

# Układ akwizycji i archiwizacji parametrów ruchu układów mobilnych – przegląd czujników pomiarowych

JEL: L97 DOI: 10.24136/atest.2019.042

Data zgłoszenia: 15.12.2018 Data akceptacji: 08.02.2019

*W ramach pracy przedstawiono układ pomiarowy umożliwiający zbieranie oraz zapis parametrów ruchu pojazdu. Do budowy układu, wykorzystano moduł nawigacji inercyjnej składający się z trójosiowych akcelerometrów oraz żyroskopów wykonanych w technologii MEMS. Wykonano badania oraz opracowano metody obliczeniowe pozwalające na odniesienie zebranych danych, do punktu w przestrzeni trójwymiarowej, w celu wyznaczenia trajektorii ruchu pojazdu. Zbudowany układ pomiarowy wykorzystuje trzy rodzaje czujników: akcelerometr, żyroskop, magnetometr. Każdy z tych czujników pozwala na pomiar wielkości fizycznej, w trzech prostopadłych osiach kartezjańskiego układu współrzędnych. Dodatkowo w pracy wykorzystano moduł nawigacji satelitarnej (GPS), jako odniesienie w skali „makro” (układ współrzędnych związany ze środkiem kuli ziemskiej o promieniu wynoszącym ok. 6371 km) dla modułu nawigacji inercyjnej (INS/IMU), umożliwiającej dokładny pomiar w skali „mikro” (układ współrzędnych związany z punktem początkowym ruchu dla trasy, której długość nie przekracza kilkuset metrów). W artykule przedstawiono przegląd dostępnych czujników pomiarowych ze szczególnym uwzględnieniem parametrów wybranych sensorów oraz błędów wprowadzanych do układu pomiarowego.*

**Słowa kluczowe:** akcelerometr, żyroskop, magnetometr, układ pomiarowy.

## Wstęp

Układy pomiarowe pozwalające na rejestrację oraz przetwarzanie parametrów ruchu, są szeroko stosowane w bardzo dużej ilości dziedzin techniki, sportu czy też życia codziennego [8, 15, 30, 36]. Wielu ludzi nie zdaje sobie nawet sprawy z tego, jak często spotyka się z tego typu urządzeniami, a w szczególności z modułem nawigacji inercyjnej. System nawigacji satelitarnej jest powszechnie znany. Inaczej jest w przypadku nawigacji inercyjnej, która nie ma uwidocznionego bezpośredniego wpływu na życie człowieka, a wraz z rozwojem techniki komputerowej i elektroniki obszary jej zastosowania nieustannie się zwiększają.

Historia nawigacji inercyjnej sięga II Wojny Światowej, podczas której zastosowano ją w budowie niemieckich rakiet V2 [32]. Przez długi czas technologia ta była rozwijana przez wojsko, aż do początku lat 60, kiedy została wykorzystana przez NASA w misji Apollo. Kolejnym etapem, było wykorzystanie jej w lotnictwie, skąd pochodzi powszechnie używane tradycyjne nazwy dla kątów obrotów wokół poszczególnych osi. Umożliwiła ona określenie pozycji i prędkości samolotu, niezależnie od jego usytuowania w przestrzeni, co wynika z charakterystycznej cechy żyroskopu. Oś obrotu żyroskopu zawsze ustawia się równoległe do kierunku działania sił pola grawitacyjnego Ziemi. Obecnie układy nawigacji inercyjnej budowane są postaci płytki drukowanej, której rozmiary nie przekraczają kilku milimetrów.

Znajdują one zastosowanie w lotnictwie, jako „czarne skrzynki”, które są w rzeczywistości rejestratorami parametrów ruchu samolotu. Moduły nawigacji inercyjnej stosuje się również w motoryzacji. Pełnią one również rolę „czarnych skrzynek”, ale nie jest to jedyna

aplikacja w przemyśle motoryzacyjnym. Ważnym aspektem wykorzystania tego typu modułów jest poprawa komfortu jazdy samochodem. Wiele urządzeń pokładowych wykorzystuje dane zbierane przez te moduły i przetwarza je na własne potrzeby, w celu zmiany ustawień i wartości parametrów pracy [16].

Podróżując przez duże miasto i korzystając z nawigacji satelitarnej, często zdarza się, że wysokie budynki skutecznie ograniczają widoczność satelitów, przez co uaktualnienie położenia pojazdu staje się wręcz niemożliwe. W takich sytuacjach system GPS łączy się na moduł nawigacji inercyjnej, który umożliwia śledzenie położenia pojazdu od ostatniej chwili, gdy widziany był satelita. Punkt ten staje się wtedy początkiem układu współrzędnych, względem którego wyznaczana jest trajektoria pojazdu i wyświetlana jest jako integralna część trasy przejazdu. Dzieje się tak, aż do momentu wykrycia sygnału z wystarczającej ilości satelitów.

Kolejnym obszarem, gdzie nawigacja inercyjna odgrywa coraz większą rolę jest sport. Wykorzystywana jest w celu odtworzenia szczegółowych parametrów ruchu w przypadku sportów samochodowych, co pozwala na wprowadzanie korekcy ustawień np. rozkładu masy czy aerodynamiki. Oprócz tego znajduje również zastosowanie w dyscyplinach, w których ważna jest technika, sposób wykonywania określonych ruchów lub trasa przejazdu np. w narciarstwie alpejskim [30]. Oprócz zastosowań mających na celu poprawę wyników w sporcie, nawigacja inercyjna, znajduje zastosowanie do odtwarzania charakterystycznych ruchów znanych sportowców, w celu zaimplementowania ich np. w grach komputerowych.

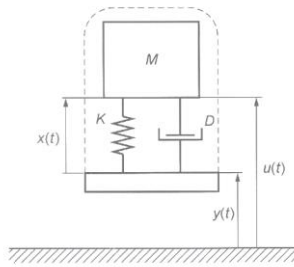
Nawigacja inercyjna, a w szczególności akcelerometri znajdują zastosowanie w budowie i eksploatacji maszyn. Wykorzystywane są w wibroakustycznej diagnostyce maszyn. Na podstawie częstotliwości oraz kierunku drgań danej części, możliwy jest do określenia stopień zużycia części czy podzespołu, a nawet stwierdzenie rodzaju defektu podczas pracy maszyny [28].

Ostatnim obszarem zastosowań, o którym warto wspomnieć są urządzenia mobilne takie jak smartfony, tablety czy zegarki. Producenci umieszczają wewnątrz tych urządzeń miniaturowe moduły nawigacji inercyjnej, które umożliwiają użytkownikom automatyczny obrót ekranu, czy zamianę telefonu w kierownicę podczas gry. Oprócz tego, dzięki tym czujnikom telefony „wiedzą” ile kroków wykonaliśmy w danym dniu. Istnieją specjalne algorytmy, które pozwalają na podstawie naszych charakterystycznie, powtarzających się ruchów, określić czy dana osoba jest właścicielem telefonu [6, 15, 36].

## 1. Przegląd czujników pomiarowych

### 1.1. Akcelerometri

Akcelerometr w ogólnym znaczeniu jest urządzeniem czysto mechanicznym, umożliwiającym pomiar przyśpieszenia układu, w kierunku jego czułości. W rzeczywistości, gdy mówimy o akcelerometrze, jako o czujniku należy uwzględnić również przetwornik wielkości fizycznej, na wielkość elektryczną. Układ mechaniczny akcelerometru można zamodelować przy użyciu masy  $M$ , która łączy się z nieruchomą obudową czujnika, poprzez sprężynę o sztywności  $K$  oraz tłumik o współczynniku tarcia lepkiego  $D$ . Opisany model mechaniczny został przedstawiony na rys. 1.



**Rys. 1.** Model mechaniczny akcelerometru, gdzie:  $x(t)$  – położenie masy  $M$  względem obudowy,  $y(t)$  – położenie obudowy względem nieruchomego układu odniesienia,  $u(t)$  – położenie masy  $M$  względem nieruchomego układu odniesienia [28]

Na podstawie równania różniczkowego ruchu, uwzględniając oznaczenia z rysunku, możliwe jest zapisanie równania, które pozwala wyznaczyć wartość przyspieszenia względem nieruchomego układu odniesienia [5, 28].

$$a(t) = \frac{d^2 y(t)}{dt^2}$$

Opisany model w przypadku akcelerometru ma istotny wpływ na charakterystyki statyczne oraz dynamiczne czujnika. Odpowiednio modulując wartościami  $K$ ,  $M$  oraz  $D$  możliwe jest uzyskanie różnych charakterystyk. Bardziej stabilne charakterystyki można uzyskać, stosując model mechaniczny z kompensacją siły. W tym przypadku akcelerometr pracuje w zamkniętym układzie regulacji, którego zadaniem jest utrzymanie masy  $M$  w stałym położeniu, a zmianie ulega siła kompensująca  $f_c$ , która jest proporcjonalna do przyspieszenia. Ruch takiego modelu można opisać zależnością uwzględniając siłę kompensującą  $f_c$ .

$$f_c(t) - Ma(t) = M \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + D \frac{dx(t)}{dt} + Kx(t)$$

Model akcelerometru z kompensacją siły charakteryzuje się tym, że odpowiednio dobierając elementy układu regulacji automatycznej, możliwe jest wykonanie akcelerometru, o bardzo dużej liniowości charakterystyki, eliminując tym samym wpływ sprężyny o stałej  $K$  oraz tłumika o współczynniku tarcia lepkiego  $D$ . Czujniki tego typu posiadają znacznie szerszy zakres częstotliwości pracy [28].

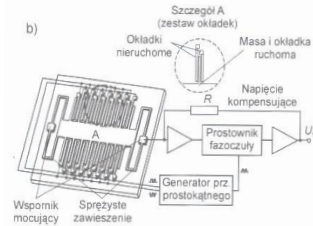
Akcelerometry wykonuje się zazwyczaj w postaci mikroukładów elektromechanicznych w technologii MEMS. Ze względu na wielkość fizyczną (elektryczną) będąca zależną od przyspieszenia możemy wyróżnić akcelerometry:

- a) piezoelektryczne,
- b) pojemnościowe,
- c) piezorezystancyjne,
- d) termiczne.

Akcelerometr pojemnościowy, do pomiaru wielkości przemieszczenia masy względem obudowy, wykorzystuje kondensator o zmiennej odległości okładek. W wyniku działania przyspieszenia, masa się przemieszcza powodując zmianę pojemności kondensatora, która wykrywana jest przez układy kondycjonujące sygnał. Wymagane jest wzmocnienie sygnału ze względu na bardzo małe zmiany pojemności. W celu zmniejszenia błędów, wykorzystuje się często układy różnicowe, dla których odczyt stanowi różnica zmian pojemności dwóch kondensatorów. Rozwiązanie konstrukcyjne akcelerometru pojemnościowego zostało przedstawione na rys. 2 [5, 28].

Akcelerometry piezorezystancyjne, do pomiaru wielkości przemieszczenia masy względem obudowy, wykorzystują układ tensometryczny. W przypadku tej konstrukcji, masa jest umocowana na sprężystych belkach, na których umieszczone są również piezore-

zystory. W wyniku działania przyspieszenia, następuje ruch masy względem obudowy, w wyniku czego belki są zginane. Zmiana ta jest wykrywana przez układ mostkowy. Podobnie jak w przypadku konwencjonalnych pomiarów tensometrycznych, wymagana jest kompensacja zmian temperatury [28].



**Rys. 2.** Konstrukcja akcelerometru pojemnościowego wykonanego w technologii mikroobróbki powierzchniowej krzemu [28]

Akcelerometry są szeroko stosowane. Z tego powodu w sklepach elektronicznych można znaleźć wiele różnych typów akcelerometrów, które różnią się parametrami takimi jak: sposób pomiaru, rodzaj sygnału pomiarowego, zakres pomiarowy, dokładność pomiaru, częstotliwość pomiaru itd. Do porównania czujników przyspieszeń wybrano trzy rozwiązania, produkowane przez trzy różne firmy. Zestawienie podstawowych parametrów czujników przedstawiono w tabeli 1.

**Tab. 1.** Zestawienie parametrów wybranych akcelerometrów [21, 25, 27]

Cecha	Wartość		
Nazwa czujnika	LSM303DLHC	ADXL345	MPU-60X0
Rodzaj czujnika	b.d.	pojemnościowy	piezorezystancyjny
Zakresy pomiarowe	$\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g/\pm 16g$	$\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g/\pm 16g$	$\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g/\pm 16g$
Ilość bitów ADC	16	13	16
Częstotliwość	Do 3,2 kHz	Do 3,2 kHz	Do 1 kHz
Czułość poprzeczna	b.d.	1%	2%
Nieliniowość	0,01%/°C	0,5%	0,5%

## 2. Żyroskop

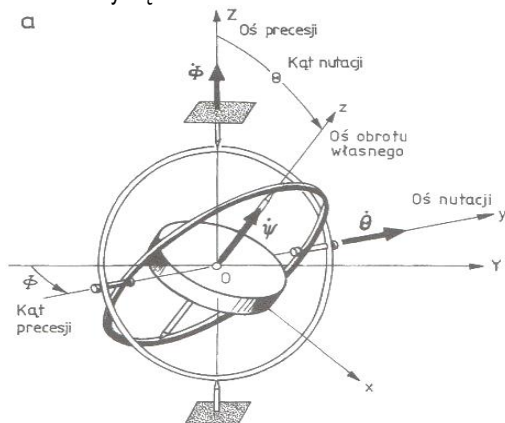
Tradycyjny żyroskop jest urządzeniem mechanicznym, które zostało wynalezione w 1852 roku przez Jeana Foucaulta. Żyroskop tego typu był wykorzystywany, jako element nawigacji inercyjnej służący do określania kąta obrotu obiektu, względem jakiegoś płaszczyzny odniesienia. Model żyroskopu na przegubie kardana został przedstawiony na rysunku 3.

Obrót wokół osi względem, której masowy moment bezwładności jest największy, nazywamy kątem obrotu własnego, a prędkość kątowna wokół tej osi została oznaczona  $\dot{\Psi}$ . Obrót wokół osi  $y$  nazywamy kątem nutacji  $\theta$ , a obrót wokół osi  $z$  kątem precesji  $\varphi$ .

Żyroskop mechaniczny znalazł zastosowanie w nawigacji, w szczególności morskiej i lotniczej, dzięki efektowi żyroskopowemu, który określa związek pomiędzy kierunkiem przyłożonych do obiektu momentów, a kierunkiem precesji tego obiektu. Uwzględniając, że na obiekt nie działają żadne siły, a moment pędu jest zachowany, można wnioskować, że zwiększając prędkość kątowną obiektu, zmniejsza się prędkość kątowna precesji i odwrotnie. Masa wprawiona w odpowiednio szybki ruch obrotowy, nieobciążona siłami zewnętrznymi, zawieszona przegubowo, będzie utrzymać stały kierunek swojej osi obrotu [12].

Wraz z rozwojem układów MEMS, opracowano nowy rodzaj żyroskopów. Zachowały one swoją tradycyjną nazwę, są żyroskopami mechanicznymi, jednakże zasada działania tego typu urządzeń jest zupełnie inna niż tradycyjnego żyroskopu [35]. Element pomiarowy, w urządzeniach wykonanych w technologii MEMS, nie wykonuje

ruchu obrotowego, a jedynie drga. W ich przypadku zmiana prędkości obrotowej, powoduje wywołanie siły Coriolisa, która jest proporcjonalna do zmiany kąta obrotu w czasie.



Rys. 3. Model mechaniczne żyroskopu na przegubie kardana [19]

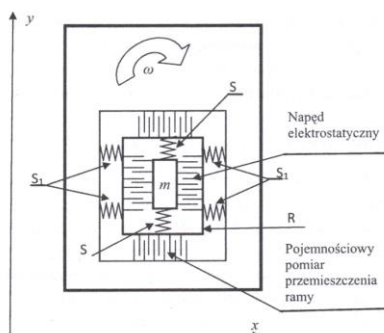
Konstrukcje żyroskopów są bardzo zróżnicowane. Projektanci żyroskopów mają do dyspozycji wiele różnych komponentów, co daje ponad 2500 możliwych kombinacji wykonania żyroskopów [32]. Nowoczesne żyroskopy możemy zaliczyć do dwóch podstawowych grup:

- układy optyczne,
- układy z wibrującym elementem VSG.

Układy optyczne opierają się na zjawisku Sagnaca, które polega na występowaniu różnicy czasu transmisji fal świetlnych w kanale, podczas jego obrotu. Żyroskopy optyczne nie znajdują zastosowania w układach do wyznaczania parametrów ruchu pojazdu [5]. Układy z wibrującym elementem mogą być zbudowane na wiele sposobów, ale najpopularniejsze są konstrukcje nawiązujące do zasady działania kamertonu. Ich idea działania polega na wprowadzeniu kamertonu w drgania ciągłe, podobne do akustycznych. W wyniku obrotu tego kamertonu z prędkością kątową, na jego ramiona zaczyna działać siła Coriolisa, która powoduje skrócenie jego ramion w płaszczyźnie prostopadłej do osi kamertonu [20]. Konstrukcje wykorzystujące opisaną regułę, w rzeczywistości jako element drgający wykorzystują napęd realizowany pojemnościowo, a do wykrywania skrócenia używa się elektrod.

Drugim rodzajem czujników wykorzystujących wpływ siły Coriolisa, jest żyroskop zbudowany na bazie ramki o pewnej masie  $m$ , która zamocowana jest do obudowy za pomocą sprężyn o stałej  $S$  oraz  $S_1$ . Model takiego żyroskopu został przedstawiony na rysunku 4.

Żyroskopy są równie popularne jak akcelerometry i stanowią podstawę budowy nawigacji inercyjnej. Żyroskopy różnią się między sobą podstawowymi parametrami takimi jak: zakres pomiarowy, częstotliwość pracy, czułość poprzeczna, nieliniowość, ilość bitów przetwornika ADC itd.



Rys. 4. Model żyroskopu z wibrującym elementem [35]

Tab. 2. Zestawienie parametrów wybranych żyroskopów [23, 26, 27]

Cecha	Wartość		
Nazwa czujnika	L3GD20	MPU-60X0	BMG160
Zakresy pomiarowe	±250°/s; ±500°/s; ±2000°/s	±250°/s; ±500°/s; ±1000°/s; ±2000°/s	±125°/s; ±250°/s; ±500°/s; ±1000°/s; ±2000°/s
Ilość bitów ADC	16	16	16
Częstotliwość	Do 760 Hz	Do 8 kHz	Do 2 kHz
Czułość poprzeczna	Brak danych	2%	1%
Nieliniowość	0,2%	0,2%	0,05%

### 3. Magnetometr

Magnetometr służy do pomiaru pola magnetycznego, jak również namagnesowania różnych obiektów wykonanych np. z ferromagnetyków. Pierwszy pomiar pola magnetycznego został wykonany przez Carla Gaussa w 1833 roku. Stanowiło to początek różnych eksperymentów z polem magnetycznym, w wyniku czego odkryto wiele zjawisk z nim związanych, a są to m.in. magnetoimpedancja, magnetostrykcja, indukcja elektromagnetyczna, efekt Halla, magneto-rezystancja [4, 7].

Magnetometry w formie znanej obecnie rozpowszechnione zostały w latach 70 ubiegłego wieku, kiedy zbudowano pierwszy czujnik wykorzystujący zjawisko magneto-rezystancji. Początkowo były one wykorzystywane jako głowice do taśm i dysków magnetycznych. Znalazły również zastosowanie w bezpośrednich pomiarach pola magnetycznego np. anomalie pola magnetycznego Ziemi oraz w pomiarach pośrednich np. wykrywanie zmian ilości cieczy w zbiorniku.

W ramach zjawiska magneto-rezystancji możemy wyróżnić jej kilka rodzajów: gigantyczną, anizotropową, tunelową, kolosalną, balistyczną oraz nadzwyczajną. W przypadku magnetometrów wykorzystywana jest zazwyczaj magneto-rezystancja anizotropowa. Należy jednak wspomnieć, o co raz częściej wykorzystywanym zjawisku magneto-rezystancji gigantycznej, które jest zjawiskiem analogicznym, ale jego skala jest znacznie większa, a zmiana rezystancji może dochodzić nawet do 80% [7].

Zjawisko magneto-rezystancji anizotropowej, polega na zmianie początkowego oporu elektrycznego  $R_0$  przewodnika, na który działa zewnętrzne pole magnetyczne  $H$ , o wartość  $\Delta R$ . Gdy przez przewodnik przepływa prąd o natężeniu  $I$ , początkowy spadek napięcia na magneto-rezystorze, gdy pole magnetyczne nie występuje, można zapisać na podstawie prawa Ohma.

Określenie zmiany wartości oporu w funkcji pola magnetycznego, zależy od kierunku spontanicznego namagnesowania. Odpowiednio modelując własności warstwy przewodzącej można dobrać tak kierunek osi łatwego namagnesowania, aby pokrywał się z kierunkiem przepływu prądu. W takiej sytuacji oś trudnego namagnesowania jest prostopadła do kierunku przepływu prądu, w związku z tym, gdy na przewodnik nie działa pole magnetyczne, zmiana rezystancji nie występuje.

Na podstawie określenia pola w trzech niezależnych osiach kartezjańskiego układu współrzędnych, możliwe jest określenie kątów obrotów czujnika, wokół poszczególnych osi. W modułach nawigacji inercyjnej, magnetometr wykorzystywany jest jako układ wspomagający odczyt żyroskopu i przy zastosowaniu odpowiednich metod, obliczeniowych możliwe jest ograniczenie dryftu żyroskopu.

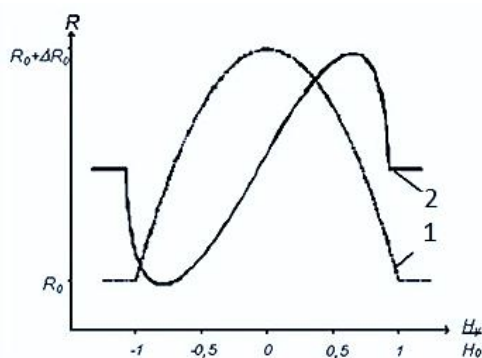
Konstrukcje magnetometrów są bardzo zróżnicowane i zależą od zjawiska jakie wykorzystują do pomiarów pola magnetycznego. Najprostszym, a zarazem najstarszym magnetometrem, jest tradycyjny kompas, którego zadaniem jest wskazywać północny biegun magnetyczny Ziemi. Istnieje wiele odmian magnetometrów pozwalających badać różne aspekty magnetyzmu. W pracy wykorzystano



magnetometr wykonany w technologii MEMS, który wykorzystuje zjawisko magnetorezystancji anizotropowej.

Czujniki tego typu wykonuje się poprzez nałożenie na podstawę czujnika, cienkiej warstwy permalaju tj. stopu niklu z żelazem. Zwykle zawartość procentowa pierwiastków w tym stopie, wynosi ok. 80% niklu oraz 20% żelaza. Materiał ten wykorzystywany jest w magnetometrach, ze względu na „miękkosć magnetyczną”, czyli zdolność stopu do magnesowania i rozmagnesowania. Pomiar zmiany pola magnetycznego, ze względu zasadę działania, zamieniany jest od razu na sygnał napięciowy, który poddawany jest dalszej obróbce w celu linearyzacji. W przypadku czujników, które służą do pomiaru silnych pól magnetycznych, nie ma specjalnych wymagań, co do wykonania powierzchni permalaju. Wraz ze zmniejszaniem gęstości pola magnetycznego, dochodzi konieczność zastosowania zmiany kąta osi łatwej magnesowania, w stosunku do kierunku przepływu prądu. Prowadzi to do zwiększenia czułości, poprzez przesunięcie fazowe o kąt 45°.

Wpływ zmiany zależności przedstawiony został w postaci wykresu na rysunku 5, na którym można zauważyć, że dla niskiej wartości natężenia pola magnetycznego działającego na czujnik, w przypadku charakterystyki bez pochylenia osi „łatwej”, pochodna funkcji przyjmuje wartość bliską zeru. Obszar niskiej wartości natężenia pola charakteryzuje się niemal liniowym wzrostem.



Rys. 5. Zależność wielkości zmiany rezystancji czujnika: 1 – dla kierunku osi łatwej zgodnej z kierunkiem przepływu prądu, 2 – kierunku odchylnego o kąt 45° [37]

Magnetometry są wykorzystywane, jako dodatkowy moduł do nawigacji inercyjnej pozwalający otrzymać dokładniejszy i stabilniejszy wynik pomiaru. W tym zastosowaniu rzadko występuje samodzielnie i zazwyczaj stanowi jeden z układów na płytce drukowanej, na której znajduje się również akcelerometr i żyroskop.

Tab. 3. Zestawienie parametrów wybranych magnetometrów [22, 24, 25]

Cecha	Wartość		
	LSM303DLHC	LIS3MDL	BMC150
Nazwa czujnika	LSM303DLHC	LIS3MDL	BMC150
Zakresy pomiarowe	±130µT/±190µT/ ±250µT /±400µT/ ±470µT/±560µT/ ±810µT	±400µT/±800µT/ ±1200µT/ ±1600µT	±2500µT
Ilość bitów ADC	12	16	12
Częstotliwość	Do 220 Hz	Do 1 kHz	Do 300 Hz
Nieliniowość	b.d	0,12%	1%

#### 4. Błędy pomiarowe czujników

Poznanie błędów wpływających na odczyt wartości przyspieszenia i prędkości kątowej, ma istotny wpływ na dokładność wyznaczenia parametrów ruchu. Otrzymanie prędkości i przemieszczenia na podstawie danych z akcelerometru wymaga całkowania, które

można interpretować geometrycznie jako sumowanie pola pod wykresem. Brak eliminacji błędów systematycznych oraz przypadkowych może prowadzić do przekłamania wyniku. Możemy wyróżnić wiele rodzajów błędów, a następnie przyporządkować je do dwóch podstawowych grup [34]. Żyroskop jest obarczony błędem wolnozmiennym, natomiast akcelerometr błędem szybkozmiennym [33]. Do pierwszej grupy zaliczymy błędy związane z konstrukcją czujnika, na które jako użytkownik nie mamy wpływu:

- błąd prostopadłości osi (czujniki wieloosiowe) – błąd prostopadłego ułożenia czujników dla każdej z osi, parametrem powiązaniem jest czułość poprzeczna, a więc podatność czujnika na odczyt wartości w kierunku, w którym obiekt nie ulega przemieszczeniu. Wartość czułości poprzecznej podaje się jako wartość procentową, która zazwyczaj nie przekracza 5% [28].
- błąd przetwornika ADC (czujniki cyfrowe) – w wyniku dyskretyzacji wielkości fizycznej, która jest funkcją ciągłą, dochodzi do utraty pewnej ilości informacji, a dokładność procentowa dyskretyzacji określona jest ilością bitów n przetwornika analogowo-cyfrowego.
- błąd kalibracji czujnika – błędy tego typu związane są ze współczynnikami skalowania, dopasowania, a także linearyzacji. Błędy tego objawiają się, jako dodatkowy błąd systematyczny w czasie, gdy na czujnik oddziałuje wymuszenie [1, 3]. W nowych konstrukcjach żyroskopów, producenci dają możliwość pomiaru oraz korekcy tego błędu.

Do drugiej grupy błędów zaliczamy błędy odczytu wartości przyspieszenia, które w dużej mierze są losowe, ale znany jest ich rozkład w wyniku czego możliwa jest ich aproksymacja, a w konsekwencji ograniczenie ich wpływu [2, 3, 36]. Zaliczamy do nich:

- offset – błąd systematyczny, który jest równoległym przesunięciem mierzonej wartości. Brak eliminacji offsetu w przypadku wyznaczania trajektorii skutkuje błędem odległości, który narasta w czasie czasu.
- błądzenie losowe prędkości (szum biały) – błąd losowy o płaskim widmie, posiadający intensywność teoretycznie statyczną w całym paśmie. Ten rodzaj błędów generuje błędzenie losowe drugiego rodzaju w przypadku wyznaczania trajektorii, które rośnie proporcjonalnie w czasie.
- błąd migotania – błąd losowy związany z defektami sieci krystalicznej półprzewodników. W przypadku wyznaczania trajektorii ruchu, generuje błędzenie losowe trzeciego rodzaju, które rośnie proporcjonalnie w czasie.
- błąd temperaturowy – silnie nieliniowy błąd, powodujący fluktuację błędów systematycznych na wyjściu z czujnika. W konstrukcjach akcelerometrów, żyroskopów i magnetometrów uwzględnia się czujniki temperatury, które mają za zadanie kompensować ten błąd.

#### 5. Globalny system pozycjonowania (GPS)

System GPS z ang. Global Positioning System jest układem nawigacji satelitarnej, który został opracowany i wdrożony w XX wieku przez Stany Zjednoczone. System GPS służy do ustalania pozycji odbiornika na powierzchni Ziemi i tworzą go 3 podstawowe segmenty:

- kosmiczny – konstelacja 24 satelitów okrążających Ziemię w czasie ok. 12h, rozłożonych w równych odstępach na orbicie, zapewniających stałą widoczność, co najmniej 5 satelitów z prawdopodobieństwem wynoszącym 99,96% dla kąta 5° ponad horyzontem.
- ziemny – układ stacji, których zadaniem jest monitorowanie stanu satelitów i korygowanie pozycji na orbicie, gdy jest to konieczne.

c) użytkowników – wszystkie odbiorniki GPS, które korzystają z sygnału nadawanego przez satelity. Mogą to być zarówno odbiorcy autoryzowani (zwiększona dokładność) oraz nieautoryzowani (dokładność normalna)

Głównym zadaniem systemu GPS, jest wyznaczenie pozycji obiektów na powierzchni Ziemi. Wyznaczenie tej pozycji odbywa się w sposób pośredni, ponieważ dokładne położenie obiektu określane jest poprzez rozwiązanie układu równań sfer kulistych, których środki stanowią satelity. Współrzędne x, y oraz z będące rozwiązaniem układu równań są punktem przecięcia się tych sfer [30,31]. Zostało to przedstawione na rysunku 6.



**Rys. 6.** Model czterech przecinających się sfer o środkach w satelitach. [źródło: <http://nadiagpsphysics.weebly.com/how-does-the-gps-work.html>]

Aby możliwe było wyznaczenie punktu przecięcia sfer, niezbędna jest znajomość promienia każdej ze sfer, a wyznacza się je poprzez wymnożenie prędkości rozchodzenia się fali w próżni c oraz czasu potrzebnego na dotarcie sygnału do odbiornika. Z tego powodu czas t stanowi dodatkową niewiadomą, a więc niezbędne jest dodanie czwartego równania do układu równań, które przyjmuje postać.

$$\begin{aligned}(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2 &= (ct_{c1})^2 \\(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2 &= (ct_{c2})^2 \\(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2 &= (ct_{c3})^2 \\(x_4 - x)^2 + (y_4 - y)^2 + (z_4 - z)^2 &= (ct_{c4})^2\end{aligned}$$

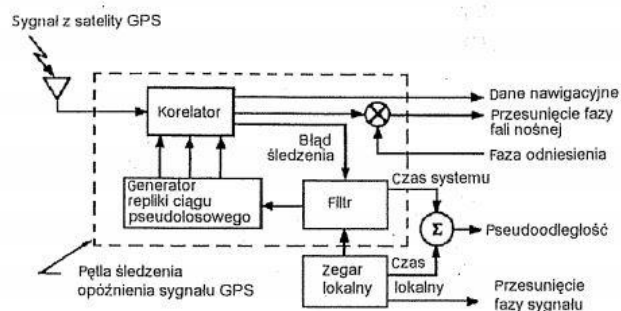
Do wyznaczenia pozycji odbiornika w przestrzeni wymagana jest znajomość dokładnego czasu, satelity wyposażone są w bardzo dokładne zegary atomowe. Niestety, zastosowanie zegara atomowego w odbiorniku byłoby bardzo nieekonomiczne, dlatego stosuje się zegary kwarcowe o podwyższonej dokładności, jednak błąd generowany w ten sposób jest na tyle duży, że w rzeczywistości układ równań zostaje rozbudowany o dodatkowe równanie, zawierające odpowiednie poprawki.

Pomiar czasu przejścia sygnału od satelity do odbiornika może być wykonany na 2 sposoby:

- metodą kodową – do odbiornika przesyłany jest ściśle określony ciąg binarny, który w odbiorniku jest porównywany z generowaną repliką. Przesunięcie tego kodu nadanego w stosunku do repliki jest przeliczane na czas, który stanowi podstawę rozwiązania układu równań,
- metodą fazową – znając częstotliwość sygnału nadawanego z satelity możliwe jest określenie dokładnej ilości pełnych przejść fazowych od satelity do odbiornika, a w konsekwencji czasu. Do zastosowania tej metody pomiaru wymagany jest udział stacji naziemnych [18].

Konstrukcje odbiorników GPS różnią się między sobą w zależności od wymaganych parametrów użytkowych, ale ich ogólna zasada działania i schemat budowy jest niezmienny. Odbiornik GPS musi spełniać szereg podstawowych funkcji, aby możliwe było ustalenie jego pozycji, a zaliczamy do nich: odbiór sygnału, identyfi-

kacja satelity, wyznaczenie czasu przebiegu sygnału obliczenie informacji nawigacyjnych. Schemat blokowy odbiornika GPS został przedstawiony na rysunku 7.



**Rys. 7.** Schemat blokowy odbiornika GPS [19]

Najważniejszym elementem każdego odbiornika GPS jest zegar, najczęściej kwarcowy, który jest wzorcem do wyznaczania czasu i częstotliwości. Kolejnym istotnym elementem odbiornika jest generator repliki ciągu pseudolosowego, którego zadaniem jest przekazywanie ciągów bitowych do korelatora, tworząc tym samym pętlę opóźnienia. Jej zadaniem jest określenie wielkości opóźnienia sygnału, w stosunku do chwili czasu nadania z satelity. Wszystkie informacje trafiają następnie do jednostki arytmetycznej, która zamienia pojedyncze dane w informacje nawigacyjne, które w zależności od urządzenia mogą być zapisywane lub wyświetlane w czasie rzeczywistym [13, 19].

Błędy określenia pozycji odbiornika GPS mogą mieć dwojakie podłoże. Pierwszą grupę błędów stanowią błędy związane z budową całego systemu oraz jego chwilową konfiguracją. Do drugiej grupy błędów zaliczamy błędy związane z działaniem samego odbiornika. Duży wpływ ten rodzaj błędów ma jego jakość wykonania. Pierwsza grupa błędów wraz z szacowanymi dokładnościami dla użytkownika nieautoryzowanego i autoryzowanego została przedstawiona w tabeli 4.

**Tab. 4.** Średnie błędy systemu GPS [19]

Źródło błędu	Użytkownik autoryzowany	Użytkownik nieautoryzowany
Położenie stacji lub satelity	6-30 m	1,2 m
Wpływ atmosfery	12 m	0,02 m
Wielotorowość	1,2 m	1,2 m
Szumy i inne	8 m	0,05 m
Współczynnik odchylenia	14-33 m	1,78 m
Suma	41,2 – 84,2 m	4,25 m

Do najważniejszych przyczyn błędów odbiornika GPS należą:

- opóźnienia związane z budową obwodów elektronicznych, w szczególności obwodu RLC, a także wpływ zmiany temperatury na charakterystyki podzespołów elektronicznych. Błąd generowany w ten sposób wynosi ok. 0,2 m.
- problemy synchronizacji z zegarem kwarcowym odbiornika,
- szybkość działania oprogramowania,
- utrata odcinka kodu o długości pełnego okresu,
- błąd wyznaczenia parametrów nawigacyjnych – błąd zależy od odbiornika i mieści się w granicach 3 metrów dla użytkowników nieautoryzowanych.

## 6. Układ współrzędnych

Układ współrzędnych kartezjańskich, inaczej nazywany układem prostokątnym. Jest to prostoliniowy układ o osiach prostopadle skierowanych względem siebie, przecinających się w jednym punkcie. Punkt ten jest określane mianem początku układu współrzęd-

nych i oznacza się go zwyczajowo cyfrą lub literą. Zbiór pozwalający na opis ruchu pojazdu w przestrzeni jest trójwymiarowy, z tego względu wykorzystywany układ współrzędnych kartezjańskich posiada trzy osie:

- a) oś OX zwaną osią odciętych,
- b) oś OY zwaną osią rzędnych,
- c) oś OZ zwaną osią kotych.

### 7. Układ współrzędnych sferycznych

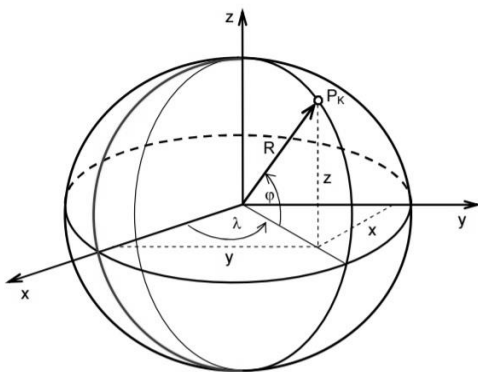
Układ współrzędnych sferycznych stanowi rozszerzenie układu współrzędnych biegunowych w przestrzeni trójwymiarowej. W ramach współrzędnych sferycznych można wyróżnić system „geograficzny” i „matematyczny”. Obydwa systemy do opisu położenia punktu w przestrzeni wymagają znajomości dwóch kątów oraz promienia wodzącego. Dla stałej długości promienia wodzącego, wszystkie możliwe położenia punktu w przestrzeni powodują wyrysowanie sfery o środku w początku układu współrzędnych. Układ tego typu w najbardziej zbliżony i intuicyjny sposób pozwala na opisanie położenia na kuli ziemskiej [12].

W tym miejscu należy zwrócić uwagę na różnicę w opisie systemu „matematycznego” i „geograficznego”. W ujęciu matematycznym współrzędne sferyczne określają trzy parametry: promień wodzący, długość azymutalna, odległość zenitalna.

Ujęcie „geograficzne” również określa współrzędne sferyczne przy pomocy trzech niezależnych zmiennych: promienia wodzącego, długości geograficznej, szerokości geograficznej.

Różnica pomiędzy wspomnianymi systemami polega na innym zakresie zmienności kąta  $\varphi$ . W związku z tą różnicą układ „geograficzny”, czyli taki jakim posługujemy się przy określaniu współrzędnych geograficznych, dzieli kulę ziemską płaszczyzną wyznaczoną przez równik, na półkulę północną i południową.

Aby możliwe było porównywanie danych zebranych przy użyciu modułu GPS oraz nawigacji inercyjnej, wymaga się aby dane przetransformować do tego samego rodzaju układu współrzędnych. Ze względu na fakt, iż dane z czujników nawigacji inercyjnej zwracane są w układzie kartezjańskim najrozsądniej jest przekształcić dane modułu GPS z układu sferycznego na układ kartezjański. Przejście z układu współrzędnych sferycznych na układ współrzędnych kartezjańskich graficznie przedstawiono na rysunku 8.



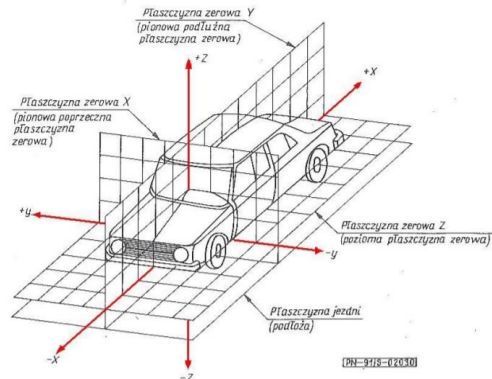
Rys. 8. Współrzędne geograficzne oraz układ kartezjański kuli ziemskiej [14]

W przypadku takiej transformacji należy założyć, że początek prawoskrętnego układu współrzędnych kartezjańskich pokrywa się z początkiem układu współrzędnych sferycznych. Co więcej osie OX i OY układu kartezjańskiego wyznaczają płaszczyznę OXY, która musi pokrywać się z płaszczyzną równika Ziemi, natomiast oś OX przechodzi przez południk zerowy [14]. Takie założenia pozwalają na przejście z układu współrzędnych sferycznych do układu kartezjańskiego.

### 8. Globalny i lokalny układ współrzędnych

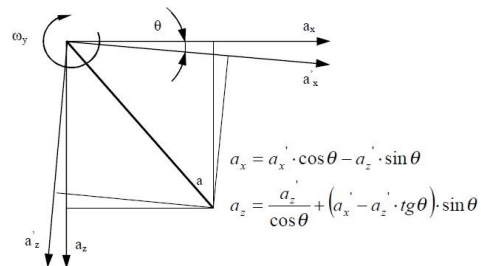
Aby wyznaczyć parametry ruchu pojazdu względem pewnego nieruchomego punktu w przestrzeni, należy wyróżnić lokalny oraz globalny układ współrzędnych. Oba układy są układami kartezjańskimi prawoskrętnymi, przy czym lokalny układ współrzędnych związany jest poruszającym się obiektem. Globalny układ współrzędnych nie zmienia swojej orientacji oraz położenia w czasie i znajduje się w pewnym znanym miejscu w przestrzeni. Dla uproszczenia zakłada się, że w chwili początkowej ruchu osie układu globalnego oraz lokalnego pokrywają się. Oprócz tego z układem lokalnym – pojazdem – związany jest układ współrzędnych czujników. Zakłada się, że osie układu związanego z triadą czujników, pokrywają się z osiami lokalnego układu współrzędnych.

W przypadku pojazdu samochodowego kierunku osi określa norma PN-91/S-02030. Według tej normy oś OX pokrywa się z osią wzdłużną pojazdu, OY z osią poprzeczną, a oś OZ jest skierowana prostopadle do płaszczyzny jezdni, natomiast początek układu współrzędnych, leży w środku masy pojazdu. Układ osi i płaszczyzn związanych z pojazdem samochodowym przedstawiono na rysunku 9 [29].



Rys. 9. Lokalny układ płaszczyzn i współrzędnych związanych z pojazdem samochodowym [29, 31]

Ze względu na strukturę pojazdu schodowego, w której znajdują się elementy podatne pomiędzy karoserią pojazdu, a nawierzchnią drogi, dochodzi do obrotu karoserii pojazdu – lokalnego układu współrzędnych – względem globalnego układu współrzędnych. W wyniku tego obrotu, odczyt przyspieszeń zostaje zakłócony, ze względu na dodatkową składową, którą jest przyspieszenie grawitacyjne. Istotę pomiarów parametrów ruchu układu lokalnego, stanowi odniesienie tego układu w każdej chwili pomiaru, do układu globalnego poprzez obrót wektora przyspieszenia, o ściśle określone kąty, wokół poszczególnych osi współrzędnych. Wpływ obrotu lokalnego układu współrzędnych na odczyty przyspieszeń na płaszczyźnie OXY schematycznie przedstawiono na rysunku 10 [9-11]. Prawidłowe określenie kątów obrotu, stanowi najistotniejszą przeszkodę w wyznaczeniu rzeczywistego przebiegu parametrów ruchu pojazdu samochodowego.



Rys. 10. Wpływ obrotu układu lokalnego na pomiar wartości przyspieszenia [31]



## Podsumowanie

Wyznaczenie parametrów ruchu pojazdu stanowi zagadnienie złożone i skomplikowane. Największe wyzwanie, stanowi problem wyznaczenia kątów, umożliwiających zorientować układ lokalny, względem globalnego układu współrzędnych. Poprawne wyznaczenie wartości kątów obrotu bryły nadwozia samochodu podczas jego ruchu pozwala na poprawne wyznaczeniem pozostałych parametrów ruchu. Wykorzystanie nawigacji inercyjnej wyróżnia zbudowany układ pomiarowy, co umożliwiło jej wykorzystanie do akwizycji parametrów ruchu, niezależnie od manewrów obiektu ruchomego.

Budowa układu pomiarowego do akwizycji i archiwizacji parametrów ruchu układów mobilnych, w szczególności samochodów osobowych, wymagała wykonania przeglądu dostępnych czujników pomiarowych. Uwzględnienie podczas doboru sensorów ich charakterystyk oraz błędów pomiarowych pozwoliło zwiększyć dokładność pomiarową zbudowanego układu oraz ograniczyć niepewność przyjętych modeli matematycznych.

## Bibliografia:

- Borenstein J., Ojeda L., Kwanmuang S., *Heuristic Reduction of Gyro Drift*, JoN, Michigan, 2009
- Du J., *Examensarbetet i utveckling och undersökning av algoritmer för MEMS-gyron, 30hp, avancerad nivå*, BTH, 2012
- Du J., Gerdman C., Linden M., *Signal Processing Algorithms for Position Measurement with MEMS-Based Accelerometer*, 16<sup>th</sup> Nordic Baltic Conference on Biomedical Engineering, Gothenburg, 2014
- Freitas P., *Magnetoresistive Sensors*, Journal of Physics: Condens. Matter 19 (2007) str. 1-21
- Gucma M. *Podstawy Morskiej Nawigacji Inercyjnej*, Wyd. AM, Szczecin, 2006
- Grygiel R., Bieda R., Wojciechowski K., *Metody wyznaczania kątów z żyroskopów dla filtru komplementarnego na potrzeby określania orientacji IMU*, Przegląd Elektrotechniczny, R.90 Nr 9/2014, str. 217-224
- Hauser H., Stragl G., *Magnetoresistive Sensors*, Preparation, Properties and Applications of Thin Ferromagnetic Films, 2007, str. 15-27
- Janota A., Šimák V., *Improving the Precision and Speed of Euler Angles Computation from Low-Cost Rotation Sensor Data*, Sensors, 2015, 15, 7016-7039
- Kędziora K., Krzemień P., Wach W., *Problematyka Interpretacji Danych z Wybranych Urządzeń Rejestrujących Parametry Ruchu Pojazdów*, Kraków, 2012
- [19] Kędziora K., Lewandowski A., Waluś K. J., *3-Axis Acceleration Sensor Model In Application To Dynamic Vehicle Movement Measurement*, Kraków-Poznań
- Kędziora K., Lewandowski A., Waluś J. K., *Wykorzystanie czujników przyspieszenia do wyznaczania parametrów krzywoliniowych ruchu pojazdu*, Kraków-Poznań, 2007-2010
- Kittel C., *Mechanika*, PWN, Warszawa, 1973 str. 265-286
- Kruszewski P., *Nawigacja Satelitarna w Praktyce*, KaBe, Krosno, 2016
- Ligas M., *Układy współrzędnych na kuli*, Materiały dydaktyczne – Geodezja geometryczna
- Matzner F., *Tracking of 3D Movement*, praca magisterska, Uniwersytet Praski, Praga, 2014
- Merkisz J., *Pokładowe urządzenia rejestrujące w samochodach*, Wyd. PP, Poznań, 2007
- Mohamed A. A., *Creating Real-Time operation System Based on xPC Target Kernel*, IJRTE, Vol. 2, 2013, str. 143
- Narkiewicz J., *GPS Globalny System Pozycyjny*, WKŁ, Warszawa, 2003
- Narkiewicz J., *Podstawy układów nawigacyjnych*, WKŁ, Warszawa, 1999
- Nasiri S., *A Critical Review of MEMS Gyroscopes Technology and Commercialization Status*, InvenSense
- Nota katalogowa ADXL345 Digital Accelerometer firmy Analog Devices
- Nota katalogowa BMC 150 6-axis eCompass firmy Bosch
- Nota katalogowa BMG 160 Digital, triaxial gyroscope sensor firmy Bosch
- Nota katalogowa LIS3MDL Digital output magnetic sensor firmy ST
- Nota katalogowa LSM303DLHC Ultra compact high-performance eCompass module firmy ST
- Nota katalogowa L3GD20 3-axis Digital output gyroscope firmy ST
- Nota katalogowa MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4 firmy InvenSense
- Pomiary*, praca zbiorowa pod red. J. Piotrowskiego, WNT, Warszawa, 2009
- PN-91 S-02030, Pojazdy samochodowe, przyczepy i naczepy. Trójwymiarowy układ odniesienia i punkty bazowe. Nazwy i określenia.
- Wagli A., Skaloud J., *Turning Point. Trajectory Analysis for Skiers*, InsideGNSS, Spring 2007, str. 24-34
- Waluś K. J., *Analiza sygnałów dyskretnych w procesie modelowania ruchu pojazdów samochodowych*, Rozprawa Doktorska, Poznań, 2009
- Wetzstein G., *Inertial Measurement Units I*, EE 267 Virtual Reality Lecture 9, Stanford
- Wnuk M., *Filtracja Komplementarna w inercyjnych czujnikach orientacji*, Politechnika Wroclawska, Wroclaw, 2014
- Woodman J. O., *An Introduction to Inertial Navigation*, UoC, Cambridge, 2007
- Zakrzewski J., Kampik, M. *Sensory i Przetworniki Pomiarowe*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2013
- Zhi R., *A Drift Eliminated Attitude & Position Estimation Algorithm In 3D*, Graduate College Dissertations and Thesis, 2016
- <http://www.te.com/usa-en/industries/sensor-solutions/insights/intro-into-mr-sensor-applications.html>

## The system of acquisition and archiving of motion parameters of mobile systems - an overview of measuring sensors

As part of the work, a measuring system is presented that allows collecting and recording vehicle motion parameters. To build the system, an inertial navigation module was used, consisting of two-axis accelerometers and gyroscopes made in MEMS technology. The tests were carried out and calculation methods were developed to allow the collected data to be referenced, to a point in the three-dimensional space, in order to determine the trajectory of the vehicle's movement. The built-in measuring system uses three types of sensors: accelerometer, gyroscope, magnetometer. Each of these sensors allows the measurement of the physical size in three orthogonal axes of the Cartesian coordinate system. In addition, the work uses a satellite navigation module (GPS), as a reference on the "macro" scale (coordinate system related to the center of the globe with a radius of about 6371 km) for the inertial updating module (INS / IMU), enabling accurate measurement in the "micro" scale (the coordinate system associated with the starting point of the traffic for the route, the length of which does not exceed several hundred meters).

The article presents an overview of available measuring sensors with special consideration of the parameters of selected sensors and errors introduced into the measurement system.

**Keywords:** accelerometer, gyroscope, magnetometer, measuring system.

## Autorzy:

dr inż. **Konrad J. Waluś** – Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii transportu, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, konrad.walus@put.poznan.pl  
mgr inż. **Jakub Grabiński** – Absolwent Politechniki Poznańskiej