



دانشگاه صنعتی سهند

نشریه سامانه های 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 پیاده سازی آن در محیط شبیه سازی براساس اطلاعات پروازی واقعی

عسکر عزیزی^۱، حمید نوری سولا^۲، امین صادقی امامقلی^۳ و امیر ریخته گر غیاثی^۴

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

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

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

^۴نویسنده 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

موقعیت یابی و نقشه سازی همزمان (SLAM) مشکلی اساسی در زمینه ی ناوبری ربات های متحرک است و حل آن یکی از جذاب ترین موضوعات کاری محققین بوده و امروزه یکی از بخش های مهم سیستم های ناوبری را تشکیل می دهد. در این مقاله یک الگوریتم SLAM اینرسی کارآمد برای یک پهپاد یا یک وسیله هوایرد ارائه شده است. ساختار SLAM اینرسی مذکور برای به کارگیری دو نوع سنسور Range/Bearing و Bearing-only مناسب بوده و نیازی به سیستم های موقعیت یاب خارجی همچون GPS و یا هر نوع اطلاعات از قبل تهیه شده ندارد. این مطالعه سیستمی جامع ارائه می کند 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 می کند؛ اول اینکه کلیه درجات آزادی را برای پهپاد در نظر می گیرد یعنی تغییرات موقعیت پهپاد تنها در دو جهت X و Y محدود نشده و بلکه تغییرات ارتفاع پهپاد نیز در نظر گرفته می شود، دوم اینکه محدودیتی برای موقعیت نشانه ها وجود نداشته، یعنی سیستم بر پایه سنسورهای اینرسی قادر است تمام نشانه ها را در ارتفاعات متفاوت مشاهده کند. نهایتاً با استفاده از اطلاعات پروازی یک هواپیمای واقعی، صحت عملکرد الگوریتم با ارایه نتایج شبیه سازی ها به اثبات رسیده است.

واژه های کلیدی

سیستم ناوبری اینرسی، مکان یابی و نقشه سازی همزمان، هواپیمای بدون سرنشین، فیلتر کالمن توسعه یافته.



Sahand University
of Technology

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 Azizi¹, Hamid Nourisola², Amin Sadeghi-Emamgholi³ and Amir Rikhtehgar Ghiasi⁴

¹M.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.

۱- مقدمه

با توجه به کاربردهای گوناگون و مفید هواپیماهای بدون سرنشین (پهپادها)^۱، 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^۲ [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^۳ واقع در آن، که باید مورد شناسایی قرار گیرند، به کار گرفته می‌شود. اما پهپاد بایستی این کارها را بدون استفاده از تجهیزات مکان‌یابی مانند سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS)^۴ 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 و نشانه‌های 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)^۵ است [۱۰]. فیلتر EKF یک راه حل محبوب برای SLAM است که کاربردهای روزافزون آن را می‌توان در ربات‌های عمل‌کننده در محیط‌های سرپوشیده^۶ و داخلی [۵]، ربات‌های زمینی در محیط‌های بیرونی و فضاهای باز [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 منحصر به فرد ارائه می‌دهد و شامل کاربردهای زیادی است، از جمله: اکتشافات سیاره‌ای و یا در جاهایی که سیستم GPS آسیب دیده باشد یا در مکان‌هایی که سیگنال‌های GPS نمی‌توانند دریافت شوند. اما مهم‌تر از همه، الگوریتم SLAM می‌تواند برای مقاوم کردن سیستم ناوبری استفاده شود [۱۶]. برای این که بتوان این الگوریتم را در ناوبری استفاده کرد بایستی بتواند نشانه‌ها را بازنگری کند که این کار به خاطر همبستگی‌های^۸ آماری که پهپاد را به نشانه‌ها مرتبط می‌کند دارای دو تأثیر مهم است: الف) بهبود تخمین مکان پهپاد، بنا بر این پهپاد یا باید محیط ناشناخته‌ی بیشتری را برای پیدا کردن نشانه‌های جدید کاوش کند و یا بایستی نشانه‌های شناسایی شده را بازنگری^۹ کند تا کیفیت مکان‌یابی را بهبود بخشد [۹]. در کاربردهای عملی به ویژه در مورد یک پهپاد، معمولاً از یک سیستم ناوبری اینرسی (INS)^{۱۱} استفاده می‌شود اما در این حالت، با توجه به ماهیت فرضی^{۱۱} 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، تخمین زده می‌شوند. در برخی موارد نیز از الگوریتم SLAM برای تکمیل سایر سیستم‌های 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 به طوری که چندین پیاده‌سازی برای SLAM در وسیله‌های زمینی [۲۲ و ۲۳]، زیرآبی [۲۴ و ۲۵] و بر روی یک وسیله‌ی هوا برد 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

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 x و y 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 به‌طوری‌که 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 ارائه شده در این مقاله پرداخته است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در بخش ششم گنجانده شده‌اند و در نهایت، بخش هفتم به ارائه 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^۱، ب- SLAM جهانی^۲. در SLAM جهانی، موقعیت پهپاد و نشانه‌های زمینی نسبت به مرکز کروی 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 اوپلر $(\Psi^n = [\phi \ \theta \ \psi]^T)$ ، بایاس خروجی سنسورهای واحد اندازه‌گیری اینرسی (IMU) یعنی δf^b و δw_{ib}^b ، و N تا موقعیت سه بعدی نشانه‌ها در محیط (m_i^e) ، می‌شود [۳۱-۳۳]:

$$\hat{x}_{global}(k) = [p^e, v^e, \Psi^n, \delta f^b, \delta w_{ib}^b, m_1^e, m_2^e, \dots, m_N^e] \quad (1)$$

به‌طوری‌که $i=1,2,\dots,N$ ، بالانویس e بیانگر بردارهای دستگاه مختصات ECEF^۴ است، بالانویس b بردارهای دستگاه مختصات بدنه را نشان می‌دهد و بالانویس n به بردارهای دستگاه مختصات ناوبری محلی^۵ 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.

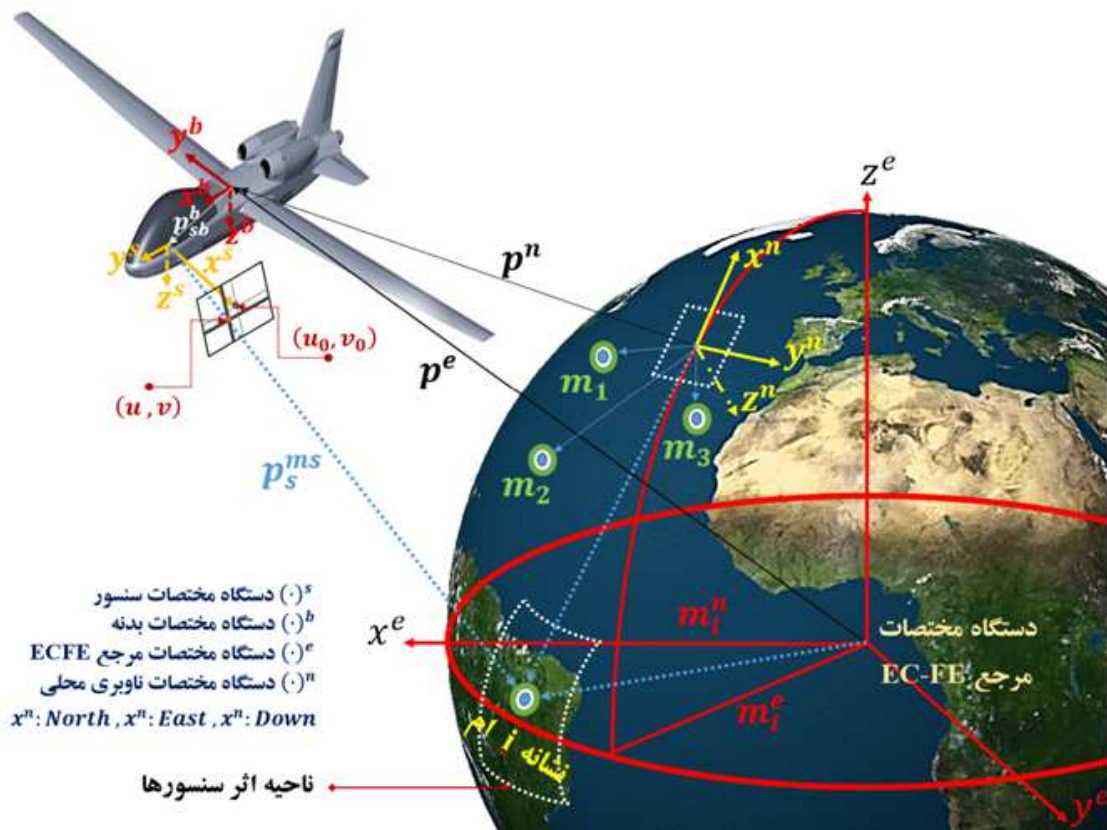
1- Local SLAM

2- Global SLAM

3- IMU: Inertial Measurement Unit

4- ECEF: Earth-Centered, Earth-Fixed

۵- Local-Level Navigation Frame



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

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

$$\dot{\hat{x}}_{global}(t) = F_{global}[\hat{x}_{global}(t), u(t)] + G_{global}[N(t)] \quad (2)$$

بطوری که تابع $F_{global}[\cdot, \cdot]$ تابع مدل فرآیند پیوسته در زمان است، تابع $G_{global}[\cdot]$ 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]:

$$\dot{p}^e = v^e \quad (3)$$

$$\dot{v}^e = C_b^e \hat{f}^b - C_b^e \delta f^b - C_b^e w_{accel} - 2(w_{ie}^e \times v^e) + g_l^e \quad (4)$$

$$\dot{\Psi}^n = E_b^n (\hat{w}_{ib}^b - \delta w_{ib}^b - w_{gyro} - C_n^b w_{ie}^n) \quad (5)$$

به طوری که در آن w_{ie}^e و w_{ie}^n بردارهای سرعت زاویه‌ای زمین هستند که به ترتیب 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

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

$$C_b^e = C_n^e C_b^n \quad (۶)$$

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

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

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

$$f^b = \hat{f}^b - \delta f^b - w_{accel} \quad (۸)$$

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

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

$$\delta f^b = 0 \quad (۱۰)$$

$$\delta \dot{w}_{ib}^b = 0 \quad (۱۱)$$

سرانجام موقعیت‌های نشانه‌های نقشه در دستگاه مختصات ECEF تخمین زده می‌شوند و همچنین به عنوان حالتی از عوارض زمینی ساکن و بی حرکت، ثابت فرض می‌شوند و مدل فرآیند i^{th} به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\dot{m}_i^e = 0 \quad (۱۲)$$

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

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

به طوری که تابع $F_{global}[\dots, k]$ تابع انتقال حالت غیرخطی و $G_{global}[\dots, k]$ تابع انتقال مدل ورودی در زمان k است، بنابراین مدل گسسته‌ی فرآیند به صورت زیر به دست می‌آید [۳۱-۳۳]:

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

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

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

$$\delta f^b(k) = \delta f^b(k-1) \quad (۱۷)$$

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

$$m_i^e(k) = m_i^e(k-1) \quad (۱۹)$$

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

در این جا 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^۱، اثر کوریولیس^۲ 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:

$$\dot{p}^n = v^n \quad (20)$$

$$\dot{v}^n = C_b^n \hat{f}^b - C_b^n \delta f^b - C_b^n w_{accel} + g^n \quad (21)$$

$$\dot{\Psi}^n = E_b^n (\hat{w}_{ib}^b - \delta w_{ib}^b - w_{gyro}) \quad (22)$$

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:

$$\dot{m}_i^n = 0 \quad (23)$$

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

$$p^n(k) = p^n(k-1) + v^n \Delta t \quad (24)$$

$$v^n(k) = v^n(k-1) + [C_b^n \hat{f}^b - C_b^n \delta f^b - C_b^n w_{accel} + g^n] \Delta t \quad (25)$$

$$\Psi^n(k) = \Psi^n(k-1) + [E_b^n (\hat{w}_{ib}^b - \delta w_{ib}^b - w_{gyro})] \Delta t \quad (26)$$

$$\delta f^b(k) = \delta f^b(k-1) \quad (27)$$

$$\delta w_{ib}^b(k) = \delta w_{ib}^b(k-1) \quad (28)$$

$$m_i^n(k) = m_i^n(k-1) \quad (29)$$

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 تخمین زده 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.

$$z_i(k) = H_{i,global} (p^e(k), \Psi^n(k), m_i^e(k), k) + v(k) \quad (30)$$

$$z_i(k) = H_{i,local} (p^n(k), \Psi^n(k), m_i^n(k), k) + v(k) \quad (31)$$

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

1- Centripetal
2- Coriolis effect

غیرهمبسته با میانگین صفر و کواریانس R است. مشاهدات زمینی می‌توانند از انواع سنسورهای مختلف مانند رادار، یک دوربین بصری یا فاصله‌یاب لیزری به دست 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 به عنوان 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 به صورت زیر خواهد بود [۳۴-۳۶]:

$$z_i(k) = \begin{bmatrix} \rho_i \\ \varphi_i \\ \vartheta_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{(x_i^s)^2 + (y_i^s)^2 + (z_i^s)^2} \\ \tan^{-1}\left(\frac{y_i^s}{x_i^s}\right) \\ \tan^{-1}\left(\frac{z_i^s}{\sqrt{(x_i^s)^2 + (y_i^s)^2}}\right) \end{bmatrix} \quad (32)$$

به طوری که ρ_i ، φ_i و ϑ_i زاویه‌های اوپلر 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 نام 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 به وسیله‌ی زاویه‌های $\text{azimuth}(\varphi_i)$ و $\text{elevation}(\vartheta_i)$ نمایش داده شود:

$$z_{i,ang}(k) = \begin{bmatrix} \varphi_i \\ \vartheta_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tan^{-1}\left(\frac{y_i^s}{x_i^s}\right) \\ \tan^{-1}\left(\frac{z_i^s}{\sqrt{(x_i^s)^2 + (y_i^s)^2}}\right) \end{bmatrix} \quad (33)$$

به طوری که R_{ang} کواریانس نویز زاویه‌ای است. برای دوربین بصری، مشاهده به صورت مطلوب‌تری به شکل پیکسل‌هایی در تصویر دوربین نمایش داده می‌شود:

$$z_{i,pix}(k) = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u \left(\frac{y_i^s}{x_i^s}\right) + u_0 \\ f_v \left(\frac{z_i^s}{x_i^s}\right) + v_0 \end{bmatrix} \quad (34)$$

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

$$\begin{bmatrix} \varphi \\ \vartheta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tan^{-1}\left(\frac{u-u_0}{f_u}\right) \\ \tan^{-1}\left(\frac{(v-v_0)\cos\varphi}{f_v}\right) \end{bmatrix} \quad (35)$$

موقعیت نسبی نشانه نام نسبت به سنسور یعنی $p_{ms,i}^s$ که در دستگاه مختصات سنسور اندازه‌گیری می‌شود، به صورت رابطه‌ی زیر داده می‌شود:

$$p_{ms,i}^s = C_b^s C_n^b [m_i^n - p^n - C_b^n p_{sb}^b] = C_b^s C_e^b [m_i^e - p^e - C_b^e p_{sb}^b] \quad (36)$$

که در آن C_b^s ماتریس دوران از دستگاه مختصات بدنه به دستگاه مختصات سنسور است، p_{sb}^b آفست (انحراف) سنسور از مرکز جرم وسیله است که در دستگاه مختصات بدنه اندازه‌گیری می‌شود و $C_e^b = (C_b^e)^T$ است.

۴- سنسورهای range bearing only و 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 به صورت 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، به طوری که 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. به‌روزرسانی حالت که در آن به‌ازای هر مشاهده یک گام به‌روزرسانی در EKF برای اصلاح مقدار حالت تخمین زده شده و به‌روزرسانی ماتریس کوواریانس حالت، انجام می‌گیرد.

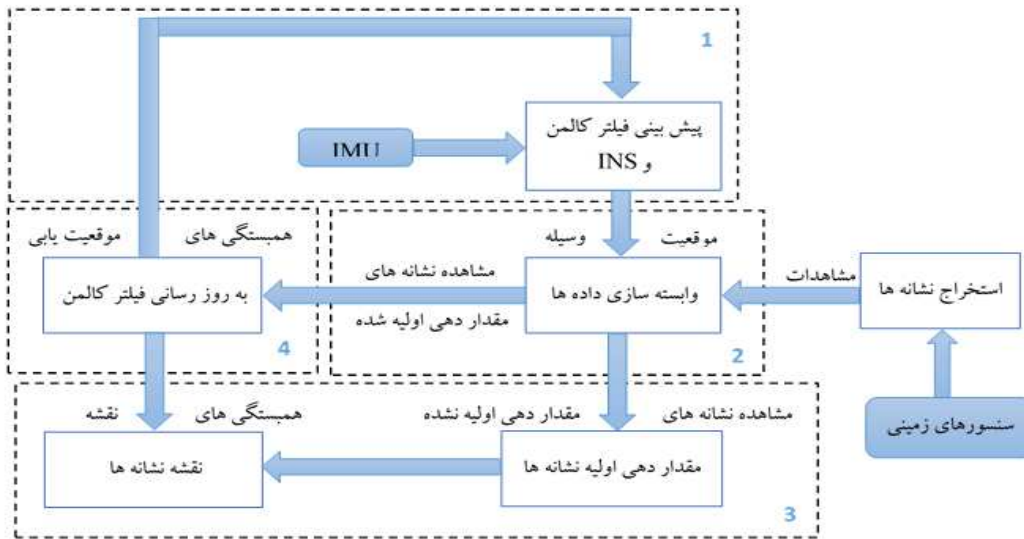
شکل ۲ مرور اجمالی بر الگوریتم SLAM اینرسی range/ bearing ارائه داده است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود الگوریتم بازگشتی است، پیش‌بینی حالت EKF یعنی بلوک ۱ هنگامی که داده‌ی سنسور اینرسی آماده و در دسترس باشد، اجرا می‌شود. بخش وابسته‌سازی داده یعنی بلوک ۲، بخش مقداردهی اولیه‌ی نشانه یا بلوک ۳ و بخش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

۴-۱- 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:

$$p^-(k+1) = \nabla F_{global} p(k) \nabla F_{global}^T + \nabla G_{global} Q(k) \nabla G_{global}^T \quad (37)$$

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



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) به صورت رو به جلو پیش‌بینی می‌شود.

$$p^-(k+1) = \nabla F_{local} p(k) \nabla F_{local}^T + \nabla G_{local} Q(k) \nabla G_{local}^T \quad (38)$$

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

۴-۲- مقداردهی اولیه‌ی نشانه

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

$$J_{1,global}[\hat{x}_{global}(k), J_2(z_i(k))] \rightarrow m_i^e = p^e + C_n^e C_b^n p_{sb}^b + C_n^e C_b^n C_s^b p_{ms}^s \quad (39)$$

$$J_{1,local}[\hat{x}(k)_{local}, J_2(z_i(k))] \rightarrow m_i^n = p^n + C_b^n p_{sb}^b + C_b^n C_s^b p_{ms}^s \quad (40)$$

به طوری که برای هر دوی SALM جهانی و SLAM محلی، $J_2(z_i(k))$ به صورت زیر است:

$$J_2(z_i(k)) \rightarrow p_{ms,i}^s = \begin{bmatrix} \rho_i \cos(\phi_i) \cos(\vartheta_i) \\ \rho_i \sin(\phi_i) \cos(\vartheta_i) \\ \rho_i \sin(\vartheta_i) \end{bmatrix} \quad (41)$$

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

$$\hat{x}_{global,aug}(k) = \begin{bmatrix} \hat{x}_{global}(k) \\ m_i^e(k) \end{bmatrix} \quad (42)$$

$$p_{global,aug}(k) = \begin{bmatrix} I & 0 \\ \nabla J_x & \nabla J_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{global}(k) & 0 \\ 0 & R_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & 0 \\ \nabla J_x & \nabla J_z \end{bmatrix}^T \quad (43)$$

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

$$\hat{x}_{local, aug}(k) = \begin{bmatrix} \hat{x}_{local}(k) \\ m_i^e(k) \end{bmatrix} \quad (44)$$

$$P_{lcal, aug}(k) = \begin{bmatrix} I & 0 \\ \nabla J_x & \nabla J_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{local}(k) & 0 \\ 0 & R_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & 0 \\ \nabla J_x & \nabla J_z \end{bmatrix}^T \quad (45)$$

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

۴-۳- 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:

$$\gamma_i = v_i^T(k) S_i^{-1}(k) v_i(k) \quad (46)$$

به طوری که $v_i(k)$ و $S_i(k)$ نوآوری^۱ و کوواریانس نوآوری برای یک مشاهده از نشانه نام در نقشه در بخش زمانی k هستند. هنگام بررسی کردن وابسته‌سازی یک مشاهده‌ی داده شده با نشانه‌های 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 این صورت 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 این گونه فرض می‌شود که نشانه قبلاً دیده نشده است و بنابراین داده‌ی مشاهده‌ای برای مقداردهی اولیه‌ی نشانه درون نقشه استفاده می‌شود.

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

۴-۴- به‌روز رسانی بردار حالت

پس از این که 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 و سرعت پهپاد، خروجی‌های سنسورهای اینرسی و موقعیت نشانه مذکور و سایر نشانه‌های محیط می‌شود، استفاده می‌گردند. تخمین حالت در مرحله‌ی به‌روز رسانی EKF، به‌روز می‌شود. به طوری که تخمین حالت و ماتریس کوواریانس حالت بعد از به‌روز رسانی برای SLAM جهانی به صورت زیر می‌باشند [۳۰]:

$$\hat{x}_{global}^+(k+1) = \hat{x}_{global}^-(k+1) + N(k+1)v(k+1) \quad (47)$$

$$\hat{p}_{global}^+(k+1) = \hat{p}_{global}^-(k+1) - N(k+1)S_i(k+1)N(k+1)^T \quad (48)$$

$$v_i(k+1) = z_i - H_{i, global}(\hat{x}_{global}^-(k+1)) \quad (49)$$

$$S_i(k+1) = \nabla H_{i,global} \hat{p}_{global}^-(k+1) \nabla H_{i,global}^- + R(k+1) \quad (50)$$

$$N(k+1) = \hat{p}_{global}^-(k+1) \nabla H_{i,global}^T S_i^{-1}(k+1) \quad (51)$$

جایی که $H_{i,global}(\hat{x}_{global}^-(k+1))$ مشاهده‌ی نشانه‌ی پیش‌بینی شده است 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 شبیه‌سازی‌ها

الگوریتم ارایه شده برای هر دو شرایط استفاده از سنسورهای range/bearing و bearing only به کار 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 G و F و به‌خصوص با کمک داده‌های دریافتی از شتاب‌سنج و ژيروسکوپ، 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 آن صورت 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 آن صورت سیستم با در نظر 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 کواریانس و بردار حالت متشکل از موقعیت، سرعت، زوایای اویلر و مقادیر شتاب و چرخش تخمین زده 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 شبیه‌سازی 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.

۶- نتایج شبیه‌سازی‌ها

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

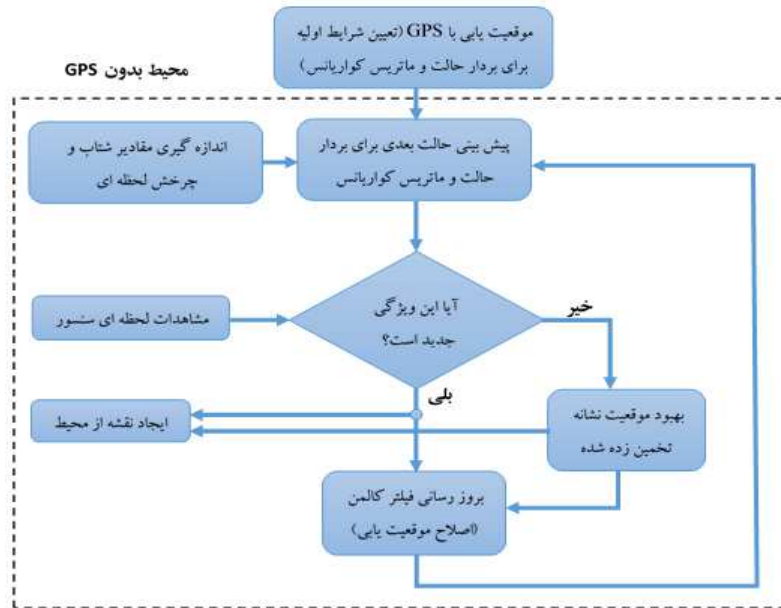
۶-۱- اندازه‌گیری مقادیر شتاب و چرخش و شرایط اولیه

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 ژيروسکوپ‌ها به‌صورت آنی اندازه‌گیری می‌شوند (

$$\left[\begin{matrix} \hat{f}^b(t) \\ \hat{w}_{ib}^b(t) \end{matrix} \right].$$

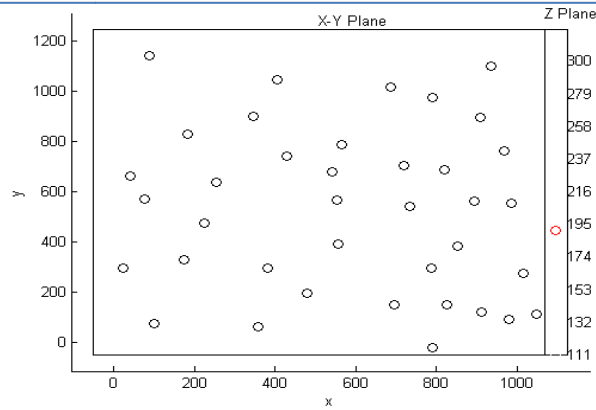
به‌منظور شبیه‌سازی، یک پایگاه داده از این مقادیر برای مسیر پرواز به مدت ۱۰۰ ثانیه تهیه شد و در هر لحظه با

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



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

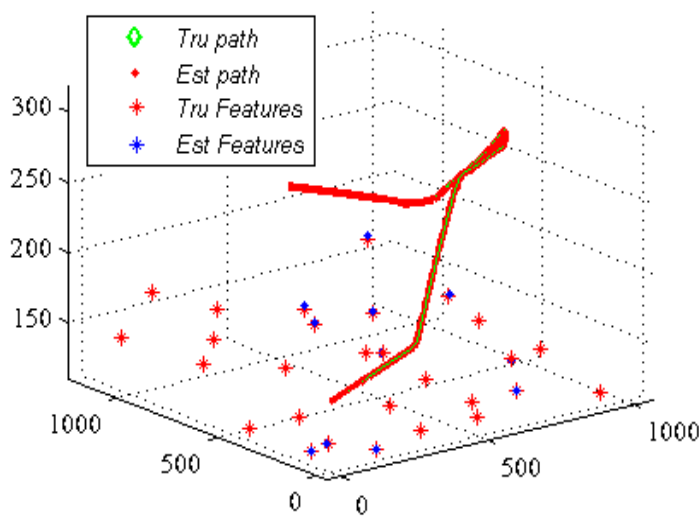
دسترسی پیدا کرد. برای آن که الگوریتم SLAM اینرسی به‌خوبی قادر به تخمین مکان پهپاد باشد، اطلاع از مکان اولیه‌ی پهپاد، تأثیر بسزایی در عملکرد صحیح الگوریتم دارد. به‌همین منظور در ابتدا با شروع شبیه‌سازی برای چند ثانیه فرض بر آن است که سیستم GPS فعال باشد و سیستم به کمک آن مکان‌یابی را انجام دهد و موقعیت 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 کواریانس شروع به کار می‌کند. در واقع علاوه بر شبیه‌سازی الگوریتم SLAM اینرسی پیشنهادی، برای تعیین 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 فرآیند تکرار می‌شود و بعد از تعیین مقادیر اولیه، GPS از چرخه خارج می‌شود. هرچند که می‌توانستیم شرایط اولیه را به شکل دستی وارد کنیم اما برای آن که 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 موقعیت‌ها را می‌توان به دلخواه در راستای محورهای X و Y و نیز با تغییر مکان دایره قرمز رنگ در راستای Z انتخاب کرد.



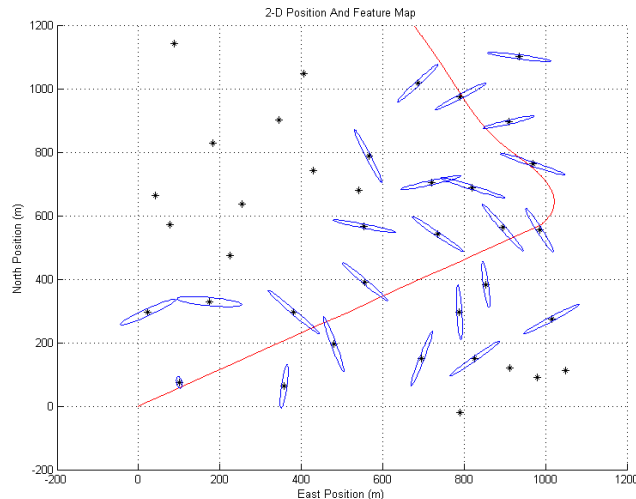
شکل ۴: تعریف موقعیت واقعی نشانه‌ها با ارتفاع‌های متفاوت، به طوری که ابتدا با تغییر موقعیت دایره قرمز رنگ در نوار عمودی سمت راست شکل، ارتفاع موقعیت نشانه را مشخص می‌کنیم و بعد با اضافه کردن دایره سیاه در صفحه سمت چپ شکل موقعیت X و Y نقطه مورد نظر را تعیین می‌کنیم.

۲-۶- 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 به صورت 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 نشانه‌ها 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. به طوری که مشاهده می‌گردد الگوریتم به خوبی 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.



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

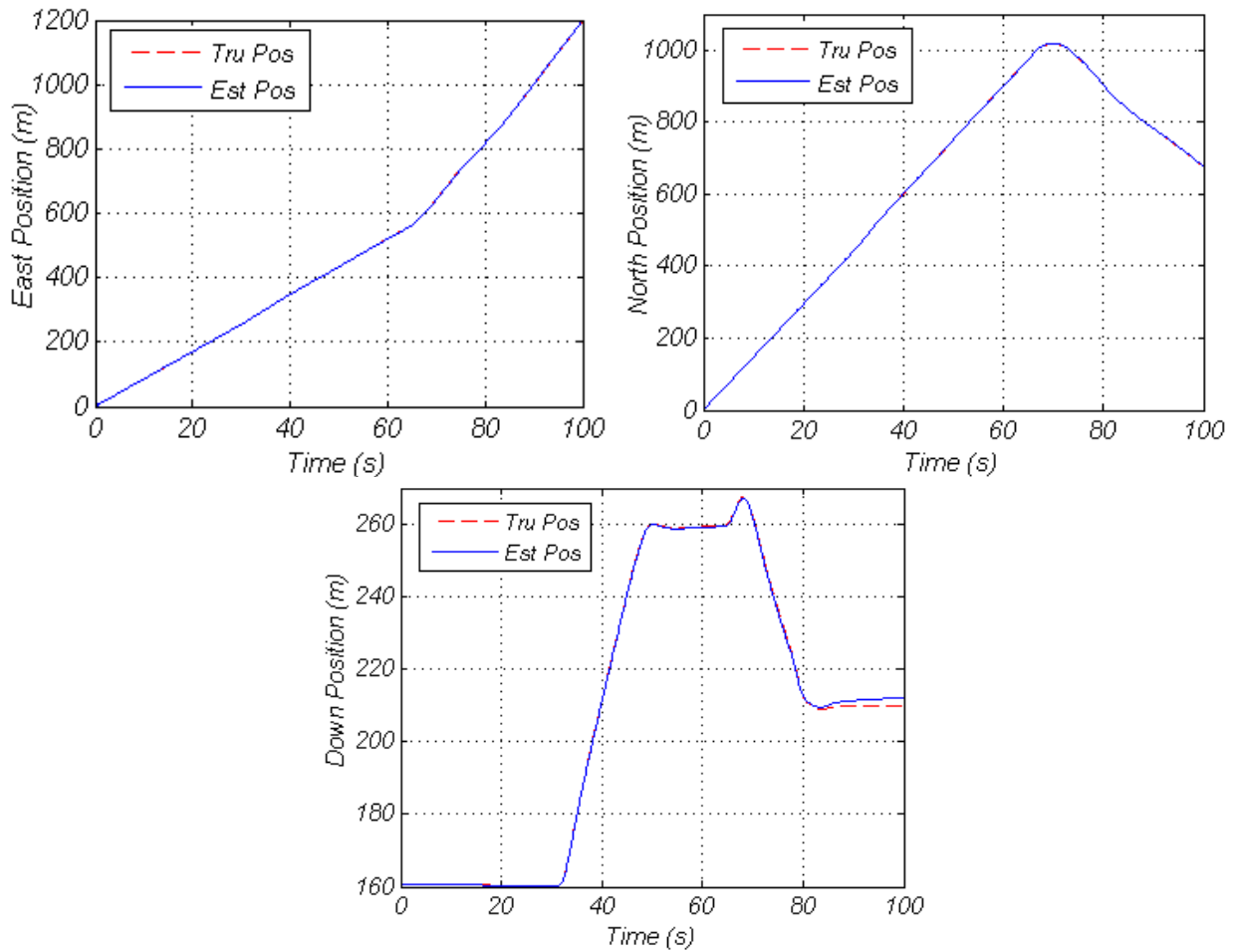
در شکل ۶ محدوده موقعیت نشانه‌های تخمین زده شده و همچنین مسیر حرکت تخمین زده شده توسط الگوریتم SLAM اینرسی نشان داده شده است. در واقع آنچه که سیستم با روش SLAM فراهم می‌آورد، در این نمای دو بعدی نشان داده می‌شود. خط قرمز رنگ مسیر حرکت تخمین زده شده را نشان می‌دهد. نقاط سیاه رنگ همان نشانه‌های حقیقی تعریف 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 این که 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.

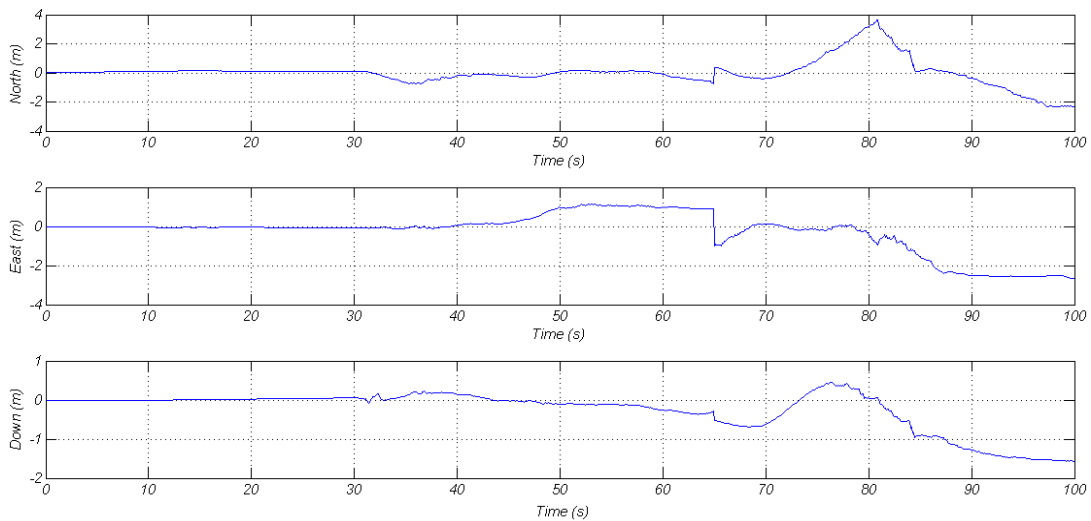
در منحنی‌های شکل ۷ برای بهتر مشخص شدن عملکرد مطلوب سیستم طراحی شده برای تعیین موقعیت پهپاد، مکان تخمینی توسط الگوریتم با مکان واقعی پهپاد مقایسه شده است و میزان خطای آن‌ها در شکل ۸ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که از شکل‌های مذکور مشخص است خطا مقدار ناچیزی است و بیشتر در تغییر جهت‌های مسیر هواپیما (ثانیه 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:

$$v_{mag} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (52)$$

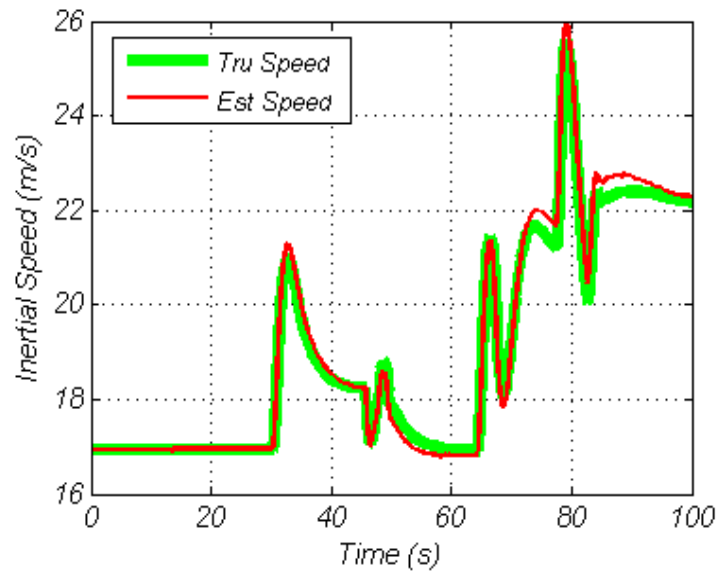
در شکل ۱۱ هم زوایای اولر واقعی و تخمین زده شده مقایسه شده‌اند و میزان خطای ناچیز مشاهده شده اثباتی بر قدرت بالای الگوریتم می‌باشد.



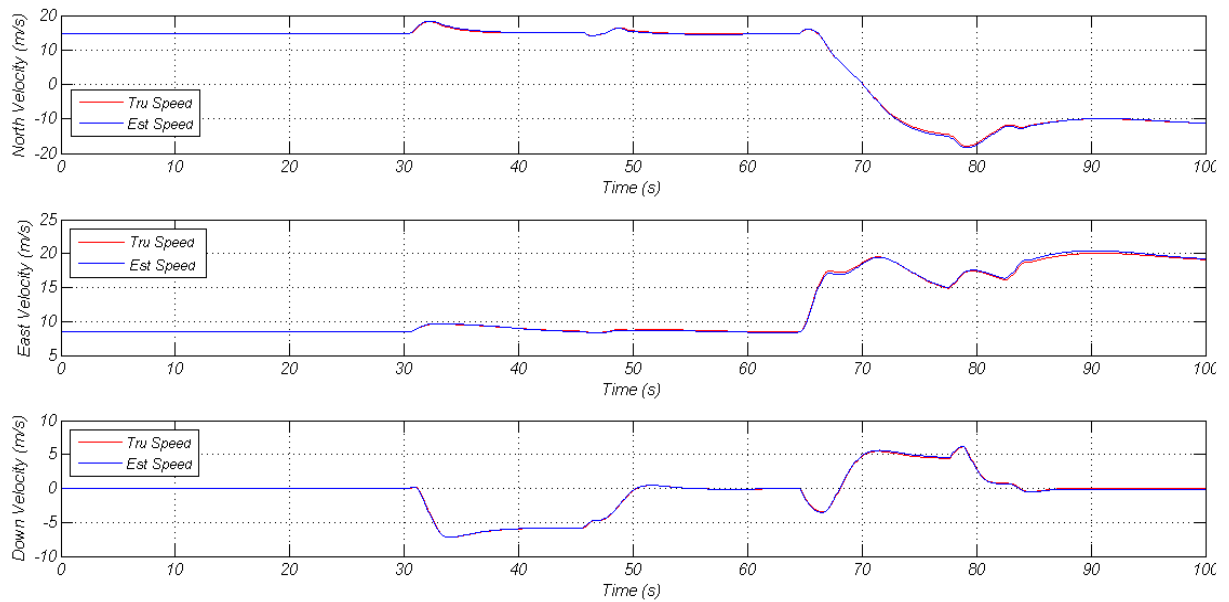
شکل ۷: مقایسه مکان واقعی پهپاد با مکان تخمین زده شده توسط الگوریتم برای حرکت در راستاهای شرق، شمال و راستای پایین.



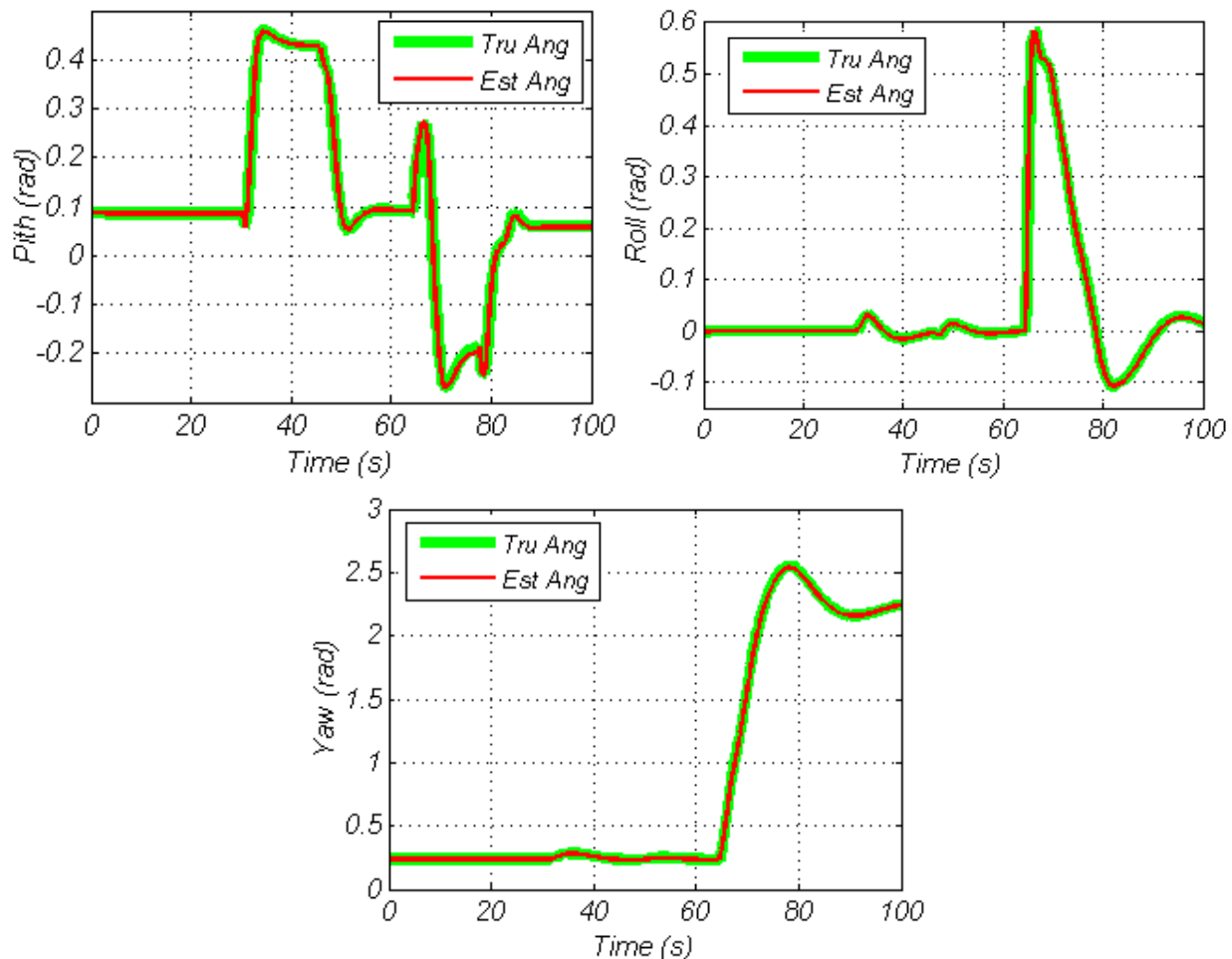
شکل ۸: منحنی های خطاهای بین موقعیت واقعی پهپاد و موقعیت تخمین زده شده توسط الگوریتم.



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.



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

۷- نتیجه گیری

در این مقاله کلیه روش‌ها و معادلات پایه برای پیاده‌سازی 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 زمانی که 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 ارائه شده برای شرایطی که مشاهدات بر پایه‌ی سنسورهای range/bearing صورت می‌گیرند، بررسی شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها گواهی بر کارایی 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، کارایی قابل قبولی را ارائه کرده است.

در این پژوهش، الگوریتم ارائه 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 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

موقعیت اولیه پهپاد در دقت تخمین‌های الگوریتم تأثیر به‌سزایی دارد که ما این مسأله را با اضافه کردن حلقه‌ای به الگوریتم جهت بررسی GPS برای 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-

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

- 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 hypotheses using mahalanobis distance', Eng. Applicat. Artif. Intell, 1998, 11, (3), pp. 439-448.