

کالیبراسیون حسگر مغناطیس با استفاده از پیچه هلمهولتز

رضا آقایی^۱، یاسر جعفری^۲، جعفر کاظمی^۳، حسن امینی^۴

۱- مدیر گروه آزمون‌های سیستمی، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران، r.aghaei@isrc.ac.ir

۲- کارشناس آزمون، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران، jafariyaser@yahoo.com

۳- مدیر مرکز تجمیع، یکپارچه سازی و آزمون، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران، jk.kazemi@gmail.com

۴- مدیر گروه آزمون‌های محیطی، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران، h.aminy@yahoo.com

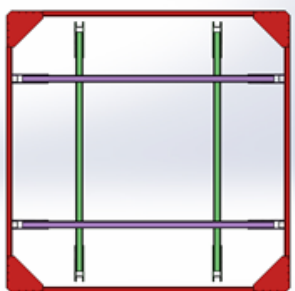
چکیده

در این مقاله، کالیبراسیون حسگر مغناطیس با استفاده از پیچه هلمهولتز، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. با استفاده از پیچه هلمهولتز، پرو فایل میدان مغناطیسی مورد نظر تولید و داده‌های متناظر از حسگر مرجع و حسگر مورد کالیبراسیون، جمع آوری شده است. سپس با استفاده از روش ریاضی و روش تبدیل بیضی به کره و به کمک حداقل مربعات خطا، پارامترهای مجهول استخراج شده‌اند و در نهایت با استفاده از مقایسه نتایج حاصل شده در هر دو روش، از طریق گراف و تحلیل آماری، ارزیابی لازم صورت گرفته و اثبات شده است که روش ریاضی کارایی قابل قبول تری دارد.

واژه‌های کلیدی: حسگر مغناطیس، پیچه هلمهولتز، بایاس، ضریب گین، ضریب عدم تعاد محوری، حداقل مربعات خطا

مقدمه

جهت تولید میدان مغناطیسی یکنواخت و قابل کنترل، از دو و یا چند سیم‌پیچ استفاده می‌شود. فریم سیم‌پیچ‌ها باید با هم موازی بوده و در فاصله خاصی از هم قرار گیرند. میزان فاصله سیم‌پیچ‌ها و همچنین تعداد سیم در هر یک از حلقه‌ها از یکی از قواعد هلمهولتز، رابنز، برونیک، مریت و ... تبعیت می‌کند. جهت تولید میدان یکنواخت در اندازه و جهت دلخواه نیاز به سه مجموعه کامل از این سیم‌پیچ‌ها که دو به دو با هم متعام هستند وجود دارد. این حلقه‌ها می‌توانند دارای مقطع دایروی و یا مربعی باشند. نوع مربعی نسبت به نوع دایروی، دارای حجم میدان یکنواخت بزرگتر، ساخت ساده‌تر، استحکام بیشتر، عدم نیاز به نگهدارنده و سهولت در دسترسی به داخل سیم‌پیچ است. شکل (۱) نمایی از یک پیچه هلمهولتز سه محوره را نشان می‌دهد.



شکل ۱: نمایی از یک پیچه هلمهولتز

کالیبراسیون هر حسگر جهت پی‌بردن به میزان صحت و دقت داده‌های قرائت شده و در نهایت تلاش برای اصلاح آن است. با انجام فرآیند کالیبراسیون حسگر، قابلیت اطمینان استفاده از آن افزایش می‌یابد. حسگر مغناطیس جزء دسته حسگرهای پر کاربرد و حساس به شمار می‌آید. از طرفی، این حسگر به محل نصب از حیث میزان دور بودن از مواد فرومغناطیس و نویزهای مغناطیسی محیط استفاده از آن، به شدت حساس است. یکی از روش‌های عملیاتی در کالیبراسیون این نوع حسگرها، ایجاد یک میدان مغناطیسی مشخص و ثابت در فریم بدنه‌ای حسگر است که در حد امکان مکان هندسی یک کره را در فریم مذکور پیمایش کند. جهت انجام این کار دو روش کلی وجود دارد. یکی از روش‌ها تغییر وضعی مشخص حسگر در یک میدان ثابت و تعریف شده است. روش دیگر، ایجاد یک میدان متغیر و مشخص با استفاده از پیچه هلمهولتز است که در مراجع [۵-۱] به این روش اشاره شده است. در این روش، نیاز به حرکت فیزیکی حسگر مورد کالیبره وجود ندارد و در مرکز پیچه به طور ثابت قرار می‌گیرد. در این مقاله روش دوم مورد استفاده قرار گرفته شده است.

روش انجام کار

برای انجام این کار ابتدا لازم است، حسگر مورد آزمون، 3DM-GX5-25 که متعلق به شرکت LORD است با حسگری که حلقه کنترلی پیچه هلمهولتز با آن بسته می‌شود (FGM3D100 متعلق به شرکت SENSYS) است، همراهتا و در حد ممکن نزدیک آن نصب شود. برای این کار از یک نگهدارنده از جنس پلاستیک و با دقت ابعادی 0.01 میلیمتر استفاده شده است که در شکل (۳) نمایش داده شده است. با این کار، وضعیت میدان تولیدی در دستگاه مختصات بدنه‌ای هر دو حسگر مشخص و نیازی به استخراج ماتریس دوران وجود ندارد. در گام دوم نیاز است با استفاده از پیچه هلمهولتز بردارهای میدان مغناطیسی با دامنه ثابت و جهت متغیر اعمال شود. جهت انجام این کار، با استفاده از نرم افزار متلب پروفایل مختصات نقاط واقع بر سطح یک کره با شعاع ۴۰۰۰، تولید و مورد استفاده قرار گرفت. در گام بعدی، در حین شبیه سازی پروفایل مورد نظر توسط پیچه هلمهولتز، داده برداری انجام می‌شود. برای انجام این کار از یک سیستم کنترل مرکزی دریافت کننده داده‌ها به صورت زمان واقعی استفاده می‌شود. از این‌رو، داده‌های متناظر هر دو حسگر با نرخ ۵۰ داده در ثانیه، تا پایان زمان اعمال میدان ثبت می‌شود. شکل (۵) نمای کلی از قرارگیری حسگر و اعمال میدان متغییر با دامنه ثابت توسط پیچه هلمهولتز را نشان می‌دهد.

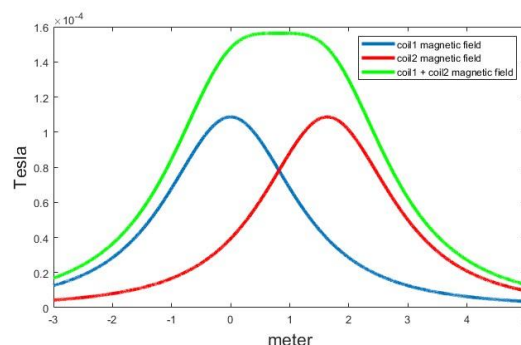


شکل ۳: نمایی از حسگر مرجع و حسگر مورد کالیبراسیون

میدان تولید شده توسط این شبیه ساز در محور مرکزی هر وجه از معادله (۱) پیروی می‌کند:

$$B = \mu_0 NI \left(\frac{1}{2\pi \left(\frac{x^2}{w^2} + \frac{1}{4} \right) \sqrt{x^2 + \frac{w^2}{2}}} + \frac{1}{2\pi \left(\frac{(x-0.55x)^2}{w^2} + \frac{1}{4} \right) \sqrt{(x-0.55x)^2 + \frac{w^2}{2}}} \right) \quad (1)$$

در این رابطه μ_0 نفوذ پذیری مغناطیسی خلاء، I جریان عبوری از هر سیم در حلقه، N تعداد سیم در هر حلقه، x مکان هندسی خط عمود بر صفحه سیم‌پیچ و گذرنده از مرکز سیم‌پیچ و w طول ضلع حلقه است. شکل (۲) میدان گذرنده از مرکز سیم‌پیچ را نشان می‌دهد.



شکل ۲: میدان گذرنده از مرکز سیم‌پیچ

کالیبراسیون حسگر مغناطیس در کاربرد فضایی به سه صورت انجام می‌شود که عبارتند از:

- کالیبراسیون حسگر به تنهایی
- کالیبراسیون حسگر در حضور سایر تجهیزات و یا به اصطلاح کالیبراسیون سیستمی
- کالیبراسیون در مدار فضا پیمای (در کاربرد فضایی)

در نوع اول، پارامترهای مورد نظر برای شناسایی بایاس ذاتی، ضرایب گین و ضرایب عدم تعاد محوری هستند و این نوع کالیبراسیون از حیث تقدم، مقدم بر دو نوع دیگر است. در نوع دوم و سوم [۳-۲ و ۴-۶]، پارامترهای مورد نظر برای شناسایی اثر آهن سخت (آهن ربای دائم و ممان دوقطبی موجود در سیستم) که به صورت بردار بایاس ظاهر می‌شود و اثر آهن نرم (وجود مواد فرومغناطیس) که به صورت ماتریس ۳ در ۳ ظاهر می‌شود، هستند. مدل سازی حسگر در هر سه نوع خیلی به هم شبیه هستند ولی تعبیر متفاوتی دارند. این مقاله به کالیبراسیون نوع اول می‌پردازد.

معادله (۲) معادله عمومی بیضی است.

$$D = [X^2, Y^2, Z^2, 2XY, 2XZ, 2YZ, 2X, 2Y, 2Z] \quad (3)$$

بردار D بردار رگرورها است.

$$v = [a \ b \ c \ d \ e \ f \ g \ h \ i]^T \quad (4)$$

بردار v بردار پارامترها است.

$$v[9 \times 1] = \text{inv}(D^T D)[9 \times 9](D^T 1)[9 \times 1] \quad (5)$$

از معادله (۵) پارامترها بدست می‌آیند. پس از تعیین پارامترها از معادلات

تکمیلی مرجع [۷] گین، ماتریس ضرایب و بایاس بدست می‌آیند.

در ادامه، از یک روش کلی‌تر مرجع [۱] که در ادامه شرح داده می‌شود و دیدگاه ریاضی آن بیشتر از دیدگاه فیزیکی است، در این مقاله استفاده شده است. در بخش نتایج اختلاف مدل بیضی به کره و روش دوم تشریح خواهد شد.

ساده‌ترین مدل ریاضی برای حسگر مغناطیس [۱] به صورت معادله (۶) است.

$$B_{\text{measured}} = \begin{bmatrix} X_{\text{gain}} & Y_{\text{to}X} & Z_{\text{to}X} \\ X_{\text{to}Y} & Y_{\text{gain}} & Z_{\text{to}Y} \\ X_{\text{to}Z} & Y_{\text{to}Z} & Z_{\text{gain}} \end{bmatrix} B_{\text{True}} + \text{bias} \quad (6)$$

در این رابطه B_{measured} داده‌های اندازه‌گیری شده توسط حسگری که قرار است کالیبره شود است. B_{True} داده‌های اعمال شده توسط پیچه هلمهولتز است و تناظر یک به یک با B_{measured} باید داشته باشد. بردار bias ، بایاس ذاتی حسگر است و عناصر ماتریس 3×3 ارتباط بین B_{measured} و B_{True} را هنگامی که بایاس از B_{measured} کسر شده است را مشخص می‌کند. پارامترهای مورد نظر پس از انجام فرآیند کالیبراسیون باید مشخص شوند شامل نه المان ماتریس و سه المان مربوط به بردار بایاس هستند. جهت استفاده از حداقل مربعات خطا، لازم که پارامترها از رگرورها مجزا شوند [۱] که در معادله (۷) این کار انجام شده است:

$$\begin{bmatrix} B_m X \\ B_m Y \\ B_m Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{\text{gain}} & Y_{\text{to}X} & Z_{\text{to}X} & X_{\text{bias}} \\ X_{\text{to}Y} & Y_{\text{gain}} & Z_{\text{to}Y} & Y_{\text{bias}} \\ X_{\text{to}Z} & Y_{\text{to}Z} & Z_{\text{gain}} & Z_{\text{bias}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_t X \\ B_t Y \\ B_t Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

در معادله (۸) ماتریس پارامترها جهت استخراج به یک سمت معادله منتقل شده است.

$$\text{param}[3 \times 4] = B_m[3 \times N] B_t^T [N \times 4] \text{inv}(B_t[4 \times N] B_t^T [N \times 4]) \quad (8)$$

N تعداد داده برداری‌های انجام شده است که در این آزمون در حدود ۱۸۶۰۰۰ نمونه است.

نتایج

محاسبات مربوط به تخمین پارامترهای مورد نظر با استفاده از نرم افزار متلب انجام و نتایج حاصل از آن در غالب گراف به شرح ذیل آورده شده است. تمامی گراف‌های ارائه شده از دو بخش تشکیل می‌شوند که بخش



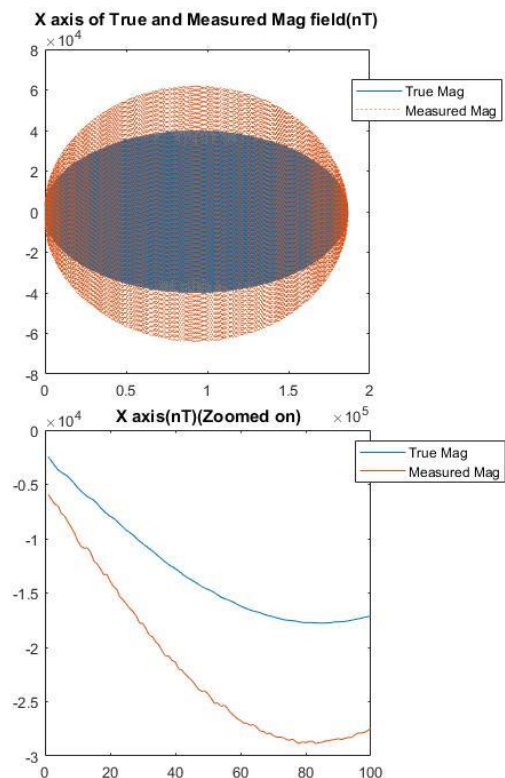
شکل ۴: حسگر 3DM-GX5-25



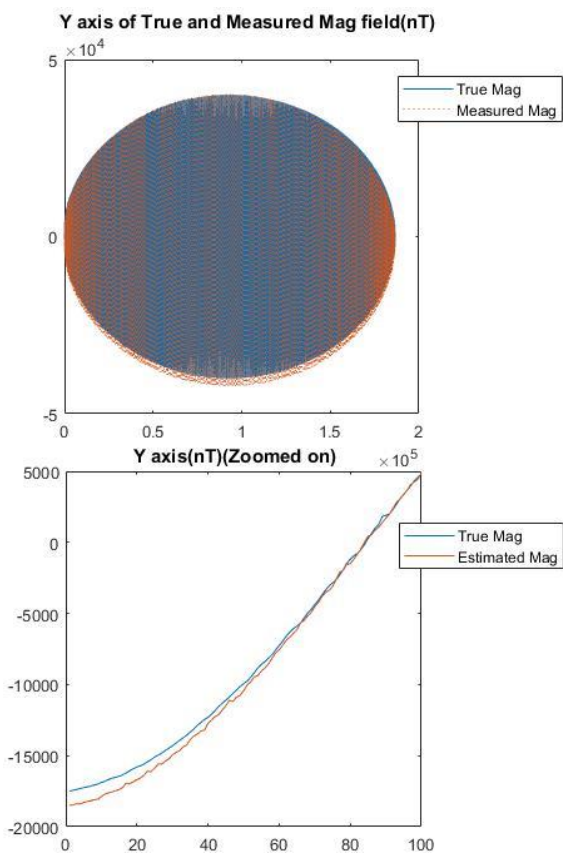
شکل ۵: حسگر در پیچه هلمهولتز و در حال داده برداری

با توجه به اینکه حسگرهای سه محوره، اغلب با کنار هم قرار دادن سه حسگر تک محوره ساخته می‌شوند، بطور ذاتی دارای ایراد عدم تعامد محوری هستند. با توجه به اینکه فریم مختصات هر حسگر که بر روی بدنه یا به اصطلاح کیسینگ آن تعریف می‌شود و مبنای استفاده از حسگر محسوب می‌شود، با فریم حسگرهای تک محوره که شرح داده شده از لحاظ تعامد محوری با هم متفاوت هستند. با این مقدمه می‌توان نتیجه گرفت که مدل بیضی به کره [۷-۱] تخمین درستی از پارامترهای مجهول را نتیجه نمی‌دهد، زیرا استفاده از مدل مذکور بر مبنای گین، دوران و انتقال است که بخش دوران آن با دو فریمی که وضعیت تعامد متفاوتی دارند قابل اجرا نیست. روش اجرایی مدل بیضی به کره، کاملاً در مرجع [۷] آورده شده است. معادلات استفاده در این روش به شرح معادلات (۲-۵) هستند:

$$aX^2 + bY^2 + cZ^2 + d2XY + e2XZ + f2YZ + g2X + h2Y + i2Z = 1 \quad (2)$$

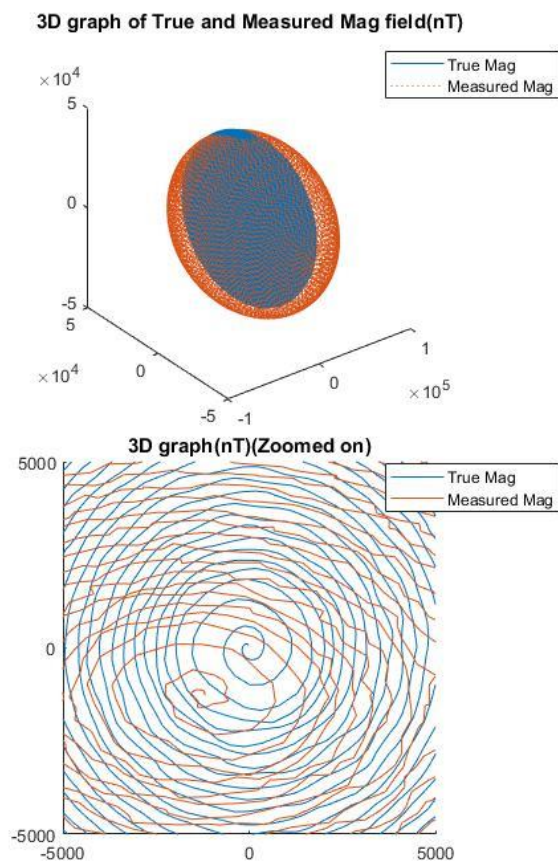


شکل ۷: محور X قبل از کالیبراسیون



شکل ۸: محور Y قبل از کالیبراسیون

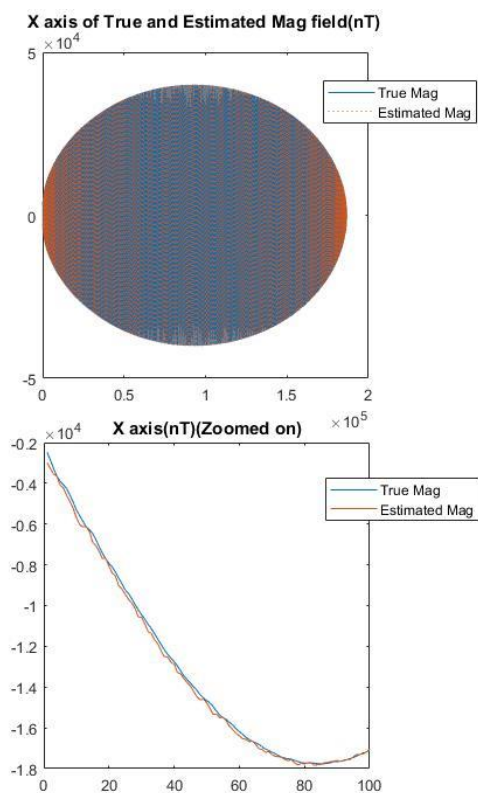
دوم آن، بزرگ نمایی قسمتی از گراف قبلی است. شکل (۶) مرتبط با گراف سه بعدی از داده‌های حسگر قبل از کالیبراسیون آن است. در این گراف، داده‌های حسگر و داده‌های تولید شده توسط پیچه هلمهولتز، نمایش داده شده‌اند. در بخش اول و دوم گراف، عدم انطباق شدید داده‌ها مشخص است.



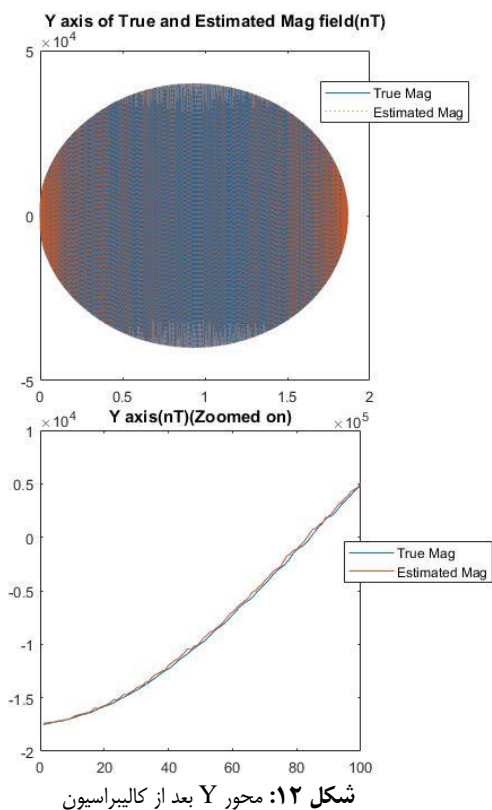
شکل ۶: گراف سه بعدی قبل از کالیبراسیون

شکل (۷-۹) مرتبط با گراف محورهای سه‌گانه حسگر، قبل از کالیبراسیون آن است. در این گراف‌ها، عدم انطباق شدید داده‌ها مشخص است.

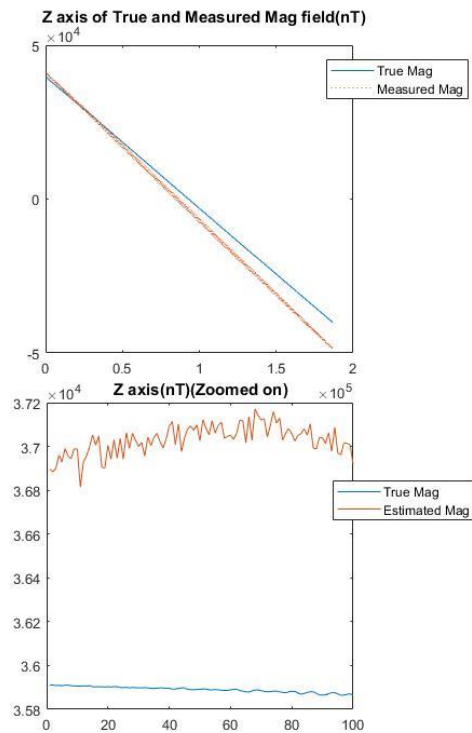
شکل (۱۱-۱۳) مرتبط با گراف محورهای سه‌گانه حسگر، بعد از کالیبراسیون آن است. در این گراف‌ها، انطباق قابل قبول داده‌ها مشهود است.



شکل ۱۱: محور X بعد از کالیبراسیون

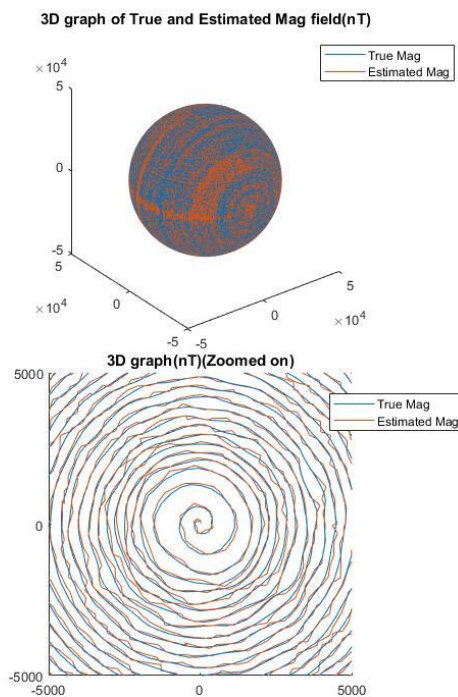


شکل ۱۲: محور Y بعد از کالیبراسیون



شکل ۹: محور Z قبل از کالیبراسیون

شکل (۱۰) مرتبط با گراف سه بعدی از داده‌های حسگر بعد از کالیبراسیون آن است. در این گراف، داده‌های حسگر و داده‌های تولید شده توسط پیچه هلمهولتز، نمایش داده شده‌اند. در بخش اول و دوم گراف، انطباق قابل قبول داده‌ها مشهود است.



شکل ۱۰: گراف سه بعدی بعد از کالیبراسیون

این مدل است طوری که گین بین محوری‌ها دو به دو باید با هم مساوی باشند. تحلیل آماری مربوط به این دو روش به شرح جدول (۳ و ۴) است:

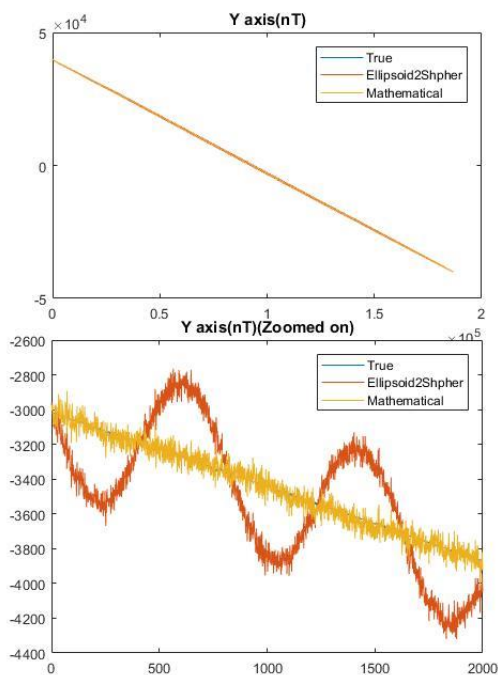
جدول ۳: تحلیل آماری مدل ریاضی

مورد	میانگین (nT)	RMS(nT)
نرم میدان	-۰٫۵	۶۳
خطای محور X	۰	۱۳۹
خطای محور Y	۰	۱۵۲
خطای محور Z	۰	۴۴

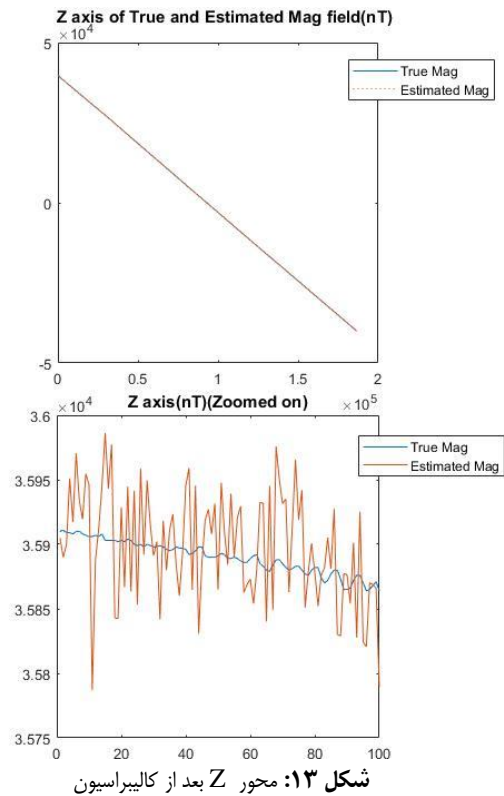
جدول ۴: تحلیل آماری مدل بیضی به کره

مورد	میانگین (nT)	RMS(nT)
نرم میدان	۲۹	۵۷
خطای محور X	۰	۴۹۰
خطای محور Y	۰	۴۷۲
خطای محور Z	۰	۲۴۵

تحلیل آماری نشان می‌دهد که مدل ریاضی دارای عملکرد قابل قبول تری نسبت به مدل بیضی به کره است. در نهایت در شکل (۱۴) محور Y کالیبره شده با هر دو روش، جهت مقایسه و نتیجه گیری آورده شده است. در این گراف در بخش بزرگ نمایی شده، مشهود است که عملکرد مدل ریاضی قابل قبول تر است. وجود نوسانات در مدل بیضی به کره، عدم توانایی آن نسبت به حذف کامل تعامد محوری را نشان می‌دهد. بنابراین با کار انجام شده می‌توان نتیجه گرفت که مدل ریاضی، قابلیت بالاتری نسبت به مدل بیضی به کره، دارا است.



شکل ۱۴: مقایسه محور Y در هر دو مدل ریاضی و بیضی به کره



شکل ۱۳: محور Z بعد از کالیبراسیون

پارامترها که شامل ماتریس ضرایب و بردار بایاس است با استفاده از حداقل مربعات خطا و روابط بخش قبل محاسبه شدند در جدول (۱) آورده شده‌اند:

جدول ۱: پارامترهای تخمین زده شده مدل ریاضی

پارامتر	مقدار
ماتریس ضرایب	$\begin{bmatrix} 1.57377 & 0.00606 & 0.02693 \\ -0.01755 & 1.12362 & 0.00426 \\ 0.02109 & 0.00776 & 1.02729 \end{bmatrix}$
بردار بایاس (نانوتسلا)	$\begin{bmatrix} -981.7 \\ -3573.6 \\ -981.9 \end{bmatrix}$

همانطور که از جدول (۱) مشهود است ماتریس ضرایب متقارن نیست. علت عدم تقارن آن، استفاده نکردن از مدل بیضی به کره است که دلیل آن در بخش قبل ذکر شد. جهت پی بردن به برتری مدل مورد استفاده نسبت به مدل بیضی به کره، از تحلیل آماری جدول (۳) استفاده شده است. جدول (۲) پارامترهای مدل بیضی به کره آورده شده است.

جدول ۲: پارامترهای تخمین زده شده مدل بیضی به کره

پارامتر	مقدار
ماتریس ضرایب	$\begin{bmatrix} 1.57524 & -0.00767 & -0.00201 \\ -0.00767 & 1.12450 & 0.00220 \\ -0.00201 & 0.00220 & 1.02827 \end{bmatrix}$
بردار بایاس (نانوتسلا)	$\begin{bmatrix} -976.4 \\ -3572.7 \\ -981.1 \end{bmatrix}$

در جدول (۲ و ۱) گین‌های اصلی و بایاس خیلی به هم نزدیک هستند اما گین‌های بین محوری با هم متفاوتند. همچنین در مدل بیضی به کره ماتریس ضرایب متقارن است. این بدلیل دیدگاه فیزیکی مرتبط با

نتیجہ گیری و جمع بندی

با توجه به اهمیت بالای حسگر مغناطیس در ناوبری فضایی، هوایی و صنعتی، کالیبراسیون آن از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. در کار صورت گرفته در این مقاله، دو روش محاسباتی که یکی از آن‌ها دارای دیدگاه فیزیکی و دیگری دارای دیدگاه ریاضی بود، بررسی شدند و قابلیت روش ریاضیاتی اثبات شد. در این مقاله، این روش صرفاً برای کالیبراسیون حسگر به تنهایی استفاده شد و لازم است روش‌های مختلف برای کالیبراسیون حسگر نصب شده در سامانه و همچنین کالیبراسیون حسگر در مدار نیز مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد.

قدردانی

تمام فعالیت‌های انجام شده در این مقاله در مرکز تجمیع، یکپارچه سازی و آزمون پژوهشگاه فضایی ایران صورت پذیرفته است که بدینوسیله از تمامی دست اندرکاران این فعالیت تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

- [1] Andrea Vitali, "6-point tumble sensor calibration", DT0053 Rev 1, Design tip, December 2015
- [2] Sarvenaz Salehi, Navid Mostofi, and Gabriele Bleser, "A practical in field magnetometer calibration method for IMUs", researchgate, October 2012
- [3] John c. Springmann " Attitude-Independent Magnetometer Calibration with Time-Varying Bias"
- [4] Cheng Chi, Jun-Wei Lv and Dan Wang," Calibration of triaxial magnetometer with ellipsoid fitting method", Earth and Environmental Science 237 (2019) 032015
- [5] Val ´erie Renaudin, Muhammad Haris Afzal, and G´erard Lachapelle, " Complete Triaxis Magnetometer Calibration in the Magnetic Domain" Journal of Sensors, Volume 2010, Article ID 967245 , 26 October 2010
- [6] "Calibrating a magnetometer sensor using multiple methods", RESEARCH INITIATION, UE 5.1, AUTONOMOUS ROBOTICS, ENSTA BRETAGNE, 2021
- [7] Andrea Vitali," Ellipsoid or sphere fitting for sensor calibration", DT0059 Rev 3, Design tip, October 2018.