

Czujniki bezwładnościowe – Żyroskopy

Bogdan Kreczmer

`bogdan.kreczmer@pwr.wroc.pl`

Katedra Cybernetyki i Robotyki
Wydziału Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów
Politechniki Wrocławskiej

Wybrane zagadnienia robotyki

Copyright©2026 Bogdan Kreczmer

Niniejszy dokument zawiera materiały do wykładu dotyczącego wybranych zagadnień robotyki. Jest on udostępniony pod warunkiem wykorzystania wyłącznie do własnych prywatnych potrzeb i może on być kopiowany wyłącznie w całości, razem z niniejszą stroną tytułową.

Spis treści

1

Żyroskopy

- Kategorie żyroskopów i wykorzystywane zjawiska fizyczne
- Mechanical gyroscopes
- Siła Coriolisa
- Optical Gyroscopes

Plan prezentacji

1 Żyroskopy

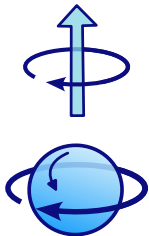
- Kategorie żyroskopów i wykorzystywane zjawiska fizyczne
- Mechanical gyroscopes
- Siła Coriolisa
- Optical Gyroscopes

Typy żyroskopów



- Żyroskopy mechaniczne
 - obrotowe
 - wibrujące
- Żyroskopy optyczne
- Żyroskopy wykorzystujące zjawisko mechaniki kwantowej

Typy żyroskopów



Zjawiska fizyczne wykorzystywane w żyroskopach mechanicznych

- Zasada zachowania momentu pędu
- Siła Coriolisa

Żyroskopy mechaniczne – metody wykorzystania zjawisk fizycznych



Stały moment pędu – obejmuje żyroskop z wirującym wirnikiem i bardziej ezoteryczne żyroskopy elektronowe i cząsteczkowe.



Oscylacyjny moment pędu – wykorzystuje się masę zawieszoną skrętnie, która oscyluje tam i z powrotem z własną częstotliwością rezonansową.



Stały pęd liniowy – wykorzystywany jest stały strumień cieczy, plazmy lub elektronów, który ma tendencję do utrzymywania ustalonego wektora prędkości podczas obrotu platformy. Na przykład, jedna z koncepcji zakłada wykorzystanie pary różnicowych anemometrów z gorącym drutem w celu wykrycia pozornego bocznego przemieszczenia przepływającego słupa powietrza.



Oscylacyjny pęd liniowy – wykorzystuje zestaw odrębnych mas poruszających się tam i z powrotem (promieniowo lub równoległe) wzdłuż linii prostej.

Żyroskopy mechaniczne – metody wykorzystania zjawisk fizycznych



Zasada zachowania momentu pędu

Stały moment pędu – obejmuje żyroskop z wirującym wirnikiem i bardziej ezoteryczne żyroskopy elektronowe i cząsteczkowe.

Siła Coriolisa



Oscylacyjny moment pędu – wykorzystuje się masę zawieszoną skrętnie, która oscyluje tam i z powrotem z własną częstotliwością rezonansową.



Stały pęd liniowy – wykorzystywany jest stały strumień cieczy, plazmy lub elektronów, który ma tendencję do utrzymywania ustalonego wektora prędkości podczas obrotu platformy. Na przykład, jedna z koncepcji zakłada wykorzystanie pary różnicowych anemometrów z gorącym drutem w celu wykrycia pozornego bocznego przemieszczenia przepływającego słupa powietrza.



Oscylacyjny pęd liniowy – wykorzystuje zestaw odrębnych mas poruszających się tam i z powrotem (promieniowo lub równoległe) wzdłuż linii prostej.

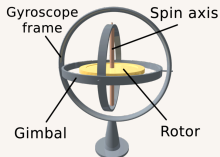
Plan prezentacji

1 Żyroskopy

- Kategorie żyroskopów i wykorzystywane zjawiska fizyczne
- Mechanical gyroscopes
- Siła Coriolisa
- Optical Gyroscopes

Żyroskopy obrotowe – stały moment pędu

Żyroskop rotacyjny



<https://en.wikipedia.org/wiki/File:3D.Gyroscope.png>

Pochodzenie nazwy

Nazwa **żyroskop** pochodzi ze starożytnej greki. Jest to kombinacja słów: *okrąg* and *patrzyć*.

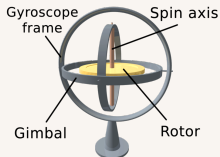
Konstrukcja

Żyroskop to dysk zamontowany na dwóch lub trzech przegubach, które są obrotowymi podporami umożliwiającymi obrót dysku wokół jednej osi. Zestaw trzech zawieszek kardanowych, zamontowanych jeden na drugim z ortogonalnymi osiami obrotu, wykorzystuje się w celu umożliwienia dyskowi zamontowanemu na najbardziej wewnętrznym zawieszeniu kardanowym zachowania orientacji niezależnej od orientacji jego podpory w przestrzeni.

<https://en.wikipedia.org/wiki/Gyroscope>

Żyroskopy obrotowe – stały moment pędu

Żyroskop rotacyjny



<https://en.wikipedia.org/wiki/File:3D.Gyroscope.png>

Wykorzystywane zjawisko fizyczne

Koncepcja konstrukcji żyroskopu opiera się na zasadzie zachowania momentu pędu. Mówi ona, że całkowity moment pędu układu jest stały zarówno pod względem wartości, jak i kierunku, jeśli wypadkowy moment zewnętrzny działający na układ jest równy zeru.

Konstrukcja

Żyroskop to dysk zamontowany na dwóch lub trzech przegubach, które są obrotowymi podporami umożliwiającymi obrót dysku wokół jednej osi. Zestaw trzech zawieszek kardanowych, zamontowanych jeden na drugim z ortogonalnymi osiami obrotu, wykorzystuje się w celu umożliwienia dyskowi zamontowanemu na najbardziej wewnętrznym zawieszeniu kardanowym zachowania orientacji niezależnej od orientacji jego podpory w przestrzeni.

<https://en.wikipedia.org/wiki/Gyroscope>

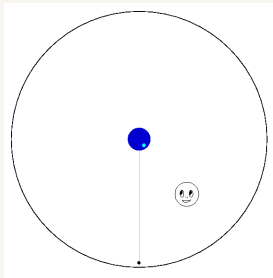
Plan prezentacji

1 Żyroskopy

- Kategorie żyroskopów i wykorzystywane zjawiska fizyczne
- Mechanical gyroscopes
- Siła Coriolisa
- Optical Gyroscopes

Ruch w inercjalnym układzie odniesienia

Obserwacja w inercjalnym układzie odniesienia

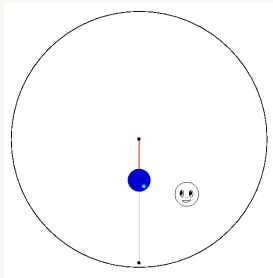


I Prawo Newtona

Każde ciało pozostaje w stanie spoczynku lub porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym, chyba że zostanie zmuszone do zmiany tego stanu przez przyłożoną siłę.

Ruch w inercjalnym układzie odniesienia

Obserwacja w inercjalnym układzie odniesienia

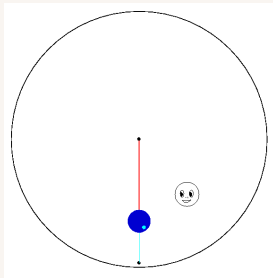


I Prawo Newtona

Każde ciało pozostaje w stanie spoczynku lub porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym, chyba że zostanie zmuszone do zmiany tego stanu przez przyłożoną siłę.

Ruch w inercjalnym układzie odniesienia

Obserwacja w inercjalnym układzie odniesienia

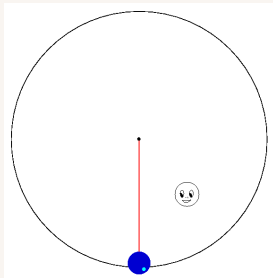


I Prawo Newtona

Każde ciało pozostaje w stanie spoczynku lub porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym, chyba że zostanie zmuszone do zmiany tego stanu przez przyłożoną siłę.

Ruch w inercjalnym układzie odniesienia

Obserwacja w inercjalnym układzie odniesienia

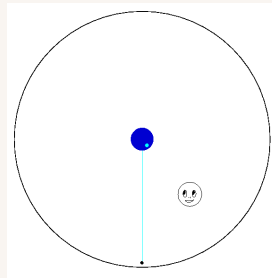
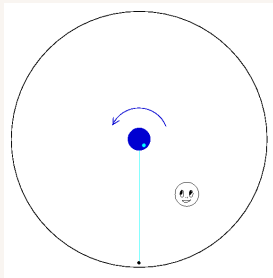


I Prawo Newtona

Każde ciało pozostaje w stanie spoczynku lub porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym, chyba że zostanie zmuszone do zmiany tego stanu przez przyłożoną siłę.

Ruch w nieinercyjnym układzie odniesienia

Obserwacja w inercyjnym i nieinercyjnym układzie odniesienia

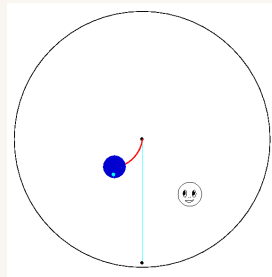
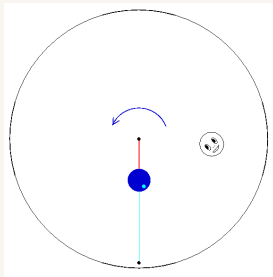


I Prawo Newtona

Każde ciało pozostaje w stanie spoczynku lub porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym, chyba że zostanie zmuszone do zmiany tego stanu przez przyłożoną siłę.

Ruch w nieinercyjnym układzie odniesienia

Obserwacja w inercyjnym i nieinercyjnym układzie odniesienia

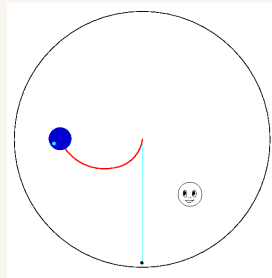
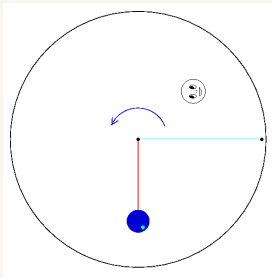


I Prawo Newtona

Każde ciało pozostaje w stanie spoczynku lub porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym, chyba że zostanie zmuszone do zmiany tego stanu przez przyłożoną siłę.

Ruch w nieinercyjnym układzie odniesienia

Obserwacja w inercyjnym i nieinercyjnym układzie odniesienia

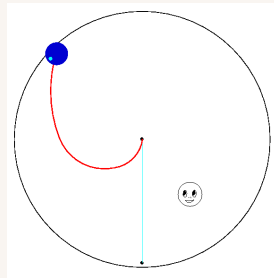
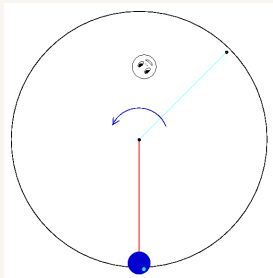


I Prawo Newtona

Każde ciało pozostaje w stanie spoczynku lub porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym, chyba że zostanie zmuszone do zmiany tego stanu przez przyłożoną siłę.

Ruch w nieinercyjnym układzie odniesienia

Obserwacja w inercyjnym i nieinercyjnym układzie odniesienia

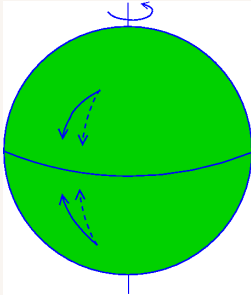


I Prawo Newtona

Każde ciało pozostaje w stanie spoczynku lub porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym, chyba że zostanie zmuszone do zmiany tego stanu przez przyłożoną siłę.

Konsekwencje

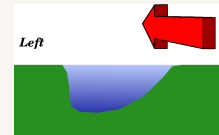
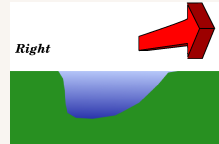
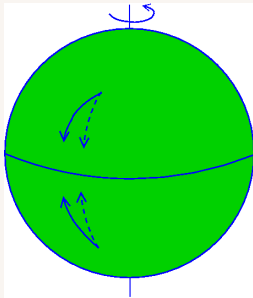
Odchylenie trajektorii ruchu na Ziemi



Na półkuli północnej trajektoria ruchu obiektów odchyła się w prawo. Na półkuli południowej efekt jest przeciwny.

Konsekwencje

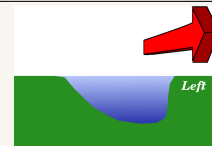
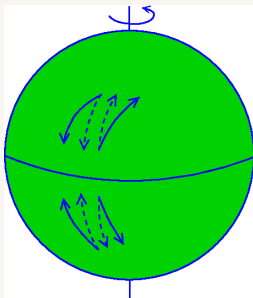
Odchylenie trajektorii ruchu na Ziemi



Wpływ siły Coriolisa na rzeki jest słaby, ale zauważalny. Rzeki na półkuli północnej płynące prosto na północ lub południe ulegają silniejszej erozji wzdłuż prawego brzegu. Na półkuli południowej efekt jest przeciwny.

Konsekwencje

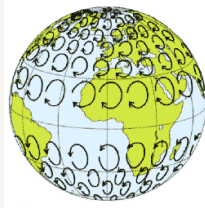
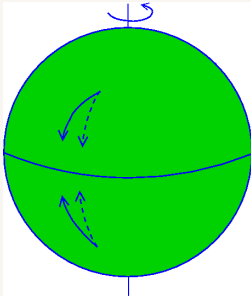
Odchylenie trajektorii ruchu na Ziemi



Przeciwny kierunek przepływu rzek powoduje erozję przeciwległych brzegów.

Konsekwencje

Odchylenie trajektorii ruchu na Ziemi – Huragany



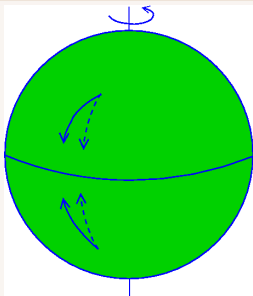
Author: Anders Persson

https://en.wikipedia.org/wiki/File:Coriolis_effect14.png

Na półkuli północnej huragany wirują zgodnie z ruchem wskazówek zegara, a na półkuli południowej w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara.

Siła koriolisa – Wzory

Odchylenie trajektorii ruchu na Ziemi



$$F_c = m(\Omega \times v)$$

where

m – masa obiektu,

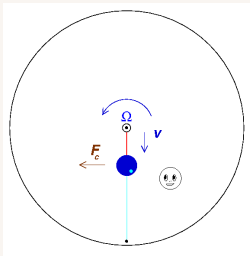
Ω – prędkość kątowna,

v – prędkość liniowa obiektu,

Wzór ten oznacza, że siła Coriolisa jest prostopadła zarówno do kierunku prędkości poruszającej się masy, jak i do osi obrotu układu odniesienia.

Coriolis force – Formula

Deflection on a circle



$$\Omega \perp \mathbf{v} \Rightarrow F_c = m\Omega v$$

where

m – masa obiektu,

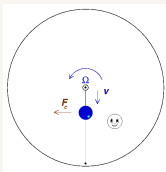
Ω – prędkość kątowna,

v – prędkość liniowa obiektu,

Wzór staje się prostszy, gdy oś obrotu jest prostopadła do wektora prędkości poruszającej się masy.

Dlaczego siła Coriolisa?

Odchylenie na okręgu



$$\Omega \perp \mathbf{v} \Rightarrow F_c = m\Omega v$$

where

m – masa obiektu,

Ω – prędkość kątowa,

v – prędkość liniowa obiektu,

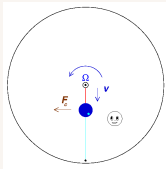
Wzór staje się prostszy, gdy oś obrotu jest prostopadła do wektora prędkości poruszającej się masy.

Pytania

Dlaczego nie stosuje się siły odśrodkowej do pomiaru prędkości obrotowej?

Dlaczego siła Coriolisa?

Odchylenie na okręgu



$$\Omega \perp \mathbf{v} \Rightarrow F_c = m\Omega v$$

where

m – masa obiektu,

Ω – prędkość kątowna,

v – prędkość liniowa obiektu,

Wzór staje się prostszy, gdy oś obrotu jest prostopadła do wektora prędkości poruszającej się masy.

Pytania i odpowiedzi

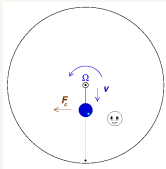
Dlaczego nie stosuje się siły odśrodkowej do pomiaru prędkości obrotowej?

Ponieważ wartość siły odśrodkowej zależy od położenia względem osi obrotu!

$$F_f = m(\Omega \times (\Omega \times r))$$

Dlaczego siła Coriolisa?

Odchylenie na okręgu



$$\Omega \perp \mathbf{v} \Rightarrow F_c = m\Omega v$$

where

m – masa obiektu,

Ω – prędkość kątowna,

v – prędkość liniowa obiektu,

Wzór staje się prostszy, gdy oś obrotu jest prostopadła do wektora prędkości poruszającej się masy.

Pytania i odpowiedzi

Dlaczego nie stosuje się siły odśrodkowej do pomiaru prędkości obrotowej?

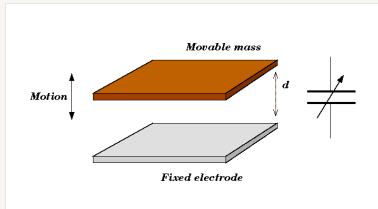
Ponieważ wartość siły odśrodkowej zależy od położenia względem osi obrotu!

$$F_f = m(\Omega \times (\Omega \times r))$$

Siła Coriolisa nie zależy od miejsca (poza osią rotacji) wykonania pomiaru!

$$F_c = m(\Omega \times v)$$

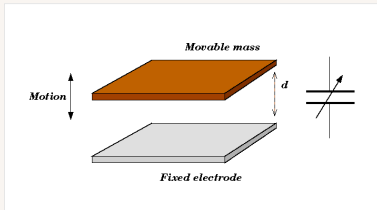
Techniki pomiaru



Jak można to zmierzyć?

Zmiana odległości między okładkami kondensatora powoduje zmianę jego pojemności, a co za tym idzie zmianę napięcia.

Techniki pomiaru

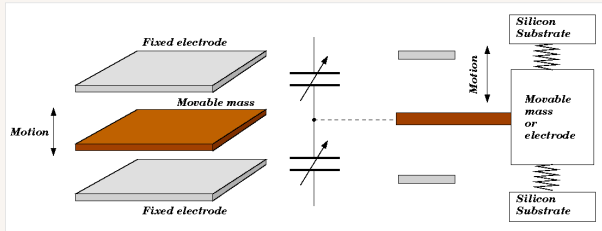


$$\begin{aligned} d \nearrow &\Rightarrow C \searrow \Rightarrow U \nearrow \\ d \searrow &\Rightarrow C \nearrow \Rightarrow U \searrow \end{aligned}$$

Jak można to zmierzyć?

Zmiana odległości między okładkami kondensatora powoduje zmianę jego pojemności, a co za tym idzie zmianę napięcia.

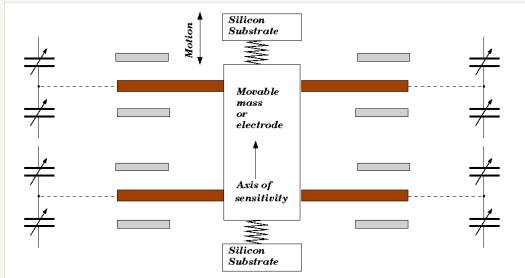
Technika pomiaru różnicowego



Zwiększenie dokładności

Aby zwiększyć dokładność pomiaru, wykorzystuje się technikę pomiaru różnicowego.

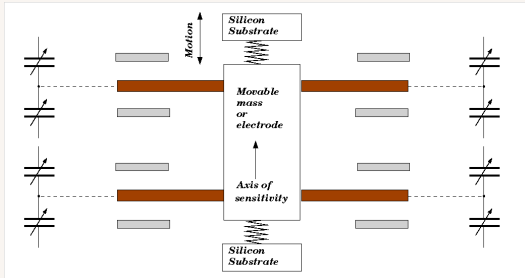
Wzmocnienie



Zwiększenie dokładności i precyzji

Dalsze zwiększenie dokładności, ale również precyzji, otrzymywane jest poprzez zwielokrotnienie ilości kondensatorów pomiarowych.

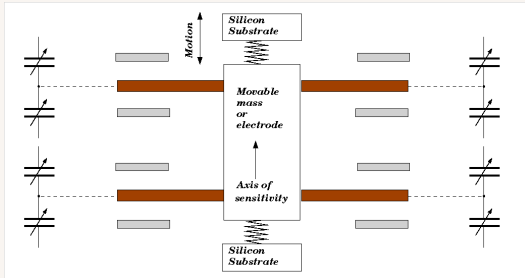
Pomiar przyśpieszenia



Bezpośredni pomiar przyśpieszenia

Dla pomiaru przyśpieszenia wystarczające jest bezpośrednie zmierzenie napięcia na kondensatorach.

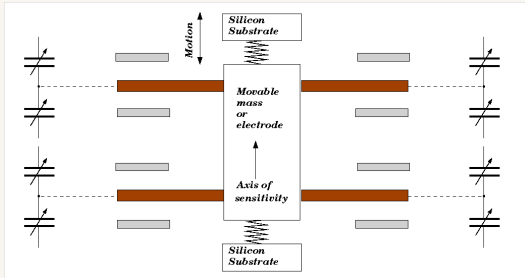
Pomiar szybkości kątowej



Jak może zostać zmierzna szybkość kątową?

Czy możemy użyć pomiaru przyspieszenia dośrodkowego, aby zmierzyć szybkość kątową?

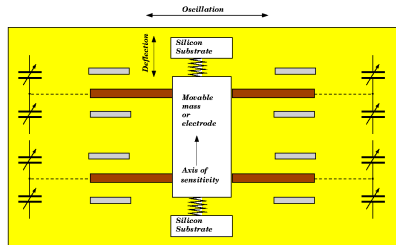
Pomiar szybkości kątowej



Jak może zostać zmierzna szybkość kątową?

Czy możemy użyć pomiaru przyspieszenia dośrodkowego, aby zmierzyć szybkość kątową? Tak, ale ...

Pomiar szybkości kątowej

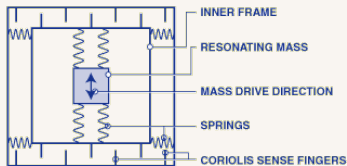


Siła koriolisa

Odchylenie spowodowane jest siłą Coriolisa, która jest prostopadła do wektora prędkości drgań.

Żyroskop wibracyjny – Oscylacyjny liniowy moment pędu

Vibration gyroscope



<http://sensorwiki.org/doku.php/sensors/gyroscope>

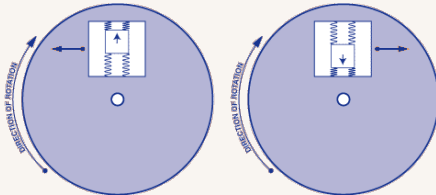
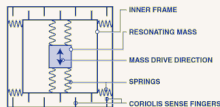
Konstrukcja

Żyroskopy wibracyjne składają się z mikromasy, która jest połączona z zewnętrzną obudową za pomocą zestawu sprężyn.

This outer housing is connected to the fixed circuit board by a second set of orthogonal springs. Ta zewnętrzna obudowa jest połączona z bardziej zewnętrzną obudową za pomocą drugiego zestawu sprężyn ortogonalnych.

<http://sensorwiki.org/doku.php/sensors/gyroscope>

Żyroskop wibracyjny – Oscylacyjny liniowy moment pędu



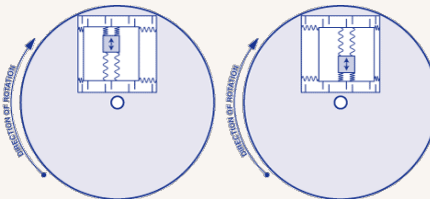
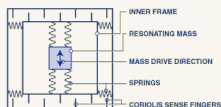
<http://sensorwiki.org/doku.php/sensors/gyroscope>

Zasada działania

Masa jest ciągle napędzana ruchem sinusoidalnym wzdłuż pierwszego zestawu sprężyn. Każdy obrót układu wywołuje przyspieszenie Coriolisa oddziałujące na masę i popychając ją w kierunku drugiego zestawu sprężyn. Gdy masa jest odpychana od osi obrotu, zostanie popchnięta prostopadłe w jednym kierunku, a gdy zostanie odepchnięta w stronę osi obrotu, zostanie popchnięta w przeciwnym kierunku, ze względu na siłę Coriolisa działającą na masę.

<http://sensorwiki.org/doku.php/sensors/gyroscope>

Żyroskop wibracyjny – Oscylacyjny liniowy moment pędu



<http://sensorwiki.org/doku.php/sensors/gyroscope>

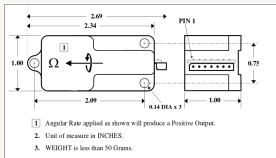
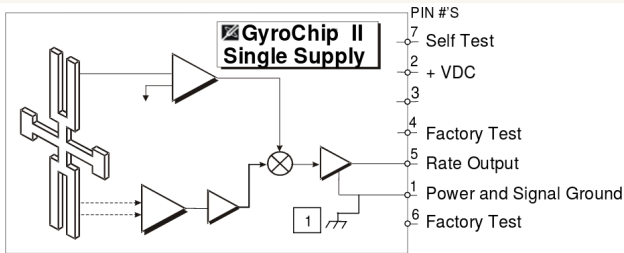
Zasada działania

Siłę Coriolisa wykrywa się za pomocą pojemnościowych wypustków sensorycznych (okładek kondensatorów) rozmieszczonych wzdłuż obudowy masy i sztywnej konstrukcji. Gdy masa jest popychana przez siłę Coriolisa, wykrywana jest różnica pojemności, gdy płytki zbliżają się do siebie. Gdy masa jest pchana w przeciwnym kierunku, różne zestawy palców sensorycznych zbliżają się do siebie; w ten sposób czujnik może wykryć zarówno wartość, jak i kierunek szybkości kątownej układu.

<http://sensorwiki.org/doku.php/sensors/gyroscope>

Vibrating gyroscope – GyroChip

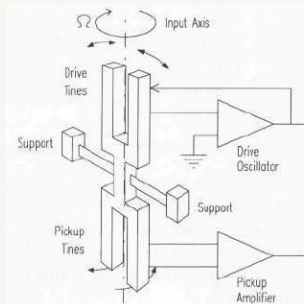
QRS-14 GyroChip II



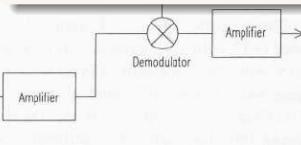
Input Supply Voltage	+9 to +18 VDC
Input Supply Current (max)	15 mA
Resolution and Threshold	< 0,004 °/sec
Range	± 100 °/sec
Operating Life	10 years, typical

Żyrosko wibracyjny – zasada działania

Systron Donner GyroChip

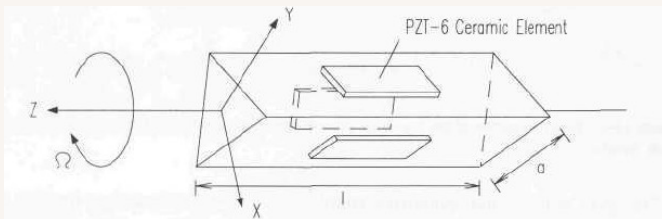


Górne zęby napędzane są oscylatorem, który powoduje ich synchroniczny ruch do siebie i od siebie. Ponieważ oba zęby synchronicznie zbliżają się i oddalają od siebie, ich siły Coriolisa są prostopadłe do płaszczyzny zespołu widełek, ale w przeciwnych kierunkach. Boczne przesunięcie zębów względem osi widełek kamertonowych (czyli czułej osi żyroskopu) powoduje, że siły te generują moment obrotowy proporcjonalny co do wartości do wejściowej prędkości kątowej. Ponieważ wzbudzenie zęba napędowego ma charakter sinusoidalny, powiązana z nim prędkość promieniowa V jest również sinusoidalna, co oznacza, że wypadkowy moment obrotowy wytwarzany przez siły Coriolisa jest również sinusoidalny. Zęby podnoszące reagują na ten oscylacyjny moment obrotowy, poruszając się do wewnątrz i na zewnątrz płaszczyzny, jak pokazano na rysunku, wytwarzając sygnał różnicowy na wzmacniaczu odbiorczym, który jest dokładnie w fazie z prędkością promieniową zębów napędowych. Sygnał wyjściowy wzmacniacza odbiorczego jest następnie synchronicznie demodulowany (na podstawie częstotliwości oscylatora napędowego) do sygnału stałego proporcjonalnego do kątowej prędkości obrotowej Ω .



Żyroskopy wibracyjne – Żyroskop (Murata)

Construction

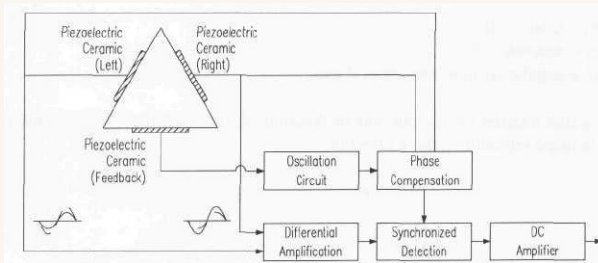


Description

Czujnikowy składa się z 40-milimetrowego pryzmatu trójkątnego wykonanego ze specjalnej substancji zwanej *elinvar* (sprężysty metal), która jest stopem niklu, chromu i stali o bardzo małym współczynniku rozszerzalności cieplnej, co zapewnia dobrą stabilność wymiarową.

Vibrating gyroscope – Gyrostar (Murata)

Główna idea

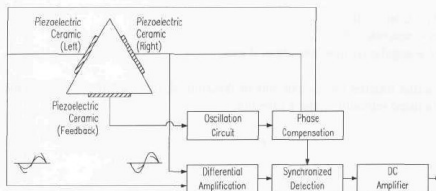


Zasada działania

Jeżeli pryzmat zostanie wprowadzony w drgania o jego częstotliwości rezonansowej w kierunku OX , wówczas każdy obrót pryzmatu wokół osi OZ wywołuje siłę Coriolisa, która powoduje drgania w kierunku OY z tą samą częstotliwością. Rzeczywistą prędkość kątową Ω można zatem określić, mierząc amplitudę tych indukowanych drgań w kierunku OY .

Vibrating gyroscope – Gyrostar (Murata)

Główna idea



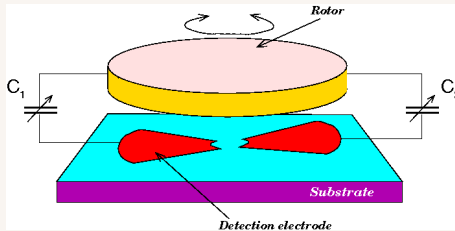
Zasada działania

Układ pryzmatów w kształcie trójkąta równobocznego pozwala na umieszczenie lewego i prawego elementu przetwornika w kierunku złożonego trybu drgań. Dzięki czemu ta same elementy ceramiczne PZT może być stosowana zarówno do wzbudzania pręta, jak i wykrywania wypadkowych sił Coriolisa.

Żyroskop wykrywa i pozwala obliczyć szybkość kątową poprzez odjęcie od siebie sygnałów wyjściowych z lewego i prawego przetwornika piezoelektrycznego. Wzmocnienie różnicowe zapewnia tłumienie szumów i wibracji, ponieważ sygnały wyjściowe lewy i prawy będą równe co do amplitudy, gdy Ω jest równe zero. W miarę jak pryzmat ulega odkształceniu na skutek działania sił Coriolisa wywołanych obrotem, sygnał wyjściowy jednego detektora wzrasta, a drugiego maleje. W efekcie podwaja to wielkość sygnału odpowiadającemu szybkości obrotu żyroskopu.

Żyroskop z kołem wibracyjnym

Główna idea

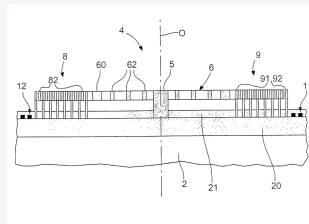
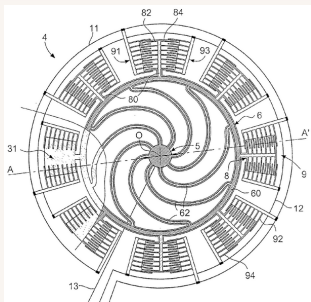


Zasad działania

Koło jest napędzane tak, że wibruje wokół swojej osi symetrii, a obrót wokół którejkolwiek z osi w płaszczyźnie powoduje pochylenie koła. Zmianę tę można wykryć za pomocą elektrod pojemnościowych umieszczonych pod kołem.

Żyroskop z kołem wibracyjnym

Przykład opatentowanej konstrukcji – Patent EP 1313216 A2

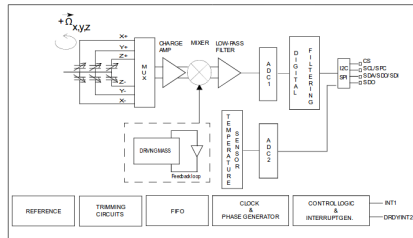


Zasada działania

Pierwsze struktury elektrod w kształcie grzebienia 91 służą do elektrostatycznego wprowadzania rezonatora pierścieniowego 4 w drgania, a druga struktura elektrod w kształcie grzebienia 93, która jest umieszczona po drugiej stronie elementów podstawy 80, służy do pojemnościowego wykrywania drgań rezonatora.

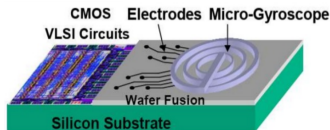
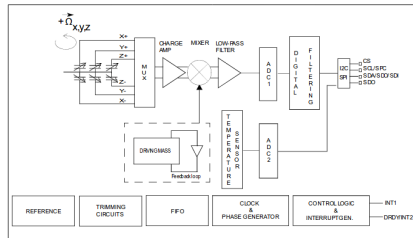
Gyroscope I3G4250D

- Supply voltage: 2.4 V to 3.6 V
- Selectable full scale (245/500/2000 dps)
- I²C/SPI digital output interface
- Integrated low- and high-pass filters with user-selectable bandwidth
- Package LGA-16



Gyroscope I3G4250D

- Supply voltage: 2.4 V to 3.6 V
- Selectable full scale (245/500/2000 dps)
- I²C/SPI digital output interface
- Integrated low- and high-pass filters with user-selectable bandwidth
- Package LGA-16



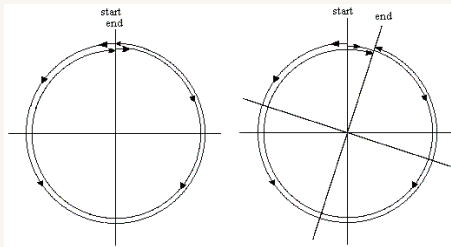
Plan prezentacji

1 Żyroskopy

- Kategorie żyroskopów i wykorzystywane zjawiska fizyczne
- Mechanical gyroscopes
- Siła Coriolisa
- Optical Gyroscopes

Żyroskopy optyczne

Główna idea

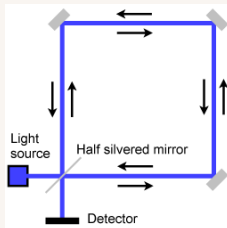


Zasad działania

Żyroskopy optyczne działają wykorzystując efekt Sagnaca. Źródło światła umieszczone jest na okręgu i emituje dwie wiązki światła w każdym kierunku. Jeśli źródło pozostaje nieruchome, obie wiązki światła potrzebują tyle samo czasu, aby pokonać okrąg i powrócić do źródła. Jeśli jednak źródło obraca się po okręgu, wiązka światła przed źródłem potrzebuje więcej czasu, aby pokonać całą drogę. To przesunięcie fazowe jest proporcjonalne do prędkości kątowej układu.

Żyroskopy optyczne

Główna idea



Zasada działania

Efekt Sagnaca można w rzeczywistości uogólnić na dowolną pętlę, niezależnie od jej kształtu. W szczególności możemy zmierzyć ten efekt za pomocą interferometrii pierścieniowej. W tym przypadku wiązka laserowa jest najpierw rozszczepiana przez półsrebrzone lustro. Następnie obie wiązki pokonują identyczne ścieżki, ale w przeciwnych kierunkach, wokół pętli składającej się z płaskich lusterek i wypełnionych powietrzem prostych rur lub długiego światłowodu. Te dwie wiązki łączą się następnie w detektorze. Gdy system się obraca, jedna z wiązek musi pokonać większą odległość niż wiązka poruszająca się w przeciwnym kierunku, aby dotrzeć do detektora. Ta różnica w długości ścieżki (lub przesunięcie Dopplera) jest wykrywana jako przesunięcie fazy przez interferometrię.

Koniec prezentacji
Dziękuję za uwagę