

SZYMAK Piotr, PRACZYK Tomasz, MILEWSKI Stanisław

ZASTOSOWANIE SYSTEMÓW NAWIGACJI INERCJALNEJ DO POMIARU ORIENTACJI PRZESTRZENNEJ OKRĘTU

Streszczenie

Znajomość orientacji przestrzennej okrętu niezbędna jest do działania różnych systemów okrętowych np. systemów artyleryjskich. Do pomiaru orientacji przestrzennej można zastosować różne rozwiązania, jednym z nich, niezależnym od zewnętrznej infrastruktury są systemy nawigacji inercjalnej (INS – ang. Inertial Navigation System). W artykule zaprezentowano system pomiarowy oparty o INS, jego użycie w warunkach rzeczywistych oraz wstępną analizę uzyskanych wyników.

WSTĘP

Działanie wielu systemów okrętowych wymaga znajomości orientacji przestrzennej okrętu, czyli przede wszystkim kątów Eulera określających orientację okrętu względem ziemskiego układu odniesienia. Na przykład, żeby dokładnie wycelować armatę okrętową w cel o znanych współrzędnych konieczna jest znajomość przechyłów bocznego, wzdłużnego oraz kursu okrętu. Bez tych informacji armata jest w zasadzie bezużyteczna.

Jednym z rozwiązań, które można zastosować do dokładnego wyznaczenia orientacji przestrzennej okrętu jest system DGPS, czyli różnicowa wersja systemu GPS (np. 3-4 odbiorniki tego systemu umiejscowione w różnych punktach na okręcie i wyznaczające płaszczyznę okrętu). Wadą tego rozwiązania jest jednak ograniczony zasięg, uzależniony od zasięgu stacji referencyjnych.

Innym rozwiązaniem jest zastąpienie DGPS przez GPS. Mankamentem takiego rozwiązania jest jednak po pierwsze jego dokładność a po drugie tak jak w przypadku DGPS jego zależność od infrastruktury zewnętrznej, która uniemożliwia lub przynajmniej ogranicza zastosowanie takiego rozwiązania w systemach militarnych.

Alternatywą dla powyższych dwóch rozwiązań jest system hybrydowy oparty z jednej strony o INS-y [2-6,8,9,11] z drugiej zaś o układ kamer zorientowanych wzdłuż dwóch osi okrętowych – poprzecznej i wzdłużnej. Zadaniem INS-ów byłoby w tym przypadku wyznaczanie orientacji przestrzennej okrętu natomiast system wizyjny służyłby do „trzymania w ryzach” INS-ów. Te ostatnie należą do tzw. rozwiązań zliczeniowych, których dokładność maleje wraz z czasem dlatego też w celu uzyskania wiarygodnych danych nawigacyjnych informacje pozyskiwane z tych systemów muszą być co jakiś czas korygowane np. przy pomocy GPS (systemy lotnicze) [7] lub właśnie systemów wizyjnych. Użycie systemów wizyjnych polegałoby na określaniu przechyłu bocznego i wzdłużnego na podstawie kątów pomiędzy horyzontem widzianym z dziobu i z burty a brzegami klatek zarejestrowanego ciągu obrazów.

W celu weryfikacji użyteczności powyższego rozwiązania konieczne jest przeprowadzenie szeregu badań. Niniejszy artykuł prezentuje pierwszy krok w całym procesie badawczym a

mianowicie konstrukcję systemu pomiarowego opartego o INS-y, a także pierwsze pomiary w morzu, których celem było określenie metodyki pomiarowej umożliwiającej ocenę dokładności INS-ów i wstępna analiza uzyskanych wyników.

1. SYSTEM POMIAROWY

System pomiarowy parametrów ruchu okrętu zastosowany w trakcie badań na morzu (rys. 1) składa się z następujących elementów:

- zestawu 3 INS-ów firmy XSENS serii MTi połączonych za pomocą sieci XBus,
- urządzenia XBus Master, zarządzającego przepływem danych w sieci XBus oraz konwertującego dane z/do sieci XBus opartej na łączu RS485 a połączeniem USB do komputera PC,
- komputera PC z oprogramowaniem MT Manager do konfigurowania czujników INS, zbierania, wizualizacji i archiwizacji danych z czujników.



Rys. 1. System pomiaru parametrów ruchu okrętu bazujący na INS

Urządzenia MTi zostały umieszczone na wspólnej listwie w taki sposób, aby znajdowały się w takiej samej orientacji przestrzennej względem okrętu. W ten sposób każde z urządzeń podczas pomiarów mierzyło te same parametry ruchu okrętu co umożliwiło następnie na porównanie działania każdego z nich.

Każde z urządzeń zostało skonfigurowane w inny sposób. Dotyczyło to przede wszystkim ustawień filtra Kalmana [1,10] wbudowanego w każde z urządzeń i służącego do przetwarzania „surowych” danych z czujników składowych urządzenia MTi (trzech akcelerometrów, trzech żyroskopów i magnetometru 3-osiowego). Dwa z urządzeń wykorzystywały ustawienia filtra przewidziane przez producenta dla warunków morskich. Trzecie z urządzeń zostało tak skonfigurowane, aby generowało na wyjściu surowe nieprzetworzone dane – brak filtra Kalmana.

Takie postępowanie miało dwa cele. Pierwszym celem było określenie korzystniejszych ustawień filtra Kalmana dających pomiar na wyjściu urządzenia MTi bliższy wartości rzeczywistej (dwa różne ustawienia morskie, jako punkt odniesienia dla pomiarów urządzeniami MTi w przyszłości wykorzystane zostaną dane zarejestrowane przy pomocy systemu DGPS, w trakcie badań w morzu oba systemy działały będą równolegle). Drugim celem było zarejestrowanie surowych nieprzetworzonych danych tak, aby mieć później możliwość ich samodzielnego przetwarzania i poszukiwania metod i algorytmów pozwalających na zredukowanie błędów systemów inercyjnych do minimum.

2. WYBRANE WYNIKI POMIARÓW I ICH WSTĘPNA ANALIZA

W trakcie prób morskich na pokładzie ORP Czajka (rys. 2) zestaw 3 INS-ów został zamontowany na pokładzie sygnałowym w pomieszczeniu sygnalisty. Urządzenia MTi zostały rozmieszczone wzdłużnej osi symetrii kadłuba okrętu w taki sposób, że osie pomiarowe y urządzeń były ustawione wzdłużnej osi symetrii kadłuba, osie pomiarowe x w poprzecznej osi symetrii, skierowane na lewą burtę, natomiast osie pomiarowe z w pionowej osi symetrii kadłuba, skierowane ku górze.



Rys. 2. System pomiaru parametrów ruchu okrętu na pokładzie ORP Czajka

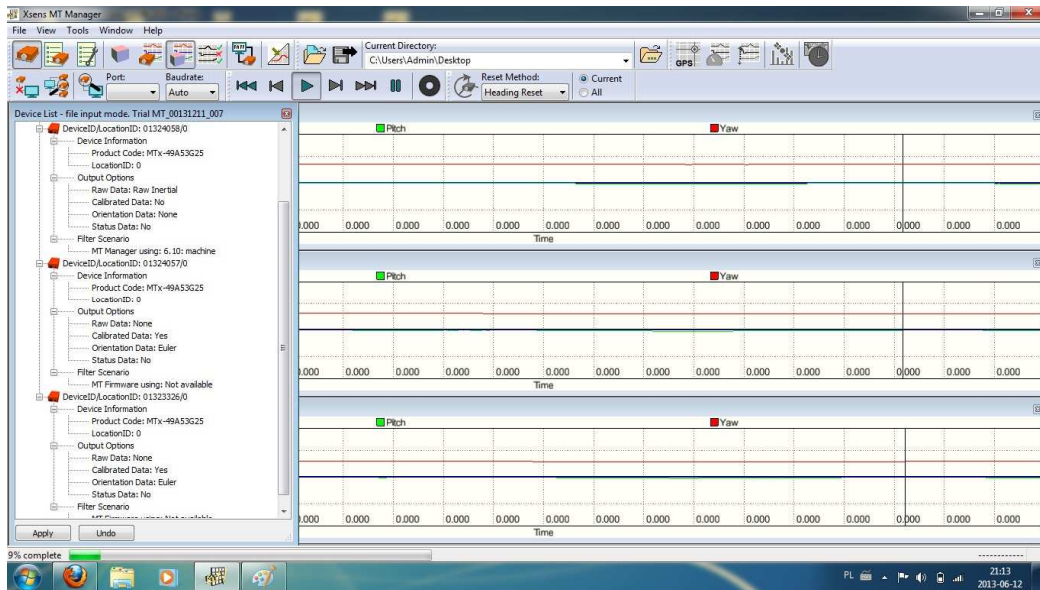
W trakcie pomiaru parametrów ruchu kadłuba ORP Czajka urządzenie XBus Master komunikowało się z komputerem PC z oprogramowaniem MT Manager z częstotliwością 50 Hz. Ze względu na fakt, iż częstotliwość próbkowania w przypadku systemu DGPS planowanego jako system wzorcowy dla systemu INS będzie mniejsza, zastosowanie częstotliwości 50 Hz będzie miało na celu lepsze dopasowanie próbek zarejestrowanych przez INS-y z pomiarami uzyskanymi z DGPS (oba systemy pomiarowe ze względu na brak możliwości ścisłej integracji nie będą ze sobą zsynchronizowane czasowo, pomiary odbywały się będą całkowicie niezależnie).

Wysoka częstotliwość próbkowania zastosowana podczas pomiarów wymusiła zapis danych pomiarowych w wielu różnych plikach. Zapis wszystkich danych w jednym pliku mógłby spowodować późniejsze trudności z ich analizą za pomocą dostępnych narzędzi (zbyt dużo próbek). Pliki zapisywane były pod nazwami przypisywanymi im przez program MT Manager i oprócz samych danych pomiarowych zawierały jeszcze informacje dotyczące parametrów urządzeń INS i czasu rejestracji. Ta ostatnia informacja będzie niezbędna do porównania wskazań uzyskanych z INS i DGPS.

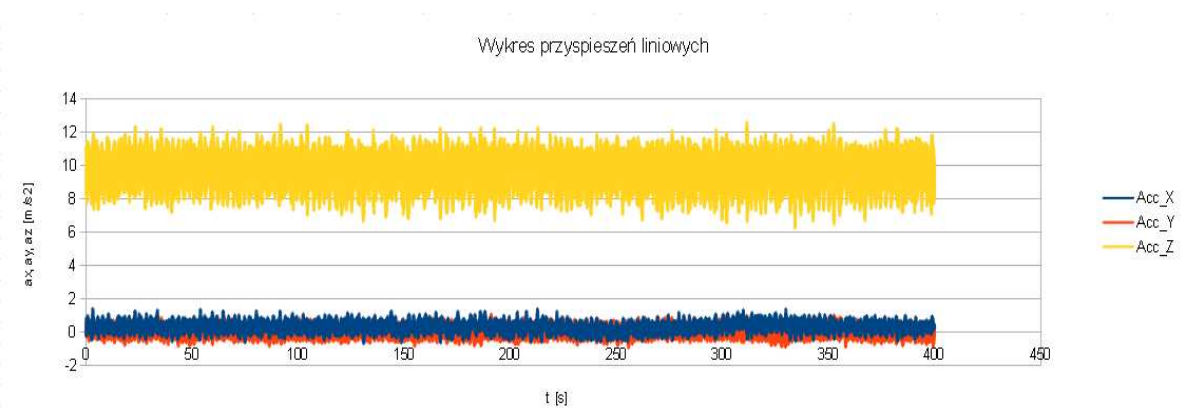
Kolejne urządzenia MTi przesyłały dane z następującymi ustawieniami:

1. MTi o nr identyfikacyjnym 01324058 przesyłał dane typu „Raw Inertial”, czyli „surowe” wartości z czujników, nie skalibrowane i nie przetworzone (oprogramowanie MT Manager wyświetlało dane przetworzone w oparciu o scenariusz nr 6.10 „Machine”) – pomiary z tego urządzenia były przewidziane do samodzielnego przetwarzania i poszukiwania metod i algorytmów pozwalających na uzyskanie jak najdokładniejszej orientacji przestrzennej okrętu,
2. MTi o nr identyfikacyjnym 01324057 przesyłał dane skalibrowane (w oparciu o zaimplementowany przez producenta model fizyczny czujników) i przetworzone (zgodnie z scenariuszem nr 8.10 Marine),

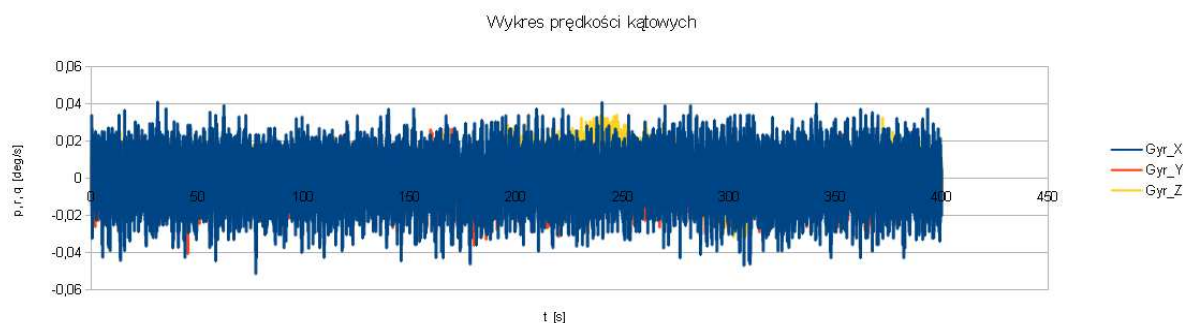
3. MTi o nr identyfikacyjnym 01324026 przysyłał dane skalibrowane i przetworzone (zgodnie z scenariuszem nr 8.9 Marine).



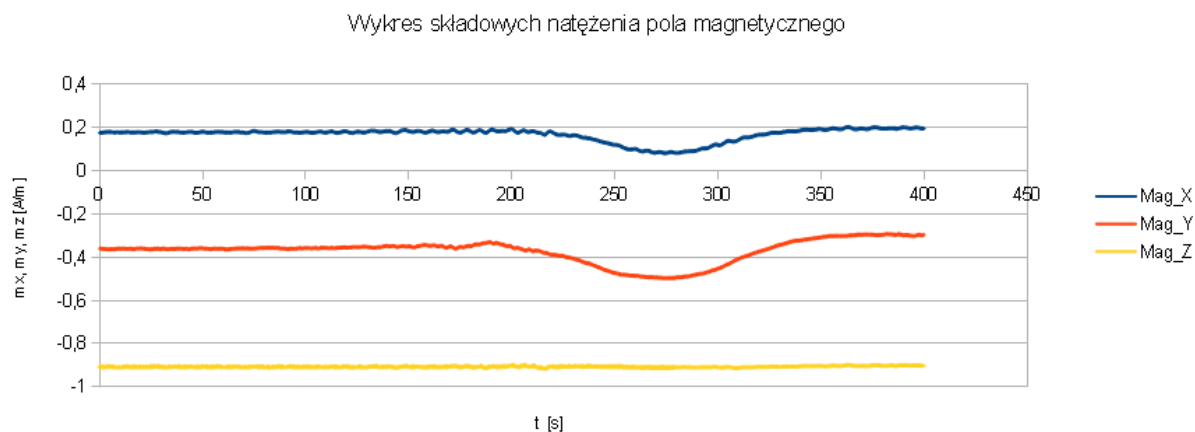
Rys. 3. Widok okna programu MT Manager



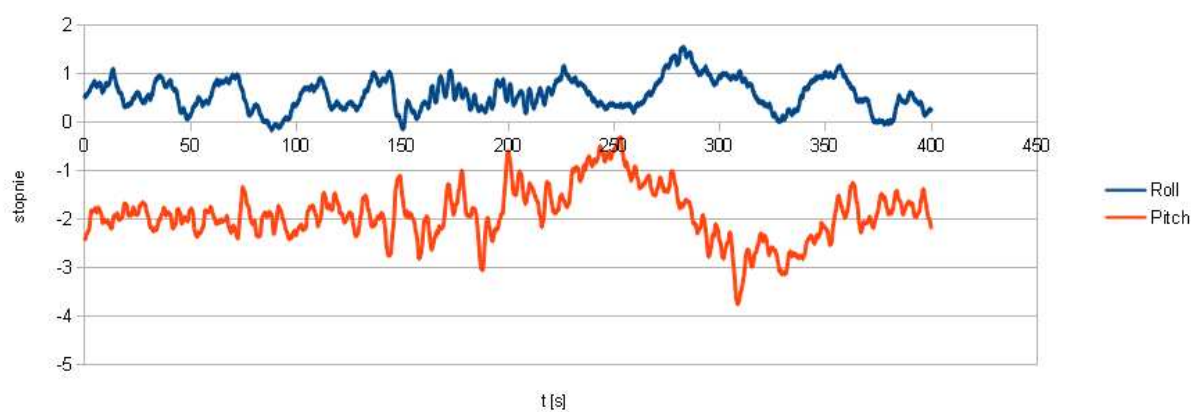
Rys. 4. 400-sa sekundowy przebieg przyspieszeń liniowych dla urządzenia działającego zgodnie ze scenariuszem nr 2 (patrz wyżej, przyspieszenia po osi z osiągają większe wartości ze względu na fakt iż są one sumą przyspieszenia ziemskiego i przyspieszeń okrętu).



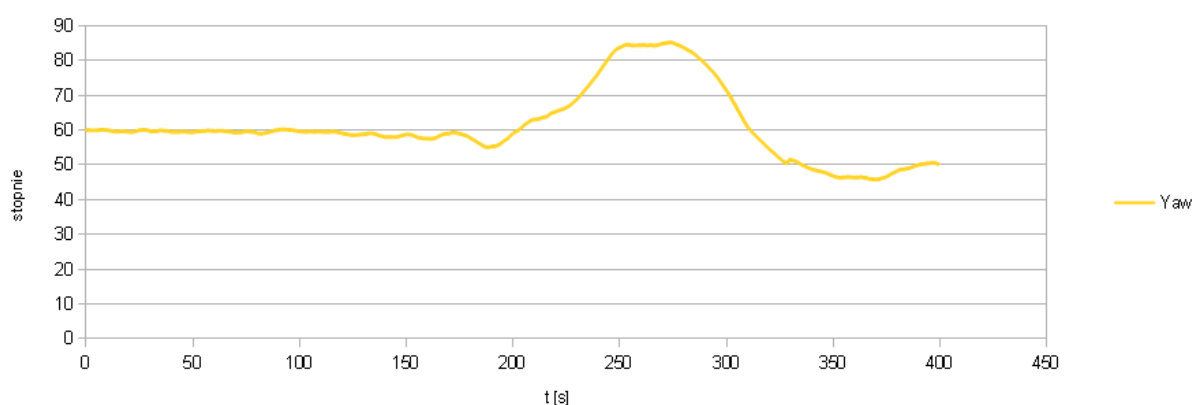
Rys. 5. 400-sa sekundowy przebieg prędkości kątowych dla urządzenia działającego zgodnie ze scenariuszem nr 2



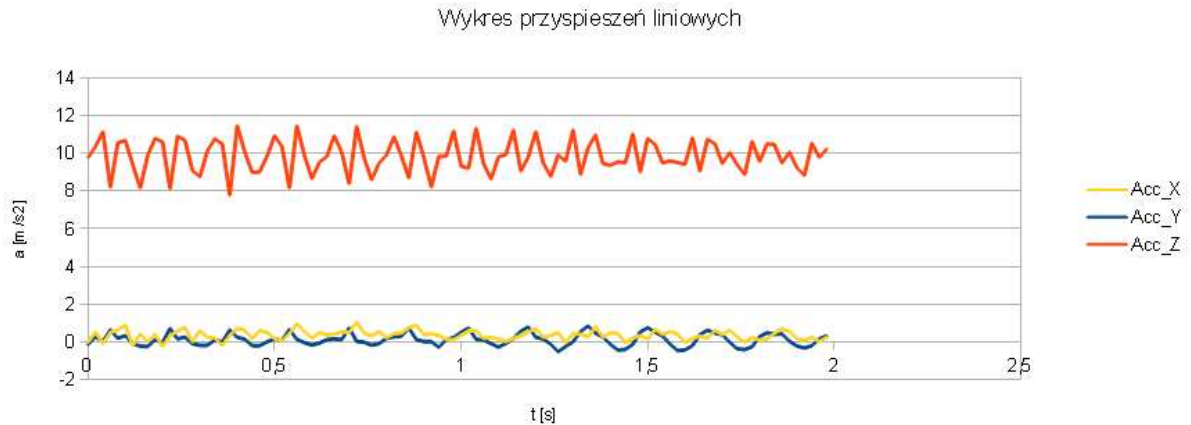
Rys. 6. 400-sta sekundowy przebieg składowych natężenia pola magnetycznego ziemi dla urządzenia działającego zgodnie ze scenariuszem nr 2 (wybrzuszenie składowych x i y pomiędzy 250 i 300 sekundą odpowiada zmianie kursu jednostki w tym przedziale czasowym – patrz rys. 8)



Rys. 7. 400-sta sekundowy przebieg kołysania wzłużnego i bocznego okrętu dla urządzenia działającego zgodnie ze scenariuszem nr 2 (pomiarzy pomiędzy 250 i 300 sekundą odpowiadają zmianie kursu jednostki w tym przedziale czasowym – patrz rys. 8)



Rys. 8. 400-sta sekundowy przebieg kursu okrętu dla urządzenia działającego zgodnie ze scenariuszem nr 2.

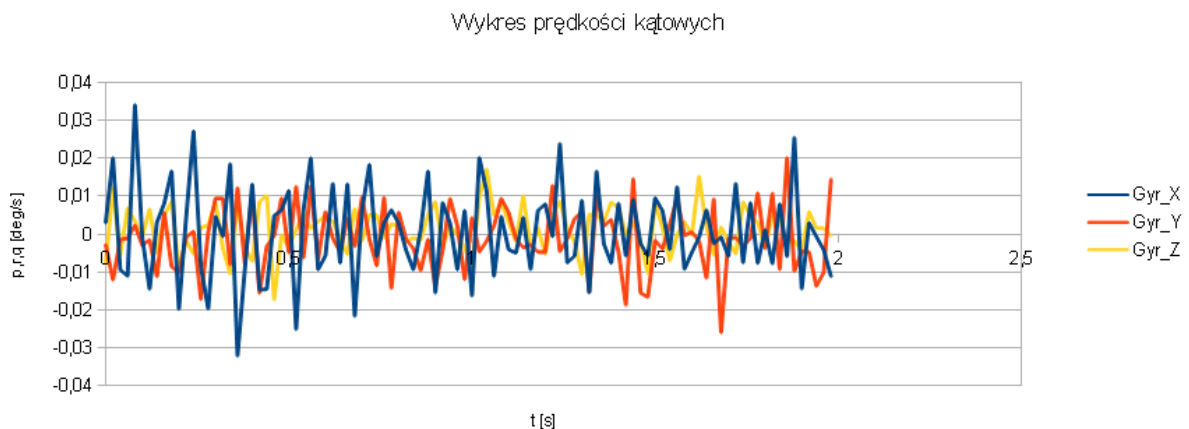


Rys. 9. Dwu-sekundowy przebieg przyspieszeń liniowych dla urządzenia działającego zgodnie ze scenariuszem nr 2 (zmiany przyspieszeń w osi x i y odpowiadają raczej błędom pomiaru natomiast zmiany sinusoidalne przyspieszenia w osi z odnoszą się do falowania i związanego z nim przegłębienia jednostki)

Przykładowe przebiegi czasowe sygnałów z akcelerometrów, żyroskopów oraz magnetometru zarejestrowanych podczas badań w morzu w dniu 12.06.2013 przedstawiają rysunki 4 - 13. Decydujący wpływ na uzyskane wyniki pomiarów miały warunki atmosferyczne: stan morza 1. Po analizie uzyskanych danych pomiarowych określono parametry ruchu okrętu na fali takie jak kołysanie wzdłużne oraz kołysanie boczne:

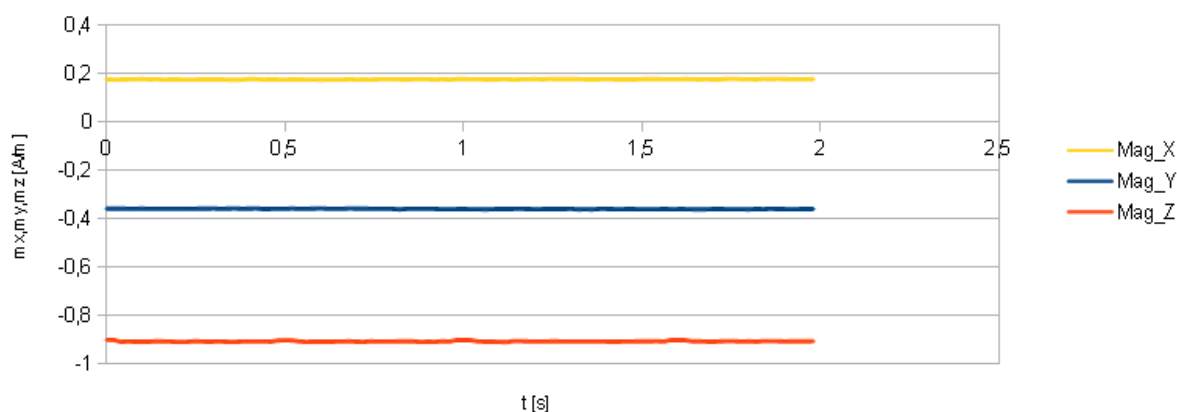
- kołysanie wzdłużne: częstotliwość ok. 0.07 Hz, amplituda ok. 2.5° ,
- kołysanie boczne: częstotliwość ok. 0.13 Hz, amplituda ok. 3° .

Analiza wyników wykazała niewielkie odchylenie układu pomiarowego od osi wzdłużnej i poprzecznej okrętu. Sinusoidy opisujące oba typy wychyleń (wzdłużne i boczne) były przesunięte w stosunku do wartości 0 o pewną wielkość, co można zauważyć na rysunku 6. W efekcie odchylenia układu pomiarowego odnosi się wrażenie, że okręt przechylał się bardziej na lewą burtę niż na prawą oraz bardziej na dziób niż na rufę. Po analizie wyników pomiarów określono wartości odchylenia układu pomiarowego i uwzględniono je podczas opracowywania szczegółowych wyników z badań.



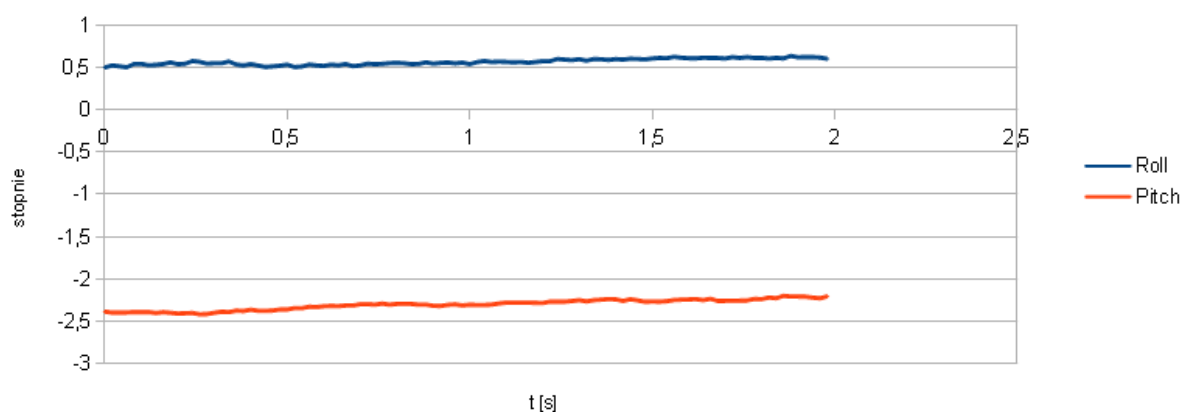
Rys. 10. Dwu-sekundowy przebieg prędkości kątowych dla urządzenia działającego zgodnie ze scenariuszem nr 2

Wykres składowych natężenia pola magnetycznego



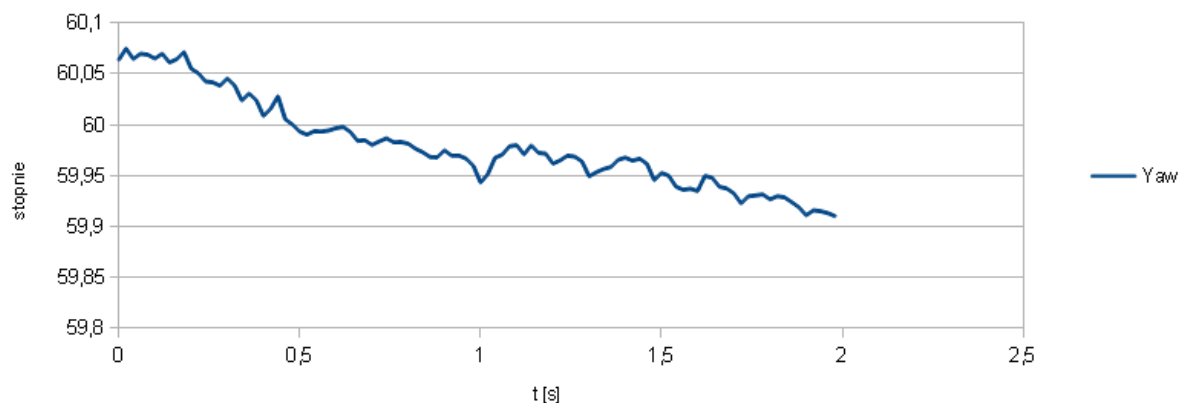
Rys. 11. Dwu-sekundowy przebieg składowych natężenia pola ziemskiego dla urządzenia działającego zgodnie ze scenariuszem nr 2 (praktycznie stałe wartości składowych pola ziemskiego związane były z bardzo małymi zmianami kursu – patrz rys. 13)

Wykres kątów Eulera



Rys. 12. Dwu-sekundowy przebieg kołysania wzdłużnego i boczno-okrętu dla urządzenia działającego zgodnie ze scenariuszem nr 2 (bardzo małe zmiany kątów wynikają ze stanu morza podczas pomiarów – stan morza wahał się od wartości 0 do 1)

Wykres kursu



Rys. 13. Dwu-sekundowy przebieg kursu okrętu dla urządzenia działającego zgodnie ze scenariuszem nr 2 (wykres przedstawia w zasadzie przebieg myszkowania czyli delikatnych fluktuacji kursu wynikających z wpływu morza)

Pomiary wykazały również drgania kadłuba okrętu wynikające z pracy siłowni i pozostałych urządzeń okrętowych. Zaobserwowane drgania charakteryzują się następującymi przybliżonymi parametrami:

- w wzdłużnej osi symetrii kadłuba: częstotliwość ok. 2,5 Hz, amplituda ok. 0,15°,
- w poprzecznej osi symetrii kadłuba: częstotliwość ok. 2,5 Hz, amplituda ok. 0,1°.

PODSUMOWANIE

Artykuł prezentuje system pomiarowy orientacji przestrzennej okrętu oparty na urządzeniach INS a także przedstawia raport z pierwszych badań w morzu z użyciem wspomnianego systemu. W wyniku przeprowadzonych pomiarów dokonano wstępnej oceny parametrów ruchu kadłuba okrętu typu 207M (ORP Czajka), poruszającego się na Zatoce Gdańskiej przy stanie morza ok. 1. Analiza pomiarów udowodniła, że koncepcja systemu pomiarowego zastosowanego podczas badań jest właściwa.

W kolejnych badaniach planuje się zweryfikować dokładność systemów INS w oparciu o system DGPS. W tym celu, trzy lub cztery odbiorniki systemu DGPS zainstalowane zostaną na okręcie wspólnie z opisanym w artykule systemem pomiarowym. Użycie 3-4 odbiorników DGPS wyznaczających pozycję każdego z nich w układzie ziemskim pozwoli na określenie ruchów płaszczyzny rozpiętej pomiędzy odbiornikami i zgodnej z pokładem okrętu. To z kolei da podstawę do porównania wskazań uzyskanych z INS-ów oraz DGPS.

BIBLIOGRAFIA

1. Choukroun, D., Bar-Itzhack, I. Y., and Oshman, Y., *A Novel Quaternion Kalman Filter*, Proceedings of Guidance, Navigation, and Control Conference, Monterey, CA, Aug. 2002, AIAA-2002-4460
2. Gebre-Egziabher D. E., Powell J. D., and Hayward R. C., *Design of multi-sensor attitude determination systems*, IEEE Transaction on Aerospace and Electronics Systems, vol. 40, no. 2, pp. 627–649, APRIL 2004.
3. Haid M. and Breitenbach J., *Low cost inertial orientation tracking with Kalman filter*, Appl. Math. Comp., vol. 153, no. 2, pp. 567–575, 2003.
4. Luinge H. J., Veltink P. H., and Baten C. T., *Estimating orientation with gyroscopes and accelerometers*, Technol. Health Care, vol. 7, no. 6, pp. 455–9, 1999.
5. Mayagoitia R. E., Nene A. V., and Veltink P. H., *Accelerometer and rate gyroscope measurement of kinematics: An inexpensive alternative to optical motion analysis systems*, J. Biomechanics, vol. 35, no. 4, pp. 537–542, 2002.
6. Nguyen Ho Quoc Phuong Y.-S. S., Kang Hee-Jun and Ro Y.-S., *A dcm based orientation estimation algorithm with an inertial measurement unit and a magnetic compass*, Journal of Universal Computer Science, vol. 15, no. 4, pp. 859–876, Feb 2009.
7. Psiaki, M. L., Powell, S. P., and Jr., P. M. K., *The Accuracy of the GPS-Derived Acceleration Vector, a Novel Attitude Reference*, Proceedings of Guidance, Navigation, and Control Conference, AIAA, 1999, AIAA-99-4079
8. Roetenberg D., Luinge H., Baten C, and Veltink P., *Compensation of Magnetic Disturbances Improves Inertial and Magnetic Sensing of Human Body Segment Orientation*, IEEE Transactions on neural systems and rehabilitation engineering, vol. 13, no. 3, September 2005
9. Shuster, M. D. and Oh, S. D., *Three-Axis Attitude Determination from Vector Observations*, Journal of Guidance, Dynamics, and Control, Vol. 4, No. 1, Jan.-Feb. 1981, pp. 70–77
10. Tiano A., Sutton R., Lozowicki A., Naeem W., *Observer Kalman filter identification of an autonomous underwater vehicle*, Control Engineering Practice 15 (2007) 727–739

11. Wenger, L. and Gebre-Egziabher, D., *System Concepts and Performance Analysis of Multi-Sensor Navigation Systems for UAV Applications*, Unmanned Unlimited Systems, Technologies, and Operation - Aerospace, AIAA, San Diego, CA, Sept. 2003, AIAA 2003-6647

USING INERTIAL NAVIGATIONAL SYSTEMS TO MEASURE THE SPATIAL ORIENTATION OF A SHIP

Abstract

To operate, many ship systems, e.g. artillery systems, require information about spatial orientation of a ship. To measure the spatial orientation, different solutions can be used, and one of them is solution based on Inertial Navigational Systems (INS) whose the main advantage in military applications is their independency of external infrastructure. The paper presents a measurement system based on INS, its application in real conditions at sea and initial analysis of measurement results.

Autorzy:

dr inż. **Piotr Szymak** – Akademia Marynarki Wojennej, Wydział Mechaniczno-Elektryczny, Instytut Elektrotechniki i Automatyki Okrętowej, p.szymak@amw.gdynia.pl

dr hab. inż. **Tomasz Praczyk** – Akademia Marynarki Wojennej, Wydział Nawigacji i Uzbrojenia Okrętowego, Instytut Uzbrojenia Okrętowego i Informatyki, t.praczyk@amw.gdynia.pl

dr inż. **Stanisław Milewski** – Akademia Marynarki Wojennej, Wydział Nawigacji i Uzbrojenia Okrętowego, Instytut Uzbrojenia Okrętowego i Informatyki, s.milewski@amw.gdynia.pl