



Imaged Based Earth Horizon Sensor with no Altitude Information

Behrooz Raeisy^{*,1} and Fatemeh Ghofrani²

1. Executive Manager, Institute of Mechanics, ISRC, raeisy@shirazu.ac.ir

2. Space Sensor Group, Institute of Mechanics, ISRC, f.ghofrani@isrc.ac.ir

*Corresponding author

Journal of
Space Science,
Technology &
Applications (Persian)

Vol. 1, No. 1, pp.: 53-64

2021

Available in:
Journal.isrc.ac.ir/article_138078.html

DOI:

10.22034/JSSTA.2021.256573.1008

Article Info

Received: 2020-11-9

Accepted: 2021-7-5

Keywords

Static earth horizon sensor,
Attitude determination,
Satellite; 2D image detector.

How to Cite this article

Behrooz Raeisy and Fatemeh Ghofrani, "Imaged Based Earth Horizon Sensor with no Altitude Information", *Journal of Space Science, Technology and Applications*, vol 1 (1), p.:53-64, 2021.

Abstract

Various sensors can be used to attitude determination of a satellite, including the Earth Horizon Sensor. These sensors generally divided into two types: static and scanning types. In the static type, two-dimensional array or several linear arrays capture instantly the Earth image information to attitude determination. In the scanning type sensors, a narrow-band optical beam mechanically sweeps a ring of space to find the crossing point of the beam to the Earth using a single spot detector. In this research, a new algorithm for a static earth horizon sensor with a two-dimensional array is presented. The algorithm does not need elevation of the sensor and this is the main advantage with respect to old ones. To extract the equations, a tangent vectors from the aperture of the pine-hole camera to the Earth is considered and this vector is extracted in two different body coordinates and base coordinates that are connected to the ground. By equating the two, an equation with three unknowns of pitch, roll and elevation is obtained. The equation is satisfied by each pixel on the Earth horizon. Thus; the system of equations is formed by the number of the Earth horizon pixels in the camera image and parameters are estimated by numerical solving of the unknown equations.



حسگر افق زمین تصویری با الگوریتمی مستقل از ارتفاع

بهروز رئیسی^{۱*}، فاطمه غفرانی^۲

۱. * گروه پژوهشی حسگرهای فضایی-شیراز - پژوهشکده مکانیک، پژوهشگاه فضایی ایران
b.raeisy@isrc.ac.ir

۲. گروه پژوهشی حسگرهای فضایی-شیراز - پژوهشکده مکانیک، پژوهشگاه فضایی ایران
f.ghofrani@isrc.ac.ir

چکیده

یکی از حساسه‌هایی که با کمک آن می‌توان تعیین وضعیت ماهواره را انجام داد حسگر افق زمین است. این حسگرها عموماً در دو نوع ایستا و جاروبی تقسیم‌بندی می‌شوند. در نوع ایستا، یک آرایه دوبعدی یا چند آرایه خطی اطلاعات تصویری از زمین را در یک لحظه اخذ و سپس محاسبات تعیین وضعیت را انجام می‌دهند اما در نوع جاروبی، یک حساسه تک نقطه‌ای با کمک یک سامانه مکانیکی که تغییر مسیر پرتو آن را انجام می‌دهد، داده‌گیری می‌نماید. رویه پیشنهادی این تحقیق، ایستا و بر اساس آرایه دوبعدی است که در آن برخلاف سایر الگوریتم‌های تصویری، نیازی به داده ارتفاع نیست. برای استخراج معادلات، برداری که از نقطه روزنه دوربین بر سطح افق زمین مماس شده است در نظر گرفته شده و این بردار واحد در دو دستگاه مختلف مختصات بدنه و مختصات پایه که به زمین متصل است، استخراج می‌شود. با مساوی قرار دادن این دو معادله‌ای با سه مجهول پیچش، چرخش و ارتفاع به دست می‌آید که مختصات هر پیکسل قرار گرفته بر روی افق زمین، در این معادله صدق می‌کند. بنابراین، دستگاه معادلاتی با تعداد نقاط تصویر که تشکیل افق زمین را داده‌اند و سه مجهول تعیین وضعیت تشکیل و با حل عددی معادلات، مجهولات تخمین زده می‌شوند.

دو فصلنامه

علوم، فناوری و

کاربردهای فضایی

سال اول، شماره ۱، صفحه: ۶۴-۵۳
بهار و تابستان ۱۴۰۰

Available in:
Journal.isrc.ac.ir/article_138078.html

DOI:

10.22034/JSSTA.2021.256573.1008

تاریخچه داوری

دریافت ۱۳۹۹/۰۸/۱۹

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۴

واژه‌های کلیدی

حسگر افق زمین ایستا، ماهواره،
تعیین وضعیت، مبدل تصویری
آرایه دوبعدی

نحوه استناد به این مقاله

بهروز رئیسی، فاطمه غفرانی، "حسگر افق زمین تصویری با الگوریتمی مستقل از ارتفاع"، دو فصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای فضایی، جلد اول، شماره اول، صفحات ۵۳-۶۴، ۱۴۰۰.

۱- مقدمه

حسگرها را با توجه به نوع آشکارسازشان می‌توان در سه شاخه کلی به شرح زیر تقسیم بندی نمود:

۱- آشکارسازهای چندنقطه‌ای^۴ [۱۳، ۱۴]: این نوع از حسگرها از چندین آشکارساز نقطه‌ای استفاده می‌کنند. به گونه‌ای که هر یک از آشکارسازها وضعیت ماهواره را نسبت به محور خود اندازه‌گیری می‌کند. خروجی هر آشکارساز در واقع یک ولتاژ DC است که متناسب با حاصل ضرب تشعشعات زمین در زاویه فضایی احاطه شده با زمین در آن آشکارساز است. این ولتاژها با استفاده از یک الگوریتم مناسب به زوایای پیچش و چرخش تبدیل می‌شوند.

۲- آشکارسازهای خطی چندگانه^۵ [۱۵-۱۷]: در این نوع حسگرها به جای یک آشکارساز تک نقطه‌ای و آینه چرخان جاروب کننده، از چندین آرایه خطی که هر یک در زوایای مختلف قرار گرفته‌اند استفاده می‌شود.

۳- حسگر تصویری دوبعدی^۶: در حسگرهای افق زمین مبتنی بر تصویر به منظور تخمین وضعیت، لازم است تصویری از زمین در دسترس باشد که در آن مرز بین زمین و فضا مشخص است. برای این نوع از حسگرها الگوریتم‌های مختلفی ارائه شده است [۱۸-۲۲]. برای مثال در مرجع [۱۸]، نویسندگان روشی را مبتنی بر تصویر زمین پیشنهاد کرده‌اند که دارای سه مرحله است. در مرحله اول، یک فیلتر سوبل^۷ به منظور تشخیص جهت و مکان لبه زمین بعد از تعدادی عملیات پیش پردازش استفاده می‌شود. سپس یک منحنی به نقاط افق به دست آمده از مرحله قبل، برازش^۸ می‌شود و در نهایت معادله نمودار افق، برای به دست آوردن وضعیت حسگر افق زمین حل می‌شود.

در این کار ثابت شده است که تصویر افق بر روی صفحه کانونی، یک بیضی یا هذلولی است. در مرجع [۱۹] نیز الگوریتمی مشابه ارائه شده است. در حقیقت فرایند تعیین وضعیت کاملاً مشابه است با این تفاوت که در آن، فرض شده است که انحنای افق زمین کمتر از یک پیکسل است و بنابراین عملیات برازش کردن نمودار، یک خط مستقیم را بر نقاط افق برازش می‌کند.

ایستا یا جاروبی بودن روش، مزایا و معایب خاص خود را دارد [۳]. در مقام مقایسه می‌توان گفت که حسگرهای جاروبی به

اولین گام در کنترل وضعیت یک سامانه فضایی، تعیین وضعیت آن است که این کار توسط حسگرهای مختلف انجام می‌شود. حسگر افق زمین^۱ نیز یکی از این حسگرها است که با استفاده از تفاوت بازتابش زمین و فضای تاریک پیرامونی و تشخیص لبه‌ی زمین، قادر به محاسبه زوایای پیچش و چرخش در مختصات تعریف شده بر روی مرجع زمین و بسته به نوع با فرکانس کاری ۰/۵ تا ۲۰ هرتز است [۱]. این تحقیق، ارائه الگوریتمی تصویری جدید برای یک حسگر افق زمین است. به طور کلی، حسگرهای افق زمین به دو دسته اصلی ایستا^۲ و جاروبی^۳ تقسیم می‌شوند [۲-۴]. در حسگرهای از نوع جاروبی، یک پرتو باریک نوری به صورت مکانیکی یک حلقه از فضا را جاروب می‌کند تا به نقاط عبور از زمین دست یابد. سپس، زمان‌های شروع و پایان گذر از زمین در یک دوره زمانی به منظور تخمین وضعیت حسگر استفاده می‌شود. روش‌های مختلفی برای پیاده‌سازی حسگرهای از نوع جاروبی وجود دارد [۵-۱۱]. بعضی از این حسگرها با استفاده از چرخش یک منشور در جلوی لنز زمین را جاروب می‌کنند. لازم به ذکر است که با استفاده از یک ترکیب از مجموعه منشور و لنز، برای محاسبه‌ی تغییرات پیچش و چرخش، اطلاعات مربوط به ارتفاع ماهواره باید در دسترس باشد [۶، ۱۱]. با این وجود یک حسگر جاروبی با دو بیم در مرجع [۷] پیشنهاد شده است که بدون دانستن ارتفاع ماهواره قادر است مقادیر زاویه پیچش و چرخش را محاسبه نماید. در حقیقت علاوه بر این زوایا، خود ارتفاع ماهواره نیز با استفاده از این حسگر قابل محاسبه است. در کنار این مزیت، متأسفانه در این حسگر به دلیل استفاده از دو حسگر افق زمین کامل، هزینه و اندازه سیستم افزایش می‌یابد. به منظور جبران این نواقص، مکانیزم‌های دیگری از این سیستم در مراجع [۵، ۸، ۱۲] ارائه شده است. در این مکانیزم‌ها، دو مخروط جاروب کننده تنها با استفاده از یک سر نوری به دست می‌آیند.

حسگرهای ایستا در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. اگرچه تعداد زیادی از این نوع حسگرها در مراجع پیشنهاد شده است [۱۳-۲۱]، اما به صورت کلی این نوع

5 Multiple Array Line Detectors

6 Two Dimensional Array Detectors

7 Sobel

8 Fit

1 Earth Horizon Sensor (EHS)

2 Static EHS

3 Scanning EHS

4 Multiple of Points or Multiple Spot Detectors

به استفاده از ابزار کمکی برای محاسبه ارتفاع است. این مشکل توسط آقای نگوین^۱ نیز مورد توجه قرار گرفته و با استفاده از دو حسگر افق زمین که از دو زاویه مختلف زمین را می‌بینند، روشی برای رفع آن پیشنهاد داده است [۲۲] اما مشکل نیاز به استفاده از دو سیستم مجزا و در نتیجه افزایش حجم و وزن وجود دارد. در تحقیق حاضر، الگوریتم جدیدی مطرح شده که در آن نیازی به دانستن ارتفاع مداری نیست. بنابراین می‌توان حسگری را ساخت که بدون نیاز به ابزار کمکی، برای اندازه‌گیری ارتفاع یا حسگر افق زمین اضافه تعیین وضعیت را انجام دهد [۲۳].

به صورت خلاصه می‌توان گفت که این الگوریتم مختص یک حسگر افق زمین ایستا با آرایه دوبعدی است که نه تنها نیازی به دانستن ارتفاع ندارد بلکه تخمینی از آن را نیز ارائه می‌دهد. در این الگوریتم، حسگر تصویری از زمین که شامل قسمت‌هایی از لبه زمین است را به عنوان ورودی در نظر گرفته و به کمک آن زوایای پیچش و چرخش ماهواره را محاسبه می‌کند. علاوه بر آن، تخمینی از ارتفاع را نیز به دست می‌دهد.

۲- مدل‌سازی مساله و استخراج معادلات

همان‌طور که قبلاً گفته شد، در این تحقیق روشی برای محاسبه زوایای پیچش و چرخش ماهواره به صورت مستقل از ارتفاع برای حسگر افق زمین مبتنی بر تصویر ارائه شده است. فرض بر این است که تصویربرداری از زمین توسط یک دوربین سوراخ‌سوزنی^۲ صورت می‌پذیرد. برای حل مسئله و به منظور تعیین زوایای پیچش، چرخش و ارتفاع ماهواره دو دستگاه مختصات به صورت زیر تعریف می‌شود:

۱. دستگاه مختصات بدنه که به دوربین سوراخ‌سوزنی متصل شده است و در شکل ۱- الف با محورهای (X_c, Y_c, Z_c) مشخص شده است. صفر این دستگاه در محل روزنه دوربین، محور Z_c آن همان محور نوری و صفحه حساس به نور^۳ آن در صفحه $z = -f$ قرار دارد که f همان فاصله کانونی دوربین است.

۲. دستگاه مختصات پایه که به زمین متصل است و در شکل ۱- ب با محورهای (X_0, Y_0, Z_0) نشان داده

دلیل وجود بخش‌های متحرک با مشکلاتی نظیر موارد زیر روبه‌رو هستند:

- حسگرهای اسکینیک به منظور ایجاد حرکت جاروبی شکل نسبتاً به مکانیزم پیچیده‌ای نیاز دارند که این موضوع طول عمر کل سیستم را کاهش می‌دهد.

- بخش‌های مکانیکی متحرک نیازمند به روانکاو دارند و این موضوع به‌ویژه در خلاء و با تصعید روانکاو، احتمال بروز مشکلات را بالا خواهد برد.

- سامانه‌هایی دارای ادوات مکانیکی متحرک نظیر موتورهای الکتریکی نسبت به سامانه‌هایی که تنها از نیمه هادی‌ها استفاده می‌کنند، عمدتاً دارای وزن‌های بالاتری هستند و در نتیجه امکان استفاده از آنها در ماهواره‌های کوچک‌تر وجود ندارد. این موضوع در حسگرهایی که تاکنون ساخته شده نیز کاملاً مشهود بوده و جستجو در محصولات که تولید شده‌اند نشان می‌دهد که استفاده از حسگرهای ایستا باعث کاهش وزنی از حدود ۲ تا ۳ کیلوگرم به ۵۰۰ تا ۷۰۰ گرم می‌شود [۱].

- حسگرهای جاروبی سرعت پاسخ‌دهی پایین‌تری در حد نیم تا یک هرتز دارند در صورتی که برای نمونه‌های ایستا، فرکانس ۱۰ هرتز معمول بوده و تا ۲۰ هرتز نیز گزارش شده است [۱].

- نیاز به توان مصرفی بیشتر به دلیل نیاز به موتور الکتریکی. البته این روش‌ها نسبت به شیوه‌هایی که نیاز به پردازش تصویر دارند بار محاسباتی بسیار کمتری را طلب می‌نمایند اما با پیشرفت فناوری نیمه‌رسانا و پیشرفت روزافزون پردازنده‌ها و بالاتر رفتن قدرت محاسباتی، این مزیت کم رنگ شده و به همین دلیل در سال‌های اخیر، استفاده از روش‌هایی که نیاز به پردازش تصویر دارد با استقبال بسیار زیادی مواجه شده است. مزیت دیگر حسگرهای جاروبی میدان دید بالاتر آنها است.

به جز بار پردازشی، مشکل دیگری که در روش استفاده از تصویر دوبعدی وجود دارد، نیاز به دانستن ارتفاع برای تعیین وضعیت ماهواره است که در تمامی مراجع [۱۸-۲۱]، ارتفاع مداری برای الگوریتم پارامتری معلوم فرض شده است. بنابراین، سیستم به صورت مستقل قادر به تخمین وضعیت نیست و نیاز

به راحتی به کمک شکل ۱- الف می توان گفت که بردار \vec{v}_i در دستگاه مختصات بدنه در معادله زیر صدق می کند:

(۳)

$$\begin{aligned} \vec{v}_i &= r_i \sin \alpha_i \vec{a}_{X_c} + r_i \cos \alpha_i \vec{a}_{Y_c} + \|\vec{v}_i\| \cos \eta_i \vec{a}_{Z_c} \\ &= \|\vec{v}_i\| \sin \eta_i \vec{a}_{X_c} + \|\vec{v}_i\| \sin \eta_i \cos \alpha_i \vec{a}_{Y_c} + \|\vec{v}_i\| \cos \eta_i \vec{a}_{Z_c} \\ &= \|\vec{v}_i\| (\sin \eta_i \sin \alpha_i \vec{a}_{X_c} + \sin \eta_i \cos \alpha_i \vec{a}_{Y_c} + \cos \eta_i \vec{a}_{Z_c}) \end{aligned}$$

به طوری که $\vec{a}_{X_c}, \vec{a}_{Y_c}, \vec{a}_{Z_c}$ بردارهای یکه دستگاه مختصات بدنه، η_i زاویه بین بردار \vec{v}_i و محور Z_c است. زاویه η_i به راحتی با داشتن مقادیر (x_i, y_i) و میدان دید دوربین در جهت x یا y قابل محاسبه است.

بردار \vec{v}_i را نیز به همان طریق ذکر شده در روابط (۳)، می توان در دستگاه مختصات پایه و در شکل ۱- ب به صورت زیر نوشت:

(۴)

$$\vec{v}_i = \|\vec{v}_i\| (\sin \rho \sin \beta_i \vec{a}_{X_0} + \sin \rho \cos \beta_i \vec{a}_{Y_0} + \cos \rho \vec{a}_{Z_0})$$

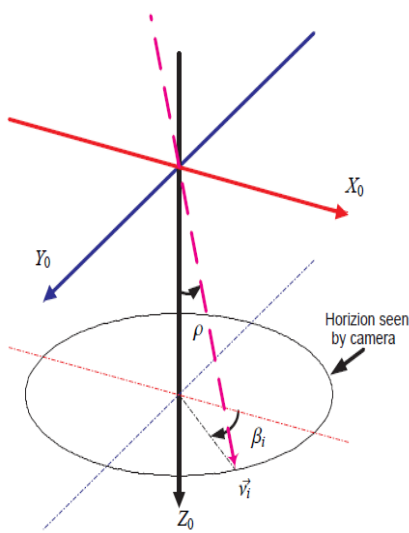
شده است، به عنوان فریم مرجع تعریف می شود. در این دستگاه که زوایای چرخش و پیچش مختصات بدنه نسبت به آن سنجیده می شود، محور X_0 به صورت مماس بر مدار حرکت ماهواره، محور Z_0 از روزنه دوربین به سمت زمین^۱ و Y_0 به نحوی که دستگاهی راست گرد تشکیل شود، تعریف می شود.

فرض کنید بردار مماسی از روزنه دوربین به یک نقطه از زمین را با \vec{v}_i نشان می دهیم. این بردار به طور قطعی از تصویر افق زمین در صفحه کانونی عبور می کند. شکل ۱ این بردار را در دو دستگاه مختصات تعریف شده نمایش می دهد.

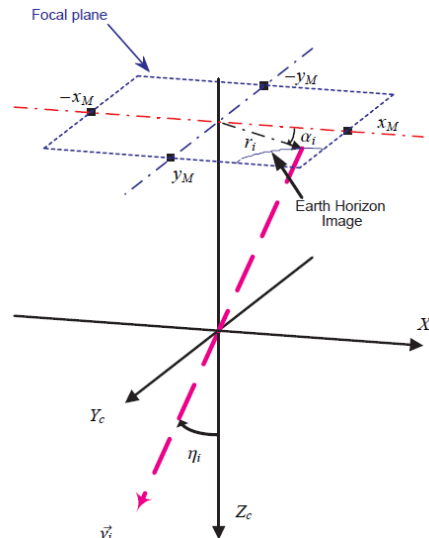
اگر مختصات هر پیکسل در تصویر افق زمین با (x_i, y_i) نشان داده شود، این نقطه در مختصات قطبی با (r_i, α_i) نیز قابل نمایش است که رابطه این نقاط به صورت زیر است:

$$r_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \quad (۱)$$

$$\alpha_i = \tan^{-1}(y_i, x_i) \quad (۲)$$



(ب) نمایش مختصات پایه



(الف) نمایش مختصات بدنه

شکل ۱.

اگر در شکل ۲ نقطه o مرکز کره زمین، p مکان قرار گرفتن روزنه دوربین و t محل برخورد مماس رسم شده از p بر سطح زمین باشد، آنگاه به راحتی می توان رابطه بین زاویه ρ و شعاع زمین و ارتفاع را به صورت رابطه (۵) نوشت. بنابراین اگر مقدار

به طوری که $\vec{a}_{X_0}, \vec{a}_{Y_0}, \vec{a}_{Z_0}$ بردارهای یکه دستگاه مختصات پایه، β_i زاویه بین بردار \vec{v}_i با محور X_0 بر روی دیسک زمین است و ρ زاویه ی بین بردار \vec{v}_i و بردار حسیض است.

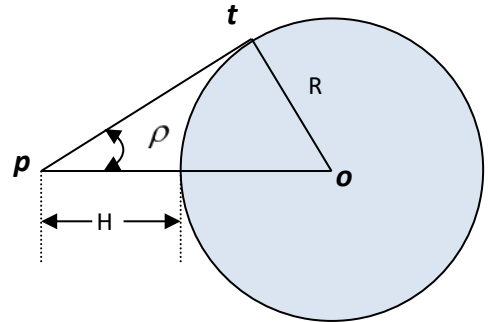
حال فرض کنید ماتریس دوران حول محور F به میزان ξ با $R_F(\xi)$ نشان داده شود؛ رابطه بین دستگاه‌های مختصات بالا با توجه به بردار یکه موازی با \vec{v}_i در دو معادله (۳) و (۴)، می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$\begin{bmatrix} \sin \rho \sin \beta_i \\ \sin \rho \cos \beta_i \\ \cos \rho \end{bmatrix} = R_Z(-\psi) \times R_Y(-\theta) \times R_X(-\phi) \times \begin{bmatrix} \sin \eta_i \sin \alpha_i \\ \sin \eta_i \cos \alpha_i \\ \cos \eta_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

به طوری که θ, ϕ و ψ به ترتیب زوایای چرخش، پیچش و سمت دوربین هستند؛ با جایگزینی ماتریس‌های دوران داریم:

ρ با استفاده از الگوریتم به دست آید، ارتفاع ماهواره قابل محاسبه است.

$$\rho = \sin^{-1} \frac{R}{R+H} \quad (5)$$



شکل ۲. استخراج رابطه بین زاویه ρ ، ارتفاع و شعاع زمین

$$\begin{bmatrix} \sin \rho \sin \beta_i \\ \sin \rho \cos \beta_i \\ \cos \rho \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \sin \eta_i \sin \alpha_i \\ \sin \eta_i \cos \alpha_i \\ \cos \eta_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

نتیجه حاصل از سطر سوم این ماتریس در واقع به صورت زیر و معادله اصلی الگوریتم پیشنهادی است:

$$\cos \rho = -\sin \eta_i \sin \alpha_i \sin \theta + \cos \eta_i \sin \phi \cos \theta + \sin \eta_i \cos \alpha_i \cos \theta \cos \phi \quad (8)$$

روی افق قرار گرفته باشند، همه این نقاط در معادله حاصل از سطر سوم رابطه (۷) صدق می‌کنند و یک سیستم معادلات غیرخطی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\vec{F}(\vec{x}) = \begin{bmatrix} f_1(\vec{x}) \\ f_2(\vec{x}) \\ \vdots \\ f_n(\vec{x}) \end{bmatrix} = 0 \quad (10)$$

به طوری که:

$$f_i(\vec{x}) = -\sin \eta_i \sin \alpha_i \sin \theta + \cos \eta_i \sin \phi \cos \theta + \sin \eta_i \cos \alpha_i \cos \theta \cos \phi - \cos \rho \quad (11)$$

در این معادله η_i و α_i با دانستن مختصات تصویر بر روی صفحه کانونی و فاصله کانونی (f) پارامترهایی قابل محاسبه هستند. این در حالی است که ρ (به عنوان تابعی از ارتفاع)، θ و ϕ هم پارامترهای مجهول هستند. در قسمت بعد، هدف یافتن این مجهولات با تشکیل یک دستگاه معادلات غیرخطی است.

۳- حل معادلات

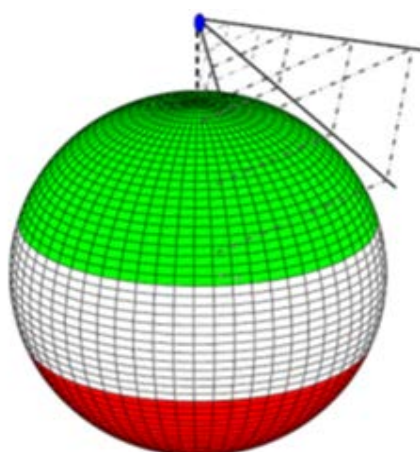
به منظور یافتن زوایای چرخش، پیچش و ارتفاع ماهواره، برداری با پارامترهای مجهول زیر داریم:

$$\vec{x} = [\phi, \psi, \rho]^T \quad (9)$$

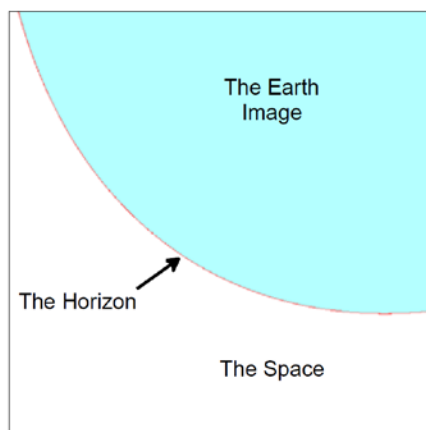
حال با استفاده از پردازش تصویر می‌توان مختصات پیکسل‌هایی که بر روی افق زمین قرار گرفته‌اند را پیدا نمود. اگر n پیکسل

در مختصات زمین شامل ارتفاع نسبت به سطح زمین و زوایای چرخش، پیچش و سمت است.

شکل ۳ - الف وضعیت دوربین نسبت به کره زمین را در ارتفاع ۳۰۰۰ کیلومتر و در وضعیتی که زوایای چرخش، پیچش و سمت آن به ترتیب ۲۰، ۳۰ و صفر درجه است نشان می‌دهد. خروجی شبیه‌ساز، تصویری مطابق با شکل ۳-ب از یک دوربین با میدان دید مساوی ۶۰ درجه و رزولوشن ۴۰۰×۴۰۰ است. در این شکل، قسمت‌هایی که نمایانگر فضا و زمین و خط فاصل آن که همان افق نامیده می‌شود مشخص شده‌اند.



شکل ۳: الف) وضعیت دوربین نسبت به کره زمین در ارتفاع ۳۰۰۰ کیلومتر و در وضعیتی با زوایای چرخش، پیچش و سمت ۲۰، ۳۰ و ۰ درجه



شکل ۳: ب) تصویر خروجی شبیه‌ساز از یک دوربین با مشخصات میدان دید ۶۰ درجه و رزولوشن ۴۰۰×۴۰۰

شکل ۴ نیز شبیه‌سازی تصاویر دوربین‌هایی در ارتفاع ۶۰۰۰ کیلومتر با میدان دیدهای ۴۰ و ۸۰ درجه و همچنین رزولوشن-های ۴۰۰×۴۰۰ و ۵۰×۵۰ را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در

بنابراین با استفاده از روش بازگشتی نیوتن-رافسون، دستگاه معادله حاصل قابل حل است. برای این کار از فرمول نیوتن-رافسون به صورت زیر بهره می‌گیریم [۲۴]:

$$x_{n+1} = x_n - \left[\frac{\partial \vec{F}(\vec{x})}{\partial \vec{x}} \right]^\dagger \vec{F}(\vec{x}_n) \quad (12)$$

به طوری که $\frac{\partial \vec{F}(\vec{x})}{\partial \vec{x}}$ مشتق $\vec{F}(\vec{x}) = 0$ نسبت به \vec{x} است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$A = \frac{\partial \vec{F}(\vec{x})}{\partial \vec{x}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \vec{x}} & \frac{\partial f_2}{\partial \vec{x}} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial \vec{x}} \end{bmatrix}^T \quad (13)$$

و $\frac{\partial f_i}{\partial \vec{x}}$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{\partial f_i}{\partial \vec{x}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_i}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial f_i}{\partial \theta} \\ \frac{\partial f_i}{\partial \rho} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \eta_i \cos \varphi \cos \theta - \sin \eta_i \cos \alpha_i \cos \theta \sin \varphi \\ -\sin \eta_i \sin \alpha_i \cos \theta - \cos \eta_i \sin \varphi \sin \theta - \sin \eta_i \cos \alpha_i \sin \theta \cos \varphi \\ \sin \rho \end{bmatrix} \quad (14)$$

لازم به ذکر است که شبه معکوس A نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$A^\dagger = (A^T A)^{-1} A^T \quad (15)$$

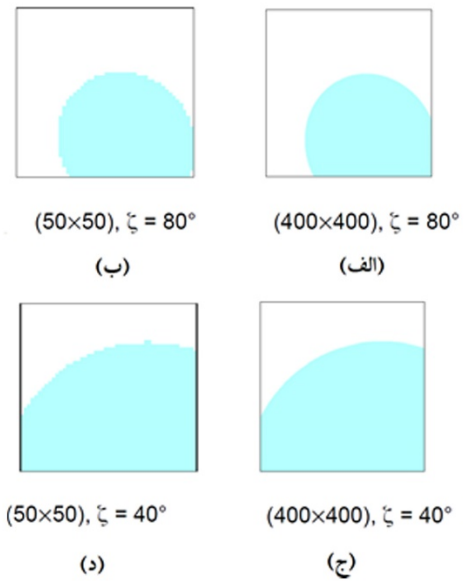
بنابراین با حل دستگاه معادلات غیرخطی به دست آمده؛ مقادیر زوایای پیچش، چرخش و ارتفاع قابل محاسبه است.

۴- شبیه‌سازی

برای صحت‌سنجی الگوریتم، یک شبیه‌ساز که شامل دو قسمت اصلی است طراحی شد. قسمت اول تصویر یک دوربین سوراخ‌سوزنی نسبتاً ایده‌آل را هنگامی که دوربین در یک ارتفاع و وضعیت مشخص به زمین وجود دارد شبیه‌سازی می‌کند. از ورودی‌های این نرم‌افزار، مشخصات دوربین شامل رزولوشن، گام پیکسل^۱، فاصله کانونی، میدان دید^۲ و همچنین وضعیت دوربین

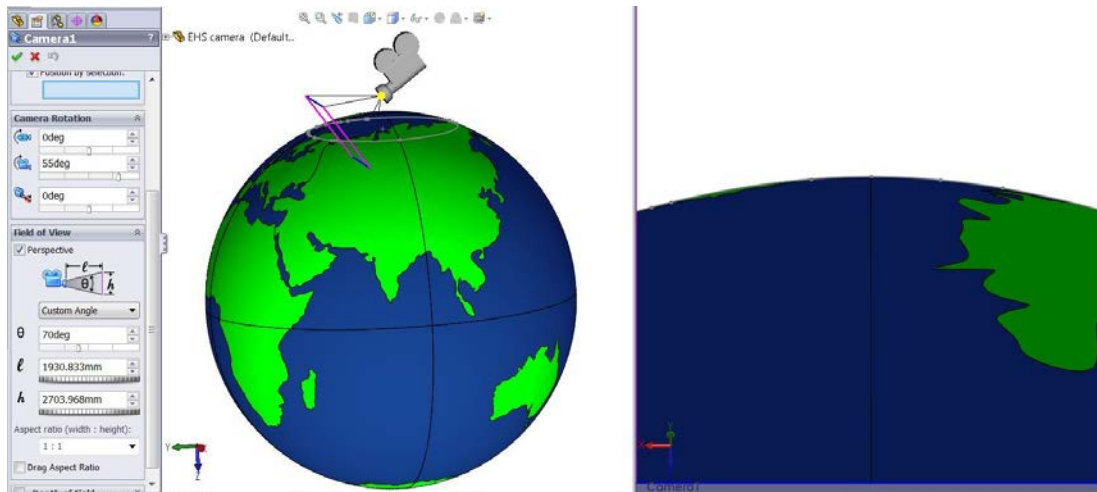
برای اطمینان از صحت عملکرد شبیه‌ساز، چندین مورد نیز با نرم‌افزار سالدورک^۱ که خود قابلیت قرار دادن یک دوربین در وضعیت مشخص را دارد شبیه‌سازی شده است که خروجی آن تا حد بسیار مطلوبی با حالتی که در نرم‌افزار شبیه‌ساز، رزولوشن دوربین به اندازه کافی بالا در نظر گرفته شود، مطابقت داشت. شکل ۵ یک نمونه از تصویر خروجی نرم‌افزار سالدورک را نشان می‌دهد.

شکل ۴ مشاهده می‌شود، کاهش رزولوشن دوربین با خشن شدن تصویر در لبه‌ها یا به عبارت دیگر صافی کمتر در منحنی افق، اثر خود را نشان می‌دهد.



شکل ۴: تصاویر شبیه‌سازی شده با رزولوشن‌ها و میدان دیدهای مختلف.

- (الف) رزولوشن ۴۰۰×۴۰۰ میدان دید ۸۰ درجه
- (ب) رزولوشن ۵۰×۵۰ میدان دید ۸۰ درجه
- (ج) رزولوشن ۴۰۰×۴۰۰ میدان دید ۴۰ درجه
- (د) رزولوشن ۵۰×۵۰ میدان دید ۴۰ درجه



شکل ۵: تولید تصویر افق زمین با استفاده از دوربین نرم‌افزار سالدورک

با استفاده از ابعاد نقاط به دست آمده از افق زمین، دستگاه معادلات غیرخطی تشکیل شده و با روش‌های عددی حل می‌شود. شکل ۶-الف نشان می‌دهد که مجموع خطا بر روی سه پارامتر ارتفاع، زاویه چرخش و پیچش چگونه تنها در چهار گام به مقدار بسیار کمی همگرا می‌شود. علاوه بر این، نحوه همگرایی تک تک پارامترها به سمت جواب نیز در شکل ۶-ب نشان داده شده است.

برای اطمینان از کارکرد مناسب الگوریتم، میزان خطا از اجراهای مختلف در نقاط مجزا در

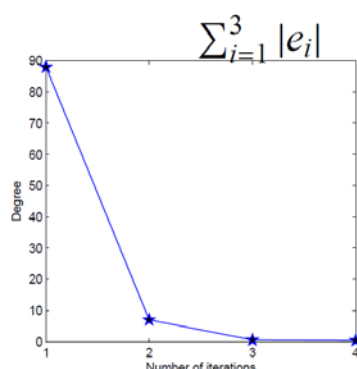
در قسمت دوم، شبیه ساز، تصویر حاصل را مورد پردازش قرار می‌دهد. در صورت درست عمل کردن الگوریتم، نرم‌افزار باید بتواند زاویه چرخش و پیچش که خروجی یک حسگر افق زمین معمول است و همچنین ارتفاع سیستم را تخمین بزند. در نهایت نیز درصد خطا محاسبه می‌شود که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

۵- نتایج شبیه‌سازی

در این فاز از تصویر، با استفاده از الگوریتم کئی^۱ که الگوریتمی برای تشخیص لبه است، افق زمین تشخیص داده می‌شود. سپس جدول ۱ نشان داده شده است.

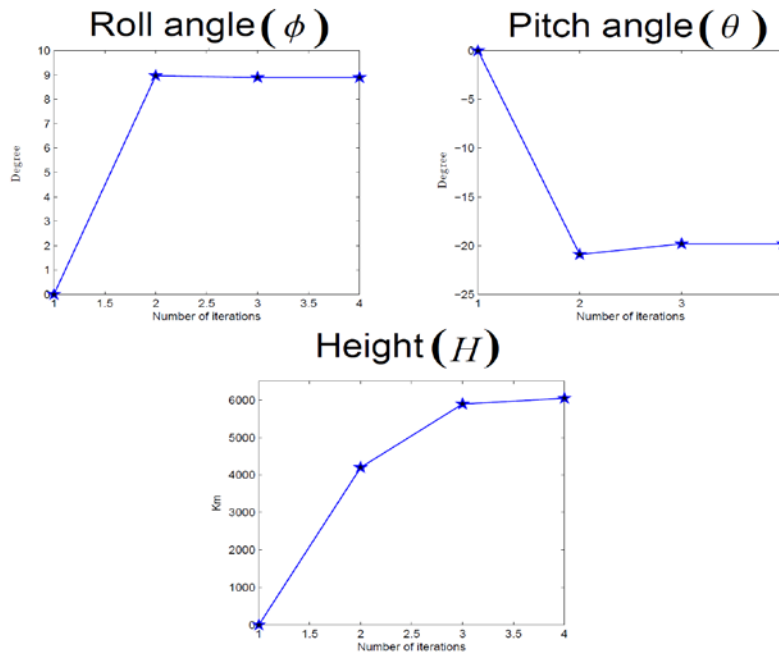
جدول ۱: میزان خطای الگوریتم پیشنهادی در برخی از شرایط انتخابی

شماره آزمایش	شرایط شبیه سازی					خطا در تخمین ها		
	Roll	Pitch	Height	FOV	Resolution	Roll	Pitch	Height
1	-20 °	+60°	1000(km)	60°	400×400	-0.286°	+0.340°	-1.7(%)
2	+20 °	+40°	2000(km)	60°	400×400	-0.359°	-0.313°	+2.7(%)
3	+40 °	+30°	3000(km)	80°	400×400	-0.133°	-0.068°	+0.6(%)
4	+35 °	-30°	6000(km)	80°	400×400	+0.052°	+0.078°	+0.2(%)



$$(a) \sum_{i=1}^3 | [\vec{x}]_i - [\vec{x}_F]_i |$$

الف) نحوه همگرایی مجموع خطا بر روی سه پارامتر ارتفاع، زاویه ی پیچش و چرخش



ب) نحوه همگرایی تک تک پارامترها به سمت جواب

شکل ۶: نحوه همگرایی پارامترها

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

تشکر و قدردانی

سنگ بنای این تحقیق بر پروژه ساخت حسگر افق زمین در گروه حسگر پژوهشکده مکانیک بنا نهاده شده است و طی این مسیر دشوار جز با همدلی و همراهی همکاران عزیزی که در این مسیر من را یاری دادند ممکن نبود. بنابر این بر خود فرض می‌دانم که از همه دوستان بالخصوص آقایان صابر ابراهیم، احسان خضری و وحید عرفان‌منش و سرکار خانم پگاه غرقی تشکر ویژه به‌عمل آورم.

مراجع

- [۱] ف. غفرانی، ع. لیاقت، ب. رئیسی و م. خوبان. "گزارش پویا داخلی و خارجی حسگر افق زمین". پژوهشکده مکانیک پژوهشگاه فضایی ایران، شهریور ۱۳۹۲.

- [2] R. A. Hutchin, "Earth horizon sensor," ed: Google Patents, 2009.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله الگوریتمی جدید برای حسگر افق زمین از نوع ایستا با استفاده از آرایه دوبعدی معرفی شد که این الگوریتم برخلاف الگوریتم‌های موجود در حسگرهای افق زمین تصویری، قادر است بدون نیاز به دانستن ارتفاع سامانه، زوایای پیش و چرخش ماهواره را اندازه‌گیری نماید.

برای صحت‌سنجی الگوریتم پیشنهادی، شبیه‌سازی برای تولید تصویر ایجاد شد و سپس بر روی تصویر به‌دست آمده الگوریتم اجرا شد. با رجوع به نتایج حاصل از این شبیه‌سازی، الگوریتم پیشنهادی صحت عملکرد خود را بدون اطلاع از پارامتر ارتفاع نشان داد در نتیجه می‌توان ادعا نمود که این روش پیشنهادی، با توجه به عدم نیاز به دانستن ارتفاع، گام بسیار مهمی در این شاخه از الگوریتم‌های حسگر افق زمین برداشته است.

- on-orbit sensor data," in *Proceedings, AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit, (Denver, CO, 2000*, pp. 350-360.
- [15] G. Soto-Romero, F. Bony, J.-J. Simonne, and J.-Y. Fourniols, "Micro Infrared Earth Sensor project: an integrated IR camera for Earth remote sensing," in *International Symposium on Remote Sensing*, 2001, pp. 176-187.
- [16] A. van Herwaarden, "Low-cost satellite attitude control sensors based on integrated infrared detector arrays," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 50, pp. 1524-1529, 2001.
- [17] A. Van Herwaarden, F. Van Herwaarden, S. Molenaar, E. Goudena, M. Laros, P. Sarro, *et al.*, "Design and fabrication of infrared detector arrays for satellite attitude control," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 83, pp. 101-108, 2000.
- [18] V. Ivatury, K. Moore, S. Prasad, G. Sinclair, A. Sloboda, D. Smith, *et al.*, "Earth Horizon Sensor for Small Spacecraft," University of Michigan Ann Arbor April 25, 2011.
- [19] H. M. Van Rensburg, "An infrared earth horizon sensor for a LEO satellite," M.S., Electrical Engineering, Stellenbosch: University of Stellenbosch, 2008.
- [20] D. Meller, P. Sriprietkiat, and K. Makovec, "Digital CMOS cameras for attitude determination," 2000.
- [21] M. Nazaree Dol Bahar, M. Effandi, M. Hassan, N. Hamzah, A. Arshad, X. Farr, *et al.*, "Modular CMOS Horizon Sensor for Small Satellite Attitude Determination and Control Subsystem," 2006.
- [22] T. Nguyen, "Attitude determination using infrared earth horizon sensors," presented at the 28th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2014.
- [۲۳] ب. رئیسی و ف. غفرانی. "حسگر افق زمین تصویری مستقل از ارتفاع." ایران ۱۳۹۷ <http://patent.irost.org/pvs/3231>
- [۳] ب. رئیسی، ف. غفرانی، ص. ابراهه، عرفان منش و ز. مهرجو، "استخراج الگوریتم تعیین وضعیت در برخی از مهم‌ترین انواع حسگرهای افق زمین و صحنه‌سنجی آن به کمک شبیه‌سازی نرم‌افزاری." در همایش ملی فناوری فضایی و کاربردهای آن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، بهمن ۱۳۹۷.
- [۴] ع. لیاقت، م. خوبان و ب. رئیسی. " معرفی خانواده محصولات حسگر افق زمین به همراه کارکردهایشان ". پژوهشکده مکانیک پژوهشگاه فضایی ایران، شهریور ۹۲.
- [5] F. Desvignes, F.-X. Doittau, J.-P. Krebs, M. Tissot, L. R. Baker, and A. Masson, "Optical sensors for spacecraft attitude measurement with respect to the earth," in *1985 International Technical Symposium/Europe*, 1986, pp. 322-330.
- [6] M. J. Sidi, *Spacecraft dynamics and control: a practical engineering approach* vol. 7: Cambridge university press, 1997.
- [7] R. A. Gontin and K. A. Ward, "Horizon sensor accuracy improvement using earth horizon profile phenomenology," in *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, Monterey, CA, Technical Papers.*, 1987, pp. 1495-1502.
- [8] T. J. Bednarek, "Dual Cone Scanning earth sensor processing algorithms ",in *Aerospace Sensing*, 1992, pp. 181-191.
- [9] R. L. Hickerson, "Infrared horizon sensor for measuring satellite pitch and roll," ed: Google Patents, 1972.
- [10] F. Tai and R. Barnes, "The dual cone scanner- An enhanced performance, low cost earth sensor ",in *Guidance and Control 1989*, 1989, pp. 147-169.
- [11] "Spacecraft earth horizon sensors," n. s. v. d. criteria, Ed., ed, 1969.
- [۱۲] ص. ابراهه، و. عرفان منش، م. ا. خضری، پ. غرقی، ز. بزرگ‌اصل، س. رضایی و ب. رئیسی. "طراحی، شبیه‌سازی و ساخت سنسور افق زمین اسکینینگ دوتایی." در همایش ملی فناوری فضایی و کاربردهای آن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، بهمن ۱۳۹۷.
- [13] G. Falbel, "A low weight/power/cost infrared Earth sensor," in *Aerospace Conference, 2004. Proceedings. 2004 IEEE*, 2004, pp. 2716-2722.
- [14] G. Natanson and J. Glickman, "A study of TRMM static Earth sensor performance using



COPYRIGHTS

© 2021 by the authors. Licensee Iranian Space Research Center of Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)