, M., Fontan, F. P., Pechac, P., Otero, F. J. D.: 'Space Diversity Gain in Urban Area Low Elevation Links for Surveillance Applications', IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61, (12), pp. 6255-6260.

[2] Marier, J. S., Rabbath, C. A., Léchevin, N.: 'Health-Aware Coverage Control with Application to a Team of Small UAVs', IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21, (5), pp. 1719-1730.

[3] Nigam, N., Bieniawski, S., Kroo, I., Vian, J.: 'Control of Multiple UAVs for Persistent Surveillance: Algorithm and Flight Test Results', IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2012, 20, (5), pp. 1236-1251.

[4] Smith, R., Self, M., Cheeseman, P.: 'Autonomous Robot Vehicles', in Ingemar, J. C., Gordon, T. W. (Ed.): 'Estimating Uncertain Spatial Relationships in Robotics'(Springer New York, 1990), pp. 167-193.

[5] Bosse, M., Newman, P., Leonard, J., Soika, M., Feiten, W., Teller, S.:'An Atlas framework for scalable mapping'. In IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Amherst, USA, September 2003, pp. 1899-1906.

[6] Dissanayake, M.W.M.G., Newman, P., Clark, S., Durrant-Whyte, H.F., Csorba, M.: 'A Solution to the Simultaneous Localization and Map Building (SLAM) Problem', IEEE Trans. on Robotics and Automation, 2001, 17, (3), pp. 229-241.

[7] Li, X., Aouf, N.: 'Experimental Research on Cooperative vSLAM for UAVs'. Proc. Int. Conf. on Computational Intelligence Communication Systems and Networks (CICSyN),Madrid, Spain, June 2013, pp. 385-390.

[8] Wang, T., Liang, J., Chen, Y., Zhang, Y., Wang, C.: 'Monocular Visual SLAM for Small UAVs in GPS-denied Environments', IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics, Guangzhou, China, December 2012, pp. 896-901.

[9] Bryson ,M., Sukkarieh, S.:' Building a Robust Implementation of Bearing-Only Inertial SLAM for a UAV', Journal of Field Robotics, Special issue on SLAM in the field, 2007, 24, (2), pp. 113-143.

[10] Simon, D.: 'Optimal State Estimation'(John Wiley & Sons,2006).

[11] Thrun, S., Lui, Y.: 'Results for outdoor-SLAM using sparse extended information filters', IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Taipei, Taiwan, September 2003,pp. 1227-1233.

[12] Williams, S.B., Dissanayake, G., Durrant-Whyte, H.:'Towards Terrain-Aid navigation for Underwater Robotics' Advanced Robotics, 2001, 15, (5), pp. 533-550.

[13] Olson, E., Leonard, J.J., Teller, S.: 'Robust Range-only Beacon Localization', IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2006, 31, (4), pp. 949-958.

[14] Kim, J.H., Sukkarieh, S.: 'Autonomous Airborne Navigation in Unknown Terrain Environment', IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 2004, 40, (3), pp. 1031-1045.

[15] Jianli, S., Shuang, P., Yuqiang, W., Xibin, W.: 'Unsecend Fast-Slam for UAV', Int. Conf. on Computer Science and Network Technology, Harbin, China, December 2011, pp. 2529-

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]

[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.6.6]

2532.

[16] Min, J., Yekeun, J., Kweon, I. S.: 'Robust visual lock-on and simultaneous localization for an unmanned aerial vehicle',In IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), Taipei, Taiwan, October 2010,pp. 93-100.

[17] Huang, L., He, B., Zhang, T.: 'An Autonomous Navigation Algorithm for Underwater Vehicles Based on Inertial Measurement Units and Sonar' ,Proc. Int. conf. on Informatics in Control Automation and Robotics, Wuhan, China, March 2010, pp. 311-314.

[18] Yun, S., Sung, S., Lee, Y. J.: 'Design and Performance test of Relative Navigation of a low cost inertial SLAM',ICROS-SICE International Joint Conference, Fukuoka, Japan, August 2009, pp. 4217-4221.

[19] Yun, S., Lee, B. J., Lee, Y. J., Sung, S.: 'Real-Time Performance Test of an Vision-based Inertial SLAM', Int. Conf. on Control Automation and Systems, Gyeonggi-do, South Korea , October 2010, pp. 2423-2426.

[20] Achtelik, M. W., Lynen, S., Weiss, S., Kneip, L., Chli, M., Siegwart, R.: 'Visual-Inertial SLAM for a Small Helicopter in Large Outdoor Environments', IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Vilamoura, Portugal, October 2012, pp. 2651-2652.

[21] Estrada, C., Neira, J., Tardos, J.D.: 'Hierarchical SLAM: Real-Time Accur Mapping of Large Environments', IEEE Trans. on Robotics, 2005, 21, (4), pp. 588-596.

[22] Guivant, J., Neito, J., Masson, F., Nebot, E.: 'Navigation and Mapping in Large Unstructured Environments', International Journal of Robotics Research, 2004, 23, (4-5), pp. 449-472.

[23] Eustice, R., Singh, H., Leonard, J., Walter, M., ad Ballard, R.: 'Visually Navigating the RMS Titanic with SLAM Information Filters', In Proc. of Robotics Science and Systems, (MIT Press, 2005), pp. 57-64.

[24] Fang, G., Dissanayake, G., Kwok, N. M., Huang, S.: 'Near Minimum Time Path Planning for Bearing-Only Localization and Mapping', In IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Edmonton, Canada, August 2005, pp. 850-855.

[25] Langelaan, J., Rock, S.: 'Navigation of Small UAVs Operating in Forests', *In AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, Rhode Island, USA, August 2004, pp. 1-11.

[26] Lemaire, T., Lacroix, S., Sola,J.: 'A Practical 3D Bearing-only SLAM Algorithm', In IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Edmonton, Canada, August 2005, pp. 2449-2454.

[27] Bryson, M. and Sukkarieh, S.: 'Building a Robust Implementation of Bearing-Only Inertial SLAM for a UAV', Journal of Field Robotics,2007, 24, (2), pp. 113-143.

[28] Li, X., Aouf, N., Nemra, A.: 'Estimation Analysis in VSLAM for UAV Application', IEEE Int. Conf. on Multi sensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI),Hamburg, Germany, September 2012, pp. 365-370.

[29] Li, X., Aouf,N.,Nemra,A.:'3D Mapping based VSLAM for UAVs', In Mediterranean Conf. on Control & Automation (MED),Barcelona, Spain, July 2012, pp. 348-352.

[30] Chowdhary, G., Johnson, E. N., Magree, D., Wu, A., Shein, A.: 'GPS-denied Indoor and Outdoor Monocular Vision Aided Navigation and Control of Unmanned Aircraft', Journal of Field Robotics, 2013, 30, (3), pp. 415-438.

[31] Bryson, M.,Sukkarieh, S.: 'Observability analysis and active control for airborne SLAM',IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2008, 44, (1), pp. 261-280.

[32] Samadzadegan, F., Abdi, G.: 'Autonomous navigation of Unmanned Aerial Vehicles based

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]
[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.6.6]

on multi-sensor data fusion', Proc. Iranian Conf. on Electrical Engineering (ICEE), Tehran, Iran, May 2012, pp. 868-873.

[33] Chun, S., Won, D.H., Heo, M. B., Lee Y.J.: 'Performance analysis of an INS/SLAM integrated system with respect to the geometrical arrangement of multiple vision sensors', International Journal of Control, Automation and Systems,2012, 10, (2), pp. 288-297.

[34] Won, D.H., Sung, S., Lee, Y.J.: 'UKF based vision aided navigation system with low grade IMU', In Int. Conf. on Control Automation and Systems (ICCAS), Gyeonggi-do, South Korea, October 2010, pp. 2435-2438.

[35] Wang, C., Wang, T., Liang, J., Chen, Y., Zhang, Y., Wang, C.: 'Monocular visual SLAM for small UAVs in GPS-denied environments', In IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics (ROBIO),Guangzhou, China, December 2012,pp. 896-901.

[36] Mohibullah, W., Julier, S.J.: 'Bearings-only localisation of targets from low-speed UAVs', Proc. Conf. on Information Fusion (FUSION),Edinburgh, UK, July 2010, pp. 1-8.

[37] Wang, C.L., Wang, T. M., Liang, J. H., Zhang, Y. C., Zhou, Y.: 'Bearing-only visual SLAM for small unmanned aerial vehicles in GPS-denied environments', International Journal of Automation and Computing, 2013, 10, (5), pp. 387-396.

[38] Montiel, J. M. M.,Montano, L.: 'Efficient validation of matching hypothesesusing mahalanobis distance', Eng. Applicat. Artif. Intell,1998, 11, (3), pp. 439–448.

[Downloaded from journals.sut.ac.ir on 2025-10-18]

[DOR: 20.1001.1.23223146.1394.3.1.6.6]