Archive of SID

ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2019;19(2):407-414

Pedestrian Tracking by Means of Inertial Navigation System

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Heidary S.H.[1] *MSc,*
Farhat J.[1] *MSc,*
Beigzadeh B.*[1] *PhD*

How to cite this article
Heidary S.H, Farhat J, Beigzadeh B. Pedestrian Tracking by Means of Inertial Navigation System Modares Mechanical Engineering. 2019;19(2):407-414.

ABSTRACT

New users such as pedestrians are added to navigation systems with developing lightweight, portable, low-cost technologies. The pedestrian navigation systems are currently applied in miscellaneous fields including medicine, sport, military services, animation, robotics, etc. This amount of use has attracted the attention of many scholars over the last few decades. In this paper, the paths of a firefighter, as a pedestrian, was estimated approximately by the help of an inertial measurement unit (IMU) and acceleration sensors. To reduce the measured errors and noises by the sensor, zero velocity update (ZUPT) method and Kalman filter are exploited in a pedestrian navigation system. Due to the fact that the error in blind navigation is divergent over time if the filter is not used, the use of conventional accelerometer sensors cannot produce a satisfactory result.

using the combined module of an inertial measurement sensor that includes accelerometer and gyroscope, it is possible to track the person's position at any moment while the sensor is tracked on the shoe. The ability of ZUPT in navigation system has been discussed and interpreted by measuring a path using a sensor installed on a person's shoe and comparing the results with the desired predetermined path.

Keywords Navigation Systems; Pedestrian; Inertial Sensors; Shoes; ZUPT

[1]Mechanical Engineering Faculty, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

Correspondence
Address: Mechanical Engineering Faculty, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran. Postal Code: -
Phone: -
Fax: -
b_beigzadeh@iust.ac.ir

Article History
Received: July 13, 2018
Accepted: September 16, 2018
ePublished: February 01, 2019

CITATION LINKS

[1] Installation options for the NAVSTAR global positioning system in surface ships [2] The global positioning system [3] Design of a wireless assisted pedestrian dead reckoning system-the NavMote experience [4] Application of tracking technologies to the study of pedestrian spatial behavior [5] Pedestrian navigation with high sensitivity GPS receivers and MEMS [6] A resource-adaptive mobile navigation system [7] Wayfinding with a GPS-based mobile navigation system: A comparison with maps and direct experience [8] Foot mounted inertial system for pedestrian navigation [9] A survey of indoor inertial positioning systems for pedestrians [10] Intelligent fusion of Wi-Fi and inertial sensor-based positioning systems for indoor pedestrian navigation [11] Heterogeneous data fusion algorithm for pedestrian navigation via foot-mounted inertial measurement unit and complementary filter [12] Inertial navigation systems with geodetic applications [13] Zero-velocity detection—An algorithm evaluation [14] Aided Navigation: GPS with high rate sensors [15] 3-D position estimation from inertial sensing: Minimizing the error from the process of double integration of accelerations [16] Vehicle longitudinal velocity estimation using two new estimators and without measuring the braking torque

Copyright© 2019, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

www.SID.ir

Archive of SID

ردیابی مسیر گام‌برداری یک عابر پیاده با استفاده از سیستم ناوبری اینرسی

سیدحمیدرضا حیدری MSc
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
جعفرالصادق فرحاتMSc
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
برهان بیگ‌زاده * PhD
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

چکیده
با گسترش تکنولوژی‌های سبک، قابل حمل و ارزان‌قیمت، گروه جدیدی از کاربران مانند عابران پیاده به استفاده‌کنندگان سیستم‌های ناوبری اضافه شده‌اند. سیستم‌های ناوبری عابر پیاده امروزه در زمینه‌های پزشکی، ورزشی، نظامی، پویانمایی و غیره گسترش زیادی پیدا کرده‌اند. این حجم از استفاده نگاه پژوهشگران زیادی را در چند دهه اخیر به خود متمرکز کرده است. در این پروژه با استفاده از سنسورهای اینرسی و شتاب‌سنج مسیر حرکت یک آتش‌نشان تخمین زده شد و هدف استفاده از روش صفرکننده سرعت در هر گام، در ناوبری عابر پیاده برای کاهش خطا و نویز موجود با استفاده از فیلتر کالمن بود. به‌دلیل آنکه خطا در ناوبری کور در صورت عدم استفاده از فیلتر ذکر شده به مرور زمان واگرا می‌شود استفاده از سنسورهای معمولی شتاب‌سنج نمی‌تواند نتیجه مطلوبی را حاصل کند.
با استفاده از ماژول ترکیبی یک سنسور اندازه‌گیری اینرسی که شامل شتاب‌سنج و ژیروسکوپ است توانسته شد ردگیری از موقعیت فرد در هر لحظه در حالی که این سنسور روی کفش نصب شده است، دنبال شود. با اندازه‌گیری مسیر پیموده‌شده با استفاده از سنسور نصب‌شده روی کفش یک انسان و مقایسه نتایج با مسیر مطلوب ازپیش‌تعیین‌شده توانایی روش صفرکننده سرعت در هر گام در ناوبری، بحث و تفسیر شده است.
کلیدواژه‌ها: سیستم‌های ناوبری، عابر پیاده، سنسورهای اینرسی، کفش، صفرکننده سرعت در هر گام

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۲۲
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۲۵
*نویسنده مسئول: b_beigzadeh@iust.ac.ir

۱- مقدمه

اولین روش ناوبری با استفاده از نشانه‌های زمینی و طبیعی مانند کوه‌ها، درخت‌ها و غیره انجام می‌شد. به‌مرور بحث پیداکردن مسیر برای کشتی‌ها جدی شد، به‌طوری که ابتدا تنها کشتی‌رانی کنار سواحل انجام می‌شد. برای اینکه کشتی‌ها بتوانند دریاهای آزاد را بدون گم‌کردن مسیر بپیمایند نیاز به روش‌های جدید برای ناوبری داشتند. یکی از این روش‌ها ناوبری سماوی بود که در آن با اندازه‌گیری زوایای اجرام آسمانی می‌توان مشخصاتی از محل فعلی را معین کرد. مثلا با اندازه‌گیری ارتفاع ستاره قطبی می‌توان عرض جغرافیایی را مشخص کرد[1, 2]. یکی دیگر از روش‌های ناوبری روشی با نام ناوبری کور است. این روش مبتنی بر محاسبات استنباطی بوده است و مقدار مسافت از طریق دانستن اطلاعاتی از نقطه شروع حرکت، جهت، سرعت و زمان طی‌شده مشخص می‌شود. در این روش، مسیر با وصل‌کردن نقاط مکان روی یک نمودار تعیین می‌شود. این روش بر مبنای اندازه‌گیری سرعت، جهت و زمان، موقعیت فعلی کشتی را نسبت به مکان اولیه محاسبه می‌کند. به‌دلیل خطاهای زیاد در اندازه‌گیری، کاربرد این روش محدود بوده است[3]. ناوبری رادیویی از دیگر روش‌های ناوبری به شمار می‌آید که به عواملی از قبیل منابع فرکانس رادیویی، تکنولوژی‌های گیرنده، دسترسی سیگنال در گیرنده و ساختار سیگنال در فرستنده وابسته است. تکنولوژی ناوبری رادیویی با استفاده از فرستنده‌های ثابت طی یک قرن اخیر با پرتاب اولین ماهواره توسط شوروی سابق در حال تکامل و گسترش بوده است[4]. دو سیستم معروف ناوبری که امروزه به‌طور گسترده در حال استفاده هستند، ناوبری‌های اینرسی و جی‌پی‌اس نام دارند. در سیستم‌های جی‌پی‌اس یک بخش فضایی با ۲۱ ماهواره و ۳ ماهواره یدکی فعال در ۶ مدار و در ارتفاع ۲۰۱۸۰کیلومتری از سطح زمین وظیفه ناوبری را بر عهده دارند[5-7]. در ناوبری اینرسی با استفاده از سنسورها، شتاب‌ها و سرعت‌های زاویه‌ای جسم، اندازه‌گیری و بر مبنای آن موقعیت و وضعیت آن محاسبه می‌شود. در این روش با استفاده از مقادیر اولیه مکان و سرعت و همچنین با استفاده از مقادیر سرعت زاویه‌ای و شتاب‌های متحرک، مکان متحرک تخمین زده می‌شود. این نوع ناوبری مستقل است، به منابع خارجی وابسته نیست و به‌راحتی تحت تاثیر تداخلات قرار نمی‌گیرد. به همین دلیل استفاده از آن در کاربردهای نظامی و آتش‌نشانی برای ناوبری ایمن بسیار مناسب است[8]. ناوبری عابر پیاده یکی از متداول‌ترین ناوبری‌ها بوده که در آن از انواع روش‌های ناوبری مطرح‌شده استفاده شده است. در واقع، در این نوع ناوبری، عمل هدایت شخص در حال حرکت با پای پیاده از نقطه شروع تا مقصد مشخص با استفاده از تکنولوژی‌های مختلف انجام می‌گیرد. استفاده از سیستم جی‌پی‌اس به‌علت نیاز به بومی‌سازی مداوم عابر پیاده در تمامی محیط‌ها و نیاز به برنامه کاربردی به سطح خاصی از دقت و صحت متکی بوده که این میزان از دقت بیشتر مربوط به خدمات امنیتی است و برای بازار مصرف‌کننده کمتر مورد توجه قرار می‌گیرد. با توجه به غیرقابل پیش‌بینی‌بودن حرکت انسان و محیط‌هایی که به نوعی با آنها درگیر است، کیفیت خدمات ناوبری عابر پیاده به‌راحتی نمی‌تواند در همه جا تضمین شود. قطعاً برای ناوبری در محیط‌های آزاد، سامانه ماهواره‌ای ناوبری جهانی، فناوری نخست است، ولی در محیط‌های سربسته یا دره‌های شهری وضعیت خیلی پیچیده‌تر و مشکل‌تر می‌شود. در واقع، ساختمان‌ها و زیرساخت‌های دست بشر، سیگنال‌های ماهواره‌ای را دچار انسداد و تضعیف می‌کنند که ردیابی و پردازش آنها را با مشکل مواجه می‌سازد. در چنین مواقعی روش ناوبری اینرسی یکی از روش‌های مناسب و مطرح‌شده است که به شکل مستقل می‌تواند راهگشای مشکل‌های مطرح‌شده باشد[9-11].

در این مقاله با استفاده از سنسورهای اینرسی و شتاب‌سنج، مسیر حرکت یک آتش‌نشان تخمین زده شد. هدف این پروژه، استفاده از روش صفرکننده سرعت در هر گام (ZUPT) در ناوبری عابر پیاده و استفاده از فیلترهای کالمن، پایین و بالاگذر در بهبودبخشیدن وضعیت مسیر تخمین‌زده‌شده بود. در واقع، به‌دلیل آنکه خطا در ناوبری اینرسی در صورت عدم استفاده از فیلترها و روش مذکور به‌مرور زمان واگرا می‌شود، استفاده از سنسورهای معمولی شتاب‌سنج نمی‌تواند نتیجه مطلوبی را حاصل کند. از این رو با استفاده از ماژول ترکیبی یک سنسور IMU که هم شامل شتاب‌سنج و هم ژیروسکوپ بود و قابلیت نصب روی کفش عابر پیاده داشت، توانسته شد تا ردگیری از موقعیت و مسیر فرد عابر پیاده در هر لحظه دنبال شود. با اندازه‌گیری مسیر پیموده‌شده با استفاده از سنسور نصب‌شده روی کفش یک انسان و مقایسه نتایج تخمین‌زده‌شده از مسیر مطلوب ازپیش‌تعیین‌شده، توانایی روش صفرکننده سرعت در هر گام در ناوبری بحث و تفسیر شد.

۲- سیستم ناوبری اینرسی قابل نصب روی کفش

عملکرد سیستم‌های ناوبری اینرسی مبتنی بر قوانین مکانیک

www.SID.ir

Archive of SID

کلاسیک بوده که بیان ریاضی آنها توسط نیوتن انجام شده است. قوانین نیوتن بیان می‌کند که حرکت یک جسم به‌طور یکنواخت در امتداد یک خط مستقیم ادامه پیدا می‌کند، مگر آنکه نیرویی از خارج بر آن اعمال شود. این قوانین همچنین بیان می‌کند که نیروی فوق، شتابی متناسب با جرم جسم تولید می‌کند. با فرض وجود قابلیت اندازه‌گیری چنین شتابی، تغییر سرعت و موقعیت را می‌توان با انتگرال‌گیری‌های متوالی از شتاب نسبت به زمان محاسبه کرد. یک سیستم ناوبری اینرسی معمولاً از سه شتاب‌سنج استفاده می‌کند که هر یک قادر به تعین شتاب در جهت خاصی است. شتاب‌سنج‌ها معمولاً طوری نصب می‌شوند که محورهای آنها بر هم عمود باشند. پس از محاسبه شتاب در سه جهت محورهای اصلی، بایستی شتاب واردشده بر اثر نیروی گرانشی زمین از مقادیر اندازه‌گیری‌شده کاسته شود تا شتاب خطی خالص سیستم ناوبری محاسبه شود. برای تشخیص چرخش سیستم ناوبری، حرکت دورانی بدنه نسبت به دستگاه مرجع اینرسی توسط حسگرهای ژیروسکوپی اندازه‌گیری می‌شود و مورد استفاده قرار می‌گیرد. معادلات ناوبری سیستم مطرح‌شده برای محاسبه موقعیت، سرعت و چرخش کفش با استفاده از اطلاعات استخراج‌شده در هر لحظه به‌وسیله سنسورهای IMU از رابطه زیر قابل محاسبه است[12]:

$$\begin{bmatrix} p_{\mathrm{n}} \\ v_{\mathrm{n}} \\ \psi_{\mathrm{n}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{\mathrm{n-1}} + v_{\mathrm{n-1}}\Delta t \\ v_{\mathrm{n-1}} + [\psi_{\mathrm{n-1}} f_{\mathrm{n}} \psi_{\mathrm{n-1}}{}^{-1} - g]\Delta t \\ a(\omega_{\mathrm{n}}\psi_{\mathrm{n-1}})\Delta t \end{bmatrix} \quad (۱)$$

در معادله ۱ پارامترهای $p_{\mathrm{n}}(k)$، $v_{\mathrm{n}}(k)$ و $\psi_{\mathrm{n}}(k)$ به‌ترتیب بردار مکان، سرعت و توصیف‌کننده جهت چرخش نسبت به مختصات مرجع هستند. همچنین متغیرهای f_{n} و g بیان‌کننده اندازه شتاب در گام n و نیروی گرانش زمین هستند. پارامتر a ماتریس به‌هنگام‌کننده چهارگانه است.

یک مساله مهم در سنسورهای IMU، قرارگرفتن در وضعیت اولیه مناسب است تا از این طریق بتوانند به‌درستی و صحت کامل ناوبری را انجام دهند. در واقع، در بیشتر سنسورهای IMU به‌ویژه انواع ارزان‌قیمت آن به‌دلیل پایین‌بودن کیفیت سنسورها و داشتن ترم انتگرال‌گیر ،خطای حاصل از اندازه‌گیری به‌سرعت شروع به رشد می‌نماید تا جایی که بعد از ۱۰ثانیه کارکرد مسیر تخمین‌زده‌شده اختلاف زیادی با مسیر مطلوب خواهد داشت. یک راه حل برای جلوگیری از چنین اتفاقی استفاده از الگوریتم صفرکننده سرعت در هر گام است که براساس آن بازگشت وضعیت سنسور به حالت اولیه در گام‌های متوالی رخ می‌دهد. در واقع، خطا در سیستم ناوبری اینرسی به خودی خود به‌مرور زمان به سمت واگراشدن میل پیدا می‌کند که برای کم‌کردن آن، روش‌های کاهش خطا مطرح می‌شود و یکی از این روش‌ها صفرکننده سرعت در هر گام است. طبق این روش، هنگامی که یک فرد راه می‌رود پاهایش در وضعیت‌های سکون و در حال حرکت قرار می‌گیرد که این وضعیت‌ها با یک سیکل متناوب در هنگام راه‌رفتن شخص تکرار می‌شوند. با صفرکردن خطای ایجادشده در هر سیکل در وضعیتی که پا در حالت سکون قرار دارد، الگوریتم صفرکننده سرعت در هر گام مانع از افزایش خطا خواهد شد. طبق رابطه مطرح‌شده در زیر اگر این خطا از یک مقدار معین بیشتر شود، سنسور، توقف و دوباره شروع به کار می‌کند[13].

$$\frac{1}{N}\sum_{\lambda\in w_{\mathrm{k}}}\left(\frac{1}{\sigma_k}\left\| f_\lambda - \frac{\bar{f}_{\mathrm{k}}}{\|\bar{f}_\lambda\|} g \right\| + \frac{1}{\sigma_{\mathrm{w}}}\|w_\lambda\|^2\right) < Y \quad (۲)$$

در معادله ۲، $\bar{f}_{\mathrm{k}}$ میانگین اندازه شتاب اندازه‌گیری در زمان w_{k} گرفته‌شده در N نمونه به مرکزیت پارامتر k، σ_{k} و σ_{w} خطاهای استانداردشده اندازه‌گیری و Y محدوده تشخیص مقدار خطا هستند.

تشخیص‌دهنده معرفی‌شده در معادله ۲ که الگوریتم صفرکننده سرعت در هر گام نام‌برده‌شده، با به‌کارگیری یک فیلتر کالمن که در رابطه زیر تعریف شده است، می‌تواند عملکرد بهتری را هنگام انباشته‌شدن خطاها داشته باشد[14]:

$$\begin{bmatrix} p_{\mathrm{n}} \\ v_{\mathrm{n}} \\ \mathrm{d}\theta_{\mathrm{n}} \end{bmatrix} <= \begin{bmatrix} p_{\mathrm{n}} \\ v_{\mathrm{n}} \\ 0 \end{bmatrix} + k_{\mathrm{n}} v_{\mathrm{n}} \;\; and \;\; \psi_{\mathrm{n}} <= a(\mathrm{d}\theta_{\mathrm{n}})\psi_{\mathrm{n}} \quad (۳)$$

در معادله فوق k_{n}، گین‌کالمن‌فیلتر و $\mathrm{d}\theta_{\mathrm{n}}$ تصحیح‌کننده جهت است.

گین‌کالمن‌فیلتر که وظیفه آن مینیمم‌کردن شاخص عملکردی واریانس خطاست و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$k_{\mathrm{n}} = PC^T V^{-1} \quad (۴)$$

$$AP + PA^T - PC^T V^{-1} CP + W = 0 \quad (۵)$$

در روابط فوق، P ماتریس مثبت معینی است که از معادله ریکاتی بیان‌شده در رابطه ۵ به دست می‌آید. سایر ضرایب متغیرهای معادلات، فضای حالت هستند که طبق روابط زیر تعریف شدند:

$$\dot{X} = Ax + Bu + w \quad (۶)$$

$$Y = Cx + v \quad (۷)$$

w و v به‌ترتیب خطای مدل‌سازی و نویز اندازه‌گیری هستند.

نکته دیگری که باید در نظر داشت در معادلات ۴ و ۵، ضرایب V و W، کواریانس خطای مدل‌سازی و نویز اندازه‌گیری هستند.

معادلات مطرح‌شده در این بخش به شکل عملی در ماژول‌های ترکیبی IMU به کار گرفته می‌شوند و در بخش بعد به پیاده‌سازی عملی این سنسورها در مسیریابی عابر پیاده پرداخته شد.

۳- بستر فیزیکی ساخته‌شده

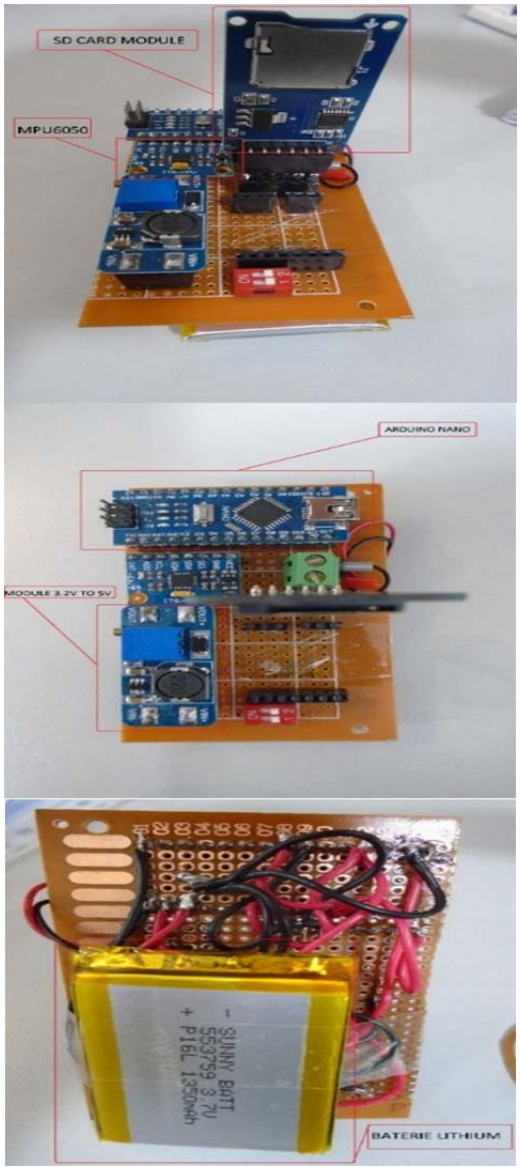
هنگام کار یک آتش‌نشان، امکان ردیابی آن به‌دلیل ضعیف‌بودن سیگنال جی‌پی‌اس میسر نیست. از این رو استفاده از ماژولی که بتواند از طریق سیستم ناوبری اینرسی این کار را انجام دهد، در این بخش توضیح داده شد. دستگاه ساخته‌شده شامل سنسورهای اینرسی، میکروکنترلر، باتری لیتیوم و کارت حافظه است و در حالی که روی کفش یک آتش‌نشان نصب شده است، مسیر حرکت را در هر لحظه با استفاده از آنالیز داده‌ها و ترسیم موقعیت آتش‌نشان ردگیری می‌کند. استفاده از کارت حافظه به این دلیل بود که فضای تصادفی دردسترس ریزپردازنده‌ها با توجه به حجم بالای اطلاعات کافی نیست و به‌منظور برطرف‌کردن این مشکل یکی از راه‌ها استفاده از کارت حافظه به‌عنوان فضای پشتیبان است.

برای برقراری ارتباط با سنسور اینرسی و گرفتن داده‌ها از یک برد آردوینو به‌دلیل توانایی برقراری ارتباط با پروتکل‌های I^2C و SPI استفاده شده است. در واقع، برد آردوینو اطلاعات دریافتی از سنسورهای شتاب‌سنج و ژیروسکوپ را از طریق پروتکل I^2C دریافت و آنها را به‌وسیله پروتکل SPI در کارت حافظه در هر لحظه ذخیره می‌کند. اطلاعات ذخیره‌شده در کارت حافظه به شکل یک فایل با فرمت txt. است. این فایل حاوی اطلاعاتی شامل شتاب، سرعت زاویه‌ای و زمان است که از طریق نرم‌افزار MATLAB قابل

www.SID.ir

Archive of SID

خواندن است. با حرکت‌دادن پا شتاب تولیدی از طریق سنسورها تشخیص داده می‌شود و با استفاده از الگوریتم نوشته‌شده در نرم‌افزار MATLAB، مسیر مطلوب که نشان‌دهنده موقعیت آتش‌نشان است در هر لحظه ترسیم می‌شود. در واقع، بعد از شروع مجدد سنسور در هر لحظه مطابق با الگوریتم صفرکننده سرعت توضیح‌داده‌شده در قسمت قبل و به‌همراه فیلتر کالمن اعمال‌شده بر ماژول ناوبری ساخته‌شده برای کمینه‌کردن خطاهای جمع‌شده حاصل از اندازه‌گیری سنسور، شتاب و جهت کفش افراد برای پردازش توسط نرم‌افزار MATLAB از کارت حافظه خوانده می‌شود و با انتگرال‌گیری‌های متوالی تغییرات سرعت و مسافت عابر پیاده قابل تشخیص خواهد بود. در مرحله آخر با ردگیری موقعیت محاسبه‌شده فرد در یک بازه زمانی معین، مسیر حرکت فرد تخمین زده می‌شود. در بستر فیزیکی برای ناوبری اینرسی، سنسور MPU6050 به کار رفته و علاوه بر نمایش برد آردوینو نانو، یک تنظیم‌کننده ولتاژ برای تامین ولتاژ سنسورهای به‌کارگرفته‌شده با مقدار مشخص استفاده شده است که خود با استفاده از یک باتری لیتیوم تغذیه می‌شود (شکل ۱).



(الف)

(ب)

(ج)

شکل ۱) نماهای متفاوت از ماژول ساخته‌شده برای ناوبری یک عابر پیاده
الف) نمای جلویی ماژول مونتاژشده؛ ب) نمای بالایی ماژول ناوبری؛ ج) نمای پشتی ماژول ساخته‌شده

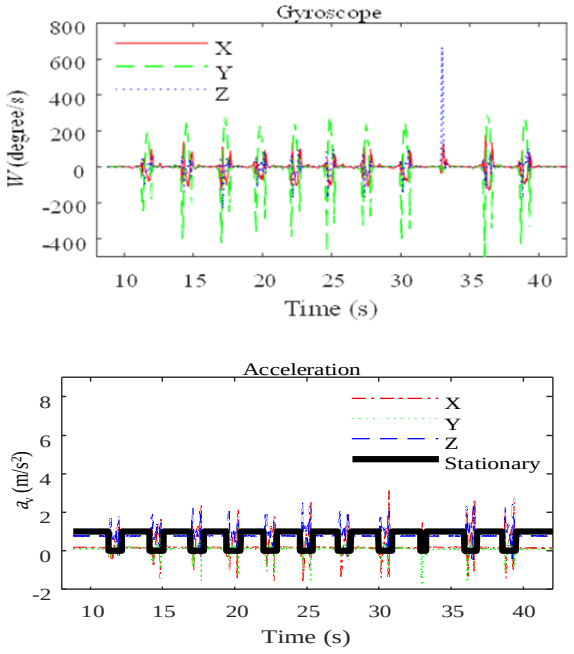
برای اندازه‌گیری مسیر پیموده‌شده، این ماژول با یک چسب روی کفش نصب می‌شود (شکل ۲). در بخش بعد، نتایج به‌دست‌آمده از پیاده‌سازی عملی این ماژول روی کفش یک شخصی که مسیری نسبتاً مستقیم و مسیری غیرمستقیم را می‌پیماید، استخراج و مورد بحث قرار گرفته شد.

شکل ۲) بستر فیزیکی متصل‌شده روی کفش

۴- نتایج و تفسیر آنها

پس از نصب ماژول ساخته‌شده در بخش قبل روی کفش انسان، آزمایش‌هایی در دو وضعیت راه‌رفتن در یک مسیر تقریباً مستقیم و راه‌رفتن در مسیر سه‌بُعدی غیرمستقیم مانند بالارفتن از پله‌های یک ساختمان انجام گرفت.

مقدار شتاب و سرعت زاویه در مختصات ناوبری در حالت محلی (نسبت به کفش) تعیین شد که برای تبدیل آن به مختصات مرجع نیاز به یک ماتریس انتقال بود. روش کاهش خطای صفرکننده سرعت در هر گام مانند یک کلید قطع و وصل عمل می‌کند. زمانی که مقدار صفر را می‌گیرد، یعنی وصل است و مقادیر شتاب‌سنج و سرعت زاویه‌ای قابل اندازه‌گیری هستند و زمانی که مقدار یک به خود می‌گیرد، یعنی قطع است و مقادیر شتاب‌سنج و سرعت زاویه، صفر هستند. این عمل با تعریف‌کردن حد آستانه انجام می‌شود که حد آستانه به‌صورت تجربی به دست می‌آید. هر گاه شتاب به‌دست‌آمده کمتر از حد آستانه باشد، عمل یک‌کردن شتاب انجام می‌شود و مقدار در غیر از این صورت صفر خواهد بود (نمودار ۱).

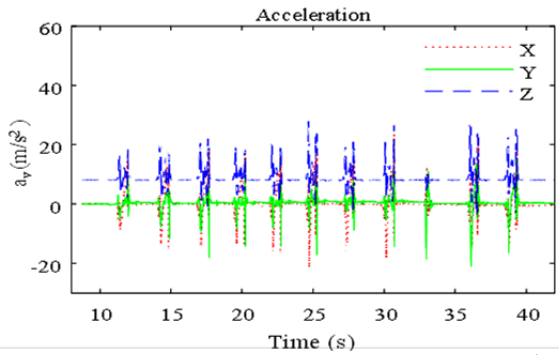


نمودار ۱) خروجی سنسور IMU برای ردیابی یک مسیر مستقیم توسط یک عابر پیاده

www.SID.ir

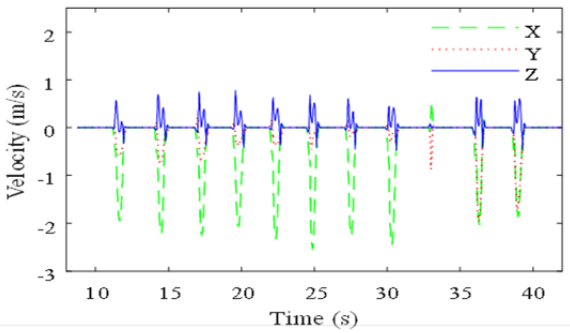
Archive of SID

نکته حایز اهمیت در نمودار شتاب خطی ارایه‌شده این بود که در تمامی سنسورهای IMU، شتاب در راستای محور Z با درنظرگرفتن نیروی گرانش محاسبه می‌شود، بنابراین برای به‌دست‌آوردن شتاب خالص یک جسم در راستای محورهای اصلی باید اثر نیروی گرانش را حذف کرد. با کم‌کردن این مقدار، نمودار شتاب خطی جسم تغییر می‌کند (نمودار ۲).



نمودار ۲) مقدار واقعی اندازه شتاب کفش عابر پیاده

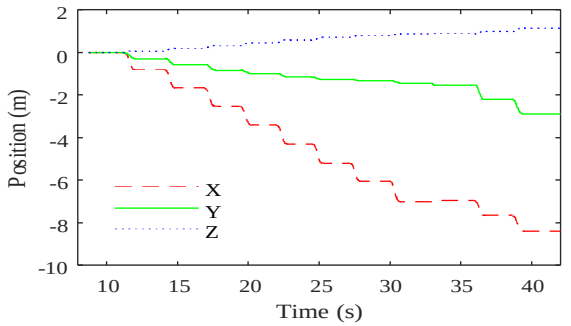
همان طور که گفته شد با انتگرال‌گرفتن از نمودار شتاب خطی می‌توان سرعت خطی عابر پیاده را در هر لحظه برای یک مسیر معین محاسبه کرد که در این پژوهش، نمودار مربوط به یک عابر پیاده‌ای ارایه شد که روی یک مسیر دوبُعدی در حال حرکت بود و ماژول ساخته‌شده روی کفشش متصل شده بود. در زمان‌هایی که وضعیت پا در حالت سکون قرار داشت، سرعت خطی مقدار صفر را نشان داد و در لحظه‌های شروع به حرکت مقادیر اندازه‌گیری‌شده را نشان داد که این به‌دلیل اعمال الگوریتم صفرکننده سرعت در هر گام با فیلتر کالمن است (نمودار ۳).



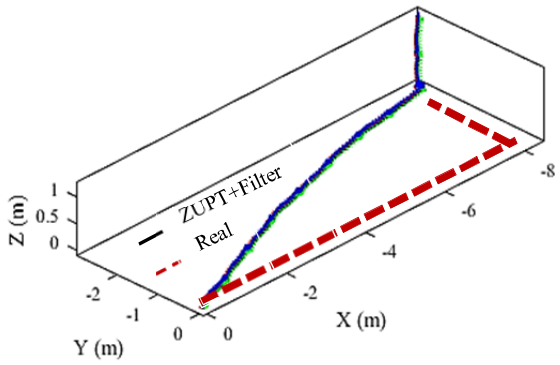
نمودار ۳) سرعت انتقالی کفش عابر پیاده

پس از انتگرال‌گیری مجدد از سرعت عابر پیاده در هر لحظه می‌توان موقعیت عابر پیاده را بر حسب زمان و براساس مختصات آن بر حسب محورهای اصلی در هر لحظه محاسبه نمود (نمودار ۴).
نمودار مسیر پیموده‌شده توسط عابر پیاده رسم شد که یک مسیر تقریباً مستقیم را می‌پیمود و موقعیت عابر را در یک بازه زمانی در جهت‌های محورهای اصلی نشان داد (نمودار ۴ و ۵). نقطه‌چین در این نمودار نشان‌دهنده مسیر واقعی پیموده‌شده توسط عابر پیاده است (نمودار ۵). اختلاف بین مسیر واقعی و اندازه‌گیری‌شده توسط سنسورهای IMU می‌تواند ناشی از عواملی همچون نویز واردشده بر سنسورهای اندازه‌گیری‌کننده یا نحوه قرارگیری نامناسب ماژول نصب‌شده روی کفش باشد. با این حال این ماژول توانست مسیر پیموده‌شده توسط عابر را با یک تقریب نسبتاً خوب ردگیری کند.

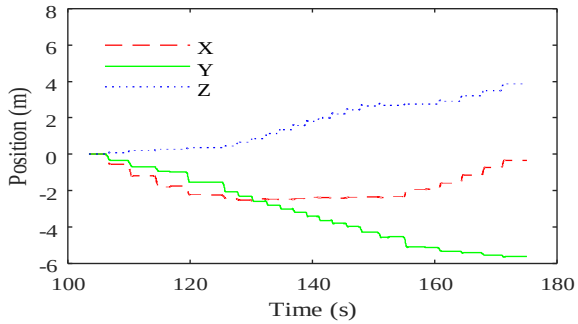
همچنین این آزمایش در بازه زمانی ۱۰۳ تا ۱۷۶ثانیه‌ای برای پیمودن یک مسیر سه‌بُعدی مانند بالارفتن از پله انجام گرفت. موقعیت عابر پیاده در این بازه زمانی در جهت‌های اصلی محورهای مختصات بعد از دوبار انتگرال‌گیری متوالی از نتایج به‌دست‌آمده از سنسور IMU نشان داده شد (نمودار ۵). با حذف ترم زمان (نمودار ۶) و رسم نمودار موقعیت عابر پیاده بر حسب مختصات قرارگرفته‌شده می‌توان مسیر پیموده‌شده را به دست آورد (نمودار ۷).



نمودار ٤) موقعیت یک عابر پیاده در یک مدت زمان معین برای ردیابی در یک مسیر مستقیم



نمودار ۵) مسیر مستقیم پیموده‌شده توسط عابر پیاده در یک مدت‌زمان معین



نمودار ٦) موقعیت یک عابر پیاده در یک مدت‌زمان معین برای ردیابی در یک مسیر غیرمستقیم

در نمودار، نقطه‌چین مسیر واقعی یک عابر پیاده را در حال بالارفتن از پله‌های ساختمان نشان می‌دهد. مسیر تخمین‌زده‌شده توسط سنسورها و مسیر واقعی دارای اختلاف جزیی بودند که این موضوع توانایی ماژول ساخته‌شده در ردیابی یک آتش‌نشان را به‌خوبی نشان می‌داد (نمودار ۷). مقدار خطاهای دو حالت ذکرشده برای ردیابی فرد عابر پیاده محاسبه شد (جدول ۱).

www.SID.ir

Archive of SID

شد. با حذف این subplotها و تنها خواندن اطلاعات مربوط به موقعیت فرد، اجرای این الگوریتم را به ۰/۰۰۰۵۷۸ثانیه خواهد رساند.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش پس از بررسی اجمالی انواع سیستم‌های ناوبری، مطالعاتی روی ناوبری اینرسی عابر پیاده انجام شد که کاربرد مناسبی در مکان‌هایی دارد که امکان استفاده از سیگنال جی‌پی‌اس به جهت ضعیف‌بودن سیگنال وجود ندارد. در گام نخست تئوری و روابط مربوط به الگوریتم صفرکننده خطا به‌همراه فیلتر کالمن به‌کاررفته مطرح شد. پس از این بررسی یک دستگاه ناوبری اینرسی برای ردیابی مسیر یک آتش‌نشان ساخته شد. در گام بعد، ماژول ساخته‌شده روی کفش یک عابر پیاده نصب شد و پس از آن آزمایش‌هایی روی یک فرد که در مسیرهای مستقیم و غیرمستقیم در حال راه‌رفتن بود، انجام گرفت. در مرحله نهایی، پس از انتگرال‌گیری‌های متوالی از سنسورهای شتاب‌سنج و ژیروسکوپ، مسیر پیموده‌شده توسط فرد مورد آزمایش تخمین زده شد. نتایج کلی به‌دست‌آمده از این آزمایش‌ها در زیر لیست شد:

- مسیر مستقیم ۹متری با خطای انحرافی ۶متر تخمین زده شد که این عملکرد با توجه به ادوات در نظرگرفته‌شده در سیستم ساخته‌شده نتیجه مطلوبی به وجود آورد.
- مسیر غیرمستقیم ۱۱متری با خطای انحرافی ۲متر تخمین زده شد که برای این سیستم ارزان‌قیمت نتیجه مطلوبی به شمار می‌آید.
- از مزایای سیستم ساخته‌شده می‌توان به سبک‌بودن و داشتن اندازه مناسب برای نصب روی انواع کفش اشاره کرد.
- از مهم‌ترین ویژگی‌های این ماژول حذف نویز به‌دلیل به‌کارگیری فیلتر مناسب و استفاده از آن در مکان‌هایی است که سایر سیگنال‌های پیداکردن موقعیت ضعیف هستند.

منابع

1- Amos KS, Cullin WJ, Carrick WH. Installation options for the NAVSTAR global positioning system in surface ships [Dissertation]. Monterey: Naval Postgraduate School; 1984.

2- Barnard ME. The global positioning system. EE Review. 1992;38(3):99-102.

3- Fang L, Antsaklis PJ, Montestruque LA, McMickell MB, Lemmon M, Sun Y, et al. Design of a wireless assisted pedestrian dead reckoning system-the NavMote experience. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2005;54(6):2342-2358.

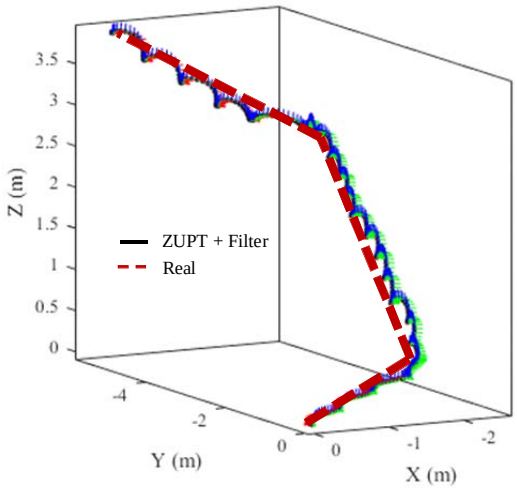
4- Shoval N, Isaacson M. Application of tracking technologies to the study of pedestrian spatial behavior. The Professional Geographer. 2006;58(2):172-183.

5- Lachapelle G. Pedestrian navigation with high sensitivity GPS receivers and MEMS. Personal and Ubiquitous Computing. 2007;11(6):481-488.

6- Baus J, Krüger A, Wahlster W. A resource-adaptive mobile navigation system. IUI '02 Proceedings of the 7th international conference on intelligent user interfaces. San Francisco: ACM; 2002.

7- Ishikawa T, Fujiwara H, Imai O, Okabe A. Wayfinding with a GPS-based mobile navigation system: A comparison with maps and direct experience. Journal of Environmental Psychology. 2008;28(1):74-82.

8- Godha S, Lachapelle G. Foot mounted inertial system for pedestrian navigation. Measurement Science and Technology. 2008;19(7):075202.



نمودار ۷) مسیر غیرمستقیم پیموده‌شده توسط عابر پیاده در یک مدت‌زمان معین

جدول ۱) مقایسه مقدار خطای اندازه‌گیری‌شده برای ردیابی عابر پیاده با مقدار مسافت واقعی پیموده‌شده

نوع مسیر	مسافت (متر)	خطا (%) انحراف	خطا (%) مسافت	خطا (%) ارتفاع
مستقیم	۹	۶	۵.۵	۱
غیر مستقیم	۱۱	۲	۲/۵	۰/۸

برای ارزیابی بهتر میزان خطا می‌توان مقادیر مذکور (جدول ۱) و مقادیر ارایه‌شده[8] را مقایسه کرد که در حالت استفاده از سیستم جی‌پی‌اس یا سیستم‌های مجهز به جی‌پی‌اس به‌همراه سنسور اینرسی مقدار خطا برای یک مسیر غیرمستقیم دوبُعدی برای مسافت بین ۱۰ تا ۲۰متر در بازه‌ای بین ۳ تا ۴/۱% و برای مسافت ۵ تا ۱۰متر در بازه‌ای بین ۲۱/۷ و ۹/۴ ارایه شده است که با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده می‌توان به عملکرد صحیح و مطلوب الگوریتم پیاده‌شده روی ماژول ساخته‌شده پی برد.

به‌طور کلی در مساله اجرای به‌هنگام، عوامل مختلفی تاثیرگذار هستند که می‌توان آنها را در دو گروه سخت‌افزار و نرم‌افزار تقسیم‌بندی کرد. در گروه اول، سرعت ریزپردازنده در دریافت و پردازش اطلاعات، دقت سنسور شتاب در محاسبه مقدار شتاب و غیره پارامترهای موثری در محاسبه زمان بهینه برای اجرای به‌هنگام هستند. در گروه دوم، نحوه نوشتن برنامه در اجرای به‌هنگام بسیار تاثیرگذار خواهد بود. به‌طور کلی امکان انجام محاسبات به‌هنگام روی داده‌های سنسور شتاب وجود دارد[15, 16]. در مطالعه انجام‌شده در مورد ردیابی عابر پیاده امکان اجرا به‌صورت به‌هنگام وجود دارد، به شرطی که subplotها از برنامه نوشته‌شده حذف شوند.

برای پیاده‌سازی چنین الگوریتمی توابع MATLAB به کار برده شد و به همین دلیل زمان اجرای الگوریتم بهینه شد. این در حالی است که اجرای چنین برنامه‌ای با زبان c مستلزم وقت نسبتاً زیادی است. زمان اجرای این الگوریتم با استفاده از توابع tic و toc محاسبه شد. در واقع، پس از دریافت داده‌های حاصل از سنسور IMU توسط ریزپردازنده آردوینو به‌ازای هر ورودی، زمان اجرای برنامه حدود ۰/۰۲۲۵۲۵ثانیه به دست آمد. این زمان نسبتاً طولانی به‌علت subplotهای متعدد است که برای رسم نمودارهای مربوط به مسیریابی از جمله موقعیت فرد، سرعت و شتاب به کار گرفته

www.SID.ir

Archive of SID

Transactions on Biomedical Engineering. 2010;57(11):2657-2666.
14- Farrell JA. Aided Navigation: GPS with high rate sensors. Pennsylvania Plaza: McGraw Hill Professional; 2008.
15- Neto P, Pires JN, Moreira AP. 3-D position estimation from inertial sensing: Minimizing the error from the process of double integration of accelerations. Proceeding of IECON 2013 - 39th annual conference of the IEEE industrial electronics society. Piscataway: IEEE; 2013.
16- Moaveni B, Khosravi M, Nasiri S, Amiri M. Vehicle longitudinal velocity estimation using two new estimators and without measuring the braking torque. Modares Mechanical Engineering. 2014;14(5):183-193. [Persian]
9- Harle R. A survey of indoor inertial positioning systems for pedestrians. IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2013;15(3):1281-1293.
10- Chen LH, Wu EHK, Jin MH, Chen GH. Intelligent fusion of Wi-Fi and inertial sensor-based positioning systems for indoor pedestrian navigation. IEEE Sensors Journal. 2014;14(11):4034-4042.
11- Fourati H. Heterogeneous data fusion algorithm for pedestrian navigation via foot-mounted inertial measurement unit and complementary filter. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2015;64(1):221-229.
12- Jekeli C. Inertial navigation systems with geodetic applications. Berlin: Walter de Gruyter; 2012.
13- Skog I, Handel P, Nilsson JO, Rantakokko J. Zero-velocity detection—An algorithm evaluation. IEEE

www.SID.ir