



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

¹Mechanical 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

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 فرحات MSc

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 ارزان قیمت، گروه جدیدی از کاربران مانند عابران پیاده به استفاده کنندگان 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. به دلیل 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 وژیروسکوپ 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 پییموده شده با استفاده از سنسور نصب شده روی کفش یک انسان و مقایسه نتایج با مسیر مطلوب از پیش تعیین شده 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. به مرور بحث پیدا کردن مسیر برای کشتی‌ها جدی شد، به طوری که ابتدا تنها کشتی‌رانی کنار سواحل انجام می‌شد. برای اینکه کشتی‌ها بتوانند دریاهای آزاد را بدون گم کردن مسیر بیمایند 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. مثلاً 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 طی شده مشخص می‌شود. در این روش، مسیر با وصل کردن 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. به دلیل 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 به طور 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 ۲۰۱۸۰ کیلومتری 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 به راحتی تحت تأثیر 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 مطرح شده 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 به علت 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 پیش‌بینی بودن حرکت انسان و محیط‌هایی که به نوعی با آنها درگیر است، کیفیت خدمات ناوبری عابر پیاده به راحتی نمی‌تواند در همه جا تضمین شود. قطعاً برای ناوبری در محیط‌های آزاد، سامانه ماهواره‌ای ناوبری جهانی، فناوری نخست است، ولی در محیط‌های سر بسته 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 مطرح شده است که به شکل مستقل می‌تواند راهگشای مشکل‌های مطرح شده 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 بالاگر در بهبود بخشیدن وضعیت مسیر تخمین زده شده بود. در واقع، به دلیل آنکه خطا در ناوبری اینرسی در صورت عدم استفاده از فیلترها و روش مذکور به مرور 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 ژيروسکوپ 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 پییموده شده با استفاده از سنسور نصب شده روی کفش یک انسان و مقایسه نتایج تخمین زده شده از مسیر مطلوب از پیش تعیین شده، 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

در معادله ۲، $\bar{f}_k$ میانگین اندازه شتاب اندازه‌گیری در زمان w_k گرفته شده در N نمونه به مرکزیت پارامتر k ، σ_k و σ_w خطاهای استاندارد شده اندازه‌گیری و Y محدوده تشخیص مقدار خطا هستند.

تشخیص دهنده معرفی شده در معادله ۲ که الگوریتم صفرکننده سرعت در هر گام نام برده شده، با به کارگیری یک فیلتر کالمن که در رابطه زیر تعریف شده است، می‌تواند عملکرد بهتری را هنگام انباشته شدن خطاها داشته باشد [14]:

$$\begin{bmatrix} p_n \\ v_n \\ d\theta_n \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} p_n \\ v_n \\ 0 \end{bmatrix} + k_n v_n \text{ and } \psi_n \leq a(d\theta_n) \psi_n \quad (3)$$

در معادله فوق k_n ، گین کالمن فیلتر و $d\theta_n$ تصحیح کننده جهت است.

گین کالمن فیلتر که وظیفه آن مینیمم کردن شاخص عملکردی واریانس خطاست و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$k_n = PC^T V^{-1} \quad (4)$$

$$AP + PA^T - PC^T V^{-1} CP + W = 0 \quad (5)$$

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

$$\dot{X} = Ax + Bu + w \quad (6)$$

$$Y = Cx + v \quad (7)$$

w و v به ترتیب خطای مدل سازی و نویز اندازه‌گیری هستند. نکته دیگری که باید در نظر داشت در معادلات ۴ و ۵، ضرایب V و W ، کواریانس خطای مدل سازی و نویز اندازه‌گیری هستند. معادلات مطرح شده در این بخش به شکل عملی در مائول‌های ترکیبی IMU به کار گرفته می‌شوند و در بخش بعد به پیاده سازی عملی این سنسورها در مسیریابی عابر پیاده پرداخته شد.

۳- بستر فیزیکی ساخته شده

هنگام کار یک آتش نشان، امکان ردیابی آن به دلیل ضعیف بودن سیگنال جی‌پی‌اس میسر نیست. از این رو استفاده از مائولی که بتواند از طریق سیستم ناوبری اینرسی این کار را انجام دهد، در این بخش توضیح داده شد. دستگاه ساخته شده شامل سنسورهای اینرسی، میکروکنترلر، باتری لیتیوم و کارت حافظه است و در حالی که روی کفش یک آتش نشان نصب شده است، مسیر حرکت را در هر لحظه با استفاده از آنالیز داده‌ها و ترسیم موقعیت آتش نشان ردگیری می‌کند. استفاده از کارت حافظه به این دلیل بود که فضای تصادفی در دسترس ریزپردازنده‌ها با توجه به حجم بالای اطلاعات کافی نیست و به منظور برطرف کردن این مشکل یکی از راه‌ها استفاده از کارت حافظه به عنوان فضای پشتیبان است.

برای برقراری ارتباط با سنسور اینرسی و گرفتن داده‌ها از یک برد آردوینو به دلیل توانایی برقراری ارتباط با پروتکل‌های I²C و SPI استفاده شده است. در واقع، برد آردوینو اطلاعات دریافتی از سنسورهای شتاب‌سنج وژیروسکوپ را از طریق پروتکل I²C دریافت و آنها را به وسیله پروتکل SPI در کارت حافظه در هر لحظه ذخیره می‌کند. اطلاعات ذخیره شده 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 نرم افزار MATLAB قابل

کلاسیک بوده که بیان ریاضی آنها توسط نیوتن انجام شده است. قوانین نیوتن بیان می‌کند که حرکت یک جسم به طور 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 تعیین 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 وارد شده بر اثر نیروی گرانشی زمین از مقادیر اندازه‌گیری شده کاسته شود تا شتاب خطی خالص سیستم ناوبری محاسبه شود. برای تشخیص چرخش سیستم ناوبری، حرکت دورانی بدنه نسبت به دستگاه مرجع اینرسی توسط حسگرهایژیروسکوپ اندازه‌گیری می‌شود و مورد استفاده قرار می‌گیرد. معادلات ناوبری سیستم مطرح شده برای محاسبه موقعیت، سرعت و چرخش کفش با استفاده از اطلاعات استخراج شده در هر لحظه به وسیله سنسورهای IMU از رابطه زیر قابل محاسبه است [12]:

$$\begin{bmatrix} p_n \\ v_n \\ \psi_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{n-1} + v_{n-1} \Delta t \\ v_{n-1} + [\psi_{n-1} f_n \psi_{n-1}^{-1} - g] \Delta t \\ a(\omega_n \psi_{n-1}) \Delta t \end{bmatrix} \quad (8)$$

در معادله ۱ پارامترهای $\psi_n(k)$ ، $v_n(k)$ و $p_n(k)$ به ترتیب بردار مکان، سرعت و توصیف کننده جهت چرخش نسبت به مختصات مرجع هستند. همچنین متغیرهای f_n و g بیان کننده اندازه شتاب در گام n و نیروی گرانش زمین هستند. پارامتر a ماتریس به هنگام کننده چهارگانه است.

یک مساله مهم در سنسورهای IMU، قرارگرفتن در وضعیت اولیه مناسب است تا از این طریق بتوانند به درستی و صحت کامل ناوبری را انجام دهند. در واقع، در بیشتر سنسورهای IMU به ویژه انواع ارزان قیمت آن به دلیل پایین بودن کیفیت سنسورها و داشتن ترم انتگرال گیر، خطای حاصل از اندازه‌گیری به سرعت شروع به رشد می‌نماید تا جایی که بعد از ۱۰ ثانیه کارکرد مسیر تخمین زده شده 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 به مرور زمان به سمت واگرا شدن میل پیدا می‌کند که برای کم کردن 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 راه رفتن شخص تکرار می‌شوند. با صفرکردن خطای ایجاد شده 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 مطرح شده در زیر اگر این خطا از یک مقدار معین بیشتر شود، سنسور، توقف و دوباره شروع به کار می‌کند [13].

$$\frac{1}{N} \sum_{\lambda \in w_k} \left(\frac{1}{\sigma_k} \left\| f_{\lambda} - \frac{\bar{f}_k}{\|\bar{f}_k\|} g \right\| + \frac{1}{\sigma_w} \|w_{\lambda}\|^2 \right) < Y \quad (9)$$

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

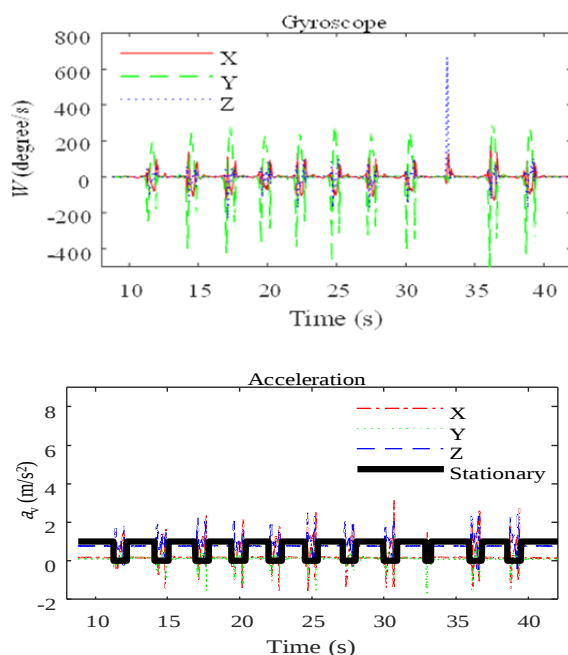


شکل ۲) بستر فیزیکی متصل شده روی کفش

۴- نتایج و تفسیر آنها

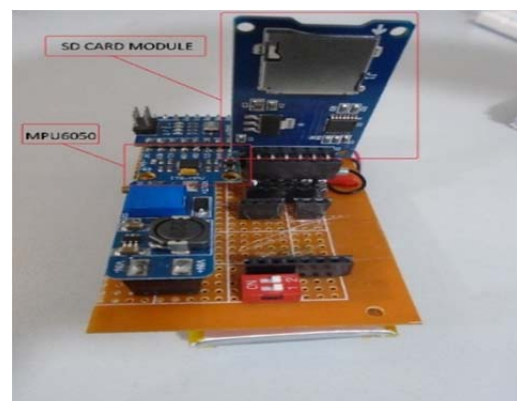
پس از نصب مازول ساخته‌شده در بخش قبل روی کفش انسان، آزمایش‌هایی در دو وضعیت راه‌رفتن در یک مسیر تقریباً مستقیم و راه‌رفتن در مسیر سه‌بعدی غیرمستقیم مانند بالا رفتن از پله‌های یک ساختمان انجام گرفت.

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 تعریف کردن 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 این صورت صفر خواهد بود (نمودار ۱).

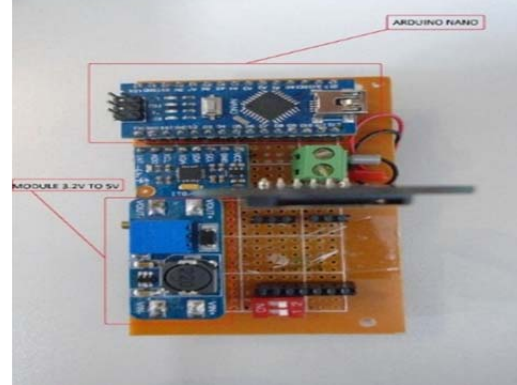


نمودار ۱) خروجی سنسور IMU برای ردیابی یک مسیر مستقیم توسط یک عابر پیاده

خواندن است. با حرکت دادن 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 توضیح داده‌شده در قسمت قبل و به‌همراه فیلتر کالمن اعمال شده بر مازول 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)



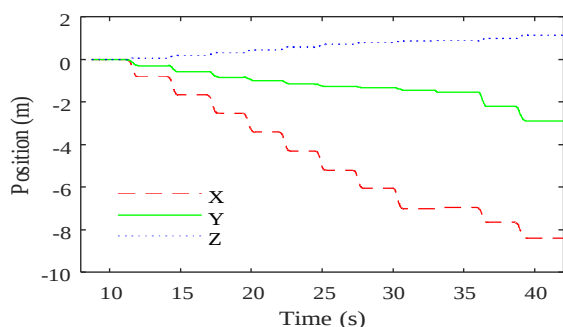
(ب)



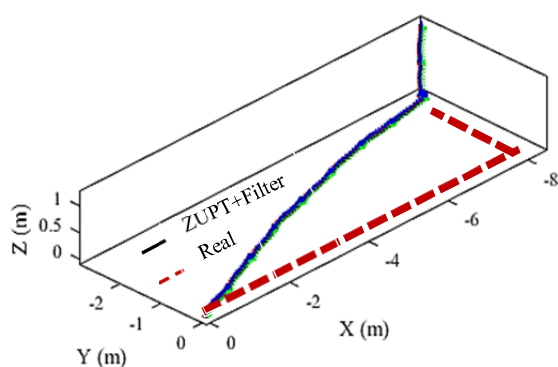
(ج)

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

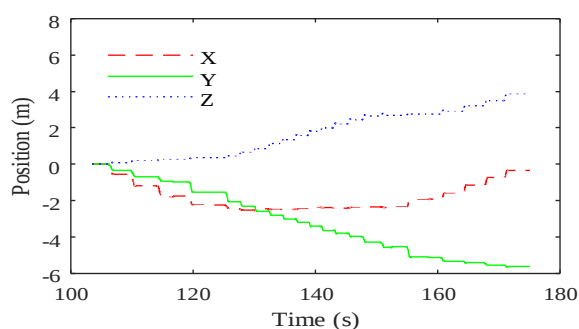
همچنین این آزمایش در بازه زمانی ۱۰۳ تا ۱۷۶ ثانیه‌ای برای پیمودن یک مسیر سه‌بعدی مانند بالا رفتن از پله انجام گرفت. موقعیت عابر پیاده در این بازه زمانی در جهت‌های اصلی محورهای مختصات بعد از دوبار انتگرال‌گیری متوالی از نتایج به‌دست‌آمده از سنسور IMU نشان داده شد (نمودار ۵). با حذف ترم زمان (نمودار ۶)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



نمودار ۴) موقعیت یک عابر پیاده در یک مدت زمان معین برای ردیابی در یک مسیر مستقیم



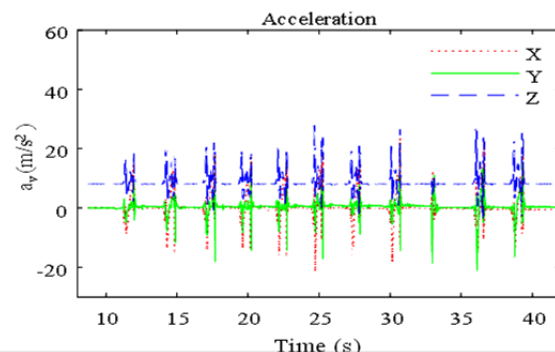
نمودار ۵) مسیر مستقیم پیموده‌شده توسط عابر پیاده در یک مدت زمان معین



نمودار ۶) موقعیت یک عابر پیاده در یک مدت زمان معین برای ردیابی در یک مسیر غیرمستقیم

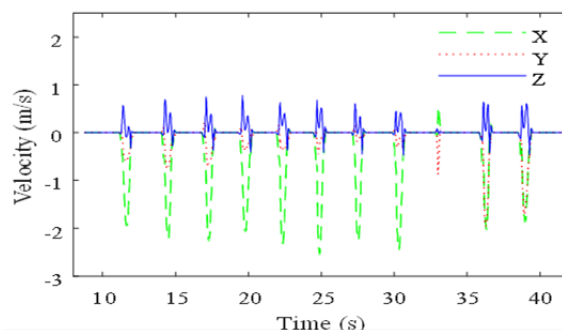
در نمودار، نقطه‌چین مسیر واقعی یک عابر پیاده را در حال بالا رفتن از پله‌های ساختمان نشان می‌دهد. مسیر تخمین‌زده‌شده توسط سنسورها و مسیر واقعی دارای اختلاف جزئی بودند که این موضوع توانایی مازول ساخته‌شده در ردیابی یک آتش‌نشان را به‌خوبی نشان می‌داد (نمودار ۷). مقدار خطاهای دو حالت ذکر شده برای ردیابی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

نکته حایز اهمیت در نمودار شتاب خطی ارایه‌شده این بود که در تمامی سنسورهای IMU، شتاب در راستای محور Z با در نظر گرفتن نیروی گرانش محاسبه می‌شود، بنابراین برای به‌دست‌آوردن شتاب خالص یک جسم در راستای محورهای اصلی باید اثر نیروی گرانش را حذف کرد. با کم کردن 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 دو‌بعدی در حال حرکت بود و مازول 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 وارد شده بر سنسورهای اندازه‌گیری‌کننده یا نحوه قرارگیری نامناسب مازول نصب‌شده روی کفش باشد. با این حال این مازول توانست مسیر پیموده‌شده توسط عابر را با یک تقریب نسبتاً خوب ردگیری کند.

شد. با حذف این subplot ها و تنها خواندن اطلاعات مربوط به موقعیت فرد، اجرای این الگوریتم را به ۰/۰۰۵۷۸ ثانیه 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 ضعیف بودن سیگنال وجود ندارد. در گام نخست تئوری و روابط مربوط به الگوریتم صفرکننده خطا به همراه فیلتر کالمن به کاررفته مطرح شد. پس از این بررسی یک دستگاه ناوبری اینرسی برای ردیابی مسیر یک آتش‌نشان ساخته شد. در گام بعد، مازول ساخته شده روی کفش یک عابر پیاده نصب شد و پس از آن آزمایش‌هایی روی یک فرد که در مسیرهای مستقیم و غیرمستقیم در حال راه رفتن بود، انجام گرفت. در مرحله نهایی، پس از انتگرال‌گیری‌های متوالی از سنسورهای شتاب‌سنج و ژيروسکوپ، مسیر پیاده شده توسط فرد مورد آزمایش تخمین زده شد. نتایج کلی به دست آمده از این آزمایش‌ها در زیر لیست شد:

- مسیر مستقیم ۹ متری با خطای انحرافی ۶ متر تخمین زده شد که این عملکرد با توجه به ادوات در نظر گرفته شده در سیستم ساخته شده نتیجه مطلوبی به وجود آورد.

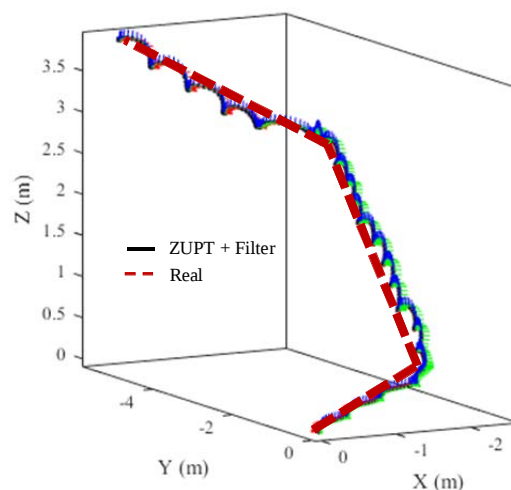
- مسیر غیرمستقیم ۱۱ متری با خطای انحرافی ۲ متر تخمین زده شد که برای این سیستم ارزان قیمت نتیجه مطلوبی به شمار می‌آید.

- از مزایای سیستم ساخته شده می‌توان به سبک بودن و داشتن اندازه مناسب برای نصب روی انواع کفش اشاره کرد.

- از مهم‌ترین ویژگی‌های این مازول حذف نویز به دلیل به کارگیری 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 پیاده شده توسط عابر پیاده در یک مدت زمان معین

جدول ۱) مقایسه مقدار خطای اندازه‌گیری شده برای ردیابی عابر پیاده با مقدار مسافت واقعی پیاده شده

نوع مسیر	مسافت		خطا (%)	
	(متر)	انحراف	مسافت	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 ارایه شده [8] را مقایسه کرد که در حالت استفاده از سیستم جی‌پی‌اس یا سیستم‌های مجهز به جی‌پی‌اس به همراه سنسور اینرسی مقدار خطا برای یک مسیر غیرمستقیم دو بُعدی برای مسافت بین ۱۰ تا ۲۰ متر در بازه‌ای بین ۳ تا ۴/۱٪ و برای مسافت ۵ تا ۱۰ متر در بازه‌ای بین ۲/۷ تا ۹/۴ ارایه شده است که با توجه به مقادیر به دست آمده می‌توان به عملکرد صحیح و مطلوب الگوریتم پیاده شده روی مازول ساخته شده پی برد.

به طور کلی در مساله اجرای به هنگام، عوامل مختلفی تاثیرگذار هستند که می‌توان آنها را در دو گروه سخت افزار و نرم افزار تقسیم بندی 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 به هنگام هستند. در گروه دوم، نحوه نوشتن برنامه در اجرای به هنگام بسیار تاثیرگذار خواهد بود. به طور کلی امکان انجام محاسبات به هنگام روی داده‌های سنسور شتاب وجود دارد [15, 16]. در مطالعه انجام شده در مورد ردیابی عابر پیاده امکان اجرا به صورت به هنگام وجود دارد، به شرطی که subplot ها از برنامه نوشته شده حذف شوند.

برای پیاده سازی 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 به ازای هر ورودی، زمان اجرای برنامه حدود ۰/۲۲۵۲۵ ثانیه به دست آمد. این زمان نسبتاً طولانی به علت subplot های متعدد است که برای رسم نمودارهای مربوط به مسیریابی از جمله موقعیت فرد، سرعت و شتاب به کار گرفته

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