

STANOWISKO DO BADAŃ INERCYJNYCH JEDNOSTEK POMIAROWYCH WYKONANYCH W TECHNOLOGII MEMS

ZDZISŁAW GOSIEWSKI*, DANIEL OŁDZIEJ**, MACIEJ SŁOWIK**

Instytut Lotnictwa, Politechnika Białostocka***

Streszczenie

Niniejsza praca przedstawia zbudowane przez autorów stanowisko do badań inercyjnych jednostek pomiarowych stosowanych w bezzałogowych aparatach latających (w skrócie BAL). Scharakteryzowano wybraną jednostkę pomiarową. Omówiono budowę oraz elementy składowe stanowiska badawczego. Dalej przedstawiono sposób realizacji oraz wyniki pomiarów drogi kątowej przy użyciu opisywanego stanowiska w różnych temperaturach pracy. Zaprezentowano wyniki pomiarów uzyskane z wbudowanych w jednostkę pomiarową giroskopów oraz akcelerometrów. Następnie przedstawiono zagadnienia związane z obliczaniem błędów wskazań inercyjnej jednostki pomiarowej.

WPROWADZENIE

Wraz z rozwojem technologii lotniczej pojawiła się potrzeba coraz dokładniejszego określania swojego miejsca i orientacji względem otoczenia. Szczególnie pozycjonowanie obiektów w przestrzeni powietrznej odgrywa kluczową rolę dla zapewnienia bezpieczeństwa i pomyślności odbywania lotów. Bezzałogowe statki powietrzne w swoim autonomicznym działaniu wykorzystują szeroką gamę czujników:

- akcelerometry
- giroskopy
- magnetometry
- barometryczne czujniki wysokości
- zbliżeniowe czujniki wysokości
- moduły GPS
- itp.

Współczesna technika oferuje skonsolidowane moduły czujnikowe, które określa się mianem IMU (z ang. Inertial Measurement Unit) – inercyjne jednostki pomiarowe. Zawierają one trzy giroskopy, trzy akcelerometry, czujnik temperatury oraz opcjonalnie 3 magnetometry. Potrójne czujniki działają względem każdej z wzajemnie prostopadłych osi x , y oraz z [1].

Obecnie w wielu ośrodkach naukowych prowadzi się pracę nad badaniem czujników położenia i orientacji, jednak ich szeroka gama oraz zmiany wprowadzane w kolejnych partiach produktów wymagają sprawdzającego ich przebadania, celem wskazania stopnia użytecz-

ności i możliwości zastosowania. Przebadano wiele giroskopów w jednostkach IMU obracając je wokół kolejnych osi i mierząc ich wskazania. Dalej porównywano odczyty z rzeczywistą prędkością kątową jaka miała miejsce podczas obrotu.

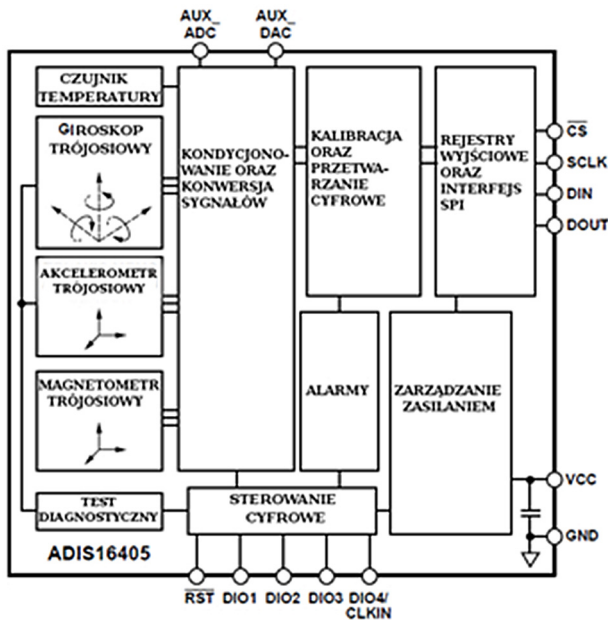
Postanowiono zbudować własne stanowisko do badań zmian orientacji i położenia BAL (Bezzałogowych Aparatów Latających) umożliwiające badanie powtarzalności inercyjnych jednostek pomiarowych z danej serii, dokładności wskazań oraz rzeczywistego zakresu pomiarowego (np. wskazania prędkości kątowych giroskopów dla wolnych i szybkich obrotów BAL).

1. INERCYJNA JEDNOSTKA POMIAROWA

Budowa stanowiska laboratoryjnego rozpatrywana jest pod kątem zastosowania go do testów dla konkretnego bloku pomiarowego firmy Analog Devices. Niemniej stanowisko ma być uniwersalnym stanowiskiem badawczym, wykorzystywanym do testowania dowolnych jednostek pomiarowych, pojedynczych giroskopów, akcelerometrów, a także magnetometrów.

Wybrano inercyjny blok pomiarowy wspomnianej firmy Analog Devices, która była jednym z prekursorów zintegrowanych jednostek pomiarowych. Produkt z rodziny ADIS typ 16405 posłużył jako jednostka testowa dla stanowiska laboratoryjnego.

Funkcjonalny schemat blokowy systemu ADIS przedstawiono na rys. 1, a jego fotografie na rys. 2.



Rys. 1. Schemat blokowy ADIS 16405

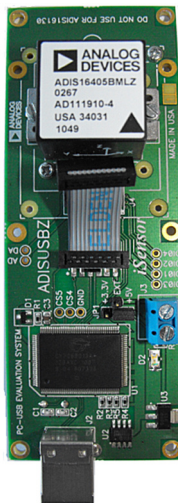
Parametry metrologiczne badanego IMU [2] są następujące:

- Posiada giroskop trójosiowy z zakresem pomiarowym do $\pm 300^\circ/\text{s}$ dla każdej z osi
- Posiada wbudowany akcelerometr trójosiowy z zakresem pomiarowym $\pm 18 \text{ g}$ (g - przyspieszenie ziemskie) dla każdej z osi
- Posiada magnetometr trójosiowy z zakresem pomiarowym ± 2.5 gaussa
- Praca w zakresie -40°C do $+85^\circ\text{C}$
- Przesył danych po magistrali SPI
- Wbudowany jest czujnik temperatury - służy do kompensacji zmian temperatury otoczenia
- Zasilanie 4.75 V - 5.25 V
- Wytrzymałość na przeciążenia do 2000 g



Rys. 2. Inercyjna jednostka pomiarowa ADIS

Do badań, moduł czujnika został osadzony na płycie rozszerzeń ADISUSBZ (rys. 3). Oferuje ona dogodne podłączenie zasilania, wejścia samo-testowania (self-test) oraz wyjścia sygnałowe. Ponadto umożliwia komunikację w standardzie USB – upraszczającą bezpośrednie podłączenie zestawu do komputera.



Rys. 3. Płyta rozszerzeń ADISUSB

2. STANOWISKO POMIAROWE

Stanowisko (rys. 4) do badań IMU składa się z trzech zasadniczych części:

- platformy pomiarowej
- komputera klasy PC
- zasilacza laboratoryjnego



Rys. 4. Stanowisko do badań inercyjnych jednostek pomiarowych położenia

Inercyjny czujnik położenia i orientacji umieszczony jest na platformie z ruchomym elementem wykonawczym, zdolnym do obrotu z zadaną prędkością kątową. Komputer klasy PC (opcjonalnie układ mikroprocesorowy z możliwością zapisu na kartę pamięci) odpowiada za komunikację z IMU oraz akwizycję danych pomiarowych wysyłanych z czujnika. Zasilacz laboratoryjny służy do zasilania i sterowania platformą pomiarową (opis działania w dalszej części artykułu).

Głównym elementem stanowiska jest platforma pomiarowa (rys. 5), na której osadzony jest badany czujnik. W jej skład wchodzi:

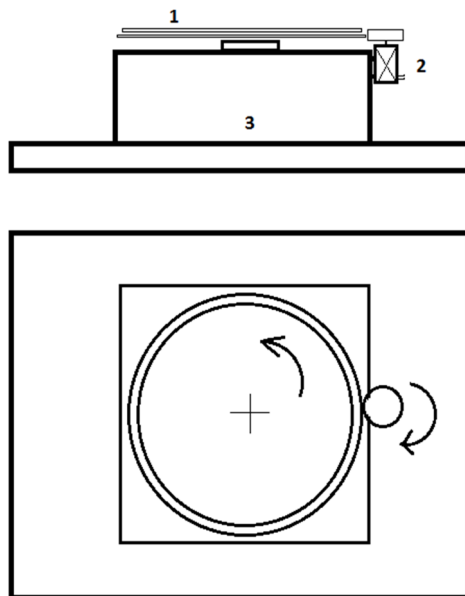
- stelaż mocujący
- dwuwarstwowy talerz obrotowy
- zespół napędowy

Ruchoma część stanowiska, czyli stół obrotowy ma strukturę dwuwarstwową. Talerz dolny jest łożyskowy i przytwierdzony na stałe do stelaża mocującego. Talerz górny jest demontowalny. Opiera się na dolnym talerzu na trzech silikonowych nóżkach, które niwelują przesuwanie się talerzy względem siebie. Zrezygnowano ze sztywnego połączenia talerzy, co umożliwi łatwe zdjęcie górnego talerza i przytwierdzenie czujnika w pożądanej osi –szybką rekonfigurację stanowiska. Dwuwarstwowy talerz obrotowy połączony jest ciernie z mniejszym kołem osadzonym bezpośrednio na osi silnika. Silnik zasilany prądem stałym napędza talerz obrotowy. W zależności od napięcia przyłożonego do zacisków silnika otrzymujemy różne prędkości obrotowe, co bezpośrednio przekłada się na różne wskazania z inercyjnej jednostki pomiarowej, która aktualnie jest badana.

Podczas testów budowa stanowiska ewaluowała, zastosowano dwa silniki o różnych rzędach prędkości obrotowych. Daje to możliwość otrzymania szerokiego spektrum prędkości kątowej stołu obrotowego w zakresie od 0,18obr/min do 12 obr/min. Zakres napięć przykładowych na wejścia silnika powinien zawierać się w granicach 5-25V. Zastosowano silniki:

- JAPAN SERVO-DM34BE36G – 166 obr/min przy 24V

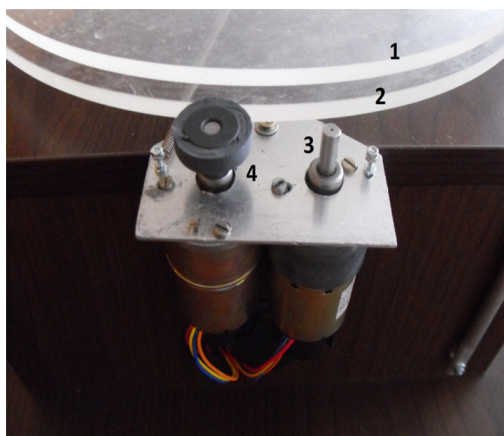
- JAPAN SERVO-DM34SM37G – 14 obr/min przy 24V



Rys. 5. Budowa platformy pomiarowej:

1 - dwuwarstwowy stół obrotowy, 2 - zespół napędowy, 3 - stelaż mocujący

Wybór źródła napędu odbywa się poprzez nałożenia koła ciernego na oś odpowiedniego silnika (rys. 6).



Rys. 6. Połączenie zespołu napędowego z dwuwarstwowym talerzem obrotowym:

1- talerz górny, 2 – talerz dolny, 3 – oś silnika pierwszego, 4 – oś silnika drugiego z nałożonym małym kołem ciernym

Zmiana kierunku obrotu stołu odbywa się poprzez zmianę polaryzacji napięcia na zaciskach silnika napędowego. Zaciski silników wyprowadzone są niezależnie od siebie i znajdują się na bocznej ścianie stelaża mocującego.

3. REALIZACJA POMIARÓW

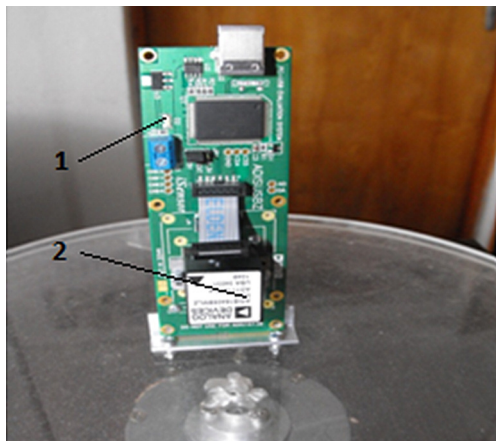
Poniżej przedstawiono realizacje pomiarów dla wybranego czujnika inercyjnego - ADIS16405. Pierwszym krokiem jest zamontowanie IMU na górnym talerzu platformy obrotowej. W zależności od wybranego mocowania możemy badać czujnik w wybranej osi x , y lub z (rys. 7).



Rys. 7a. Mocowania montażowe czujnika na stole obrotowym – obrót wokół osi z

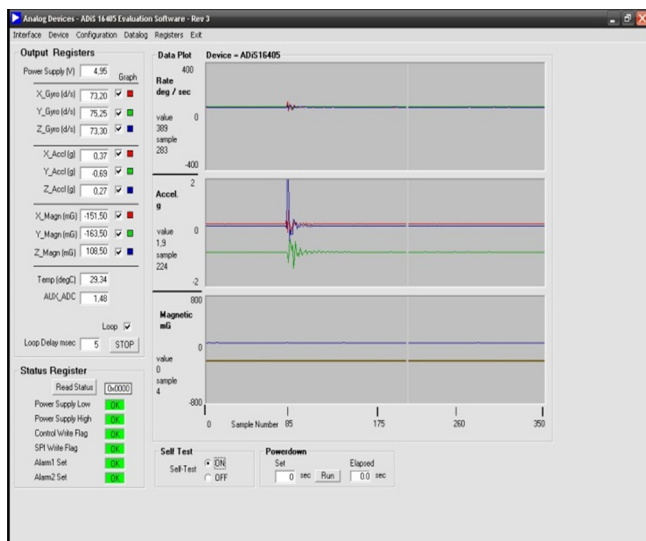


Rys. 7b. Mocowania montażowe czujnika na stole obrotowym – obrót wokół osi y



Rys. 7c. Mocowania montażowe czujnika na stole obrotowym – obrót wokół osi x
(1 - ADIS16405, 2 - płyta rozszerzeń ADISUSB)

Po podłączeniu czujnika z komputerem PC poprzez kabel USB uruchamiamy aplikację rejestrującą odczyty z wyjść czujnika – w przypadku jednostki ADIS 16405 jest to aplikacja *Adis16405_eval_4*, która jest dostępna na stronie producenta, firmy Analog Devices (rys. 8).



Rys. 8. Okno aplikacji archiwizującej odczyty z IMU

Znając kąt obrotu oraz czas trwania obrotu o dany kąt można wyznaczyć prędkość kątową z jaką obracał się stół, a wraz z nim IMU. Dane te porównujemy z odczytami, jakie zarejestrował nasz czujnik i przesłał do aplikacji archiwizującej pomiar. Wynik porównania wskazuje z jaką dokładnością czujnik wykrywa i rejestruje ruch kątowy w danej osi.

4. WYNIKI POMIARÓW

Badanie przeprowadzono w trzech punktach temperaturowych:

- 273K (0°C),
- 293K (20°C),
- 313K (40°C).

Pomiarów dokonywano w każdej z trzech osi. Dodatkowo dla temperatury 293K dokonano pomiaru dla każdej z osi X, Y, Z w kierunku zgodnym oraz przeciwnym do ruchu wskazówek zegara. Prędkości kątowe były zadawane przez zmianę napięcia na silniku napędowym stołu obrotowego. Kolejno przykładano napięcia 5V, 10V, 15V, 20V, 25V.

4.1. Błąd względny

Jako kryterium dokładności wskazań inercyjnej jednostki pomiarowej ADIS 16405 przyjęto błąd względny opisany wzorem:

$$\delta_{\omega} = \frac{(\omega - \omega_r)}{\omega_r}$$

δ_{ω} – błąd względny

Błąd względny jako bezwymiarowy najczęściej wyrażany jest w procentach:

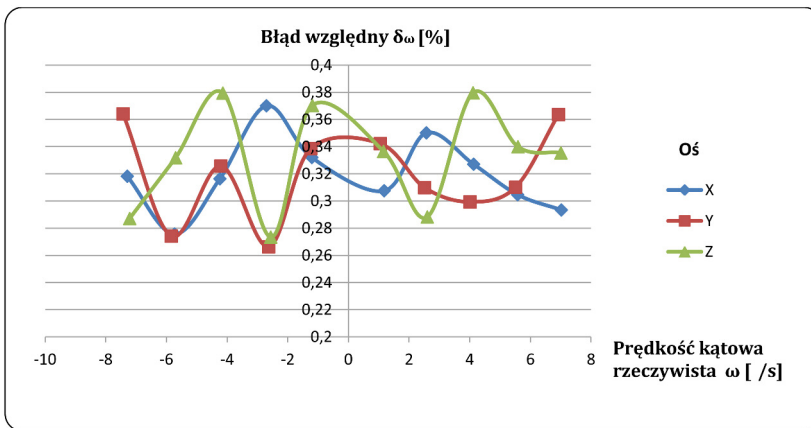
$$\delta_{\omega} = \frac{\Delta}{\omega_r} \cdot 100\%$$

gdzie: $\Delta = (\omega - \omega_r)$, ω – prędkość kątowna zmierzona, ω_r – prędkość kątowna rzeczywista

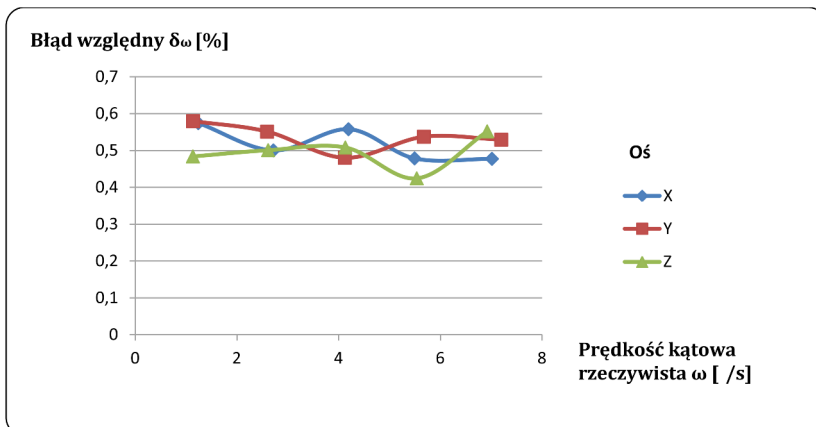
Poniżej przedstawiono wyniki badań w postaci wykresów procentowej ilustracji błędu względnego (dalej nazywanym błędem procentowym) między prędkością kątowną rzeczywistą, a zmierzoną.

Pomiar w temperaturze 293K odbywał się w dwóch kierunkach, co na wykresie (rys. 9) przedstawione jest w sposób następujący: prędkość kątowna dla obrotów czujnika zgodnych z ruchem wskazówek zegara występuje ze znakiem minus, zaś prędkość kątowna dla ruchu w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara występuje ze znakiem plus.

Obserwujemy, że błąd procentowy dla wyników pomiaru prędkości kątownej osi X w temperaturze 293Knie zmienia się więcej niż 0,1% (od 0,27% do 0,37%). Podobne wskazania uzyskano w obu kierunkach pracy. Wskazania błędu procentowego dla pozostałych osi (Y, Z) przyjmują wartości na tym samym poziomie.

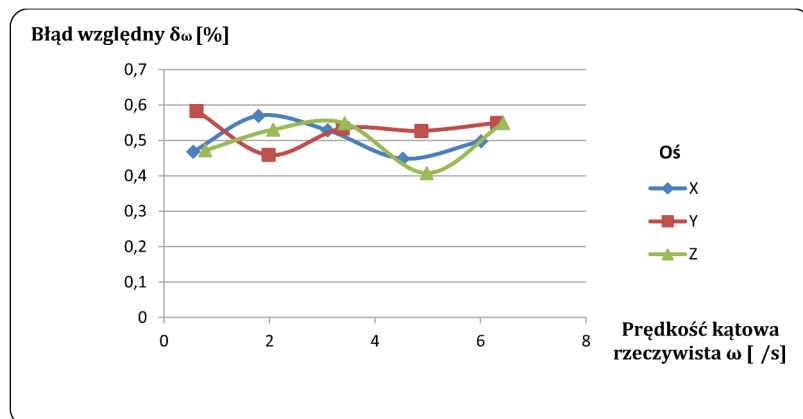


Rys. 9. Wykres błędu procentowego dla pomiaru wykonanego w temperaturze 293K



Rys. 10. Wykres błędu procentowego dla pomiaru wykonanego w temperaturze 273K

Dla pomiarów przeprowadzonych w temperaturze 273K, których wyniki zilustrowano na wykresie powyżej, stwierdzono brak istotnego wpływu spadku temperatury na odczyty IMU. Czujnik wskazywał poprawne wartości, a błąd procentowy mieścił się w granicach 0,48% ÷ 0,58% dla osi X,Y oraz 0,42%÷0,56% dla osi Z.



Rys. 11. Wykres błędu procentowego dla pomiaru wykonanego w temperaturze 313K

Dla pomiarów przeprowadzonych w temperaturze 313K, przedstawionych na rys.11 stwierdzono, że błąd procentowy mieścił się w granicach 0,46%÷0,58% dla osi X,Y oraz 0,40%÷0,55% dla osi Z.

Analizując trzy powyższe wykresy stwierdzono, że błąd procentowy dla pomiaru w temperaturze pokojowej (293K) jest niższy o około 0,2% niż w pozostałych dwóch punktach temperaturowych (273K i 313K)

Wnioskuje się, że pewna rozpiętość błędów pomiarowych dla poszczególnych osi jest spowodowana zakłóceniami zespołu napędowego wynikającego ze zmian temperatury oraz ze stabilnością źródła zasilania (dokładność zasilacza laboratoryjnego na poziomie 0,1V).

4.2. Zliczanie drogi

W artykule zamieszczono wyniki badań dotyczące zliczania drogi, czyli kąta o jaki obrócił się stół z zamontowanym czujnikiem IMU. Sygnał z giroskopu podawany jest jako sygnał prędkości [°/s], zatem aby otrzymać pokonaną drogę musimy dany sygnał scałkować.

$$\varphi = \int_{t_1}^{t_2} f(\omega) dt$$

gdzie:

φ - kąt obrotu,

ω – prędkość kątowa IMU,

t_1 – czas początkowy pomiaru,

t_2 – czas końcowy pomiaru

Prędkość kątową ω uzyskujemy z przeprowadzenia pomiaru z giroskopu. Czasy a oraz b są to czasy rozpoczęcia oraz końca pomiaru zarejestrowanego na komputerze PC. Dane pomiarowe poddano całkowaniu według dwóch metod:

Metoda trapezów:

$$\int_{\omega_p}^{\omega_k} f(\omega) dt \approx \frac{\omega_k - \omega_p}{n} \left(\sum_{i=0}^{n-1} f\left(\omega_p + i \frac{\omega_k - \omega_p}{n}\right) + \frac{f(\omega_p) - (f\omega_k)}{2} \right)$$

Metoda Simpsona:

$$\int_{\omega_p}^{\omega_k} f(\omega) dt \approx \frac{\omega_k - \omega_p}{6n} \sum_{i=0}^{n-1} [f(\omega_i) + 4f(\omega_{i+1}) + f(\omega_{i+2})]$$

Tabela 1 ilustruje dryf giroskopu przy obrocie współosiowym IMU o 360°. Czas pomiaru 50,71 [s]. Prędkość kątowna stała.

Tabela 1

Kąt obrotu φ [°]		Błąd %
Rzeczywisty	360	-
Wyliczony Metodą Trapezów	359,438	-0,1561
Wyliczony Metodą Simpsona	359,4283	-0,15881

Tabela 2 ilustruje dryf giroskopu przy obrocie współosiowym IMU o 720°. Czas pomiaru 99,27 [s]. Prędkość kątowna stała.

Tabela 2

Kąt obrotu φ [°]		Błąd %
Rzeczywisty	720	-
Wyliczony Metodą Trapezów	720,3138	-0,04357
Wyliczony Metodą Simpsona	720,2935	-0,04074

Tabela 3 ilustruje dryf giroskopu przy obrocie współosiowym IMU o 1440°. Czas pomiaru 197,31 [s]. Prędkość kątowna stała.

Tabela 3

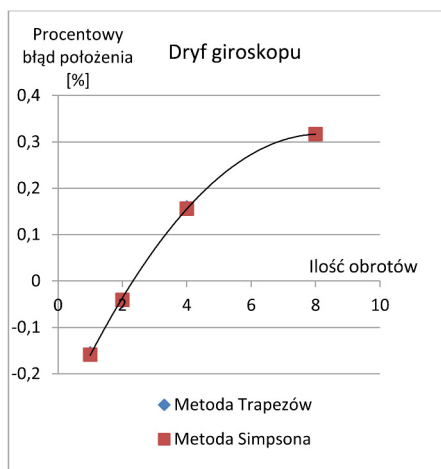
Kąt obrotu φ [°]		Błąd %
Rzeczywisty	1440	-
Wyliczony Metodą Trapezów	1442,285	0,158674
Wyliczony Metodą Simpsona	1442,246	0,15954

Tabela 4 ilustruje dryf giroskopu przy obrocie współosiowym IMU o 2880°. Czas pomiaru 392,47 [s]. Prędkość kątowna stała.

Tabela 4

Kąt obrotu φ [°]	Błąd %	
Rzeczywisty	2880	-
Wyliczony Metodą Trapezów	2889,103	0,31609
Wyliczony Metodą Simpsona	2889,125	0,316843

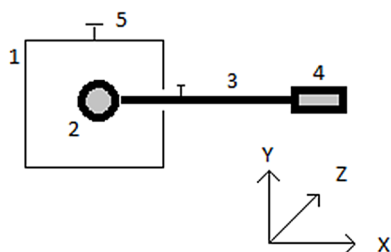
Jak widać z Tab. 1-4 dla inercyjnego czujnika położenia ADIS 16405 występuje dryf giroskopu. Wartość błędu narasta przy każdym obrocie o 360° (rys. 12).



Rys. 12. Błąd odczytu położenia kąтового

Jest on powodowany przez nagrzewanie się jednostki pomiarowej oraz charakterystykę elementów elektronicznych. Pierwsze źródło powstawania błędów, jest niwelowane przez kompensację temperaturową, w którą jest wyposażony czujnik. Błędy zliczania drogi kąto-wej wynikającej z dryfu giroskopu narastającego w czasie mogą być likwidowane przy udziale odczytów z akcelerometrów [3].

Kolejnym krokiem jest zliczanie drogi z wykorzystaniem akcelerometrów. W tym celu zmodyfikowano stanowisko. Czujnik IMU umieszczono na końcu poziomej belki łożyskowej w osi obrotu (rys. 13).



Rys. 13. Schemat stanowiska laboratoryjnego do badania akcelerometrów.

1 - podstawa, 2 - łożyskowana oś obrotu, 3 - ramię wodzące, 4 - jednostka pomiarowa IMU, 5 - krańcówka Start/Stop

Krańcówka start/stop rozpoczynała i kończyła zapis danych pomiarowych do pliku, a zarazem dawała możliwość rejestracji danych dokładnie na drodze kątowej wynoszącej 360° . Przyspieszeniomierze w jednostce ADIS16405 wskazują przyspieszenie liniowe. Dane pomiarowe zapisywane były w jednostkach g, a następnie przemnażane były przez stałą $9,80665\text{m/s}^2$. W kolejnym kroku wyliczana była prędkość liniowa oraz w drodze całkowania numerycznego wyznaczana droga jaką przebyła jednostka IMU. Znając długość ramienia (promień wodzący) można było wyznaczyć drogę kątową, kąt o jaki obrócił się czujnik podczas pomiaru. Wartość końcowa podana jest w radianach.

W ruchu po okręgu mamy dwie składowe przyspieszenia: styczne i normalne. W ruchu jednostajnym przyspieszenie styczne jest równe zero, gdyż prędkość nie ulega zmianie. Pozostaje nam tylko składowa normalna przyspieszenia, nazywana przyspieszeniem dośrodkowym. Opisane jest wzorem:

$$a_x = \frac{v^2}{r}$$

$$a_y = \frac{dv}{dt}$$

r – promień okręgu po którym porusza się IMU

v – prędkość liniowa IMU

a_x – przyspieszenie normalne (a_n)

a_y – przyspieszenie styczne (a_t)

Mając a_n które jest równoważne naszemu przyspieszeniu w osi X uzyskanemu z pomiaru oraz znając promień wodzący $r=0,7\text{m}$ wyznaczamy prędkość v . Następnie dane były całkowane metodą Simpsona w wyniku czego uzyskano drogę liniową jaką pokonał czujnik. W wyniku obliczeń uzyskano obrót czujnika o kąt równy:

$$6,295664 \text{ rad}$$

Jest to równoważne $360,715^\circ$. Błąd $0,715^\circ$ postanowiono poprawić poprzez zastosowanie dolnoprzepustowego filtra o skończonej odpowiedzi impulsowej zaimplementowanego w *Adis16405* w wyniku czego dla ponownego algorytmu obliczeń uzyskano wynik:

$$6,284387 \text{ rad}$$

Po przeliczeniu na stopnie daje nam $360,0688^\circ$. Jest to wynik dostatecznie dokładny, gdyż zakładamy że ewentualny błąd wyznaczenia kąta spowodowany jest niedokładnością wyznaczenia rzeczywistego promienia po którym obraca się czujnik. Wynika to z faktu, że czujnik IMU jest kostką sześcienną o wymiarach $23\text{mm} \times 23\text{mm} \times 23\text{mm}$ i założono, że akcelerometry są umieszczone centralnie na przecięciu się przekątnych. Jednak nie można tego zweryfikować, gdyż jest to konstrukcja zamknięta, a ewentualne przesunięcia względem przyjętego położenia akcelerometrów wewnątrz IMU, przekładają się na zmianę długości promienia r , co ma bezpośredni wpływ na dokładność wyznaczenia przebytej drogi.

5. PODSUMOWANIE

Zaprojektowane i wykonane zostało uniwersalne stanowisko do badań inercyjnych jednostek pomiarowych, służących do wyliczenia orientacji i położenia obiektu ruchomego. Istnieje możliwość przeprowadzenia badań dla każdej z osi x, y, z . Jednocześnie mamy możliwość do-

konywania rejestracji pomiarów tylko jednej osi. Do poprawnego działania stanowiska zapewniony musi być zasilacz laboratoryjny z regulowanym napięciem wyjściowym z zakresu 5-25V oraz komputer z zainstalowanym programem do archiwizacji danych. Wyniki badań inercyjnej jednostki pomiarowej ADIS 16405 wskazują, że pracuje ona z wysoką dokładnością, niezależnie od kierunku obrotu wokół osi oraz w różnych punktach temperaturowych. Jednostkę badano dla prędkości z zakresu około $1 \div 10$ stopni na sekundę. Błąd względny pomiarów waha się w granicach : $0,27 \div 0,37\%$ dla temperatury pokojowej (293K) oraz $0,4 \div 0,6\%$ dla pomiarów w temperaturze 273K i 313K. Analizując wykres dla pomiarów wykonanych w temperaturze 293K można stwierdzić, że wartość błęd pomiarowego w zależności od kierunku nie zmienia się i utrzymuje się na tym samym poziomie. Dla pomiarów przeprowadzonych na zmodyfikowanym stanowisku badawczym zarejestrowano przyspieszenia liniowe wzdłuż osi X,Y. W wyniku obliczeń wyznaczono przebytą drogę z dokładnością 0,019% względem drogi rzeczywistej.

Pracę wykonano w ramach realizacji projektu rozwojowego nr OR00002911 "SIECIOCENTRYCZNY SYSTEM WSPARCIA ROZPOZNANIA I DOWODZENIA SYTUACJAMI KRYZYSOWYMI NA TERENACH ZURBANIZOWANYCH Z AUTONOMICZNYMI BEZZAŁOGOWYMI APARATAMI LATAJĄCYMI" finansowanego ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Gosiewski Z., Ortyl A.: Algorytmy inercjalnego bezkardanowego systemu orientacji i położenia obiektu o ruchu przestrzennym, Instytut Lotnictwa, Warszawa, 1999.
- [2] ADIS 16405 Datasheet
http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADIS16405.pdf
- [3] Artese G., Trecroci A.: Calibration of a low cost MEMS ins sensor for an integrated navigation system, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B5. Beijing 2008.

ZDZISŁAW GOSIEWSKI, DANIEL OŁDZIEJ, MACIEJ SŁOWIK

TESBED FOR TESTING INERTIAL MEASUREMENT UNITS MADE IN MEMS TECHNOLOGY

Abstract

In the paper own testbed for checking of inertial measurement units used in unmanned aerial vehicles is shown. Chosen IMU was described. Structure and components of testbed was shown. Method and results of experiment in which angular path was measured in different temperatures were shown. Problems with computation of errors connected with counting path by inertial measurement unit were described.