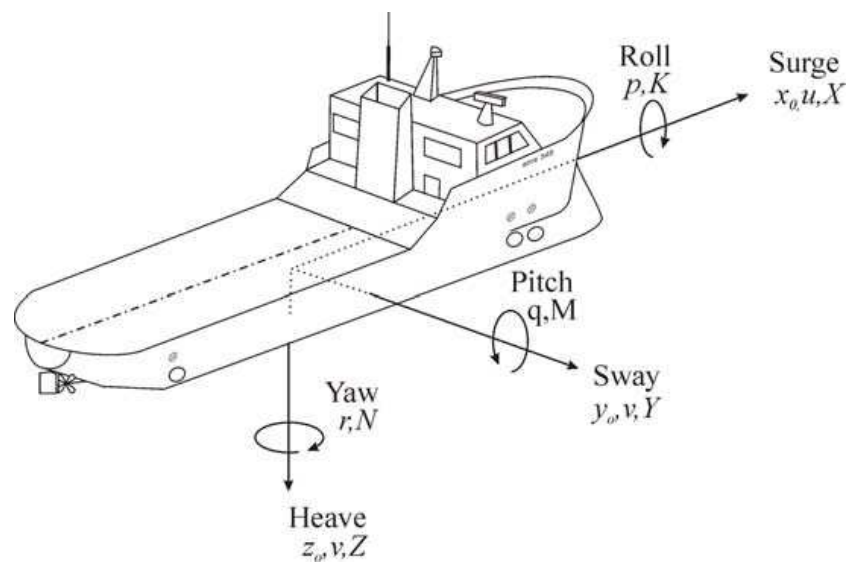


Podstawy nawigacji inercyjnej



Wprowadzenie

W zależności od stosowanych urządzeń, nawigację można podzielić na następujące działy:

- nawigacja astronomiczna, astronawigacja – jest to nawigacja oparta na obserwacji ciał niebieskich, przy dokładnej znajomości bieżącego czasu;
- nawigacja terrestryczna – jest to nawigacja morska oparta na obserwacji znaków nawigacyjnych i innych charakterystycznych obiektów znajdujących się na wybrzeżu, możliwa na odległościach do około 20 mil morskich;
- nawigacja zliczeniowa – jest to przybliżone określenie pozycji statku wodnego lub powietrznego na podstawie znajomości jego ostatniej zmierzonej pozycji oraz kierunku (kursu) i szybkości ruchu;

Wprowadzenie

- nawigacja pilotowa – jest to lokalna nawigacja wodna z uwzględnieniem znaków nawigacyjnych znajdujących się na danym akwenie i terenach okalających go, stosowana w otoczeniu portów, na prowadzących do nich torach wodnych oraz w innych oznakowanych miejscach trudnych nawigacyjnie;
- nawigacja radiowa, radionawigacja – jest to nawigacja oparta o sygnały radiowe wysyłane przez specjalne nadajniki;
- nawigacja satelitarna, np.: GPS – jest to nawigacja na podstawie sygnałów radiowych wysyłanych przez sztuczne satelity Ziemi;
- nawigacja meteorologiczna, meteonawigacja – jest to nawigacja prowadzona dowolnymi metodami, a polegająca na prowadzeniu statku szlakiem najkorzystniejszych warunków meteorologicznych;
- **nawigacja bezwładnościowa – inercyjna.**

Nawigacja inercyjna - wstęp

Istotę nawigacji inercyjnej stanowią metody określania pozycji za pomocą urządzeń zawierających elementy pomiarowe, wykorzystujące zasady dynamiki Newtona, czyli przyspieszeniomierzy i żyroskopów. Działanie systemów inercyjnych opiera się na drugiej zasadzie dynamiki Newtona, według której przyspieszenie ciała jest wprost proporcjonalne do oddziałującej na to ciało siły, a odwrotnie proporcjonalne do masy tego ciała.

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$$

gdzie:

- $\vec{a}$ – przyspieszenie ciała,
- $\vec{F}$ – siła oddziałująca na ciało o masie m ,
- m – masa ciała.

Nawigacja inercyjna - wstęp

W systemach nawigacji inercyjnej realizowany jest pomiar przyspieszeń oraz kątów obrotu w trzech płaszczyznach (x, y, z).

Pomiar przyspieszeń dokonywany jest za pomocą urządzeń zwanych przyspieszeniomierzami (akcelerometrami), natomiast pomiaru kątów obrotu dokonują żyroskopy.

Na podstawie analizy danych pochodzących z pomiaru wartości sił oraz prędkości kątowych poruszającego się obiektu, system realizuje proces zliczenia, prowadzący do uzyskania pozycji geograficznej we współrzędnych geograficznych (φ, λ, h).

Nawigacja inercyjna - wstęp

Droga, jaką przebył obiekt, może być wyznaczona na podstawie całkowania prędkości liniowej lub dwukrotnego całkowania przyspieszenia obiektu względem czasu.

Kąt orientacji przestrzennej (kurs) wyznaczany jest poprzez jednokrotne całkowanie prędkości kątowych obiektu względem czasu.

W chwili obecnej najczęściej spotykanymi w praktyce układami nawigacji zliczeniowej są układy nawigacji inercyjnej, wchodzące w skład systemów nawigacji inercyjnej.

Nawigacja inercyjna - wstęp

Podstawowymi blokami, wchodzącymi w skład systemów nawigacji inercyjnej (INS – ang. *Inertial Navigation Systems*) są:

- blok pomiarowy (IMU – ang. *Inertial Measurement Unit*), składający się z czujników:
 - przyspieszeniomierzy (dwa lub więcej – z reguły trzy czujniki) oraz
 - żyroskopów (trzech lub więcej, z reguły stosowane są trzy), zamontowanych na wspólnej platformie;
- blok obliczeniowy, składający się z komputerów nawigacyjnych, których zadaniem jest modelowanie pola grawitacyjnego Ziemi, całkowanie sygnałów wyjściowych z IMU oraz wyznaczanie i kontrolowanie pozycji obiektu.

Nawigacja inercyjna - wstęp

Istnieje wiele modeli układów nawigacji inercyjnej, charakteryzujących się różnym stopniem skomplikowania, przyjętymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi czy dokładnością, a co za tym idzie również i ceną. Jednak wszystkie te układy można podzielić na dwie podstawowe kategorie:

- układy kardanowe (ang. *gimballed*),
- układy bezkardanowe (ang. *strap-down*).

Układy odniesienia

W nawigacji inercyjnej obiekt traktowany jest jako punkt materialny poruszający się w nawigacyjnym **układzie współrzędnych**. Aby możliwe było wyznaczenie parametrów ruchu tego obiektu, jego położenia oraz ułożenia w przestrzeni wyrażonego we współrzędnych nawigacyjnych, niezbędne jest wyznaczenie **układu odniesienia**.

Układem odniesienia nazywany jest punkt lub układ punktów w przestrzeni, względem którego określa się położenie lub zmianę położenia (ruch) wybranego ciała. Wybrany punkt często wskazuje się poprzez wskazanie ciała, z którym związany jest układ współrzędnych. Wybór układu odniesienia jest warunkiem opisu ruchu lub spoczynku. Układ odniesienia można wybrać dowolnie, tak, by wygodnie opisać ruch. Z układem odniesienia wiąże się zazwyczaj układ współrzędnych, z którym bywa czasami mylony.

Układy odniesienia

Układem odniesienia w nawigacji inercyjnej jest trójwymiarowa przestrzeń wyznaczana przez układ trzech płaszczyzn. Wyróżnia się pięć zasadniczych układów odniesienia (ang. *Reference frames*), z których cztery związane są z przestrzenią, a jeden z obiektem. Każdy z nich składa się z trzech płaszczyzn wzajemnie prostopadłych, prawoskrętnych, reprezentowanych przez trzy osie: x , y , z . Różnice pomiędzy układami odnoszą się do:

- przyjmowanego modelu kształtu Ziemi (kula lub elipsoida),
- typu układu (kartezjański lub biegunowy),
- miejsca, w którym znajduje się środek układu (środek Ziemi lub lokalnie).

Układy odniesienia

Układ inercyjny opisywany jest przez trzy osie, oznaczone odpowiednio: x , y , z i oznaczany wielką literą I , od angielskiego *Inertial frame*. Układ ten jest podstawowym układem odniesienia z początkiem w środku Ziemi. Sam układ pozostaje nieruchomy względem przestrzeni, co oznacza, że w stosunku do gwiazd nie wykonuje ruchu obrotowego. Osie x , y leżą w płaszczyźnie równika, natomiast oś z pokrywa się z osią obrotu Ziemi.

Układ geograficzny

Układ geograficzny opisywany jest przez trzy osie, oznaczone odpowiednio: x_e , y_e , z_e i oznaczany wielką literą E , od angielskiego *Earth frame*.

W układzie tym Ziemia ma kształt kuli, więc odległość obiektu znajdującego się na jej powierzchni od środka Ziemi jest stała.

Osie główne układu leżą na kierunkach: północnym, wschodnim oraz wzdłuż wektora prostopadłego do powierzchni Ziemi.

Układ geograficzny jest układem biegunowym, którego naturalnym środkiem jest środek Ziemi.

Współrzędne obiektu wyznaczone są poprzez:

- długość geograficzną – λ_g ,
- szerokość geograficzną – φ_g ,
- wysokość nad powierzchnią odniesienia – h_g .

Układ geocentryczny

Układ geocentryczny opisywany jest przez trzy osie, oznaczone odpowiednio: x_c , y_c , z_c i oznaczany wielką literą C . Według nomenklatury anglojęzycznej określany jest mianem *geocentric frame*.

Układ ten aproksymuje kształt Ziemi elipsoidą obrotową. Jest to układ biegunowy z początkiem w środku ciężkości Ziemi. Oś z skierowana jest wzdłuż linii łączącej obiekt ze środkiem Ziemi, oś y skierowana jest na wschód, natomiast oś x leży w płaszczyźnie południka lokalnego. Położenie obiektu określone jest przez współrzędne geocentryczne:

- długość geocentryczną – λ_{gc} ,
- szerokość geocentryczną – φ_{gc} ,
- wektor odległości od środka Ziemi – R_{gc}

Ze względu na przyjęty model odwzorowania powierzchni Ziemi, odległość punktu od środka Ziemi zależy od pozycji tego punktu na elipsoidzie.

Układ geodezyjny

Układ geodezyjny opisywany jest przez trzy osie, oznaczone odpowiednio: N , E , D i oznaczany wielką literą N . Według nomenklatury anglojęzycznej określany jest mianem *geografic frame*. Podobnie jak w przypadku układu geocentrycznego, układ geodezyjny aproksymuje kształt Ziemi elipsoidą obrotową jest to również układ biegunowy. Układy geodezyjny i geocentryczny różnią się natomiast położeniem środka układu, gdyż środek układu geodezyjnego znajduje się na przecięciu płaszczyzny równikowej z linią prostopadłą do elipsoidy w punkcie pomiarowym.

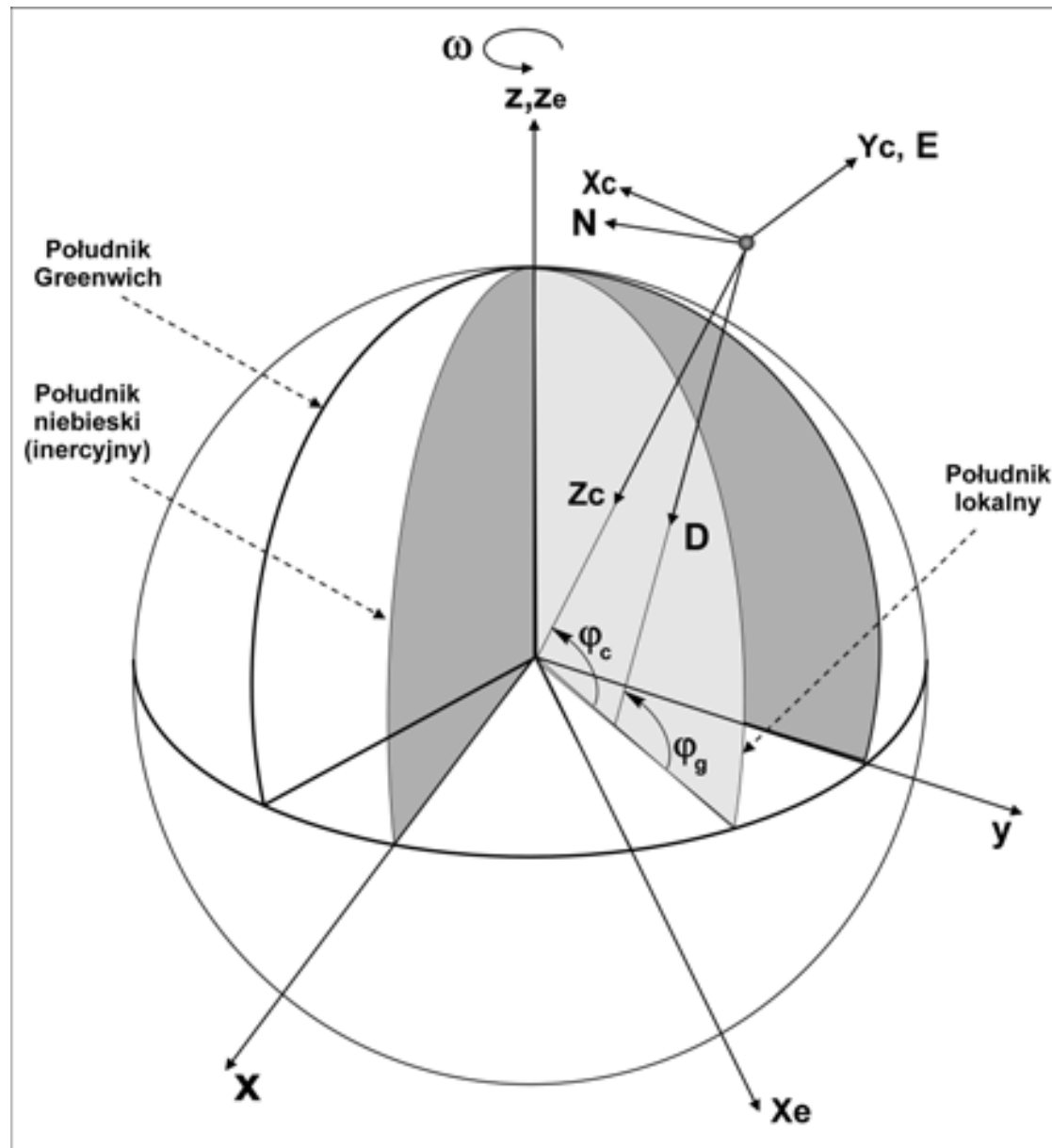
Parametry określające pozycję w tym układzie to:

długość geodezyjna – λ_c ,

szerokość geodezyjna – φ_c ,

wektor odległości od środka układu – R_c

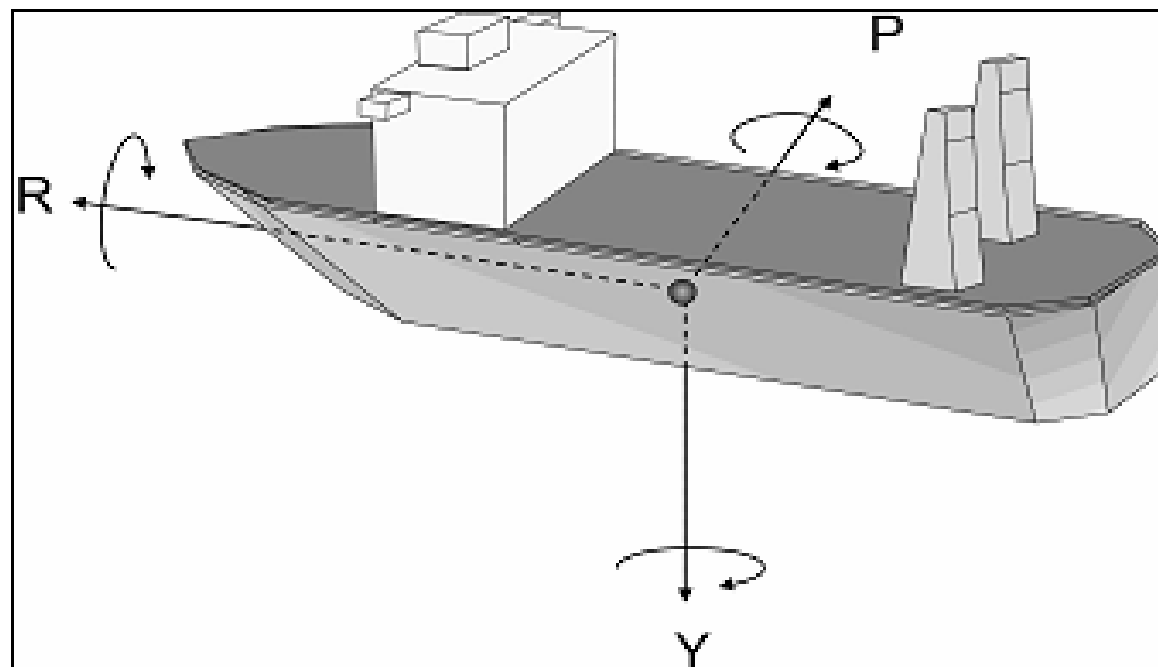
Układy odniesienia



Układ związany z obiektem

Układ związany z obiektem opisywany jest przez trzy osie, oznaczone odpowiednio: R , P , Y i oznaczany wielką literą B . Według nomenklatury anglojęzycznej układ określany jest mianem *Body frame*. W skład tego układu wchodzi trzy płaszczyzny reprezentowane przez trzy osie obrotu obiektu: kołysanie – R (ang.: *roll*), kiwanie – P (ang.: *pitch*), myszkowanie – Y (ang.: *yaw*). Początek układu znajduje się w środku ciężkości obiektu, układ jest kartezyjski, prawoskrętny. W porównaniu z wcześniej przedstawionymi układami, ten jest odrębny, gdyż nie odnosi się do Ziemi. Trzy płaszczyzny układu związane z obiektem pozwalają jedynie na wyznaczenie położenia oraz ułożenia obiektu względem jego położenia początkowego. Wyznaczenie pozycji geograficznej w tym układzie nie jest możliwe.

Układy odniesienia



Klasyfikacja układów nawigacji inercyjnej

Systemy układów nawigacji inercyjnej można podzielić na dwie grupy:

Układy kardanowe:

- układy geometryczne,
- układy analityczne – system INS stabilizowany przestrzennie (ang. SSINS – *Space Stabilized INS*),
- układy półanalityczne – system INS stabilizowany lokalnie (ang. LLINS – *Local Level INS*),

Układy bezkardanowe – system INS związany na stałe z układem (ang. SINS – *Strapdown INS*).

Układy kardanowe

Układy kardanowe składają się z dwóch podstawowych elementów:

- zewnętrznej ramki zbudowanej z trzech lub czterech pierścieni wzajemnie prostopadłych tworzących tzw. zawieszenie kardanowe;
- platformy czujników umieszczonej wewnątrz ramki, na której zamontowane są trzy przyspieszeniomierze oraz trzy żyroskopy. Charakterystyka zawieszenia kardanowego umożliwia utrzymanie platformy w stałym położeniu względem wybranego układu współrzędnych, bez względu na wychylenia obiektu we wszystkich trzech płaszczyznach.

W układach kardanowych platforma zmienia położenie względem płaszczyzn obiektu, gdy ten wykonuje manewr.

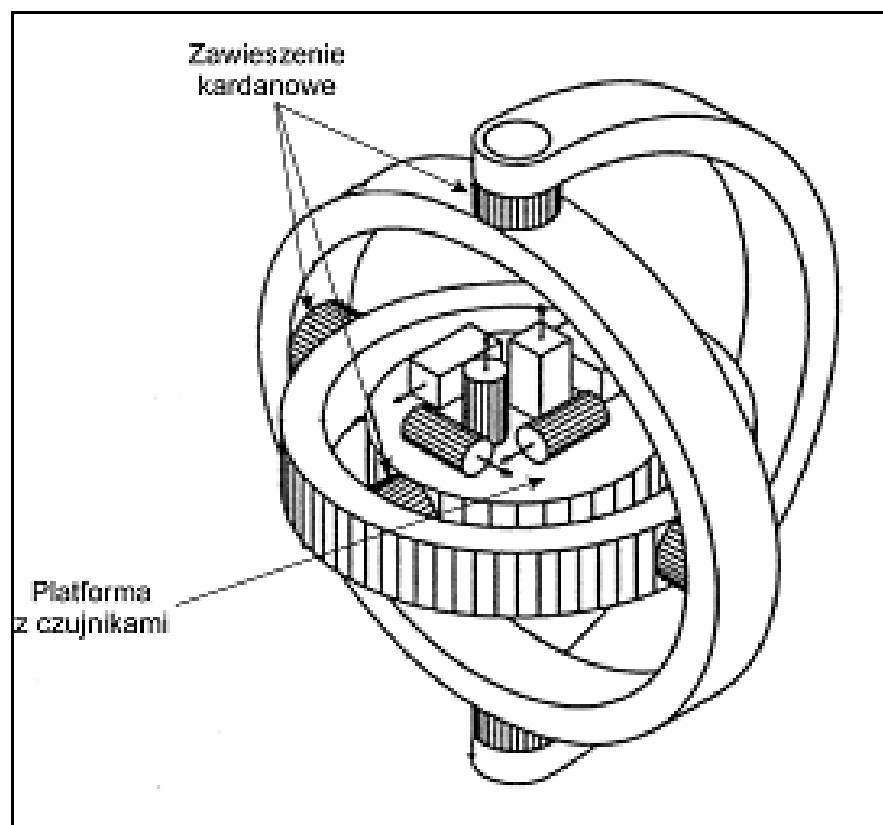
Układy kardanowe

W grupie układów kardanowych można wydzielić dwie podgrupy:

- układy stabilizowane przestrzennie, gdzie platforma zachowuje stałe położenie względem przestrzeni;
- układy stabilizowane lokalnie, gdzie platforma czujników utrzymywana jest w zadanej płaszczyźnie lokalnej na podstawie informacji o kątach obrotu obiektu względem przestrzeni otrzymywanych z żyroskopów. Układy te posiadają dodatkowo pętle sprzężenia zwrotnego z serwomechanizmem, który powoduje odchylenie platformy względem zawieszenia kardanowego oraz przestrzeni o kąt obrotu zarejestrowany przez żyroskopy, jednocześnie utrzymując platformę w płaszczyźnie lokalnej.

Układy kardanowe

Układy kardanowe były pierwszymi układami nawigacji inercyjnej, powstały i rozwijały się w okresie, gdy przetwarzanie sygnałów z czujnika w czasie rzeczywistym, ze względu na niewielkie możliwości obliczeniowe ówczesnych maszyn cyfrowych, nie było jeszcze możliwe.



Układy kardanowe – układy geometryczne

Elementami składowymi układów geometrycznych są dwie platformy, które w czasie ruchu obiektu zmieniają położenie zarówno względem siebie, jak i względem obiektu. Na jednej z platform umieszczone są żyroskopy, na drugiej przyspieszeniomierze. Płaszczyzna żyroskopów orientowana jest względem układu równikowego (inercyjnego, przestrzennego), natomiast płaszczyzna akcelerometrów – względem lokalnego układu horyzontalnego.

W układach geometrycznych, wpływ obrotu Ziemi oraz obiektu na płaszczyznę żyrokompasów i akcelerometrów jest kompensowany, dzięki czemu kąty, jakie tworzą ze sobą obie te płaszczyzny, odwzorowują szerokość oraz długość geograficzną pozycji, w której znajduje się obiekt.

Układy kardanowe – układy analityczne i półanalityczne

W układach analitycznych oraz półanalitycznych występuje tylko jedna platforma, na której umieszczone są żyroskopy oraz przyspieszeniomierze.

Platforma ta zmienia swoją orientację przestrzenną względem obiektu. Układy różnią się ustawieniem platformy względem przestrzeni.



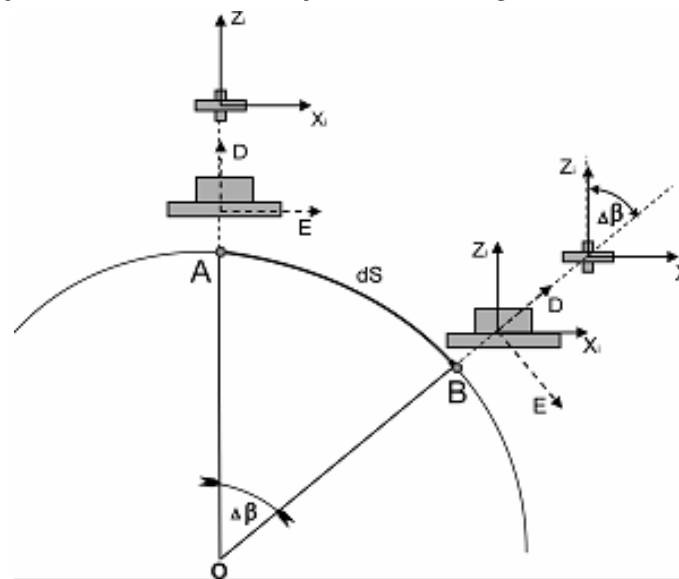
Układy kardanowe – układy analityczne, układy INS stabilizowane przestrzennie

Osie czujników zamontowanych w układach stabilizowanych przestrzennie pozostają przez cały czas pracy zgodne z osiami układu inercyjnego. Oznacza to, że układ (platforma z czujnikami) utrzymuje stałe położenie względem przestrzeni, niezależnie od położenia i ułożenia obiektu.

Każde odchylenie obiektu od osi układu inercyjnego, wyznaczone przez czujniki, kompensowane jest poprzez odpowiednie odchylenie platformy, tak aby osie główne układu wciąż pozostawały zgodne z osiami układu przestrzennego.

Układy kardanowe – układy analityczne układy INS stabilizowane przestrzennie

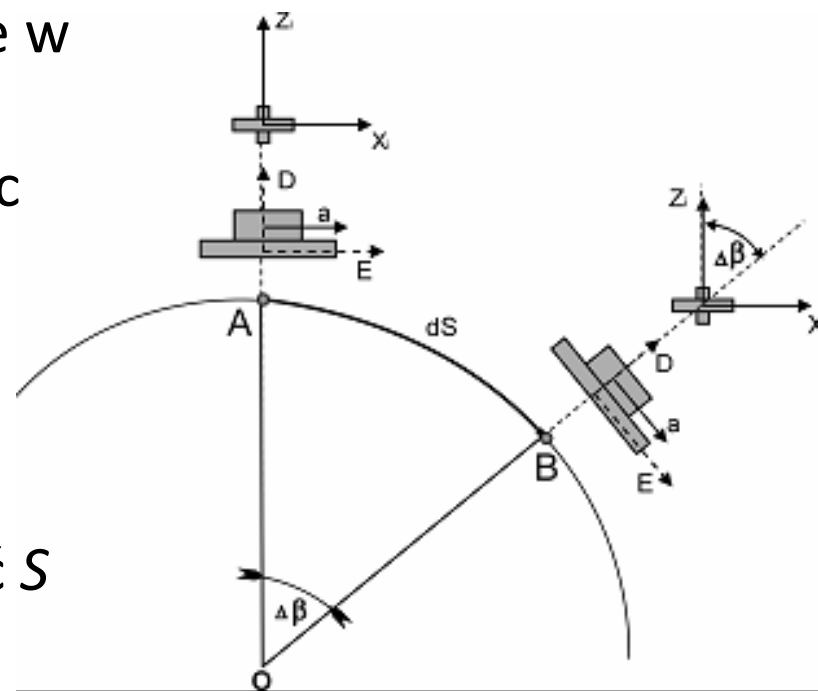
W punkcie startowym A , układ horyzontalny (D, E) oraz układ przestrzenny (Z_i, X_i) są ze sobą zbieżne, co oznacza, że ich osie pokrywają się. W trakcie przemieszczania się obiektu do punktu B , układ lokalny wykonuje obrót względem układu przestrzennego. Zmierzona przez żyroskopy zmiana położenia obiektu względem układu przestrzennego powoduje obrót platformy o wartość kąta zarejestrowaną przez żyroskopy. W ten sposób położenie układu względem przestrzeni pozostaje niezmiennie.



Układy kardanowe – układy półanalityczne, układy INS stabilizowane lokalnie

Półanalityczne układy nawigacji inercyjnej charakteryzują się tym, że platforma, na której znajdują się żyroskopy i przyspieszeniomierze utrzymywana jest w płaszczyźnie horyzontu lokalnego. Oznacza to, że względem układu przestrzennego platforma pozostaje w ciągłym ruchu.

Żyroskop zachowuje stałe położenie w przestrzeni, natomiast platforma z przyspieszeniomierzami, utrzymując stałe położenie względem układu lokalnego, zostaje odchylona od położenia poziomego o kąt β . Zaburzenie takie jest równoważne przemieszczeniu układu o odległość S wzdłuż powierzchni Ziemi.



Układy kardanowe – układy półanalityczne układy INS stabilizowane lokalnie

Całkowanie przyspieszeń oraz obliczenia nawigacyjne realizowane są w odniesieniu do układu lokalnego.

Zaletą systemów inercyjnych stabilizowanych lokalnie jest względna prostota obliczeń, nie wymagająca transformacji współrzędnych z układu przestrzennego do układu lokalnego.

Wadą natomiast są błędy systemów, występujące na dużych szerokościach geograficznych, szczególnie w rejonach podbiegunowych.

Układy bezkardanowe

Układy bezkardanowe nawigacji inercyjnej składają się z bloku czujników, czyli trzech przyspieszeniometerów i trzech żyroskopów, zamocowanych nieruchomo względem obiektu oraz pokładowych komputerów nawigacyjnych. Układy te, w porównaniu z układami kardanowymi, charakteryzują się prostszą budową, gdyż nie zawierają żadnych elementów ruchomych, konieczne jest natomiast stosowanie większych mocy obliczeniowych, aby z odpowiednią szybkością uzyskiwać na bieżąco pełne informacje nawigacyjne. Dodatkową funkcję pełnią komputery nawigacyjne, modelujące przestrzeń trójwymiarową oraz rozwiązujące równania dotyczące ruchu platformy we wszystkich sześciu stopniach swobody, w celu transformowania położenia obiektu do układu geograficznego.

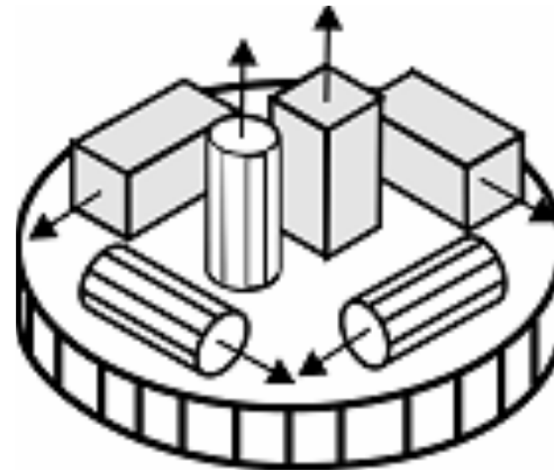
Układy bezkardanowe

W układach kardanowych transformacja dokonywana była częściowo mechanicznie dzięki zastosowaniu zawieszenia kardanowego. W układach *strap-down* realizowane jest to poprzez modelowanie matematyczne, większe muszą być także zakresy pomiarowe zastosowanych czujników. Jednak wraz z rozwojem technik komputerowych oraz zwiększaniem możliwości obliczeniowych maszyn cyfrowych, układy bezkardanowe stopniowo zastępują układy kardanowe.



Układy bezkardanowe

Osie czujników zorientowane są zgodnie z osiami położenia obiektu, na którym układ jest zainstalowany. Pomiary przyspieszeń oraz kierunku dokonywane są względem układu związanego z obiektem, natomiast parametry ruchu obiektu oraz jego położenie wyliczane są na bieżąco w komputerze pokładowym, poprzez transformację parametrów do układu geograficznego.

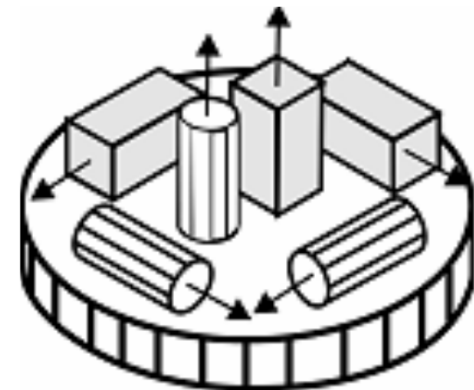


Układy bezkardanowe

Osie czujników zorientowane są zgodnie z osiami położenia obiektu, na którym układ jest zainstalowany. Pomiar przyspieszeń oraz kierunku dokonywane są względem układu związanego z obiektem, natomiast parametry ruchu obiektu oraz jego położenie wyliczane są na bieżąco w komputerze pokładowym, poprzez transformację parametrów do układu geograficznego.

W układzie można wyróżnić dwa podstawowe tory:

- tor prędkości kątowych mierzonych przez żyroskopy,
- tor przyspieszeń mierzonych przez przyspieszeniomierze.



Układy bezkardanowe

Wskazywanymi w literaturze zaletami układów bezkardanowych są:

- prostota budowy,
- brak ruchomych elementów mechanicznych,
- mały pobór mocy,
- większa odporność na przeciążenia w porównaniu z układami kardanowymi,
- natychmiastowa gotowość do pracy.

Wadą ich jest skomplikowany sposób oraz intensywność obliczeń numerycznych wykonywanych w czasie rzeczywistym, wymagające dużych mocy obliczeniowych. Jednak dzięki dynamicznemu rozwojowi technologii komputerowych oraz miniaturyzacji, wymagania sprzętowe nie są już przeszkodą w rozwoju tego rodzaju systemów.