

Badanie modułu przyspieszenia na potrzeby diagnostyki czujników inercyjnych

Streszczenie. W artykule przedstawione zostały wyniki badań stabilności modułu przyspieszenia grawitacyjnego czujników inercyjnych wykonanych w technologii MEMS (Micro Electro Mechanical Systems). Tego typu pomiary analizowane są w szczególności na potrzeby tzw. nawigacji inercyjnej. W referacie zaprezentowano badania porównawcze dwóch czujników wykonanych w technologii MEMS, na podstawie których wybrano najlepsze rozwiązanie pod względem stabilności modułu przyspieszenia grawitacyjnego.

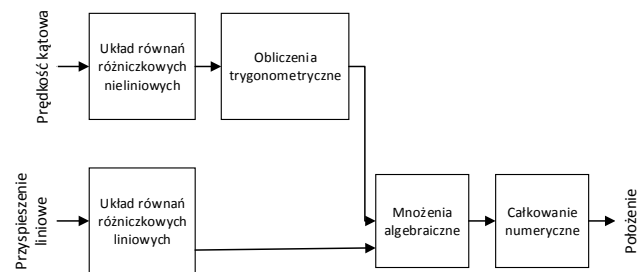
Abstract. The article presents the results of the stability study of the gravitational acceleration module of inertial sensors performed in MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) technology. Such measurements are analysed in particular for the needs of inertial navigation. The paper presents comparative studies of two sensors made in MEMS technology, based on which the best solution in relation to stability of the gravitational acceleration module has been selected. **The stability study of the gravitational acceleration module of inertial sensors**

Słowa kluczowe: diagnostyka czujników inercyjnych, nawigacja bezwładnościowa, akcelerometr

Keywords: diagnostics of inertial sensors, inertial navigation, accelerometer

Wstęp

Czujniki inercyjne wykonane w technologii MEMS (ang. Micro Electro Mechanical Systems) są szeroko wykorzystywane w wielu aplikacjach związanych z wykrywaniem ruchu człowieka, maszyn czy pojazdów [1,2,3]. Obecnie rozwijana jest nawigacja inercyjna, w której podstawowymi czujnikami są akcelerometry i żyroskopy. Podstawową zaletą takiego systemu w odróżnieniu od odbiornika GPS (ang. Global Positioning System) jest możliwość jego funkcjonowania niezależnie od układów zewnętrznych [4,5,6]. Na rys.1 przedstawiono przykładowy schemat blokowy algorytmu umożliwiającego wyznaczenie położenia.



Rys. 1. Schemat blokowy algorytmu dla systemu nawigacji inercyjnej

Dokładność wyznaczania położenia w takich systemach zależy od bardzo wielu czynników [7]. Jednym z nich jest systematyczny błąd pomiaru przyspieszenia, który po podwójnym całkowaniu rośnie z kwadratem czasu. W celu zwiększenia dokładności pomiaru w takim systemie niezbędne jest wyznaczenie przesunięcia osi akcelerometru (offset) [8, 9,10].

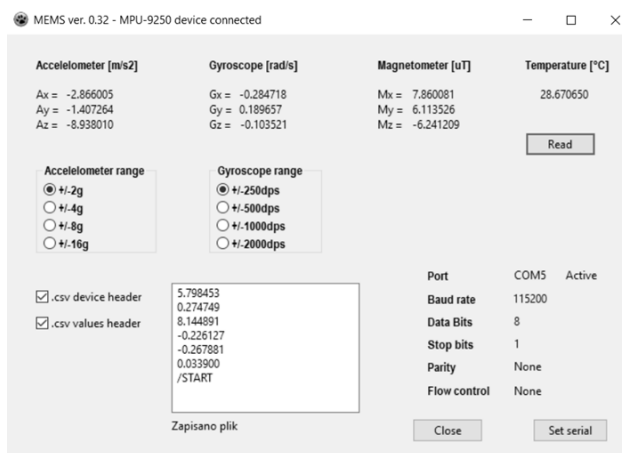
Celem pracy było wykonanie pomiarów umożliwiających porównanie wybranych czujników inercyjnych pod kątem stabilności modułu przyspieszenia przy zmianie orientacji przestrzennej. Ponadto wykonano kalibrację polegającą na korekcie przesunięć dla każdej z osi akcelerometru tak aby wartość zmierzonego przyspieszenia grawitacyjnego wynosiła w każdym przypadku 1g.

Stanowisko laboratoryjne

W ramach pracy przeprowadzono badania następujących czujników wykonanych w technologii MEMS:

- LSM9DS1 firmy STMicroelectronics [11],
- MPU-9250 firmy InvenSense [12].

Konfiguracja parametrów pracy sensorów odbywa się poprzez wykorzystanie autorskiej aplikacji, której interfejs graficzny przedstawiono na rysunku 2. Umożliwia ona również zadawanie zakresu pomiarowego dla akcelerometru i żyroskopu, jednokrotny odczyt wartości oraz wykonywanie pomiaru przez określony odcinek czasu (w tym przypadku dane zapisywane są w postaci pliku z rozszerzeniem CSV).



Rys. 2. Interfejs graficzny aplikacji

Pomiary czujnika inercyjnego zostały wykonane z wykorzystaniem autorskiej platformy obrotowej, wykonanej w technologii druku 3D, umożliwiającej precyzyjne zadawanie położenia kątownego. Sensor zamontowano tak, aby kierunek osi obrotu był prostopadły do wektora przyspieszenia grawitacyjnego i jednocześnie zgodny z osią Z akcelerometru w pierwszym przypadku i osią Y w drugim przypadku. Widok stanowiska laboratoryjnego przedstawiono na rys. 3.

Metodyka badań

Dla każdego z czujników, pomiary zostały przeprowadzone w następujący sposób:

- zadanie określonego położenia kątownego,
- rejestracja składowych a_x , a_y , a_z przez 5 sekund dla każdego położenia kątownego, co przy częstotliwości

próbki 100 Hz odpowiada zarejestrowaniu 500 próbek,

- wyznaczenie wartości średniej składowych a_x , a_y , a_z ,
- wyznaczenie modułu przyspieszenia zgodnie ze wzorem:

$$(1) \quad |g| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$$

gdzie:

$a_{x,y,z}$ - zmierzone wartości przyspieszenia ziemskiego,

- wykreślenie charakterystyki modułu przyspieszenia grawitacyjnego w funkcji położenia kąowego,
- wyznaczenie wartości średniej modułu przyspieszenia grawitacyjnego i odchylenia standardowego,
- wyznaczenie wartości przesunięcia każdej z osi akcelerometru a_{kx} , a_{ky} , a_{kz} . Polegało ono na zamocowaniu sensora tak aby oś, dla której szukana jest wartość przesunięcia, była ustawiona zgodnie z kierunkiem i zwrotem linii sił pola grawitacyjnego Ziemi. Wartości a_{kx} , a_{ky} , a_{kz} obliczono zgodnie ze wzorem:

$$(2) \quad a_{kx,ky,kz} = a_{x,y,z} - g_t$$

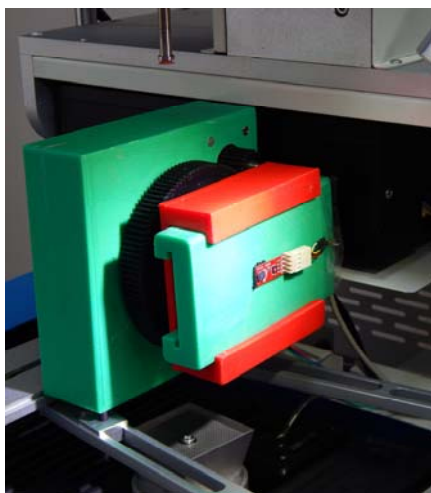
gdzie:

$g_t = 9,8123 \left[\frac{m}{s^2} \right]$ - teoretyczna wartość przyspieszenia ziemskiego dla Warszawy,

- wyznaczenie modułu przyspieszenia grawitacyjnego po uwzględnieniu wartości przesunięć każdej z osi, zgodnie ze wzorem:

$$(3) \quad |g| = \sqrt{(a_x - a_{kx})^2 + (a_y - a_{ky})^2 + (a_z - a_{kz})^2}$$

- wykreślenie charakterystyki modułu przyspieszenia grawitacyjnego w funkcji położenia kąowego z uwzględnieniem wartości przesunięć każdej osi,



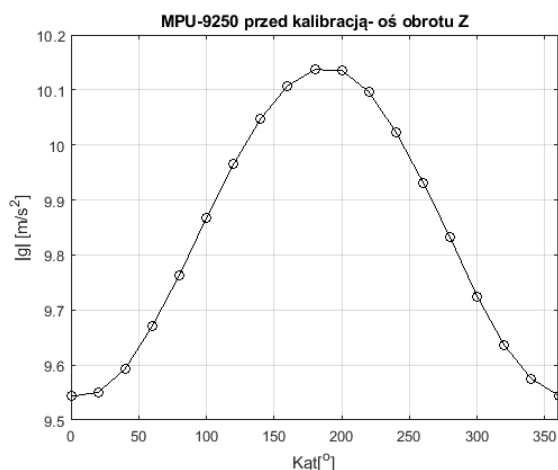
Rys. 3. Stanowisko laboratoryjne do zadawania położenia kąowego

Wyniki badań

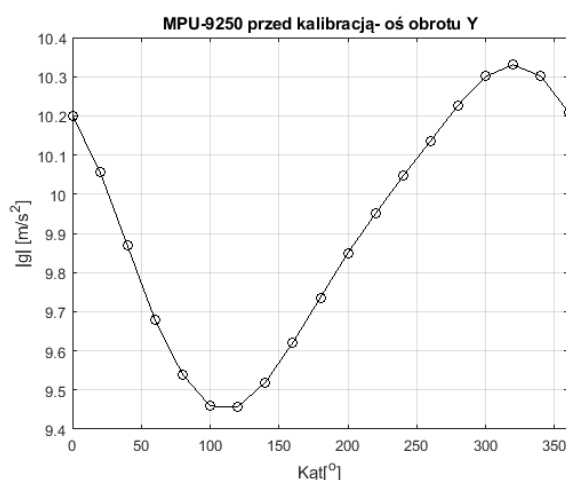
W pierwszym etapie wykonane zostały badania sensora MPU-9250. Na rys.4 przedstawiono wykres zależności wartości modułu przyspieszenia od położenia kąowego w przypadku, gdy oś obrotu była zgodna z osią Z akcelerometru.

Kolejny wykres (rys.5) dotyczy przypadku, w którym kierunek osi obrotu jest zgodny z osią Y akcelerometru.

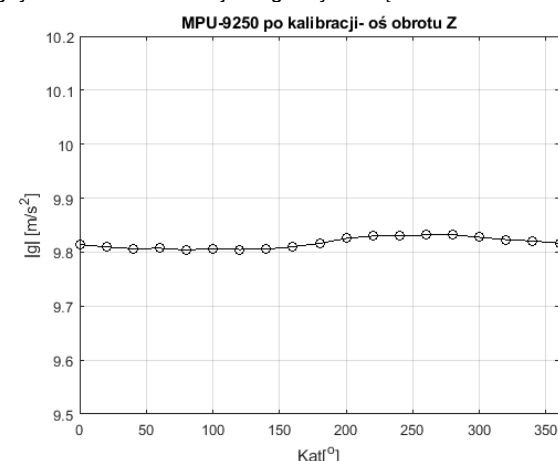
Następnie wyznaczono wartości przesunięć każdej z osi korzystając ze wzoru (2). Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 1.



Rys. 4. Wykres zależności wartości modułu przyspieszenia grawitacyjnego od położenia kąowego dla MPU-9250, gdy kierunek osi obrotu jest zgodny z osią Z akcelerometru



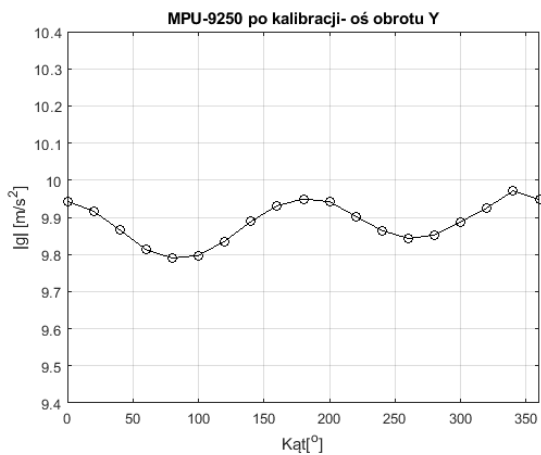
Rys. 5. Wykres zależności wartości modułu przyspieszenia grawitacyjnego od położenia kąowego dla MPU-9250, gdy kierunek osi obrotu jest zgodny z osią Y akcelerometru



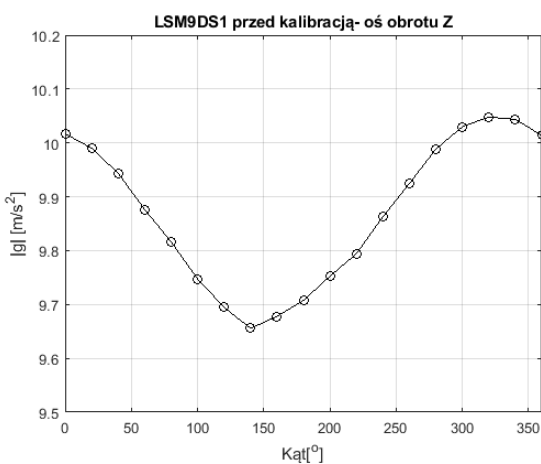
Rys. 6. Wykres zależności wartości modułu przyspieszenia grawitacyjnego od położenia kąowego z uwzględnieniem wartości przesunięć osi dla MPU-9250, gdy kierunek osi obrotu jest zgodny z osią Z akcelerometru

Tabela 1. Wyznaczone wartości przesunięć osi dla czujnika MPU-9250

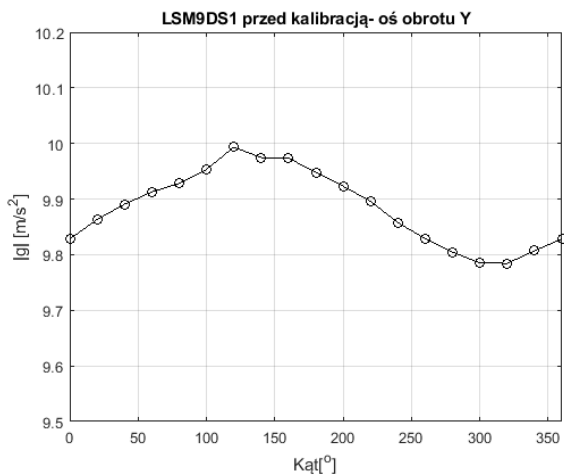
a_{kx}	0,340
a_{ky}	0,288
a_{kz}	0,275



Rys. 8. Wykres zależności wartości modułu przyspieszenia grawitacyjnego od położenia kąowego z uwzględnieniem wartości przesunięć osi dla MPU-9250, gdy kierunek osi obrotu jest zgodny z osią Y akcelerometru



Rys. 9. Wykres zależności wartości modułu przyspieszenia grawitacyjnego od położenia kąowego dla LSM9DS1, gdy kierunek osi obrotu jest zgodny z osią Z akcelerometru



Rys. 10. Wykres zależności wartości modułu przyspieszenia grawitacyjnego od położenia kąowego dla LSM9DS1, gdy kierunek osi obrotu jest zgodny z osią Y akcelerometru

Po uwzględnieniu współczynników przesunięcia każdej z osi skorygowano wartość modułu przyspieszenia grawitacyjnego i ponownie wykreślono charakterystykę zależności wartości modułu przyspieszenia od położenia kąowego. Rysunek 6 przedstawia przypadek, w którym oś obrotu była zgodna z osią Z akcelerometru.

Na rysunku 7 przedstawiono wykres dla przypadku, w którym oś obrotu była zgodna z osią Y akcelerometru.

W kolejnym etapie wykonane zostały badania sensora LSM9DS1. Na rysunku przedstawiono wykres zależności wartości modułu przyspieszenia od położenia kąowego dla czujnika LSM9DS1, w przypadku, gdy oś obrotu była zgodna z osią Z akcelerometru.

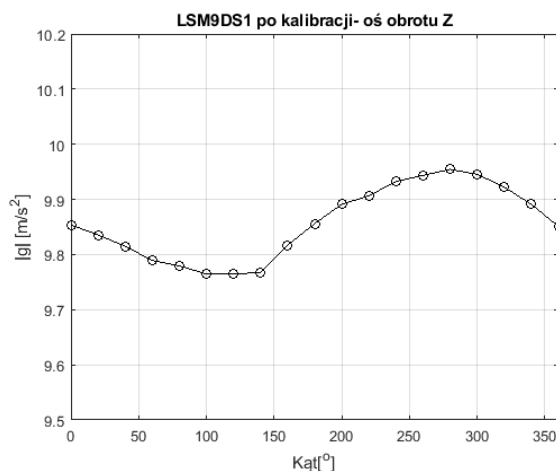
Kolejny wykres dotyczy przypadku w którym kierunek osi obrotu był zgodny z osią Y akcelerometru.

Wartości przesunięć wyznaczone dla tego czujnika przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wartości przesunięć osi dla czujnika LSM9DS1

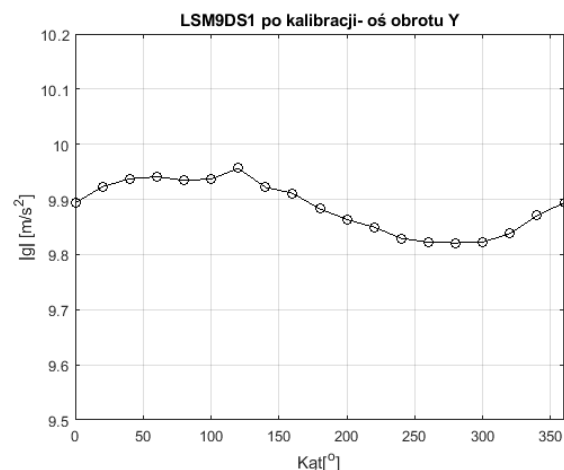
a_{kx}	0,150
a_{ky}	-0,160
a	0,070
kz	

Po wyznaczeniu wartości przesunięć przedstawionych w tabeli 2 ponownie wykreślono wartości modułu przyspieszenia od położenia kąowego dla czujnika LSM9DS1.



Rys. 11. Wykres zależności wartości modułu przyspieszenia grawitacyjnego od położenia kąowego z uwzględnieniem wartości przesunięć osi dla LSM9DS1, gdy kierunek osi obrotu jest zgodny z osią Z akcelerometru

Na rysunku 12 przedstawiono wykres dla przypadku, w którym oś obrotu była zgodna z osią Z akcelerometru.



Rys. 12. Wykres zależności wartości modułu przyspieszenia grawitacyjnego od położenia kąowego z uwzględnieniem wartości przesunięć osi dla LSM9DS1, gdy kierunek osi obrotu jest zgodny z osią Y akcelerometru

W tabeli 3 zestawiono wartości średnie oraz odchylenia standardowe dla badanych czujników.

Tabela 3. Wyniki pomiaru

Czujnik	Oś obrotu	Wartość średnia	Odchylenie standardowe
MPU-9250 przed kalibracją	Z	9,8286	0,2226
	Y	9,9205	0,3091
MPU-9250 po kalibracji	Z	9,8169	0,0103
	Y	9,8840	0,0523
LSM9DS1 przed kalibracją	Z	9,8729	0,1382
	Y	9,8823	0,0705
LSM9DS1 po kalibracji	Z	9,8590	0,0630
	Y	9,8813	0,0465

Podsumowanie

Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że przed uwzględnieniem współczynników przesunięć osi akcelerometru, pomiary wykonane czujnikiem LSM9DS1 charakteryzowały się mniejszą wartością odchylenia standardowego niż pomiary wykonane sensorem MPU-9250.

Wykonanie kalibracji polegającej na uwzględnieniu wartości przesunięć pozwoliło uzyskać mniejsze wartości odchyień standardowych, szczególnie w przypadku czujnika MPU-9250. Również wartość średnia modułu przyspieszenia grawitacyjnego jest bliższa wartości teoretycznej.

Wykorzystanie dedykowanych rejestrów (*OFFSET REGISTERS*) sensora MPU-9250 przeznaczonych do zadeklarowania wartości przesunięcia poszczególnych osi pozwala zwiększyć dokładność wykonywanych pomiarów.

Autorzy: mgr inż. Rafał Białek, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: rafal.bialek@wat.edu.pl;

dr inż. Michał Wiśnios, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: michal.wisnios@wat.edu.pl;

dr hab. inż. Marek Kuchta, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: marek.kuchta@wat.edu.pl;

LITERATURA

- [1] Bora D. J., Kumar N., Dutta R.: Implementation of wireless MEMS sensor network for detection of gait events, IET Wireless Sensor Systems, 2019, Vol:9, Issue:1, pp. 48-52,
- [2] Awasthi S.; Joshi A.: MEMS accelerometer based system for motion analysis, 2015 2nd International Conference on Electronics and Communication Systems (ICECS), 26-27 Feb. 2015,
- [3] Ivanov A.V., Skripnik T.: Human-Machine Interface with Motion Capture System for Prosthetic Control, 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus) 28-31 Jan. 2019,
- [4] Willemsen T, Keller F., Sternberg H.: Concept for building a MEMS based indoor localization system, 2014 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 27-30 Oct. 2014
- [5] Yao L., Andy Wu Y.W., Yao L., Liao Z. Z., An integrated IMU and UWB sensor based indoor positioning system, 2017 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 18-21 Sept. 2017,
- [6] Z.C. Wu, Z.F. Wang and Y. Ge, "Gravity based online calibration of monolithic tri-axial accelerometers' gain and offset drift.", in Proc.4-th Wodd Congress on Intelligent Control and Automation., 10-14 June. 2002,
- [7] Dai G., Yu H., Su W., Shao B., Li M.: Systematic error analysis and modeling of MEMS close-loop capacitive accelerometer, 2010 IEEE 5th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, 20-23 Jan. 2010,
- [8] Liang Q., Litvinenko A. Y., Stepanov O. A.: A Solution to the Attitude Problem Using Two Rotation Units of Micromechanical Gyroscopes, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS 2019, Vol: PP, Issue:99,
- [9] M Sawicki, T Sondej, Niskokosztowe sensory MEMS w systemach nawigacji inercyjnej, Pomiary, Automatyka, Kontrola vol. 68, nr 8/2012,
- [10] Chiu Y.; Hong H.; Chang Ch.: Three-axis CMOS MEMS inductive accelerometer with novel Z-axis sensing scheme, 2017 19th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS), 18-22 June 2017,
- [11] Nota katalogowa MPU-9250, www.invensense.com, 2016,
- [12] Nota katalogowa LSM9DS1, www.st.com, 2016.