

Stanovení magnetického referenčního vektoru a jeho dopady na řešení inverzního problému u MARG senzorů

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

Impact of definition magnetic reference vector to a solution of inverse issue with MARG sensors

Abstract – The paper briefly presents one block of determination rotation from Magnetic, Angular Rate and gravity sensors, the definition of magnetic reference vector. Two methods are discussed and compared deeper.

Keywords – Inclination; MARG sensor; Quaternion; Kalman, Complementary filter; Magnetometer; Geomagnetism;

I. ÚVOD

Základní informace o MARG (Magnetic, Angular Rate and Gravity) senzorech a vyjádření rotace v prostoru popisuje článek [1]. Stanovení referenčních vektorů při definici inerciální soustavy je prvním a zároveň základním problémem při určení rotace objektů v prostoru pomocí MARG senzorů. Pro stanovení magnetického referenčního vektoru je pro tento problém výhodné využít úhlu geomagnetické inklinace.

Hlavní vztah definující chybový vektor rotace MARG senzoru:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_A \\ \epsilon_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_r \\ M_r \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} A_m \\ M_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

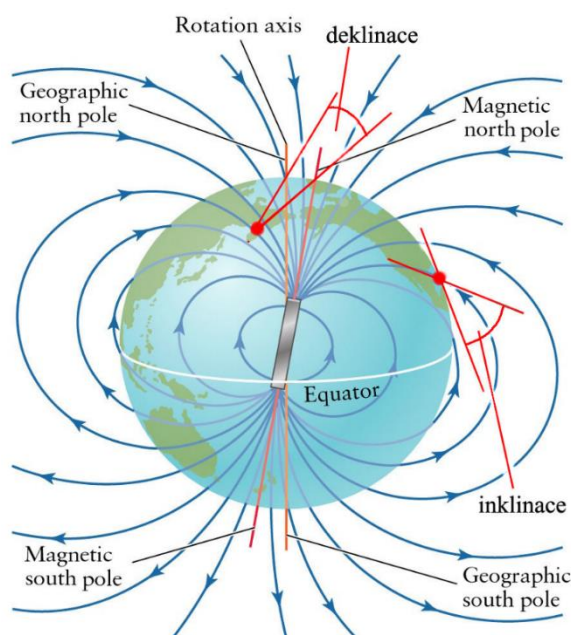
II. URČENÍ INKLINACE GEOMAGNETIZMU

Geomagnetická inklinace je odklon vektoru magnetizmu vyvolaného zeměkoulí od horizontální roviny země. Je tedy rozdílná od magnetické deklinace, která je často zmiňována v kontextu s navigací a vyjadřuje odklon magnetismu Země od geografického pólu. Ze znalosti magnetismu země tedy vyplývá, že úhel inklinace bude závislý na zeměpisných souřadnicích a to především na zeměpisné šířce (díky relativní blízkosti magnetického a geografického pólu).

Na Obrázku I. je symbolicky znázorněna inklinace i deklinace. Inklinace se pohybuje v rozsahu od -90° na jižním magnetickém pólu do 90° na severním magnetickém pólu.

Z předešlého odstavce tedy vyplývá, že pokud známe zeměpisné souřadnice měřeného místa, můžeme určit magnetickou inklinaci ze znalosti chování geomagnetického pole. Problém u většiny měření rotací pomocí MARG senzorů je, že zeměpisné souřadnice neznáme a geomagnetismus se nechová tolik předvídatelně, jak by se na první pohled mohlo zdát. Hlavním problémem je, že požadujeme velmi často měřit natočení v budovách a železné armatury staveb a jiné magneticky vodivé objekty mohou

geomagnetismus a jeho lokální inklinaci značně ovlivňovat. Fixní stanovení inklinace na základě zeměpisných souřadnic tedy není z hlediska praktických požadavků výhodné.



Obrázek I. Geomagnetické pole

A. Definice pomocí dříve změřených rotací

Sebastian Madgwick publikoval metodu na určení magnetického referenčního vektoru dynamicky v komplementárním filtru [2]. Základní vztahy pro získání referenčního vektoru dynamicky:

$$h_r = (m_b * {}^r_b R) = {}^r_b q \times m_b \times {}^r_b q^* \quad (2)$$

$$m_r = [\sqrt{h_x^2 + h_y^2}, 0, h_z] \quad (3)$$

Kde m_r je výsledný referenční vektor. Kvaternion rotace objektu je ${}^r_b q$ a jeho komplexně sdružený kvaternion ${}^r_b q^*$. V pravé části rovnice (1) značka „ \times “ označuje kvaternionové násobení.

Hlavním problémem této uvedené metody je využívání rotace v podobě kvaternionů v rovnici (2), která je při běžném optimalizačním kroku neznámá. Důležitým předpokladem v této metodě je, že odchylka magnetizmu je chybou vycházející z prostředí a musí být pouze krátkodobá. V obecných případech je ${}^r_b q$ neznámá kterou naopak chceme určit a optimalizační krok na řešení inverzního problému se díky stanovení referenčního magnetického vektoru podle [2] stává nestabilní. Díky tomu značně narůstá chyba metody a zároveň klesá její rychlost[3].

B. Přímá definice inklinace

Výhodou u MARG senzorů je, že známe při statickém měření vektor gravitace z akcelerometru. Při standardním měření pomocí MARG senzoru je možné za předpokladu krátkodobých dynamických akcelerací a jejich nulové střední hodnotě filtrovat i dynamické akcelerace dolní propustí akcelerometru.

Díky gyroskopu je možné se vyhnout i zpožděním způsobeným filtrací akcelerometru dolní propustí. Tato filtrace je složitější, existují různé způsoby od komplementárních

přístupů až po stochastické přístupy, které zohledňují více vlastností senzorů. Tato tematika je nad rámec tohoto článku, proto zde byla uvedena jen přehledově.

Pokud podle předešlých informací definujeme měřený vektor gravitace z akcelerometru a gyroskopu jako „ a “. Pak následujícími vztahy můžeme určit cosinus úhlu inklinace (4) a magnetický referenční vektor (5) pro vztah (1).

$$\cos(\alpha) = \frac{a*m}{|a|*|m|} = \frac{a_x*m_x+a_y*m_y+a_z*m_z}{\sqrt{a_x^2+a_y^2+a_z^2}*\sqrt{m_x^2+m_y^2+m_z^2}} \quad (4)$$

$$\sin(\alpha) = \sqrt{1 - \cos^2(\alpha)} \quad (5)$$

$$M_r = [\sin(\alpha), 0, \cos(\alpha)] \quad (6)$$

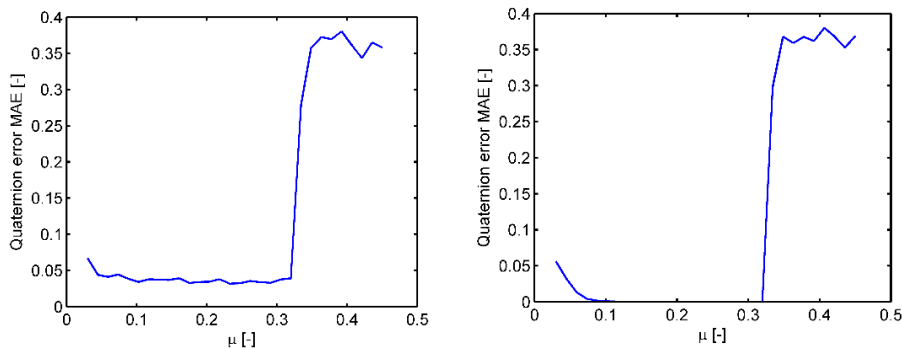
Volbou referenčního vektoru podle (6) stanovujeme osu „ x “ senzoru MARG jako výchozí, pokud je tedy senzor natočen tak, že jeho osa „ x “ míří na magnetický severní pól, výsledná rotace z rovnice (1) bude okolo osy „ z “ nulová (nulový Eulerův úhel „Yaw“). V určitých případech aplikací pro nás tato definice nemusí být výhodná a chceme volit referenční vektor obecně pro rotaci okolo osy „ z “. Pro tento problém je možné využít upravený vztah rovnice (6) na rovnici (7), kde je možné měnit natočení vůči směru na magnetický sever úhlem β .

$$M_r = [\sin(\alpha) \cos(\beta), \sin(\alpha) \sin(\beta), \cos(\alpha)] \quad (7)$$

Tuto vlastnost lze využít například při inicializaci rotace. Ne ve všech aplikacích nám záleží na absolutním úhlu od severního magnetického pólu, ale zajímá nás rotace od proběhnutí inicializace. Často se s touto situací setkáme například ve virtuální realitě.

III. TESTY METOD PRO STANOVENÍ REFERENČNÍCH MAGNETICKÝCH VEKTORŮ

Testy metody byly provedeny na simulovaných datech a podrobnější informace o testech je možné získat z článku [3]. Hlavní cíle testů byli zjistit dopady jednotlivých metod na chyby metody, počet optimalizačních kroků pro dosažení stanovené přesnosti a výpočetní rychlost metody.

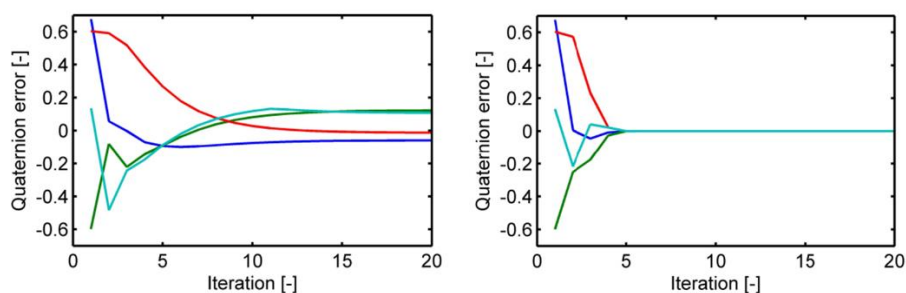


Obrázek II. Porovnání chyb metod na stanovení magnetického referenčního vektoru (vlevo dynamicky, vpravo přímá definice)

Obrázek II. zobrazuje vývoj chyby v závislosti na velikosti parametru délky kroku u metody největšího spádu. Důležitá informace pro nás je obsažena v absolutní hodnotě chyby pro stejnou hodnotu délky kroku mezi oběma metodami.

Pro hodnotu délky kroku 0,2 je průměrná absolutní chyba u dynamické metody 0,0425 a to z podstaty jednotkového kvaternionu odpovídá i relativní chybě rotace 4,25%. Pro stejnou délku kroku je u přímé metody průměrná absolutní chyba $8.33e^{-4}$. Tedy v poměrově je přímá metoda v daném nastavení testu cca 51x přesnější.

Test rychlosti konvergence nepoukazuje na velké změny mezi metodami na určení magnetického referenčního vektoru u metody největšího spádu. U Gauss-Newtonovi metody však došlo ke zlepšení o 20% v rychlosti konvergence pro přímou metodu stanovení referenčního magnetického vektoru.



Obrázek III. Průběhy vývoje chyby (vlevo metoda největšího spádu, vpravo Gauss-Newtonova metoda)

Na obrázku III. Jsou zobrazeny vývoje chyb gradientních metod. U metody největšího spádu byl referenční magnetický vektor definován podle Madgwicka. Vpravo je průběh Gauss-Newtonovy metody s přímou definicí magnetického referenčního vektoru.

IV. ZÁVĚR

V článku byla stručně zmíněna problematika snímání geomagnetického pole a problémy s tím spojené. Jsou zde také uvedeny dvě metody na stanovení referenčního magnetického vektoru a diskutovány jejich dopady na chování gradientních metod pro řešení inverzního problému. Podle provedených testů vychází v mnoha ohledech lépe přímá metoda stanovení magnetického referenčního vektoru.

PODĚKOVÁNÍ

Tento článek vznikl za podpory interního projektu na podporu studentských vědeckých konferencí SVK-2016-006 a projektu SGS-2015-020: Technologické a materiálové systémy v elektrotechnice.

LITERATURA

- [1] JUSTA, J. Představení a praktická aplikace MARG senzorů. In Elektrotechnika a informatika 2015. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2015. s. 157-160. ISBN: 978-80-261-0514-5
- [2] MADGWICK, Sebastian OH; HARRISON, Andrew JL; VAIDYANATHAN, Ravi. Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm. In: 2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics. IEEE, 2011. p. 1-7.
- [3] JUSTA, J., HAMÁČEK, A. Accelerometer-magnetometer static rotation frame on earth. In 39th International Spring Seminar of Electronics Technology (ISSE 2016) : book of abstracts. Piscataway: IEEE, 2016. s. 1-6. ISBN: 978-80-261-0618-0