

Marek SAWICKI, Tadeusz SONDEJ

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA IM. JAROSŁAWA DĄBROWSKIEGO
ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

Niskokosztowe sensory MEMS w systemach nawigacji inercyjnej**Mgr inż. Marek SAWICKI**

Ukończył studia magisterskie na wydziale Elektroniki WAT w Warszawie. Zawodowo zajmuje się projektowaniem urządzeń i układów elektronicznych. Szczególną uwagę zwraca na nowoczesne mikrokontrolery i układy reprogramowalne. Prowadzi również badania naukowe w zakresie autonomicznych systemów pozycjonowania. Poszukuje rozwiązań dla systemów pracujących w pomieszczeniach oraz trudnych warunkach propagacyjnych.



e-mail: msawicki@wat.edu.pl

Dr inż. Tadeusz SONDEJ

Absolwent Wydziału Elektroniki WAT (1997 r.), obronił pracę doktorską w 2003 r. Jest adiunktem w Instytucie Telekomunikacji Wydziału Elektroniki WAT. Jego zainteresowania naukowe to zastosowanie mikroprocesorów w programowych metodach podwyższania dokładności pomiaru oraz systemy-on-chip. Od kilku lat zajmuje się też zastosowaniem systemów cyfrowych w aplikacjach biomedycznych.



e-mail: tsondej@wat.edu.pl

Streszczenie

W artykule zaprezentowano system pozycjonowania zbudowany przy użyciu sensorów nawigacji inercyjnej (INS) oraz odbiornika GPS. Jako czujniki inercyjne zastosowano niskokosztowe, powszechnie dostępne akcelerometry i żyroskopy wykonane w technologii MEMS. Omówiono sposób kalibracji akcelerometru oraz metody przetwarzania sygnałów z sensorów MEMS. Przedstawiono również wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych.

Słowa kluczowe: systemy pozycjonowania, nawigacja inercyjna, sensory MEMS, filtracja Kalmana.

Low-cost MEMS sensors for inertial navigation systems**Abstract**

The paper presents a positioning system with GPS and inertial sensors. The system is based on commercial solutions described in [1, 3]. The designed system consists of a GPS receiver, a MEMS accelerometer, a MEMS gyroscope, an electronic compass and a pressure sensor. Data processing was carried out by use of a microcontroller with ARM Cortex-M3 core. Designated positions are recorded on a microSD memory card and transmitted by the UART interface according to the NMEA standard. The experimental tests consisting in driving on city roads were performed. The measurement results were recorded directly from the GPS receiver and the system output. Characteristic places such as a tunnel or railway traction were analysed. The results obtained show that MEMS sensors improve the accuracy of determining the position during short-term GPS signal outages. They allow setting the positions more accurately in difficult terrain such as dense urban areas and underground tunnels. In addition, application of low-cost sensors gives a possibility to use the system in popular car navigation systems or mobile phones.

Keywords: position systems, inertial navigation, MEMS sensors, Kalman filtering.

1. Wprowadzenie

Systemy nawigacji inercyjnej (INS) odgrywają bardzo ważną rolę w zintegrowanych układach pozycjonowania. Pozwalają one śledzić ruch obiektu w chwilach zaniku typowych sygnałów nawigacji satelitarnej (np. GPS) lub działać w pełni samodzielnie. Pozycja w INS wyznaczana jest na podstawie sygnałów z sensorów inercyjnych (bezwładnościowych) [2]. Podstawowymi czujnikami stosowanymi w tych systemach są akcelerometry i żyroskopy.

Główną zaletą nawigacji inercyjnej jest jej autonomiczność. Zainicjowany system działa niezależnie od układów zewnętrznych. Bazuje on wyłącznie na prawach fizyki i może pracować poprawnie na powierzchni ziemi, jak też pod wodą czy w przestrzeni powietrznej. System inercyjny nie wymaga również zapewnienia jakiegokolwiek łączności radiowej, dlatego może działać w każdych warunkach terenowych oraz wewnątrz budynków.

W układach nawigacji inercyjnej stosuje się specjalizowane czujniki przyspieszeń oraz prędkości kątowych. Są to najczęściej stabilizowane temperaturowo optyczne akcelerometry i żyroskopy. Są one tak czułe, że pozwalają np. mierzyć prędkość obrotową Ziemi.

Niestety układów tych nie stosuje się w sprzęcie przenośnym ze względu na gabaryty oraz pobór mocy. Dlatego wiele ośrodków badawczych prowadzi eksperymenty z użyciem sensorów wykonanych w technologii MEMS (ang. Micro Electro-Mechanical Systems). Czujniki takie są małe, energooszczędne oraz powszechnie dostępne.

2. Metody wyznaczania pozycji obiektu

Wyznaczanie przemieszczania obiektu w przestrzeni można dokonać kilkoma sposobami. Najprostsze metody bazują na bezpośrednim pomiarze przebytej drogi (np. zliczając obroty koła jezdźnego). Gdy poruszający się obiekt nie ma kontaktu z powierzchnią odniesienia (np. samolot) lub kontakt ten nie jest ciągły, to bezpośrednie metody są nieskuteczne. W takich wypadkach pozostaje jedynie pomiar przyspieszenia oraz prędkości kątowych podczas obrotu. W tym celu urządzenia pozycjonujące wyposaża się w akcelerometry i żyroskopy.

Akcelerometry w systemie nawigacji inercyjnej służą do pomiaru składowych przyspieszeń, które działają na poruszający się obiekt. Pomiaru te dokonywane są najczęściej wzdłuż trzech wzajemnie ortogonalnych osi układu współrzędnych. Znając chwilowe wartości składowych przyspieszeń, można wyznaczyć zmianę prędkości v a następnie przebytą drogę s w każdej z osi układu współrzędnych zgodnie z zależnościami (1) i (2) [1]:

$$v(t) = \int_0^t a(t)dt + v_0 \quad (1)$$

$$s(t) = \int_0^t v(t)dt + s_0 \quad (2)$$

gdzie: v – prędkość obiektu, a – przyspieszenie, s – przebyta droga.

W praktyce zależności (1) i (2) pozwalają wyznaczyć całkowitą drogę, gdyż stałe (v_0 i s_0) występujące we wzorach całkowitych są zerowane lub pobierane np. z odbiornika GPS. Wyznaczone składowe ruchu odnoszą się do układu odniesienia związanego z obiektem i muszą zostać przetransformowane do układu współrzędnych Ziemi. Transformacja układów współrzędnych wspomaganą jest przez żyroskopy. Mierzą one chwilową prędkość kątową wokół każdej z trzech osi podczas zmiany przestrzennej orientacji obiektu. Pomiaru te służą do obliczenia zmian kątów pochylenia, przechylenia i azymutu. Zmianę kątów wyznacza się z zależności (3) [1]:

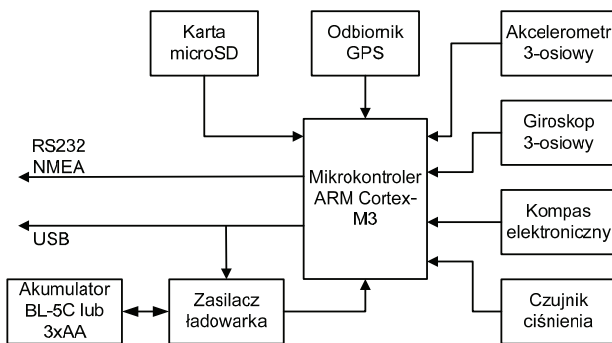
$$\alpha = \int_0^t \omega(t) dt + \alpha_0 \quad (3)$$

gdzie: α – zmiana kątowa orientacji, ω – prędkość kątowa.

Podobnie jak w przypadku składowych ruchu, początkowa orientacja obiektu α_0 musi być znana (lub pobrana np. z kompasu i akcelerometrów w warunkach statycznych). Znając chwilową orientację przestrzenną obiektu dokonuje się rzutowania składowych ruchu do współrzędnych geograficznych i wyznacza nowe położenie. Sposób rzutowania ściśle zależy od przyjętego modelu reprezentacji orientacji przestrzennej obiektu. Możliwe jest przechowywanie bezpośrednio trzech kątów Eulera, macierzy kosinusów lub kwaternionów orientacji [1]. W prezentowanym systemie pozycjonowania orientacja reprezentowana jest przez kąty Eulera.

3. System pozycjonowania z odbiornikiem GPS oraz elementami INS

System INS wykonany na bazie sensorów MEMS może pracować samodzielnie jedynie przez krótki czas. Kumulacja błędów z upływem czasu, którą charakteryzują się systemy INS, wymusza stosowanie odbiornika GPS do okresowej korekcji pozycji. Służy on również do inicjalizacji położenia początkowego. Schemat blokowy zintegrowanego systemu pozycjonowania przedstawiono na rys. 1.



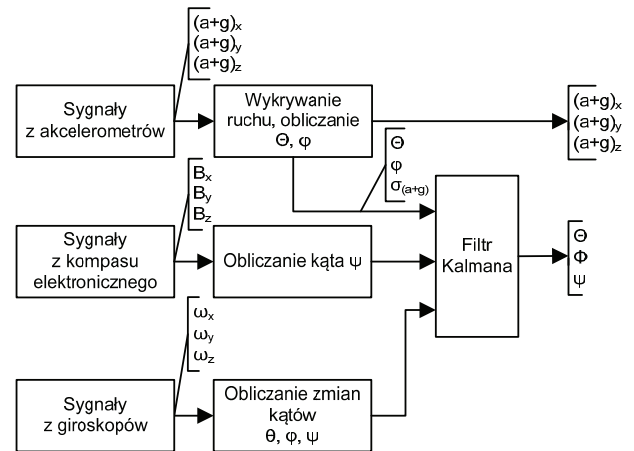
Rys. 1. Schemat blokowy zintegrowanego systemu pozycjonowania
Fig. 1. Block diagram of the integrated position system

W systemie pozycjonowania zainstalowano odbiornik GPS FGPMOPA6 firmy GlobalTop. Jako elementy systemu INS użyte zostały niskokosztowe i powszechnie dostępne sensory. Pomiarów przyspieszeń dokonuje akcelerometr MMA7455L firmy Freescale Semiconductor. Zmiana kątów orientacji przestrzennej wyznaczana jest dzięki odczytom z dwóch żyroskopów IDG500 firmy InvenSense. Dodatkowo azymut pomaga wyznaczyć cyfrowy kompas HMC6343 firmy Honeywell. Opcjonalnie przewidziano miejsce dla barometru elektronicznego do śledzenia zmian wysokości. Akwizycji pomiarów oraz niezbędnych obliczeń dokonuje mikrokontroler z rdzeniem Cortex-M3 rodziny STM32. Dane gromadzone są na wymiennym nośniku typu FLASH (karta microSD).

4. Oprogramowanie sterujące sensorami i przetwarzające dane pomiarowe

Oprogramowanie systemu mikroprocesorowego napisane zostało w języku C. Zawiera ono procedury sterowania sensorami i przetwarzania danych pomiarowych. Akwizycja danych z sensorów odbywa się z częstotliwością 100 Hz. W pierwszej fazie wyznaczane są kąty orientujące system w przestrzeni. Uproszczony schemat blokowy oprogramowania odpowiedzialnego za wyznaczenie orientacji przestrzennej przedstawiono na rys. 2. Orientacja wyznaczana jest na podstawie pomiaru składowych przyspieszenia ziemskiego (w warunkach statycznych) oraz azymutu otrzymywanego z kompasu elektronicznego. Pomiar z żyrosko-

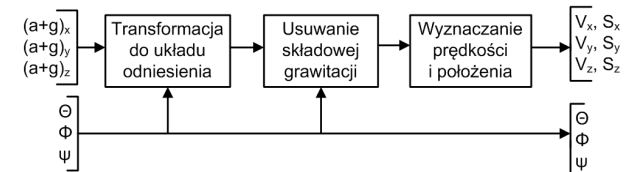
pów korygują wyznaczoną orientację, gdy system się porusza. Fuzji pomiarów dokonuje filtr Kalmana biorąc pod uwagę informację dostarczaną przez moduł wykrywania ruchu.



Rys. 2. Uproszczony schemat blokowy algorytmu do wyznaczania orientacji w systemie INS

Fig. 2. Simplified block diagram of the algorithm for determining orientation in the INS

W kolejnym etapie, składowe przyspieszenia poddawane są transformacji do układu współrzędnych Ziemi. Do przekształcenia używa się wyznaczonych kątów orientacji przestrzennej. Następnie od składowej pionowej odejmowana jest składowa grawitacyjna. Wektor przyspieszeń jest podwójnie całkowany po czasie, celem wyznaczenia chwilowych wektorów prędkości oraz położenia (rys. 3).



Rys. 3. Uproszczony schemat blokowy algorytmu do wyznaczania położenia w systemie INS

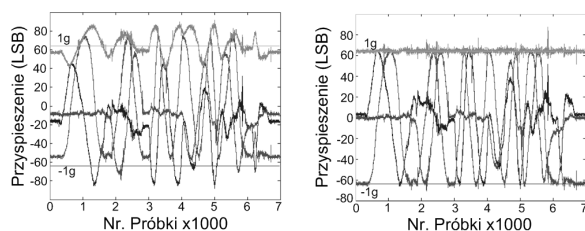
Fig. 3. Simplified block diagram of the algorithm for determining position in the INS

Synteza danych z systemu GPS i INS odbywa się w kolejnym filtrze Kalmana. W fazie predykcji tego algorytmu następuje całkowanie prędkości z systemu INS. Raz na sekundę odbierana jest ramka z odbiornika GPS z informacjami o pozycji. Wtedy w filtrze Kalmana realizowana jest faza korekcji. W przypadku braku pozycji z systemu GPS faza korekcji nie występuje. Wtedy podawana przez system pozycja wyznaczana jest wyłącznie przez fazę predykcji filtra Kalmana.

5. Kalibrowanie akcelerometrów MEMS

Ważnym etapem uruchamiania systemów nawigacji inercyjnej jest kalibracja sensorów pomiarowych. Szczególne znaczenie ma poprawne wyznaczenie przesunięcia osi akcelerometru (offset), aby przy każdym położeniu w przestrzeni wypadkowy wektor przyspieszenia równy był 1 g (przyspieszenie grawitacyjne). Aby wykonać kalibrację należy bardzo powoli obrócić akcelerometr względem jego środka kolejno wokół każdej z osi pomiarowych rejestrując wskazywane przez niego przyspieszenia. Podczas całego procesu akcelerometr nie zmienia swojego położenia. Zmienia się jedynie jego orientacja przestrzenna. Zarejestrowane przebiegi sygnałów (z trzech osi oraz wypadkowego) podczas obracania akcelerometrów w przestrzeni przedstawiono na rys. 4. W procesie kalibracji do zebranych podczas powolnego obracania akcelerometru próbek dodawany jest offset i obserwowana jest

jednocześnie zmiana wartości średniej oraz wariancji wypadkowego wektora przyspieszenia. Algorytm kalibracyjny w kolejnych krokach tak modyfikuje offsety poszczególnych osi, aby uzyskać wektor wypadkowy na poziomie $1g$ z jak najmniejszą wariancją.

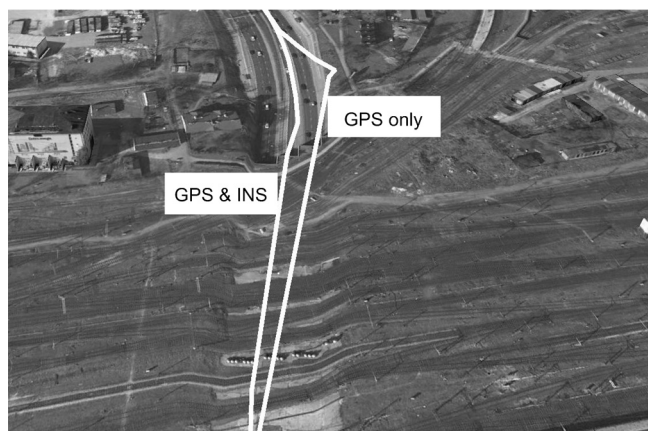


Rys. 4. Sygnał z akcelerometru podczas obracania układu przed (z lewej) oraz po kalibracji (z prawej)

Fig. 4. The accelerometer signal during system rotation before (left) and after calibration (right)

6. Badania eksperymentalne

Badania eksperymentalne systemu przeprowadzono w warunkach drogowych podczas przejazdu wybranymi ulicami miasta. Analizie poddane zostały szczególnie niekorzystne dla systemu GPS miejsca. Jednym z nich było skupisko wielu przewodów pod wysokim napięciem podczas przejazdu pod trakcją kolejową. Zarejestrowane zostały dwa strumienie danych pomiarowych. Pierwszy z nich pochodzi bezpośrednio z wyjścia odbiornika GPS. Drugi to pozycja podawana przez badany system. Zarejestrowane próbki poddano odpowiedniej konwersji formatów i naniesiono na mapę cyfrową. Zarejestrowaną trasę przedstawiono na rys. 5.



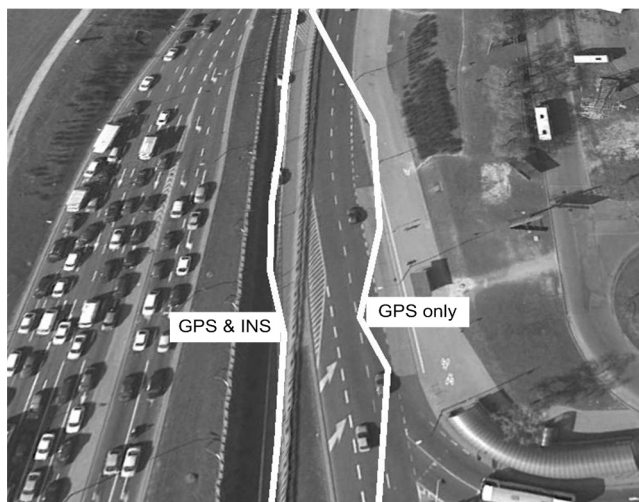
Rys. 5. Badanie systemu podczas przejazdu pod trakcją kolejową

Fig. 5. The system test during the passage under the railway traction

Jak łatwo zauważyć nawet krótkotrwale ograniczenie widoczności radiowej wyraźnie pogarsza dokładność wyznaczania pozycji przez odbiornik GPS. Po wprowadzeniu wspomaganie systemem INS i adaptacyjnej filtracji danych zaobserwowano wyraźną poprawę w dokładności wyznaczanej pozycji (z kilkunastu do kilku metrów).

Kolejnym badaniem był wjazd do tunelu będącego elementem wielopoziomowego skrzyżowania. Wynik eksperymentu przedstawiono na rys. 6. W tym przypadku zaobserwowano jeszcze większe różnice w dokładności pozycjonowania przez system GPS i system ze wspomaganie nawigacją inercyjną. Sam system GPS o ile odbiera jakiegokolwiek informacje z satelitów to niestety nie jest w stanie poprawnie ich zinterpretować. Informacja dociera do odbiornika wielokrotnie odbita od wewnętrznych ścian tunelu lub w ogóle nie dociera. Zjawisko to powoduje skokowe zmiany kolejno wyznaczanych położeń, pomimo że pojazd porusza się w rzeczywistości płynnie. System wspomagany sensorami inercyjnymi jest już bardziej odporny na przypadkowo podawane pozycje z odbiornika GPS. Zarejestrowana trasa wytyczona zosta-

ła w obszarze wyjazdu z podziemnego tunelu a nie na ulicy biegnącej równoległe.



Rys. 6. Badanie systemu podczas przejazdu tunelem pod skrzyżowaniem

Fig. 6. The system test during the passage of a tunnel under a cross road

7. Podsumowanie

Jak wykazały przeprowadzone badania eksperymentalne, system INS zbudowany z niskokosztowych sensorów może skutecznie wspomagać odbiorniki GPS np. w popularnych nawigacjach samochodowych. Dzięki zastosowaniu zintegrowanego systemu pozycjonowania możliwe jest poprawne nawigowanie w tunelach lub gęstej zabudowie miejskiej, gdy sygnał satelitalny jest słaby lub chwilowo zanika.

Zastosowane sensory oraz algorytmy przetwarzania danych nie pozwalają jednak na poprawne wyznaczenie pozycji przy dłuższych zaniakach sygnału GPS. W wykonanym systemie błąd wyznaczania pozycji narastał zbyt szybko (około 200 m po 30 s).

Podczas badania prezentowanego systemu zauważono, że kumulacja błędów występowała nawet wtedy, gdy układ był nieruchomy. Sposób, w jaki wyznaczone jest przesunięcie (podwójna całka z przyspieszenia) powodował, że błąd narastał z kwadratem czasu. Z tego powodu warto zastanowić się nad specyficznymi metodami wyznaczania przesunięcia przy użyciu sensorów niskokosztowych. W przypadku pojazdów stosuje się wspomaganie systemu GPS przez zliczanie obrotów kół z uwzględnieniem kąta skrętu z czujnika na kierownicy. W nawigacji pieszej podejmowane są próby wykrywania poszczególnych kroków na podstawie pionowych przeciążeń przy stawianiu stopy. Wszystkie te rozwiązania prowadzą jednak do opracowania systemów dedykowanych do konkretnych zastosowań.

Prezentowany system został wykonany celem sprawdzenia możliwości współcześnie dostępnych sensorów MEMS i ich przydatności w nawigacji inercyjnej. Uzyskane wyniki badań mogą być użyte do opracowania nowych metod i algorytmów przetwarzania danych z tego typu czujników.

8. Literatura

- [1] Titterton D., Weston J.: Strapdown Inertial Navigation Technology, MPG Books Ltd, Bodmin, Cornwall 1996.
- [2] RTO Lecture Series Supporting Papers: Low-Cost Navigation Sensors and Integration Technology, 26-27 of March, Warsaw 2009.
- [3] Kaniewski P.: Struktury, modele i algorytmy w zintegrowanych systemach pozycjonujących i nawigacyjnych, WAT, Warszawa 2010.