

Aleksander SAWICKI*

KOMPENSACJA ZABURZEŃ FERROMAGNETYKÓW TWARDYCH WE WSKAZANIACH MAGNETOMETRÓW MEMS

Czujniki magnetometryczne wykonane w technologii MEMS (ang. microelectromechanical system), ze względu na niewielkie wymiary, wagę oraz cenę wykorzystywane są do wyznaczania kierunku północnego w aplikacjach związanych z robotyką mobilną. Na jakość estymacji kąta obrotu wpływ mają zarówno zaburzenia pola magnetycznego powstałe na skutek obecności ferromagnetyków twardych (tzw. Hard–Iron distortion) jak i ferromagnetyków miękkich (tzw. Soft–Iron distortion).

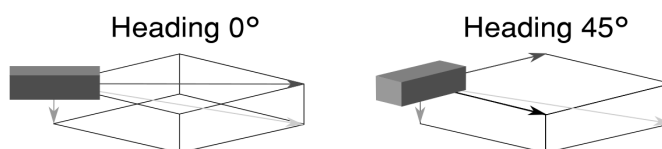
W niniejszym artykule zaprezentowano ideę estymacji kąta heading, procedurę kalibracyjną magnetometru jak i porównanie trzech wybranych algorytmów kompensacji zaburzeń od ferromagnetyków twardych. Prezentowane metody różnią się między sobą złożonością, kosztem numerycznym jak i efektywnością działania.

SŁOWA KLUCZOWE: Hard–Iron, Magnetometr, MEMS

1. ESTYMACJA KĄTA HEADING

1.1. Wstęp

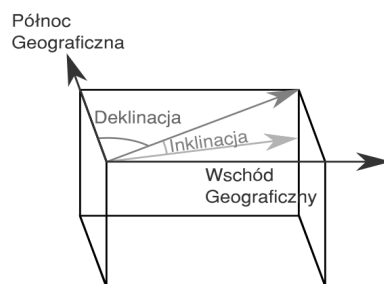
Trójosiowe sensory magnetometryczne wykorzystywane są powszechnie do wyznaczania kierunku północnego w urządzeniach takich jak układy IMU (ang. *Inertial Measurement Unit*), czy układy AHRS (ang. *Attitude and Heading Reference System*). Przy pomocy czujników tego typu możliwe jest wyznaczanie kąta *heading*[1–4], zawartego pomiędzy biegunem magnetycznym ziemi, a wybraną osią (najczęściej osią x) sensora (rys. 1).



Rys. 1. Zmiana wartości kąta *heading* wraz ze zmianą orientacji sensora

* Politechnika Białostocka.

Należy podkreślić, iż czujniki tego typu umożliwiają pomiar wektora pola magnetycznego Ziemi, nie zaś bezpośredni pomiar kierunku północnego (rys. 2). W związku z powyższym definiowane są dwa dodatkowe kąty[1]: inklinacji, zawarty pomiędzy wektorem pola magnetycznego Ziemi, a jego rzutem na oś poziomą; deklinacji, zawarty pomiędzy geograficznym biegunem Ziemi, a rzutem wektora pola magnetycznego na oś poziomą.



Rys. 2. Wizualizacja interpretacji kąta inklinacji oraz deklinacji

W celu wyznaczenia kierunku północnego geograficznego, niezbędne jest dodanie kąta deklinacji do wyznaczonej wartości *heading*. Wartość kąta deklinacji zależy od lokalizacji czujnika na powierzchni kuli ziemskiej (szerokości i długości geograficznej). Warto podkreślić, że informacje o wartości kąta bywają udostępniane w sieci internetowej m.in. przez National Centers for Environmental Information (www.ngdc.noaa.gov/geomag-web).

1.2. Kompensacja przechyleń

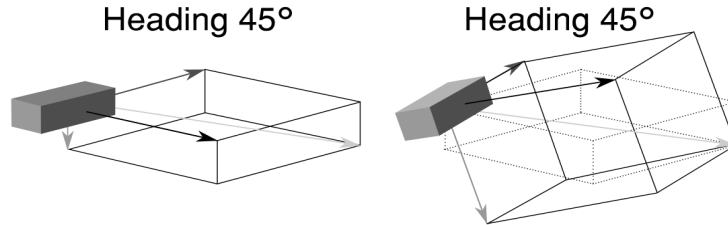
Zastosowanie magnetometru trójosiowego do pomiaru wektora magnetycznego ziemi, skutkuje rozłożeniem wektora na trzy składowe[2] oznaczane jako m_x , m_y oraz m_z (1).

$$\vec{M} = \vec{m}_x + \vec{m}_y + \vec{m}_z \quad (1)$$

gdzie: M – wektor magnetyczny ziemi, m_x – składowa osi x magnetometru, m_y – składowa osi y magnetometru, m_z – składowa osi z magnetometru.

Można uznać, iż biegun magnetyczny ziemi posiada stałą lokalizację, co za tym idzie wektor magnetyczny Ziemi również jest stały. Składowe pola magnetycznego odczytywane z magnetometru zależą natomiast od orientacji czujnika, co przedstawiono na rys. 3.

Bezpośrednie wykorzystanie składowych m_x oraz m_y do wyznaczenia kąta *heading* skutkuje znaczącą zmianą wartości kąta wraz z przechylaniem magnetometru[2–4]. W związku z powyższym niezbędne jest dokonanie przeciwnych obrotów i niejako „rzutowanie” składowych na płaszczyznę poziomą.



Rys. 3. Wizualizacja odczytów magnetometru przy zerowej orientacji oraz przy przechylnym czujniku

W zastosowaniach lotniczych orientacja obiektu reprezentowana jest poprzez zestaw kątów Eulera w konwencji Yaw-Pitch-Roll. W pierwszej kolejności dokonywany jest obrót wokół osi z o kąt ψ , następnie wokół osi y o kąt θ , finalnie wokół osi x o kąt ϕ (2) – (3) [5].

$$R_x(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad R_z(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$R_{xyz} = R_x(\phi)R_y(\theta)R_z(\psi) \quad (3)$$

gdzie: R_{xyz} – macierz rotacji $z \rightarrow y \rightarrow x$, $R_x(\phi)$ – macierz obrotu wokół osi x o kąt ϕ , $R_y(\theta)$ – macierz obrotu wokół osi y o kąt θ , $R_z(\psi)$ – macierz obrotu wokół osi z o kąt ψ .

„Rzutowanie” na płaszczyznę poziomą, odbywa się poprzez przeprowadzenie obrotów o przeciwnych wartościach, w odwrotnej kolejności. Dokonanie rotacji o kąt $(-\phi)$ względem osi x , a następnie o kąt $(-\theta)$ względem osi y powoduje cofnięcie wcześniej dokonanych rotacji (4).

$$\begin{aligned} R_{xyz} &= R_x(\phi) \cdot R_y(\theta) \cdot R_z(\psi) \\ R_x(-\phi)R_{xyz} &= R_x(-\phi) \cdot R_x(\phi) \cdot R_y(\theta) \cdot R_z(\psi) \\ R_x(-\phi)R_{xyz} &= I \cdot R_y(\theta) \cdot R_z(\psi) \\ R_y(-\theta)R_x(-\phi)R_{xyz} &= R_y(-\theta) \cdot R_y(\theta) \cdot R_z(\psi) \\ R_y(-\theta)R_x(-\phi)R_{xyz} &= I \cdot R_z(\psi) \\ R_y(-\theta)R_x(-\phi)R_{xyz} &= R_z(\psi) \end{aligned} \quad (4)$$

gdzie: $R_x(-\phi)$ – macierz obrotu wokół osi x o kąt $-\phi$, $R_y(-\theta)$ – macierz obrotu wokół osi y o kąt $-\theta$, I – macierz jednostkowa/brak obrotu.

W przypadku poddania wektora pomiarowego B_p przekształceniom reprezentujących obroty przeciwne $R_x(-\phi)$ oraz $R_y(-\theta)$ otrzymywany jest wektor zależny bezpośrednio od kąta obrotu *heading* ψ oraz kąta inklinacji δ [6] (5).

$$\begin{aligned}
R_z(\psi) \begin{bmatrix} B \cos(\delta) \\ 0 \\ B \sin(\delta) \end{bmatrix} &= R_y(-\theta) \cdot R_x(-\phi) \cdot B_p \\
\begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} B \cos(\delta) \\ 0 \\ B \sin(\delta) \end{bmatrix} &= R_y(-\theta) \cdot R_x(-\phi) \cdot B_p \quad (5) \\
\begin{bmatrix} B \cos(\delta) \cos \psi \\ -B \cos(\delta) \sin \psi \\ B \sin(\delta) \end{bmatrix} &= R_y(-\theta) \cdot R_x(-\phi) \cdot B_p
\end{aligned}$$

gdzie: δ – kąt inklinacji, B – długość wektora pola magnetycznego Ziemi, B_p – wektor kolumnowy reprezentujący wskazania magnetometru.

Dokonując rozwinięcia macierzy $R_x(-\phi)$ oraz $R_y(-\theta)$ równanie (5) zostaje przekształcone do następujących postaci (6) oraz (7).

$$\begin{bmatrix} h_x \\ h_y \\ h_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \sin \phi & \sin \theta \cos \phi \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ -\sin \theta & \cos \phi \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} B_{px} \\ B_{py} \\ B_{pz} \end{bmatrix} \quad (6)$$

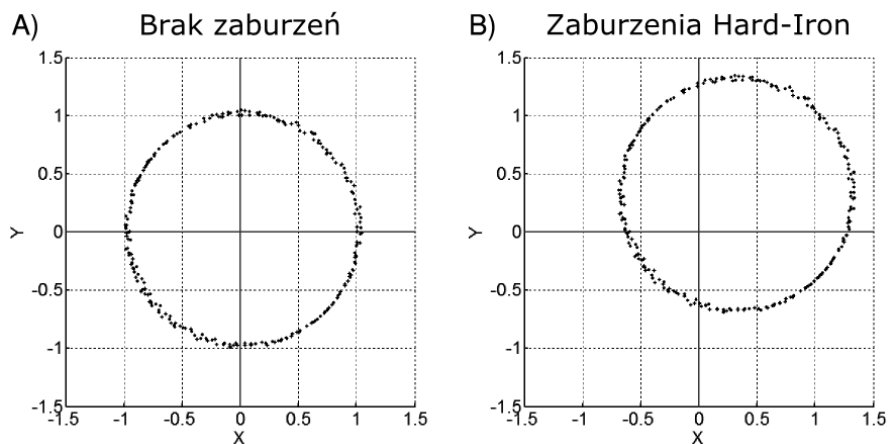
$$\begin{bmatrix} h_x \\ h_y \\ h_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{px} \cos \theta & B_{py} \sin \theta \sin \phi & B_{pz} \sin \theta \cos \phi \\ 0 & B_{py} \cos \phi & -B_{pz} \sin \phi \\ -B_{px} \sin \theta & B_{py} \cos \phi \sin \phi & B_{pz} \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \quad (7)$$

gdzie: h_x , h_y , h_z , – składowe x , y , z magnetometru pozbawionego przechyłów Pitch oraz Roll.

Podkreślić należy, iż do wyznaczenia kierunku północnego niezbędna jest znajomość wyłącznie parametrów h_x oraz h_y . Dodatkowo podczas kompensacji kątów Pitch oraz Roll konieczne jest ich wcześniejsze wyznaczenie. Najczęściej są one obliczane na podstawie danych pomiarowych pochodzących z akcelero-
metru.

1.3. Opis procedury kalibracyjnej

Procedura kalibracyjna magnetometru polega na powolnym obrocie czujnika wokół osi globalnej z , przy jednoczesnej rejestracji danych pomiarowych. W przypadku idealnym, gdy pole magnetyczne pozbawione jest zakłóceń parametry h_x oraz h_y powinny opisywać koło o środku w punkcie $(0, 0)$. W przypadku zaburzeń od ferromagnetyków twardych koło to zostanie przesunięte [1] (rys. 4).

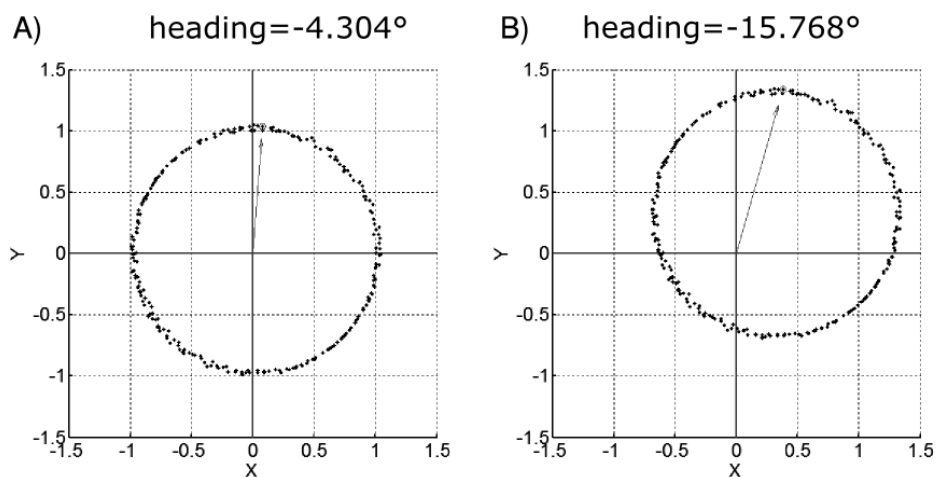


Rys. 4. Symulacja danych pozbawionych A) oraz z zaburzeniami Hard-Iron B)

Proces kalibracji wymaga wyznaczenia środka okręgu oraz przesunięcia figury, tak, aby jej nowy środek znajdował się w punkcie (0, 0). Kąt *heading* wyznaczony jest wtedy na podstawie równania[2]:

$$heading = \arctan 2(h_x, h_y) \quad (8)$$

Na rys. 5 przedstawiono przykładowe wartości kąta *heading*, w przypadku braku zaburzeń jak i przy ich występowaniu. W zależności od przesunięcia środka okręgu, a więc intensywności oddziaływania ferromagnetyków twardych różnica w wartościach wyznaczonych kątów wzrasta.



Rys. 5. Wyznaczenie kąta *heading* przy braku zaburzeń A) oraz z zaburzeniami Hard-Iron B)

2. METODY KOMPENSACJI WPŁYWU EFEKTU HARD-IRON

2.1. Metoda I

Pierwsza z metod charakteryzuje najmniejszy koszt numeryczny, a co za tym idzie z powodzeniem może ona zostać zaimplementowana w dowolnym mikrokontrolerze. W metodzie tej dane analizowane są pod kątem wystąpienia wartości największych i najmniejszych, na podstawie których liczona jest średnia mająca stanowić środek okręgu [7].

$$\begin{aligned} s_x &= \frac{h_{x \max} + h_{x \min}}{2} \\ s_y &= \frac{h_{y \max} + h_{y \min}}{2} \end{aligned} \quad (9)$$

W celu wizualizacji danych można także zdefiniować pomocniczy promień okręgu z pomocą (10).

$$r = h_{x \max} - s_x \quad (10)$$

Należy podkreślić, iż do celów kalibracji niezbędne jest wyznaczenie wyłącznie środka okręgu, który stanowi ostatecznie wartość referencyjną dla pozyskanych danych pochodzących z magnetometru. Warto także wspomnieć, że metoda ta pomimo swoich zalet posiada znaczącą wadę. Wada ta polega na tym, że wynik kalibracji jest podatny na wpływ wszelkiego rodzaju szumu magnetometru.

2.2. Metoda II

Niniejsza metoda kompensacji stanowi modyfikację algorytmu przedstawionego w artykule [8]. Algorytm ten w porównaniu do wcześniej omawianego jest znacznie bardziej rozwinięty. Wykorzystuje on zaawansowane operacje macierzowe, przez co metodę tą charakteryzuje wysoki koszt numeryczny oraz utrudniona implementacja. Analizę metody należy rozpocząć od przekształcenia równania ogólnego okręgu przedstawionego poniżej:

$$(hx_i - s_x)^2 + (hy_i - s_y)^2 = r^2 \quad (11)$$

gdzie: hx_i – i -ty odczyt osi x magnetometru poddany kalibracji od przechyleń, hy_i – i -ty odczyt osi y magnetometru poddany kalibracji od przechyleń, s_x – współrzędna x środka okręgu, s_y – współrzędna y środka okręgu, r – promień okręgu.

Równanie to może zostać przekształcone do postaci algebraicznej (12):

$$\begin{aligned} 2hx_i \cdot s_x + 2hy_i \cdot s_y + s_w &= (hx_i)^2 + (hy_i)^2 \\ s_w &= r^2 - [s_x^2 + s_y^2] \end{aligned} \quad (12)$$

W kolejnym kroku następuje przekształcenie równania do postaci macierzowej:

$$A = \begin{bmatrix} 2hx_1 & 2hy_1 & 1 \\ 2hx_2 & 2hy_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 2hx_n & 2hy_n & 1 \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} s_x \\ s_y \\ s_w \end{bmatrix} \quad c = \begin{bmatrix} (hx_1)^2 + (hy_1)^2 \\ (hx_2)^2 + (hy_2)^2 \\ \vdots \\ (hx_n)^2 + (hy_n)^2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

W następnym etapie dokonywane są obliczenia macierzowe m.in. mnożenie macierzy oraz wyznaczenie macierzy prostokątnej odwrotnej. Operacje te mają na celu wyznaczenie wektora x .

$$A \cdot x = c \quad (14)$$

$$x = (A^T \cdot A)^{-1} A^T c$$

Środek okręgu wyznaczany jest na podstawie wektora x , promień okręgu obliczony jest z parametru s_w (12).

$$s_x = x(1,1) \quad (15)$$

$$s_y = x(2,1)$$

$$r = \sqrt{s_x^2 + s_y^2 + s_w}$$

2.3. Metoda III

Ostatnia z przedstawionych metod stanowi implementację metody najmniejszych kwadratów służącą do dopasowania środka okręgu do zbioru punktów [9]. Algorytm metody w pierwszej kolejności przewiduje wyznaczenie średniej arytmetycznej poszczególnych wartości pomiarowych hx oraz hy (16).

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_i hx_i \quad \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_i hy_i \quad (16)$$

Następnie z ich wykorzystaniem tworzone są wektory u_i oraz v_i .

$$u = \begin{bmatrix} hx_1 - \bar{x} \\ hx_2 - \bar{x} \\ \vdots \\ hx_n - \bar{x} \end{bmatrix} \quad v = \begin{bmatrix} hy_1 - \bar{y} \\ hy_2 - \bar{y} \\ \vdots \\ hy_n - \bar{y} \end{bmatrix} \quad (17)$$

W kolejnym kroku na podstawie wektorów u oraz v tworzone są dodatkowe wektory uu , vv , uuu , vvv , vuu oraz uvv (18).

$$uu = \begin{bmatrix} u_1^2 \\ u_2^2 \\ \vdots \\ u_n^2 \end{bmatrix} \quad vv = \begin{bmatrix} v_1^2 \\ v_2^2 \\ \vdots \\ v_n^2 \end{bmatrix} \quad vuu = \begin{bmatrix} v_1 u_1^2 \\ v_2 u_2^2 \\ \vdots \\ v_n u_n^2 \end{bmatrix} \quad uuu = \begin{bmatrix} u_1^3 \\ u_2^3 \\ \vdots \\ u_n^3 \end{bmatrix} \quad vvv = \begin{bmatrix} v_1^3 \\ v_2^3 \\ \vdots \\ v_n^3 \end{bmatrix} \quad uvv = \begin{bmatrix} u_1 v_1^2 \\ u_2 v_2^2 \\ \vdots \\ u_n v_n^2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Wektory te są następnie sumowane (19).

$$s_{uu} = \sum_i uu_i \quad s_{vv} = \sum_i vv_i \quad s_{uvv} = \sum_i uvv_i \quad (19)$$

$$s_{uuu} = \sum_i uuu_i \quad s_{vvv} = \sum_i vvv_i \quad s_{vuu} = \sum_i vuu_i$$

Obliczone współczynniki wykorzystane są do rozwiązania układu równań (20). Zmienne zdefiniowane jako u_c oraz v_c są niewiadomymi i służą do wyznaczenia środka okręgu.

$$\begin{cases} u_c \cdot s_{uu} + v_c \cdot s_{uv} = 0.5 \cdot (s_{uuu} + s_{uvv}) \\ u_c \cdot s_{uv} + v_c \cdot s_{vv} = 0.5 \cdot (s_{vvv} + s_{vuu}) \end{cases} \quad (20)$$

Równanie to może zostać zapisane w sposób macierzowy, na podstawie którego wyznaczane są współczynniki u_c oraz v_c . Podkreślić należy, iż liczona jest macierz odwrotna macierzy kwadratowej o wymiarach 2×2 .

$$\begin{bmatrix} s_{uu} & s_{uv} \\ s_{uv} & s_{vv} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_c \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 \cdot (s_{uuu} + s_{uvv}) \\ 0.5 \cdot (s_{vvv} + s_{vuu}) \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} u_c \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{1}{s_{uu}s_{vv} - s_{uv}^2} \cdot \begin{bmatrix} s_{vv} & -s_{uv} \\ -s_{uv} & s_{uu} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0.5 \cdot (s_{uuu} + s_{uvv}) \\ 0.5 \cdot (s_{vvv} + s_{vuu}) \end{bmatrix}$$

Środek okręgu wyznaczany jest poprzez dodanie do zmiennych u_c oraz v_c wartości średnich (22).

$$\begin{aligned} s_x &= u_c + \bar{x} \\ s_y &= v_c + \bar{y} \end{aligned} \quad (22)$$

Promień okręgu (wyznaczony wyłącznie w celu wizualizacji), obliczony jest z parametru α (23).

$$\begin{aligned} \alpha &= u_c^2 + v_c^2 + \frac{s_{uu} + s_{vv}}{N} \\ r &= \sqrt{\alpha} \end{aligned} \quad (23)$$

3. WYNIKI DOŚWIADCZEŃ ORAZ WNIOSKI

W celu sprawdzenia efektywności przedstawionych algorytmów dane pomiarowe zgromadzono za pomocą eksperymentalnego modułu monitoringu ruchu powietrznego bezzałogowych statków powietrznych (rys. 6) opracowywanego w Katedrze Elektrotechniki Teoretycznej i Metrologii Wydziału Elektrycznego Politechniki Białostockiej. Urządzenie to wyposażone jest między innymi w mikroprocesor STM32L4, magnetometr cyfrowy LIS3MDL, akcelerometr LIS331DLH oraz żyroskop L3GD20H.

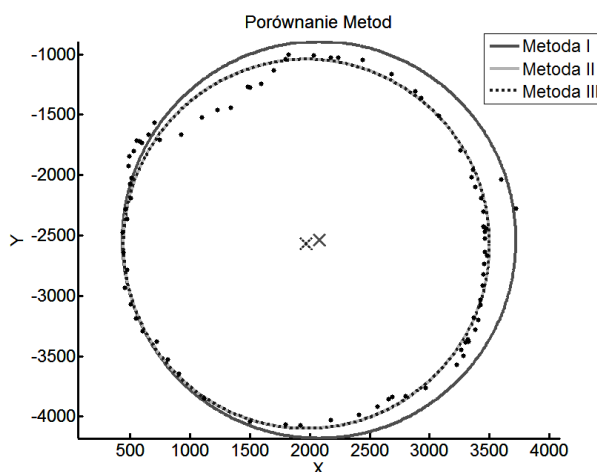
Dane pomiarowe zapisywano w czasie eksperymentów na karcie SD, a następnie poddawano je dalszej analizie za pomocą programu MATLAB. Osiągnięte wyniki przedstawiono w postaci graficznej na rys. 7. oraz w tabeli 3.1.

Podczas realizacji pracy badawczej zaimplementowano trzy algorytmy wyznaczania środka okręgu, służące do kompensacji zjawiska zaburzeń pola magnetycznego Hard-Iron distortion. Pierwsza z opisywanych metod charakteryzuje się najmniejszym kosztem numerycznym oraz łatwością implementacji w języku programowania niskiego poziomu. Algorytm ten nie jest jednak odporny

na jakiegokolwiek zaburzenia magnetometru. Na rys. 7 zaobserwować można przesunięcie środka okręgu w prawo, oraz nieoptymalne dopasowanie figury do punktów pomiarowych.



Rys. 6. Moduł monitoringu ruchu powietrznego bezzałogowych statków powietrznych



Rys. 7. Wizualne porównanie trzech opisywanych metod

Tabela 3.1. Wyniki doświadczeń poszczególnych metod kompensacji efektu Hard-iron

	METODA I	METODA II	METODA III
S_x	2079,0	1973,3	1973,3
S_y	-2537,0	-2570,1	-2570,1
r	1643,0	1528,9	1528,9

Druga z opisywanych metod charakteryzuje wysoki koszt numeryczny, oraz złożona implementacja (14). Algorytm ten, jest odporny na zaburzenia sensora pomiarowego, o czym może świadczyć lepsze dopasowanie okręgu do punktów pomiarowych na rys. 7.

Ostatni z opisywanych algorytmów charakteryzuje wysoki koszt numeryczny, oraz względnie prosta implementacja. Metoda ta bazuje na metodzie najmniejszych kwadratów, co zapewnia dobre dopasowanie okręgu do punktów pomiarowych. Na uwagę zasługuje również fakt, że zastosowanie metody II oraz metody III skutkuje otrzymaniem dokładnie takich samych rezultatów.

Ze względu na odporność na zaburzenia oraz stosunkowo prostą implementację algorytmu III w przyszłości planowane jest jego zastosowanie w module monitoringu ruchu powietrznego bezzałogowych statków powietrznych.

*Badania zostały zrealizowane w ramach pracy MB/WE/4/2016
i sfinansowane ze środków na naukę MNiSW.*

LITERATURA

- [1] Chen W., Chen R., Chen Y., Kuusniemi H., Fu Z., Wang J., An adaptive calibration approach for a 2-axis digital compass in a low-cost pedestrian navigation system, Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), ISBN: 978-1-4244-2832-8, 2010.
- [2] Navarro D., Benet G., Magnetic map building for mobile robot localization purpose, Emerging Technologies & Factory Automation, 2009. ETFA 2009. IEEE Conference. ISBN: 978-1-4244-2727-7, 2009.
- [3] Yu Q., Cheng L., Zhang Q., Chen Y., Wu H., Zhu Q., Wang Y., Liu N., Research on magnetic compass calibration for air-ground amphibious robot system, Proceedings of the 35th Chinese Control Conference, ISBN: 978-1-5090-0910-7, 2016.
- [4] Fang J., Sun H., Cao J., Zhang X., Tao Y., A Novel Calibration Method of Magnetic Compass Based on Ellipsoid Fitting, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement (Volume: 60, Issue: 6), ISSN: 0018-9456, 2011.
- [5] Ozyagcilar. T, Calibrating an eCompass in the Presence of Hard- and Soft-Iron Interference, Nota katalogowa AN4246 Freescale Semiconductor, Rev. 4.0, 2015.
- [6] Ozyagcilar. T, Calibrating Implementing a Tilt-Compensated eCompass using Accelerometer and Magnetometer Sensors, Nota katalogowa AN4248 Freescale Semiconductor, Rev. 4.0, 2015.
- [7] Witczak A., FPV Headtracker inercyjny sterownik ruchu (1), Elektronika Praktyczna, 16-25, ISSN 1230-3526, Sierpień 2015
- [8] Huang Y.-C., Chen T.-L., Chiu B.-C., Yi C.-W., Lin C.-W., Yeh Y.-J., Kuo L.-C., Calculate Golf Swing Trajectories from IMU Sensing Data, 41st International Conference on Parallel Processing Workshops, 2012, ISBN: 978-1-4673-2509-7.
- [9] Bullock R., 'Least-Squares Circle Fit', Developmental Testbed Center, 2006 http://www.dtcenter.org/met/users/docs/write_ups/circle_fit.pdf

THE COMPENSATION OF HARD IRON DISTORTIONS IN THE MEMS MAGNETOMETERS MEASUREMENTS

The magnetometer sensors, manufactured in microelectromechanical system (MEMS) technology, due to small dimension, weight and price are used for the north direction determination in applications related to a mobile robotics.

The quality of the rotation angle estimation is influenced by disturbances of the magnetic field caused by both the presence of hard ferromagnetic (so-called Hard-Iron distortion) and soft ferromagnetic materials (so-called Soft-Iron distortion).

The article presents the idea of *heading* angle estimation, magnetometer calibration procedure and compares three selected compensative algorithms of Hard-Iron distortion. Described methods differ in complexity, numerical cost and efficiency. The presented methods vary in complexity, numerical expense and efficiency.

(Received: 27. 01. 2017, revised: 16. 02. 2017)