

Kalibrace tyče pro měření nehomogenit magnetismu ve 3D prostoru

Josef Justa, Aleš Hamáček
Katedra technologií a měření
Fakulta elektrotechnická
Západočeská univerzita v Plzni
justjo@ket.zcu.cz

Calibration of the Rod for Measuring Magnetic Nonhomogeneity in 3D

Abstract – The paper briefly presents calibration method of magnetism measuring rod for measuring nonhomogeneity of magnetic field in buildings. Introduced calibration method is based on the least mean square algorithm and corrects error created due to inaccurate sensor placement.

Keywords – Magnetic Field; Indoor; Nonhomogeneity; Rod; Calibration; Least Mean Square.

I. ÚVOD

Nehomogenita magnetismu ve vnitřních prostorech budov velmi stěžuje orientaci pomocí magnetismu v budovách. Avšak za určitých podmínek může být dobrá znalost zakřivení magnetismu dokonce benefitem pro určování pozice v budovách. Princip této výhody se často označuje jako značkování pozic (angl. Position markers). Tyto nezaměnitelné magnetické značky pak mohou označovat přesnou pozici místa v budově, a poté může být pomocí složitějších algoritmů zpřesňována odhadovaná pozice pohybujícího se objektu v budově. Pro účely měření těchto nehomogenit byl vytvořen přípravek pro měření magnetismu v prostoru. [1] [2]

II. KONSTRUKCE MĚŘÍCÍ TYČE

Hlavním důvodem nehomogenit v budovách jsou dobře magneticky vodivé části budov, tedy části obsahující železo (např. betonové armatury, rámy dveří a oken, topení apod.). Celé měřicí zařízení tedy musí být maximálně 197 cm vysoké, aby se vměstnalo pod standardní dvevní zárubeň a bylo možné měřit magnetismus v těsné blízkosti dveří.



Obrázek 1. Fyzická podoba měřicí tyče

Přípravek se skládá z hliníkové tyče, na které je systematicky rozmístěno 6 MEMS senzorů. Rozmístění proběhlo na základě předešlých hrubých měření magnetismu

v budovách, tedy v části umístěné těsně nad zemí je hustota senzorů znatelně vyšší než v části vzdálené od země. Každý ze senzorů obsahuje 3D (3 ortogonálně orientované) magnetometry. Senzor MEMS použitý na tyči pak obsahuje ještě 3D gyroskopy a 3D akcelerometry, které jsou z pohledu měření magnetismu nevyužívány. Avšak akcelerometry nám mohou nabídnout pomoc při kalibraci a při měření kontrolovat svislost umístění tyče. Všechny mechanické části měřicí tyče jsou vytvořeny z nemagnetických materiálů, tedy materiálů s relativní permeabilitou blízkou se jedné (např. hliník, plasty nebo dřevo).

Princip měření magnetismu v prostoru pomocí tyče spočívá v jejím zavěšení do vertikální polohy a posouvání o nepatrné vzdálenosti k poměru předpokládané změny magnetismu. Po interpolaci mezi měřenými body dosáhneme ve výsledku pokrytí celého 3D prostoru v okolí měřeného místa.

III. KALIBRACE MĚŘICÍ TYČE

Především z důvodu nepřesného umístění senzorů, co se týká jejich vzájemného otočení, je nutnost tyč před měřením kalibrovat. Kalibrace by měla proběhnout i pro jednotlivé senzory a jejich citlivost na magnetické pole, ale vzhledem k nedostupnosti regulovatelného homogenního referenčního zdroje magnetismu na univerzitě, musíme věřit přesnostem v datovém listu. Magnetometry v MEMS provedení jsou často založeny na principu Hallova jevu a jejich chyba zisku je v tomto případě uvedena na 5 %.

A. Kalibrační metoda

Pro kalibraci rotace magnetometrů budeme obecně potřebovat homogenní magnetické pole. To lze získat například ve velké vzdálenosti od budov a v dostatečné výšce nad povrchem, kde je předpoklad nezakřiveného geomagnetického pole. V naší situaci je možné se hledání tohoto pole na poli vyhnout, stejným principem totiž můžeme získat data pro kalibraci z akcelerometrů. Díky stejnému ortogonálnímu rozmístění senzorů v pouzdře pak můžeme získané kalibrační otočení aplikovat na magnetometry. V nejlepším případě pak můžeme provést dvě nezávislé kalibrace a data zprůměrovat.

Pro kalibraci rotace je nutné stanovit jednu trojici senzorů jako referenční, a k nim vypočítat chybu natočení ostatních senzorů. Označení jednoho stavu tohoto senzoru budeme značit s indexem „r“, tedy X_r . Pro označení stavu kalibrovaného senzoru využijeme označení X_k . V obou případech se bude jednat o sloupcový vektor pro hodnoty odpovídající měřené veličině senzoru ve směru x, y, a z.

Matematicky můžeme tedy problém specifikovat jako hledání rotační matice R při zápisu

$$[X_r] = [R] * [X_k] \quad (1)$$

Pro hledání této rotační matice využijeme metodu nejmenších čtverců a danou funkci několikanásobně přetížíme.

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \\ R \\ R \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X_{k,1} \\ X_{k,2} \\ \dots \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{r,1} \\ X_{r,2} \\ \dots \end{bmatrix} \quad (2)$$

V kompaktnějším zápisu pak

$$[\epsilon_i] = [R] * [X_{k,i}] - [X_{r,i}] \quad (3)$$

Hledáme tedy takovou rotační matici, aby platilo

$$\min(\epsilon_i' \epsilon_i) \quad (4)$$

Rotační matici získáme ze vztahu

$$[X_{r,i}] = [R] * [X_{k,i}] \quad (5)$$

$$[X_{r,i}][X_{k,i}]' = [R] * [X_{k,i}][X_{k,i}]' \quad (6)$$

$$[X_{r,i}][X_{k,i}]'([X_{k,i}][X_{k,i}]')^{-1} = [R] \quad (7)$$

Tento výpočet je poté nutné opakovat pro zbytek sensorů a celou měřicí tyč tím zkalibrovat k referenčnímu magnetometru.

Bohužel jsme byli nuceni udělat nekorektní krok při převodu vztahu (2) na vztah (5). Je velmi málo pravděpodobné, že by ze všech měření vyšla korektní rotační matice a důsledek toho bude ve výsledku deformace rotační matice. Tento problém bude nastávat při nedostatečném přetížení výpočtu nebo při velké chybě měření.

Rotační matice musí obecně splňovat podmínku ortogonality, tedy

$$R' = R^{-1} \quad (8)$$

Důsledek vztahu (8) je

$$\det(R) = \pm 1 \quad (9)$$

Pro analýzu korektnosti kalibrace a ověření praktické přesnosti sensorů při montáži na měřicí tyči, tedy můžeme využít např. vztah (9).

B. Aplikace kalibrační metody

Při testování kalibrační metody bylo změřeno 13 vzorků s různým natočením v homogenním magnetickém poli a zároveň byla měřicí tyč fixována proti pohybu, aby nebylo měření směru gravitačního zrychlení Země ovlivněno.

TABULKA I. KALIBRAČNÍ MĚŘENÍ

Číslo měření	Magnetometr [μT]			Akcelerometr [m/s^2]		
	x	y	z	x	y	z
1	34,55	14,39	25,91	2,04	-9,03	-2,63
2	18,06	19,63	30,36	6,29	-5,77	-4,78
3	20,42	5,75	46,07	1,08	-9,29	-1,94
...

Výsledné korekční matice určené výpočtem (7)

$$R_{mag} = \begin{bmatrix} 0.6896 & 0.274 & 0.56 \\ -0.126 & 0.781 & -0.453 \\ -0.192 & 0.195 & 1.114 \end{bmatrix} \quad R_{acc} = \begin{bmatrix} 0.992 & 0.161 & 0.03 \\ -0.144 & 0.98 & -0.011 \\ 0.003 & -0.009 & 1.042 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Pro ověření správnosti výpočtu byly vypočteny determinanty matic

$$\det(R_{mag}) = 0,794 \quad \det(R_{acc}) = 1,03 \quad (11)$$

IV. ZÁVĚR

Provedením kalibrační metody byly určeny korekční matice pro eliminaci chyby otočení senzorů na měřící tyči od referenčního senzoru. Odchylka determinantů matic určených z měření magnetometry od ± 1 pramení z nízké korelace signálů při rotaci měřící tyče. Odchylka byla u některých senzorů při měření magnetismu až cca 70 %. Takto velký rozdíl od správné ortogonalita rotačních matic vede k nepoužitelnosti měření magnetismu ve stávající topologii měřící tyče. Vznik této chyby prozatím nebyl objasněn a může pramenit z velké chyby senzorů nebo např. z výskytu dobře magneticky vodivých částí v blízkosti měřící tyče. Při určení korekčních rotačních matic u akcelerometrů nenastal prakticky žádný problém a kalibrace probíhala podle předpokladů.

PODĚKOVÁNÍ

Tento článek vznikl za podpory interního projektu na podporu studentských vědeckých konferencí SVK-2017-008 a projektu SGS-2015-020: Technologické a materiálové systémy v elektrotechnice.

LITERATURA

- [1] JUSTA, J., HAMÁČEK, A. Stanovení magnetického referenčního vektoru a jeho dopady na řešení inverzního problému u MARG senzorů. In *Elektrotechnika a informatika 2016. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2016. s. 157-160. ISBN: 978-80-261-0514-5
- [2] CHUNG, Jaewoo, et al. Indoor location sensing using geo-magnetism. In: *Proceedings of the 9th international conference on Mobile systems, applications, and services*. ACM, 2011. p. 141-154.