

SENSORES EM ROBÓTICA: INERCIAIS

PMR3502

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

Arturo Forner-Cordero [aforner@usp.br]

Eduardo L.L. Cabral

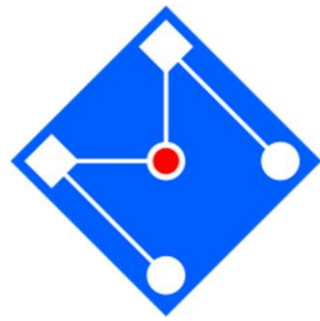
Thiago de Castro Martins

OBJETIVOS



- Sensores inerciais:
 - Giroscópio;
 - Acelerômetro;
 - Tipos de sensores;
 - Incertezas envolvidas;
 - Exemplos de medidas.
- Sensores adicionais:
 - Magnetômetro;
 - Inclinaçãometro.

SENSORES INERCIAIS



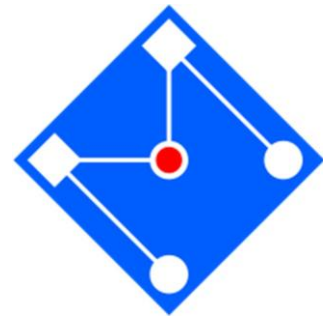
Sensores básicos para navegação de veículos autônomos \Rightarrow sensores inerciais.

Sensores inerciais:

- Giroscópios;
- Acelerômetros lineares;
- Sistema inercial de medida (acelerômetros + giroscópios).

Sensores inerciais apresentam erros que são difíceis de serem corrigidos sem informação extra \Rightarrow necessidade de outros sensores (magnetômetros, inclinômetros, GPS etc).

GIROSCÓPIOS



Sensor que mede posição ou velocidade angular.

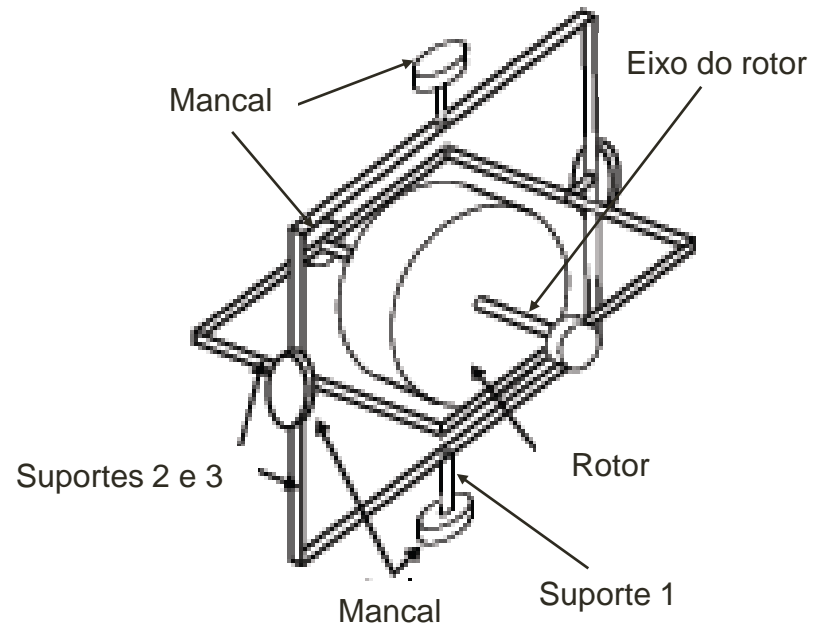
Tipos de giroscópios:

- Existem inúmeras variedades de giroscópios;
- Principais tipos:
 - Mecânicos;
 - Óticos (Fibra Ótica, Anel de Laser);
 - MEMS (Micro Electrical Mechanical System).
- Existem outros tipos.



GIROSCÓPIOS MECÂNICOS

Consiste de um rotor girando a altas rotações fixado por meio de mancais rotativos em suportes que podem girar livremente.

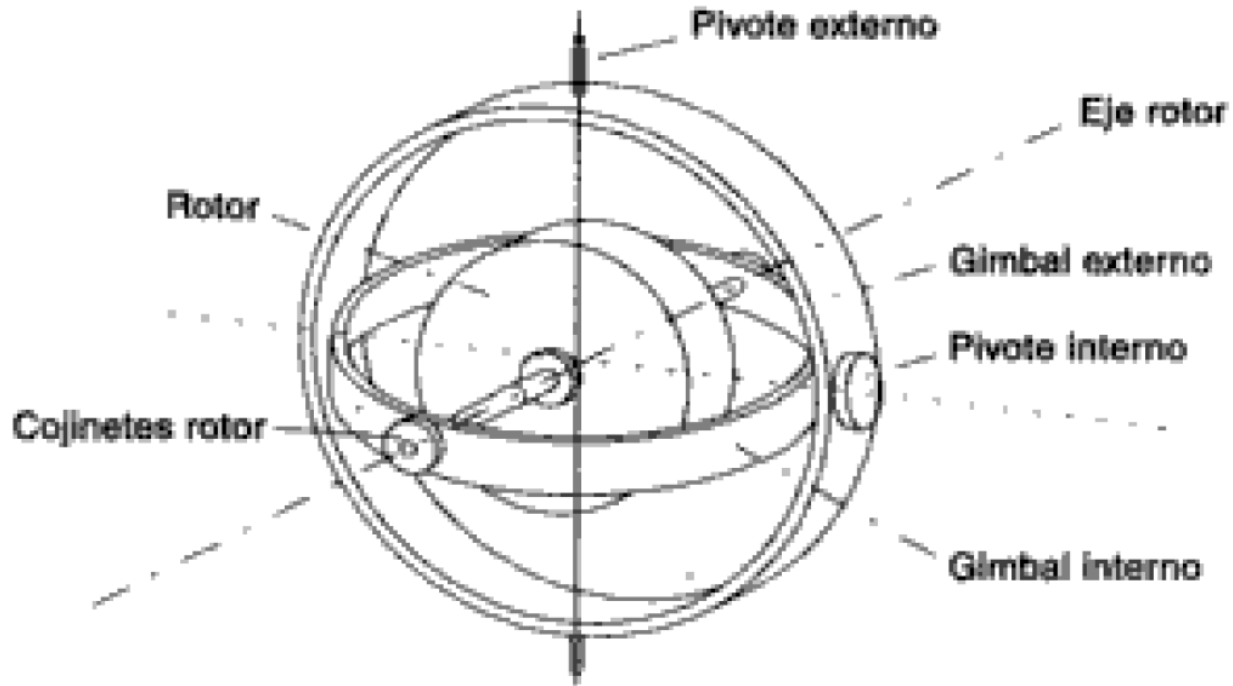


Suportes permitem rotor girar livremente em torno dos eixos cartesianos.

Suporte 1 fica preso no corpo que se deseja medir a orientação.

Graus de liberdade do giroscópio \Rightarrow depende do número de suportes com movimento.

GIROSCÓPIOS MECÂNICOS



Ollero, 2005.

Pela conservação de momento angular o rotor resiste a mudanças de orientação do seu eixo de rotação \Rightarrow eixo do rotor se mantém inercialmente estável.

Nenhum torque é transmitido dos mancais para o eixo do rotor \Rightarrow eixo de rotação é estável no espaço.

Quando o giroscópio é sujeito à uma rotação o rotor permanece sempre na mesma orientação \Rightarrow fazendo com que os ângulos entre os suportes se alterem.

Para medir a orientação basta medir os ângulos entre os suportes.

GIROSCÓPIOS MECÂNICOS



Medem diretamente a orientação do corpo ao qual está fixo \Rightarrow outros tipos de giroscópios medem velocidade angular.

Desvantagens:

- Contém partes móveis;
- Precisam de alguns minutos para aquecer antes de poderem ser usados \Rightarrow não é factível em algumas aplicações;

GIROSCÓPIOS MECÂNICOS

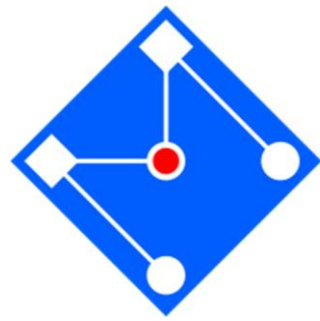


Desvantagens (cont.):

- Existência de atrito entre as partes móveis
⇒ torque de atrito é transmitido para o eixo do rotor gerando erro que acumula ao longo do tempo;
- Para minimizar atrito ⇒ usam-se mancais de alta precisão e lubrificantes especiais
⇒ alto custo de fabricação para minimizar erros.

Precisão de medida ⇒ cerca de $0,1^\circ$ em um intervalo de 6 horas.

GIROSCÓPIOS ÓTICOS



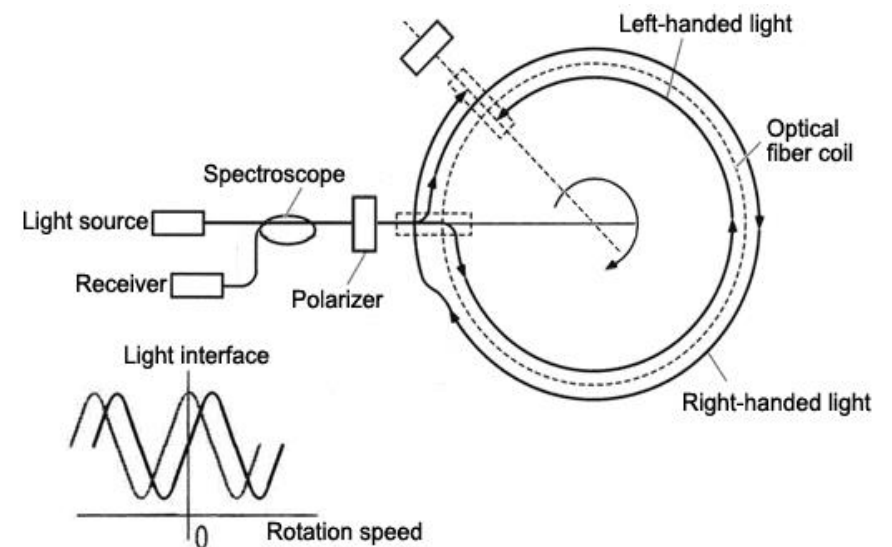
Primeiro uso comercial \Rightarrow década de 1980 em aviões.

Dois tipos:

- Fibra ótica;
- Anel de laser.

Giroscópios de fibra ótica (FOG) consistem de uma bobina de fibra ótica na qual são emitidos dois feixes de luz monocromática em direções opostas.

Usam a interferência da luz para medir velocidade angular.

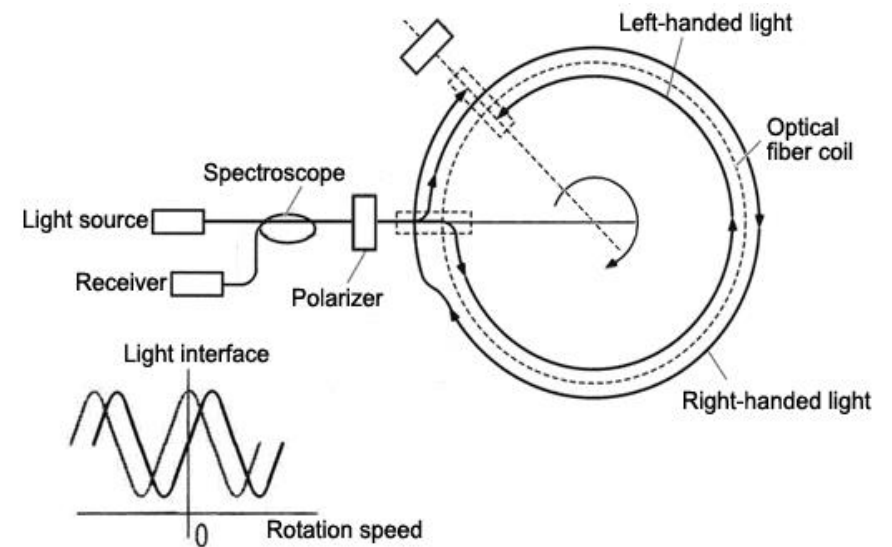


GIROSCÓPIOS ÓTICOS

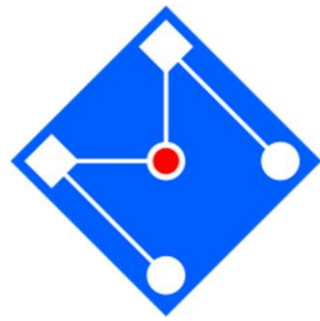


Princípio de funcionamento:

- Dois feixes de luz são emitidos na bobina em direções opostas;
- Se o sensor está em rotação o feixe que viaja na direção da rotação percorre uma distancia maior do que o feixe que viaja na direção oposta à rotação \Rightarrow Efeito Sagnac;
- Quando os feixes saem da bobina eles são combinados;

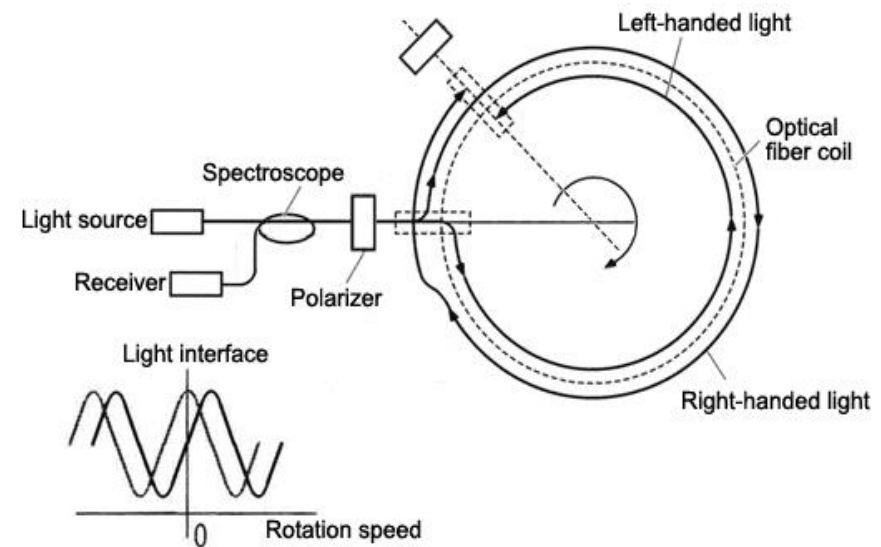


GIROSCÓPIOS ÓTICOS

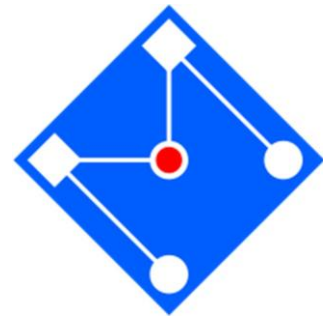


Princípio de funcionamento (cont.):

- Mudança de fase causada pelo efeito Sagnac provoca interferência entre os feixes;
- Interferência resulta em um feixe cuja intensidade é proporcional à velocidade angular do sensor;
- Velocidade angular é medida pela intensidade do feixe combinado.



GIROSCÓPIOS ÓTICOS



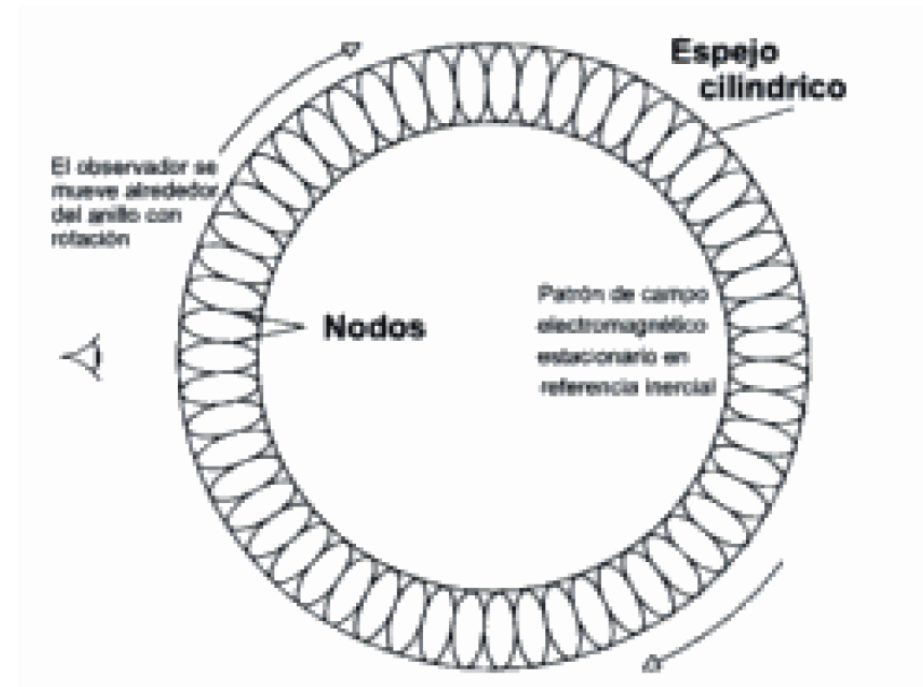
Giroscópios de anel de laser (RLG) também são baseados no Efeito Sagnac.

Diferença entre um FOG e um RLG \Rightarrow no RLG os feixes de laser são direcionados na trajetória fechada por meio de espelhos ao contrário da fibra ótica nos FOG.

Giroscópios óticos não contém nenhuma parte móvel e exigem somente poucos segundos para serem inicializados.

Exatidão dos giroscópios óticos depende da distância percorrida pelos feixes de luz \Rightarrow quanto maior a distância maior a exatidão, mas maior será o sensor.

Exatidão é limitada pelo tamanho do sensor.



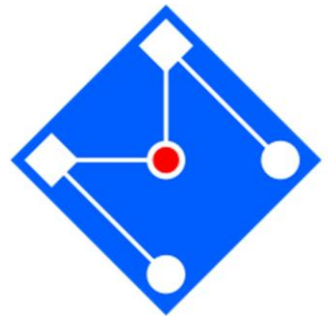
CONTINUAÇÃO

Ainda faltava ver os dispositivos MEM.

É importante, pois tem muitas aplicações.

Diferentes aplicações.

Amplamente usados em diversas aplicações.



GIROSCÓPIOS MEM



Giroscópios mecânicos e óticos apresentam custo muito alto em razão do grande número de peças e das tolerâncias de alta precisão exigidas na fabricação.

Giroscópios MEM são relativamente baratos:

- Fabricados com técnicas da microeletrônica;
- Constituídos de pouquíssimas partes (em geral possuem somente três partes).

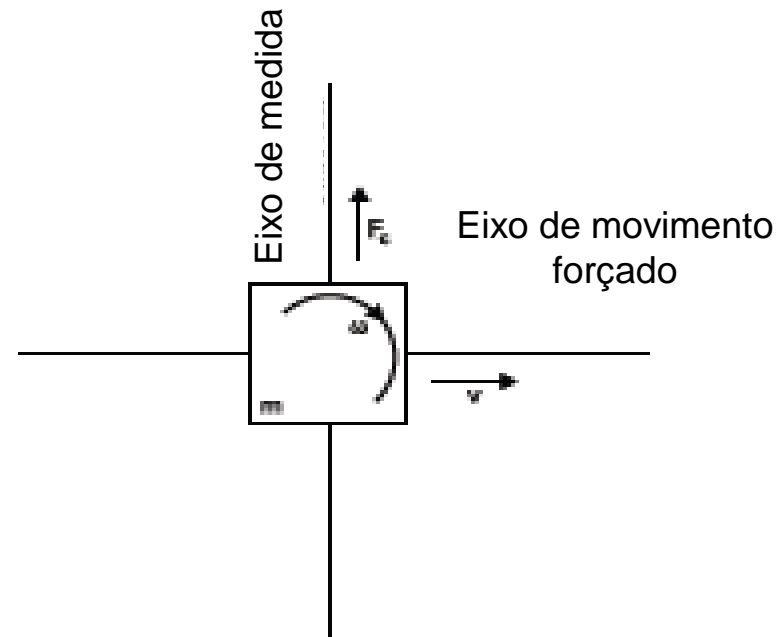
Giroscópios MEM usam a força de Coriolis para medir a velocidade angular.

GIROSCÓPIOS MEM

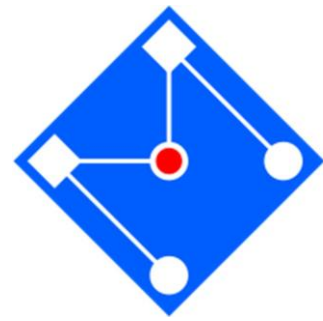
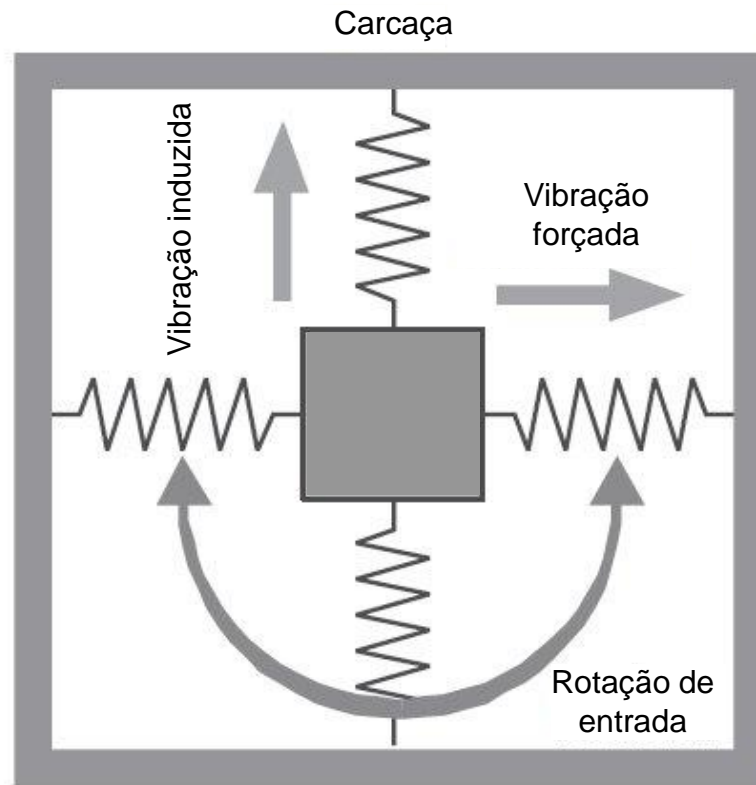


Força de Coriolis \Rightarrow uma massa (m) se movendo com velocidade linear v em relação a um sistema de coordenadas com rotação ω terá uma força (F_C) exercida sobre ela:

$$F_C = 2m(\omega \times v)$$

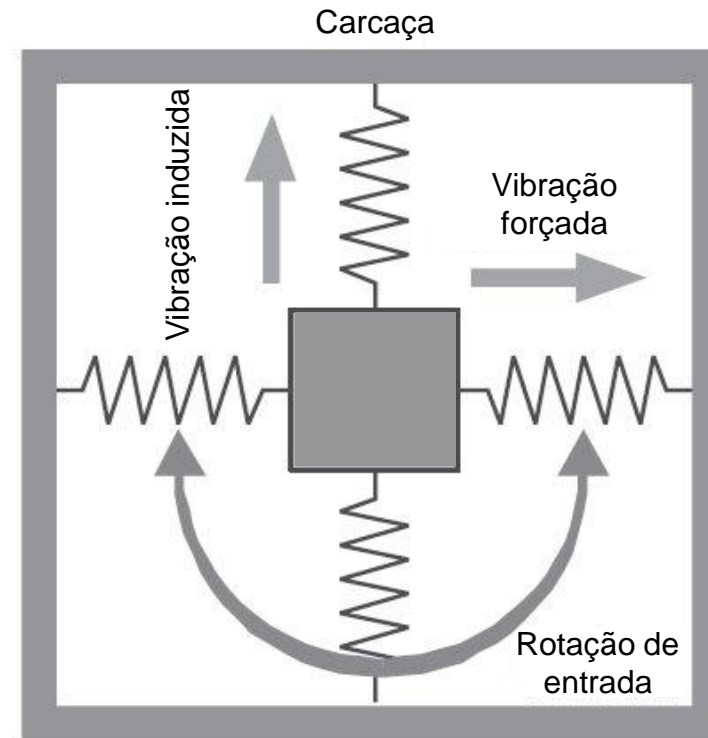


GIROSCÓPIOS MEM



- Giroscópios MEM contém elementos vibratórios para medir a força de Coriolis;
- Existem giroscópios MEM com diversas geometrias de elementos vibratórios \Rightarrow garfos, discos, etc;
- Geometria mais simples consiste de uma massa forçada a vibrar ao longo de um eixo;

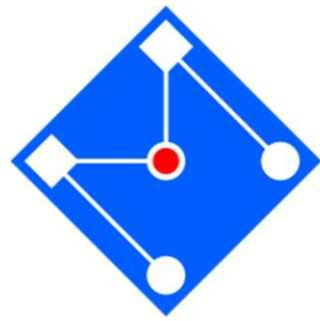
GIROSCÓPIOS MEM



Princípio de funcionamento (cont.):

- Quando o giroscópio gira uma vibração secundária é induzida na massa ao longo de um eixo perpendicular ao eixo da vibração forçada devido à força de Coriolis;
- A amplitude da vibração induzida é proporcional à rotação do giroscópio;
- Velocidade angular é calculada pela medição da amplitude da vibração secundária.

GIROSCÓPIOS MEM



Giroscópios MEMS tem exatidão muito menor do que as dos giroscópios mecânicos e óticos.

Apesar da baixa exatidão os giroscópios MEM apresentam inúmeras vantagens:

- Tamanho reduzido;
- Baixo peso;
- Construção robusta;
- Baixo consumo de energia;
- Pequeno tempo de inicialização;
- Custo baixo para produção em grandes volumes;
- Alta confiabilidade;
- Baixa ou nenhuma manutenção;
- Integração com outros sensores MEMS (e.g., acelerómetros).

GIROSCÓPIOS MEM



Comparação dois giroscópios da Honeywell \Rightarrow giroscópio ótico de um eixo (GG1320AN) e giroscópio MEM de dois eixos (GG5300).

	GG1320AN (Ótico)	GG5300 (MEM)
Volume	88mm x 88mm x 45mm	50mm x 50mm x 30mm
Peso	454g	136 g
Tempo para inicialização	< 4 segundos	< 1 s
Potência	15 V(cc), 1,6 watts nominal 5 V(cc), 0,375 watts nominal	5 V(cc), < 800 mA
Temperatura de operação	-54 °C to 85	-45 °C to 85 °C
Ruído	0,0035°/√h	0,2°/√h
Bias	0,0035°/h	< 70°/h

- Vantagens do giroscópio MEM \Rightarrow 2 eixos, menor tempo de inicialização, menor e mais leve.
- Desvantagens do giroscópio MEM \Rightarrow a baixa exatidão (presença de bias instável e maior ruído).

INCERTEZAS DOS GIROSCÓPIOS MEM

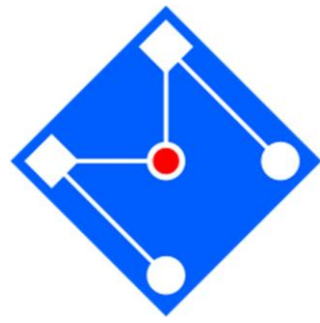


Girosópios MEM são os mais utilizados para aplicações que não exigem altíssima precisão.

Erros presentes nos girosópios MEM:

- Bias constante;
 - Instabilidade da bias;
 - Ruído térmico-mecânico;
 - Efeitos da temperatura;
 - Erros de calibração;
- Como esses erros afetam o cálculo da orientação?

INCERTEZAS DOS GIROSCÓPIOS MEM



Bias constante:

- Valor médio da velocidade angular fornecida pelo giroscópio quando está sem movimento de rotação;
- Diferença entre valor medido da velocidade angular e seu valor real ($^{\circ}/h$);
- Integração de erro constante na velocidade angular gera erro na posição angular que aumenta linearmente com o tempo;
- Bias constante \Rightarrow estimada por meio de média usando seqüência grande de leituras com o giroscópio sem realizar rotações.
- Bias constante \Rightarrow fácil de ser compensada pela sua subtração dos valores fornecidos pelo giroscópio.

INCERTEZAS DOS GIROSCÓPIOS MEM



Instabilidade da bias:

- Bias de giroscópios MEM flutuam no tempo \Rightarrow efeito associado a flutuações de baixa frequência.
- Medida da instabilidade da bias descreve como a bias pode mudar em um dado intervalo de tempo;
- Interpretação \Rightarrow se $b(t)$ é a bias no instante t , então uma instabilidade na bias igual a $0,01^\circ/\text{h}$ em 100 segundos, significa que a bias no tempo $(t + 100)$ segundos será uma variável aleatória com valor esperado igual a $b(t)$ e desvio padrão igual a $0,01^\circ/\text{h}$.

INCERTEZAS DOS GIROSCÓPIOS MEM



Instabilidade da bias:

- Como a instabilidade da bias afeta o cálculo da orientação?
 - Instabilidade da bias \Rightarrow presente na velocidade angular;
 - Posição angular é obtida pela integração no tempo da velocidade angular;
 - Integração da velocidade angular com bias que flutua de forma aleatória \Rightarrow faz surgir na posição angular uma bias que também flutua de forma aleatória;
 - Integração da velocidade angular com bias cuja incerteza cresce com o tempo \Rightarrow faz surgir na posição angular uma bias cuja incerteza é representada por um desvio padrão que cresce proporcionalmente com a raiz quadrada do tempo decorrido.

INCERTEZAS DOS GIROSCÓPIOS MEM



Ruídos térmico-mecânicos:

- Ruídos térmicos-mecânicos flutuam com frequência muito maior do que a taxa de amostragem do sensor \Rightarrow como resultado as medidas de velocidade angular apresentam ruído branco;
- Integração da velocidade angular com ruído branco \Rightarrow gera erro com desvio padrão que cresce proporcionalmente com a raiz quadrada do tempo;
- Fabricantes em geral fornecem a consequência desse ruído na posição angular \Rightarrow que consiste em uma incerteza que cresce com a raiz quadrada do tempo em unidades de $^{\circ}/\sqrt{h}$.

INCERTEZAS DOS GIROSCÓPIOS MEM



Efeitos da temperatura:

- Flutuações de temperatura do sensor induzem variação da bias;
- Qualquer variação na bias causada por uma variação de temperatura provoca um erro no cálculo da orientação que cresce linearmente com o tempo;
- Relação entre bias e temperatura é não linear nos giroscópios MEM;
- Maioria dos sistemas inerciais de medida (SIM-IMU) possuem sensores internos de temperatura que permite corrigir os efeitos induzidos pela variação da temperatura.
- Sistema inercial de medidas MTx da Xsens realiza a correção dos efeitos de temperatura internamente.

INCERTEZAS DOS GIROSCÓPIOS MEM



Erros de calibração:

- Erro de calibração se refere à soma dos erros causados por: erros em fatores de escala, erros de alinhamento e erros lineares dos giroscópios;
- Esses erros geram bias que são observadas somente quando o sensor está em operação;
- Esses erros geram desvios adicionais no sinal integrado da posição angular;
- A magnitude desses erros são proporcionais à taxa e à duração dos movimentos de rotação do sensor;
- É possível medir e corrigir os erros de calibração \Rightarrow alguns sistemas inerciais de medida (MTx da Xsens) aplicam internamente correções para os erros de calibração.

ACELERÔMETROS



Sensor que mede aceleração linear.

Tipos de acelerômetros:

- Mecânicos;
 - Piezoelétricos;
 - Capacitivos;
 - Acústicos;
 - *Strain Gauges*;
 - Muitos outros.
- Todos tipos podem ser fabricados com tecnologia MEM (Sistemas Micro-Elétrico-Mecânicos).

ACELERÔMETROS MECÂNICOS

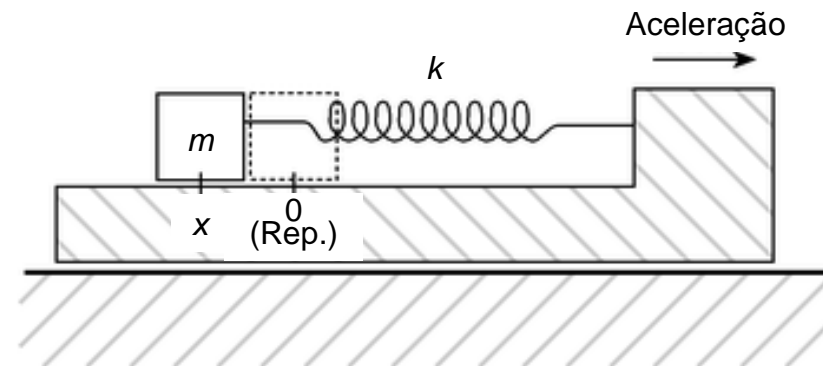


Consistem de uma massa presa por molas.

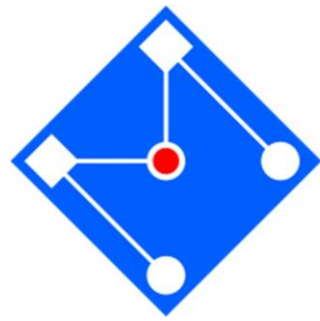
O deslocamento da massa é medido \Rightarrow fornecendo um sinal proporcional à força que age sobre a massa na direção do eixo de deslocamento.

Para calcular a aceleração que age sobre a massa usa-se a 2ª Lei de Newton:

$$F = ma = kx \Rightarrow a = kx/m$$



ACELERÔMETROS ACÚSTICOS



Denominado \Rightarrow acelerômetro de onda acústica superficial (SAW).

Consiste de uma barra engastada em uma ponta e livre na outra.

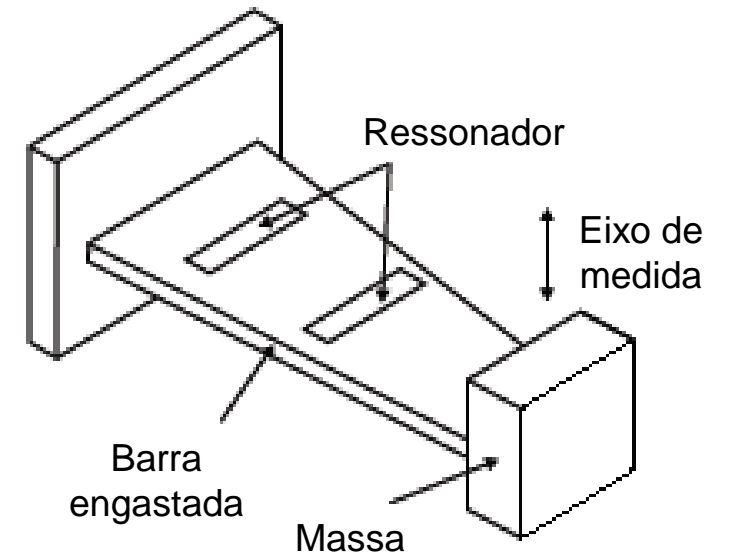
Na ponta livre é acoplada uma massa.

Barra e massa entram em ressonância em uma dada frequência.

Quando sensor sofre aceleração ao longo do seu eixo a barra flexiona causando uma alteração na frequência da onda acústica superficial.

Alteração da onda acústica é proporcional à deformação da barra que por sua vez é proporcional à aceleração.

Medindo a variação na frequência da onda acústica pode-se medir a aceleração.



ACELERÔMETROS PIEZELÉTRICOS

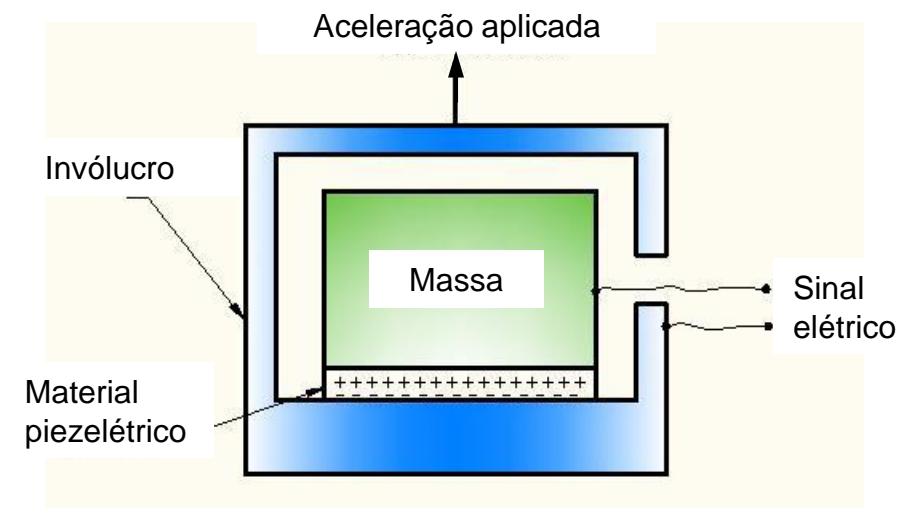


Materiais piezelétricos quando submetidos à forças de compressão/tração geram uma corrente elétrica.

Forças causadas por acelerações produzem uma corrente elétrica proporcional à força exercida.

Como a corrente é proporcional à força e a massa é constante \Rightarrow então corrente é proporcional à aceleração.

Possuem alta frequência de resposta \Rightarrow capazes de medir variações bruscas de aceleração.



ACELERÔMETROS MEM



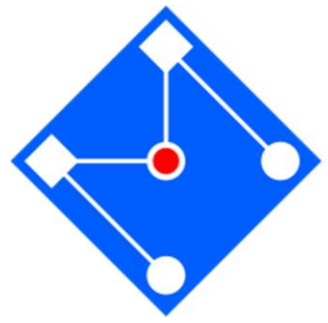
Acclerômetros MEM usam qualquer um dos princípios físicos dos diversos tipos de acclerômetros (mecânico, piezo-elétrico, capacitivo, onda acústica etc).

Acclerômetros MEM apresentam as mesmas vantagens dos giroscópios MEM \Rightarrow são baratos, pequenos, leves, consomem pouca potência e apresentam pequeno tempo para inicialização.

Desvantagem dos acclerômetros MEM \Rightarrow não são tão precisos quanto os acclerômetros fabricados com tecnologia tradicional.

Acclerômetros MEM são os mais utilizados para aplicações que não exigem altíssima precisão.

INCERTEZAS DOS ACELERÔMETROS MEM



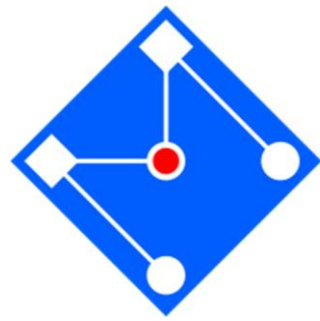
As incertezas presentes nos acelerômetros MEM são as mesmas dos giroscópios MEM:

- Bias constante;
- Instabilidade da bias;
- Ruído térmico-mecânico;
- Efeitos da temperatura;
- Erros de calibração.

Maior diferença entre os erros presentes nos acelerômetros e nos giroscópios é que o sinal do acelerômetro é integrado duas vezes para se obter a posição linear enquanto que nos giroscópios é integrado somente uma vez para se obter a posição angular.

Como esses erros afetam o cálculo da orientação?

INCERTEZAS DOS ACELERÔMETROS MEM



Bias constante:

- A bias de um acelerômetro é a diferença entre o seu sinal de saída e o valor real da aceleração (m/s^2);
- Uma bias constante quando integrada duas vezes causa um erro de posição que cresce com o quadrado do tempo decorrido;
- Pode-se medir a bias constante obtendo-se uma sequência longa de medidas com o acelerômetro parado;
- O processo de calcular a bias constante é complicado em razão da presença da gravidade que aparece na medida do acelerômetro como sendo uma bias \Rightarrow portanto é preciso conhecer exatamente a orientação do acelerômetro em relação á gravidade para medir a bias constante;
- Na prática o cálculo da bias é realizado por meio de um processo de calibração com o dispositivo fixado em uma base móvel cuja orientação pode ser controlada com grande exatidão.

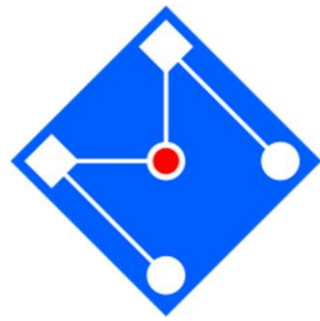
INCERTEZAS DOS ACELERÔMETROS MEM



Instabilidade da bias:

- Acelerômetros MEM são sujeitos a ruídos aleatórios que causam alterações da bias em função do tempo;
- Medida da instabilidade da bias descreve como a bias pode mudar em um dado intervalo de tempo;
- Integração da aceleração com bias que flutua de forma aleatória \Rightarrow faz surgir na velocidade e posição linear bias que também flutuam de forma aleatória;
- Integração da aceleração linear com bias cuja incerteza cresce com o tempo \Rightarrow faz surgir na velocidade linear uma bias cuja incerteza é representada por um desvio padrão que cresce com o tempo elevado à $3/2$;
- Integração dupla da aceleração linear com bias cuja incerteza cresce com o tempo \Rightarrow faz surgir na posição linear uma bias cuja incerteza é representada por um desvio padrão que cresce com o tempo elevado à $5/2$.

INCERTEZAS DOS ACELERÔMETROS MEM



Ruídos térmico-mecânicos:

- Ruídos térmicos-mecânicos flutuam com frequência muito maior do que a taxa de amostragem do sensor \Rightarrow como resultado as medidas de aceleração linear apresentam ruído branco;
- Integração da aceleração linear com ruído branco \Rightarrow gera erro na velocidade linear com desvio padrão que cresce proporcionalmente com a raiz quadrada do tempo;
- Integração dupla da aceleração linear com ruído branco \Rightarrow gera erro na posição linear com desvio padrão que cresce proporcionalmente com o tempo elevado à $3/2$.

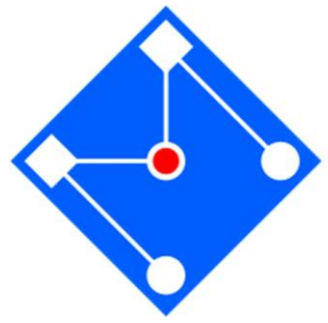
INCERTEZAS DOS ACELERÔMETROS MEM



Efeitos da temperatura:

- Como no caso dos giroscópios \Rightarrow variações de temperatura causam variações na bias da aceleração linear;
- Relação entre a bias e a temperatura em um acelerômetro depende de cada sensor \Rightarrow contudo essa dependência é altamente não-linear;
- Sistemas inerciais de medidas em geral contém sensor de temperatura que permite corrigir os sinais de saída do sistema para compensar os efeitos da temperatura.

INCERTEZAS DOS ACELERÔMETROS MEM



Erros de calibração:

- Erros de calibração e erros em fatores de escala aparecem como sendo erros na forma de bias que aparecem preferencialmente quando o sensor está sujeito à aceleração;
- No caso dos acelerômetros feitos dos erros de calibração e dos erros em fatores de escala podem ser observados quando sensor está parado em razão da aceleração da gravidade;
- Contudo, além dos efeitos dos erros de calibração e de fatores de escala que podem observados pela aceleração da gravidade \Rightarrow existem erros associados a esses efeitos também quando o sensor está em aceleração.

SISTEMA INERCIAL DE MEDIDA (SIM-IMU)



Usualmente composto por 3 giroscópios e 3 acelerômetros posicionados ao longo de eixos ortogonais:

- Pode ser também equipado com um menor número de giroscópios e acelerômetros para medir aceleração e rotação somente em 1 ou 2 eixos.

Por meio do processamento dos sinais da velocidade angular e da aceleração linear \Rightarrow calcula-se posição, velocidade linear e orientação do veículo.

SIM de demonstração:

- Dois giroscópios (eixo vertical e eixo lateral);
- Três acelerômetros.

SISTEMA INERCIAL DE MEDIDA (SIM-IMU)



Exemplos de sinais dos sensores inerciais:

- Medidas fornecidas pelos sensores inerciais (acelerômetros e giroscópios);
- Cálculo das estatísticas dos sinais adquiridos dos giroscópios e dos acelerômetros;
- Sistema parado colocado em 3 orientações diferentes:
 - Sistema na horizontal;
 - Sistema virado para o lado direito;
 - Sistema na vertical com a frente para cima.

SISTEMA INERCIAL DE MEDIDA (SIM-IMU)



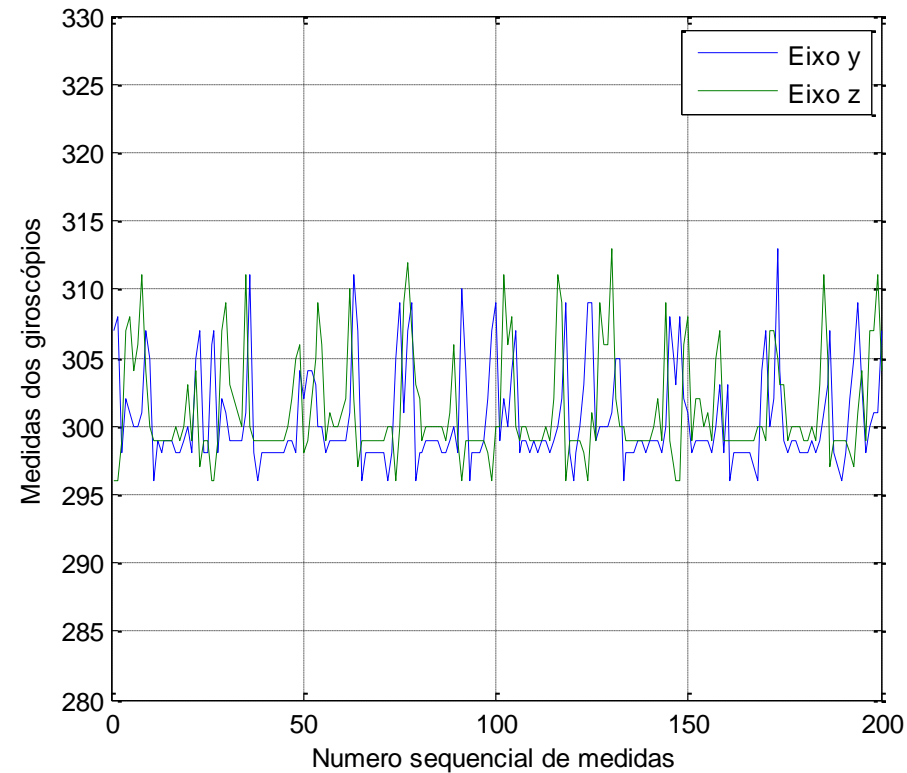
Demonstração dos sinais dos sensores inerciais:

- Para cada orientação do sistema:
 - Adquiridas sequências de medidas para cada um dos 3 acelerômetros e 2 giroscópios.
 - frequência de amostragem utilizada $\Rightarrow f_a = 15,6\text{Hz}$;
 - Número de amostras adquiridas de cada sensor em cada orientação do sistema $\Rightarrow N = 200$.

SISTEMA INERCIAL DE MEDIDA (SIM-IMU)



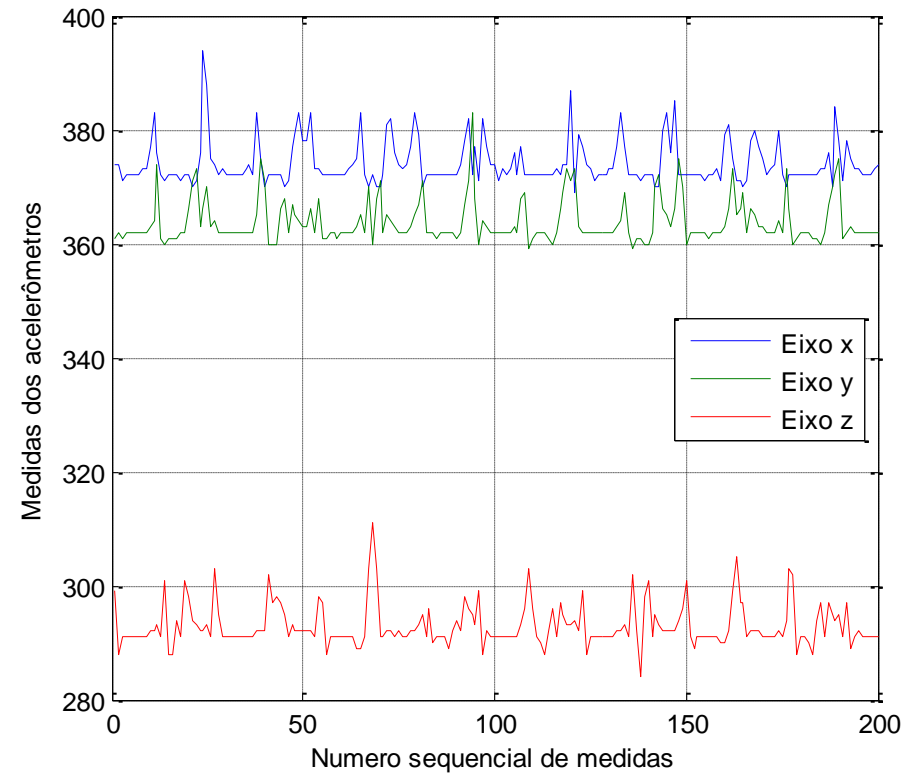
- Medidas dos giroscópios (SIM na horizontal):



SISTEMA INERCIAL DE MEDIDA (SIM-IMU)



- Medidas dos acelerômetros (SIM na horizontal):

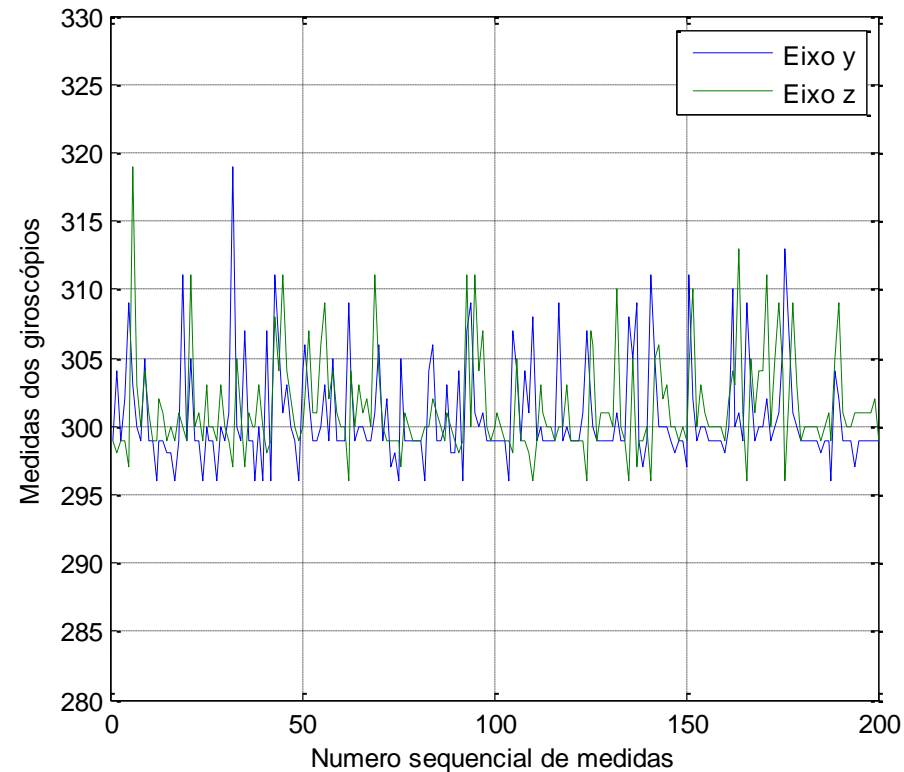


Vemos que a saída do eixo Z reflete o valor da gravidade.

SISTEMA INERCIAL DE MEDIDA (SIM-IMU)

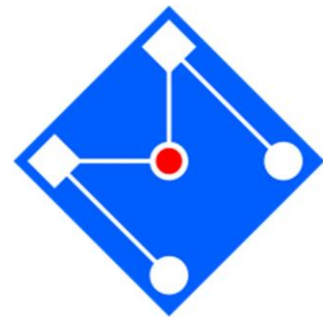


- Medidas dos giroscópios (SIM virado para o lado direito):

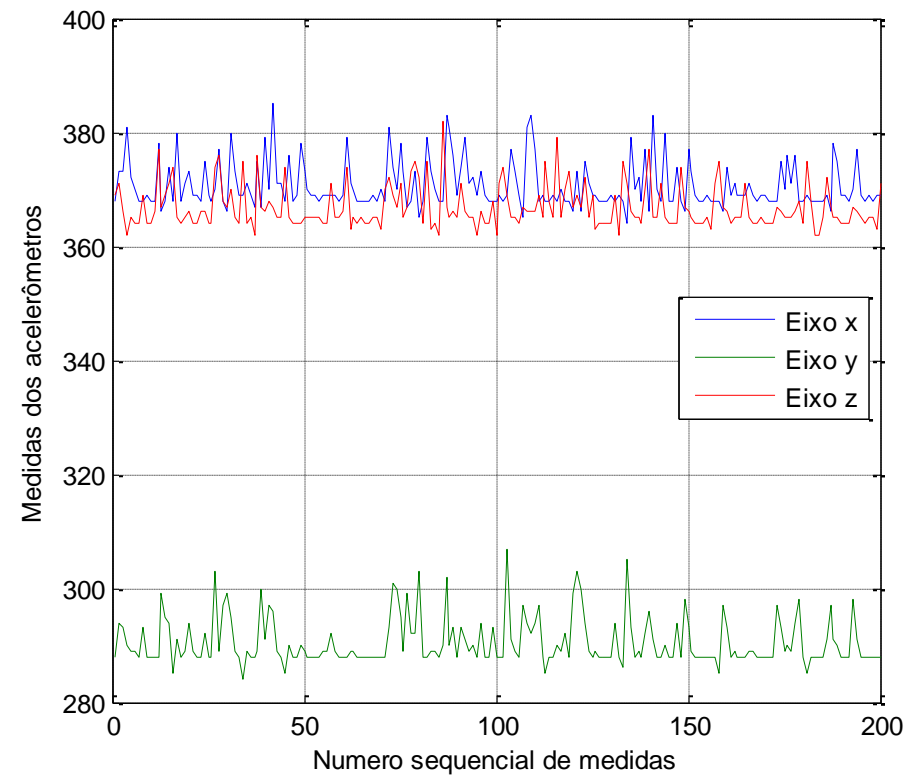


Vemos que a saída tem o mesmo valor medio

SISTEMA INERCIAL DE MEDIDA (SIM-IMU)



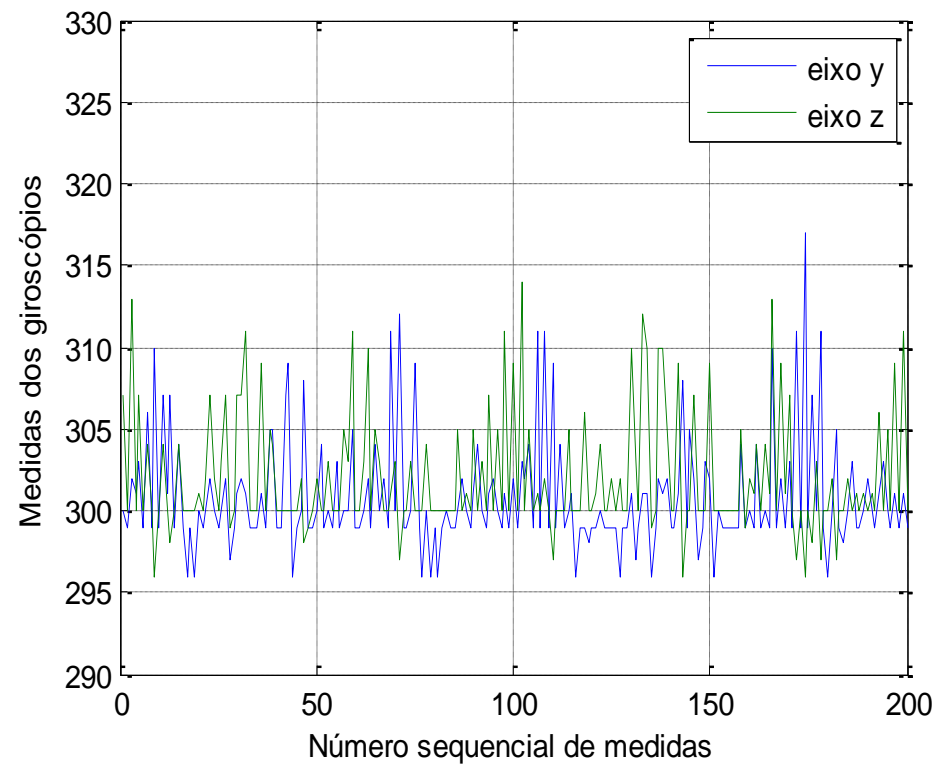
- Medidas dos acelerômetros (SIM virado para o lado direito):



SISTEMA INERCIAL DE MEDIDA (SIM-IMU)



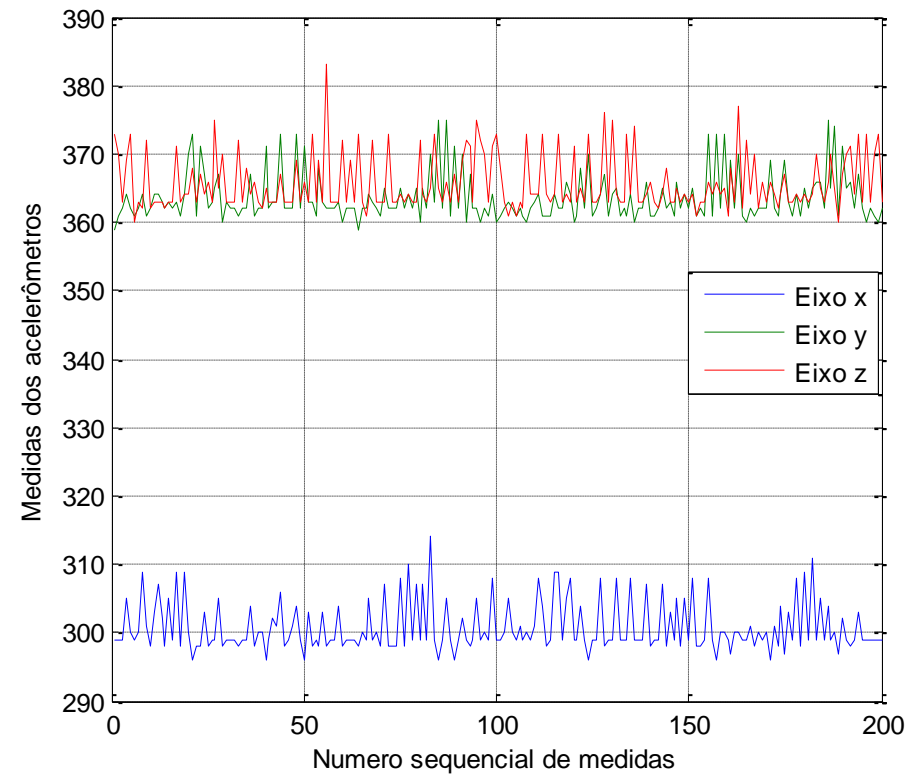
- Medidas dos giroscópios (SIM na vertical para cima):



SISTEMA INERCIAL DE MEDIDA (SIM-IMU)



- Medidas dos acelerômetros (SIM na vertical para cima):



SISTEMA INERCIAL DE MEDIDA (SIM-IMU)



- Estatísticas dos sinais dos sensores inerciais:
 - Cálculo das estatísticas dos sinais adquiridos dos giroscópios e dos acelerômetros;
 - Parâmetros calculados \Rightarrow média, desvio padrão e matriz de covariância do sistema inercial de medidas (SIM-IMU);
 - Média (\bar{x}) e desvio padrão (σ):

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k \quad \sigma = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (x_k - \bar{x})$$

SISTEMA INERCIAL DE MEDIDA (SIM-IMU)



- Matriz de covariância dos acelerômetros e giroscópios:

$$\Sigma_{SI} = \begin{bmatrix} \sigma_{11}^2 & \sigma_{12}^2 & \sigma_{13}^2 & \sigma_{14}^2 & \sigma_{15}^2 \\ \sigma_{21}^2 & \sigma_{22}^2 & \sigma_{23}^2 & \sigma_{24}^2 & \sigma_{25}^2 \\ \sigma_{31}^2 & \sigma_{32}^2 & \sigma_{33}^2 & \sigma_{34}^2 & \sigma_{34}^2 \\ \sigma_{41}^2 & \sigma_{42}^2 & \sigma_{43}^2 & \sigma_{44}^2 & \sigma_{45}^2 \\ \sigma_{51}^2 & \sigma_{52}^2 & \sigma_{53}^2 & \sigma_{54}^2 & \sigma_{55}^2 \end{bmatrix}$$

onde

$$\sigma_{ij}^2 = \sigma_{ji}^2 \quad \sigma_{ii}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (x_{i,k} - \bar{x}_i)^2 \quad \sigma_{ij}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (x_{i,k} - \bar{x}_i)(x_{j,k} - \bar{x}_j)$$

SISTEMA INERCIAL DE MEDIDA (SIM-IMU)



- Médias e desvios padrão dos sinais dos acelerômetros:

Condição	Eixo	Valor médio	Desvio padrão
Robô na horizontal	x	374,02	3,92
	y	363,84	3,80
	z	292,91	3,72
Robô virado de lado	x	370,70	4,13
	y	290,55	4,12
	z	366,76	3,76
Robô na vertical	x	300,77	3,61
	y	363,56	3,46
	z	365,70	4,08

SISTEMA INERCIAL DE MEDIDA (SIM-IMU)



- Médias e desvios padrão dos sinais dos giroscópios:

Condição	Eixo	Valor médio	Desvio padrão
Robô na horizontal	y	300,57	3,65
	z	301,14	3,79
Robô virado de lado	y	300,82	3,75
	z	301,34	3,54
Robô na vertical	y	300,85	3,46
	z	301,93	3,59

SISTEMA INERCIAL DE MEDIDA (SIM-IMU)

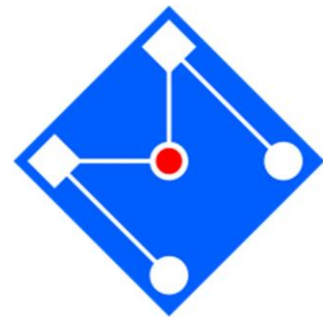


- Matriz de covariância dos sensores inerciais:

$$\Sigma_{SI} = \begin{bmatrix} 15,13 & 2,05 & -0,79 & 1,20 & -2,57 \\ 2,05 & 15,31 & 1,82 & -0,71 & -2,19 \\ -0,79 & 1,82 & 14,89 & -2,50 & -2,00 \\ 1,20 & -0,71 & -2,50 & 13,12 & 0,9051 \\ -2,57 & -2,19 & -2,00 & 0,91 & 13,29 \end{bmatrix}$$

- Observe pouca correlação entre os sinais dos diversos sensores inerciais \Rightarrow medidas são praticamente independentes (e isso é bom!)

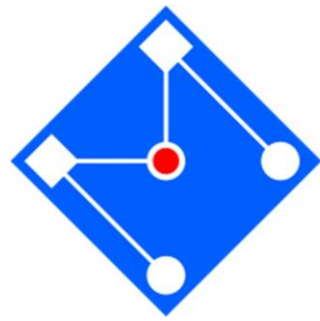
SENSORES ADICIONAIS PARA NAVEGAÇÃO



Sensores adicionais usados em navegação:

- Sensores de posição relativa ou global:
 - GPS;
 - Sensores de distância e de ângulos a marcos do ambiente (sonar, infravermelho, laser etc);
 - Sensores de velocidade do veículo;
 - Sensores de altitude do veículo.
- Sensores de orientação do veículo:
 - Magnetômetro (bússola eletrônica);
 - Inclinômetro.
- Câmeras para visão computacional:
 - Visão monocular;
 - Visão estéreo.

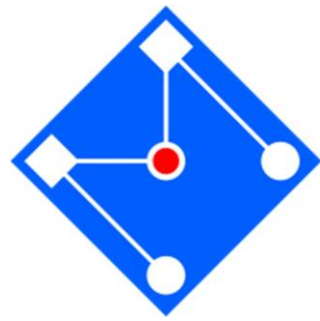
BÚSSOLAS ELETRÔNICAS



Bússola:

- Mais de 4000 anos de existência \Rightarrow inventada pelos chineses na antiguidade;
- Os chineses utilizavam um pedaço de imã natural em cima de um pedaço de seda para guiar veículos em viagens terrestres;
- Utiliza o campo magnético da Terra para obter medida de orientação absoluta;
- Desvantagens:
 - Campo magnético da Terra é fraco;
 - Facilmente perturbado por outros campos magnéticos;
 - Não muito confiável para aplicações internas a prédios.

BÚSSOLAS ELETRÔNICAS



Existem muitas formas de medir o campo magnético da Terra:

- Bússolas magnéticas-mecânicas;
- Medida direta do campo magnético (efeito hall, sensores magneto-resistivos).

Exemplo \Rightarrow bússola eletrônica
(Deventech):

- Baixa exatidão (3 a 4 graus);
- Boa repetibilidade (0,1 graus).



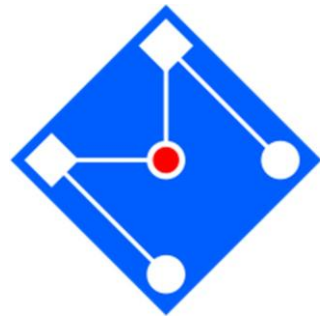
BÚSSOLAS ELETRÔNICAS



Demonstração dos sinais da bússola:

- Medidas fornecidas pela bússola;
- Cálculo das estatísticas dos sinais de orientação do robô em torno da vertical adquiridos pela bússola.
- Sistema parado em um ambiente colocado em 4 orientações diferentes:
 - Sistema virado para o norte;
 - Sistema virado para o leste;
 - Sistema virado para o sul;
 - Sistema virado para o oeste.

BÚSSOLAS ELETRÔNICAS



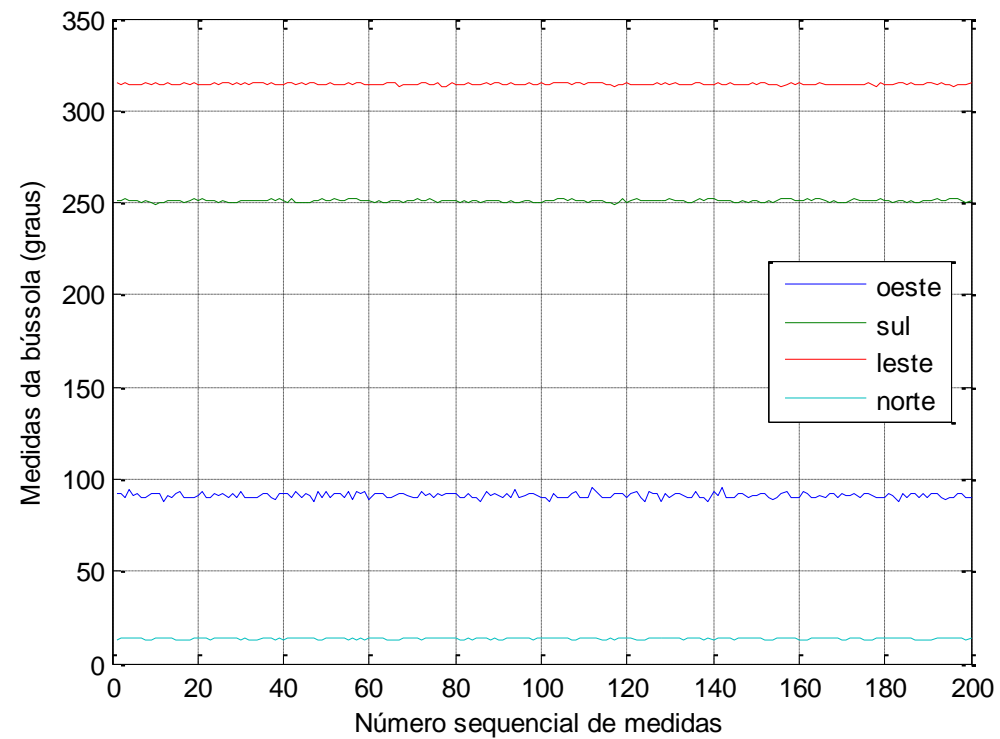
Demonstração dos sinais do bússola (cont.):

- Para cada orientação do sistema:
 - Adquiridas sequências de medidas para os sinais da bússola.
 - frequência de amostragem utilizada $\Rightarrow f_a = 13,2\text{Hz}$;
 - Número de amostras adquiridas de cada sensor em cada orientação do sistema $\Rightarrow N = 200$.

BÚSSOLAS ELETRÔNICAS



- Medidas da Bússola:



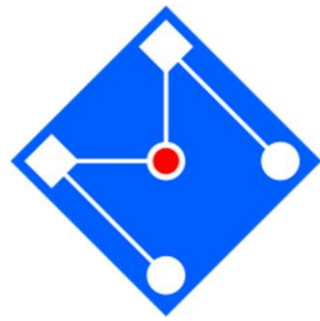
BÚSSOLAS ELETRÔNICAS



- Estatísticas dos sinais da bússola:
 - Cálculo das estatísticas dos sinais adquiridos pela bússola;
 - Parâmetros calculados \Rightarrow média e desvio;

Condição	Valor esperado	Valor médio	Desvio padrão	Erro
Sist. virado para norte	0°	$13,70^{\circ}$	$0,46^{\circ}$	$-13,70^{\circ}$
Sist. virado para oeste	90°	$91,04^{\circ}$	$1,34^{\circ}$	$-1,04^{\circ}$
Sist. virado para sul	± 180	$250,90^{\circ}$	$0,68^{\circ}$	$-62,90^{\circ}$
Sist. virado para leste	-90°	$-45,68^{\circ}$	$0,54^{\circ}$	-44.32°

BÚSSOLAS ELETRÔNICAS



● Conclusões sobre medidas da bússola:

- Pequenos desvios padrão \Rightarrow medidas da bússola apresentam boa repetibilidade;
- Grandes erros \Rightarrow medidas da bússola apresentam baixa exatidão;

➤ **É possível calibrar a bússola para obter um sinal com boa exatidão?**

- Curva de calibração pode transformar boa repetibilidade em boa exatidão;
- Como o sistema estava em ambiente interno durante a aquisição dos dados \Rightarrow os grandes erros obtidos nas medidas da bússola podem ter sido gerados por interferências da rede elétrica;
- Se essa for a razão dos grandes erros \Rightarrow curva de calibração não vai funcionar.

MAGNETÔMETROS



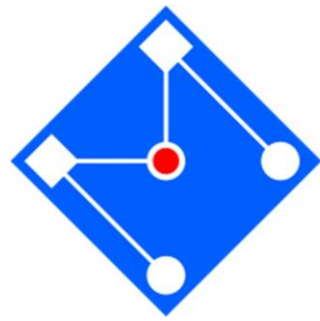
Magnetômetro vetorial \Rightarrow mede a força e a direção de um campo magnético.

Sistemas de medidas inerciais frequentemente contém além dos giroscópios e acelerômetros magnetômetros vetoriais posicionados em eixos ortogonais.

Magnetômetros vetoriais de um SIM (IMU) medem a força e a direção do campo magnético da Terra \Rightarrow gerando informações em três eixos de forma a permitir identificar as direções norte, leste e vertical.

Magnetômetros não tem a mesma exatidão dos giroscópios \Rightarrow servem somente com auxílio às medidas dos giroscópios.

MAGNETÔMETROS



Magnetômetros são afetados por perturbações locais do campo magnético da Terra causadas por objetos magnéticos e correntes de instalações elétricas.

Magnetômetros não são muito confiáveis em ambientes internos em razão dos campos magnéticos gerados pela instalação elétrica.

Magnetômetros são usados com êxito em conjunto com giroscópios para melhorar a exatidão no cálculo da orientação fornecida por um SIM.

Vantagem do uso de magnetômetros em conjunto com giroscópios \Rightarrow todos os sensores do sistema de navegação ficam no próprio veículo não dependendo de nenhuma infra-estrutura externa.

MAGNETÔMETROS

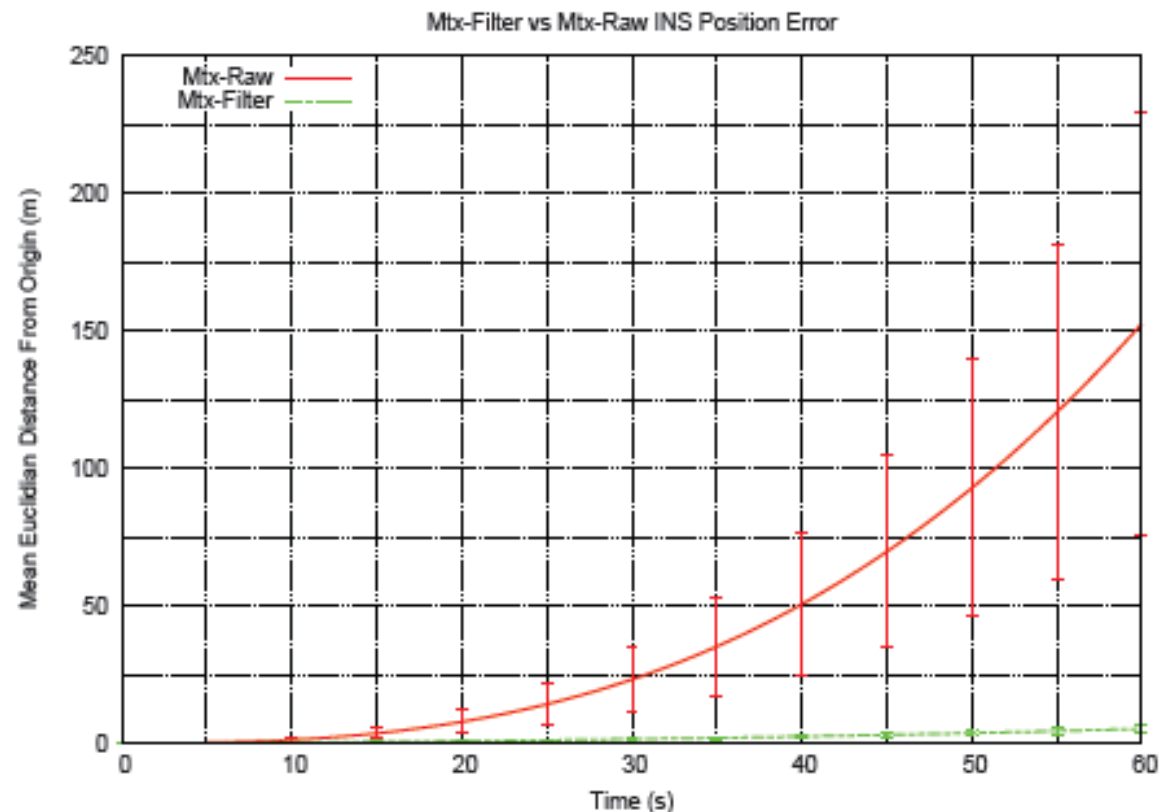


Desvantagem do uso de magnetômetros em conjunto com giroscópios \Rightarrow somente tem capacidade de reduzir a taxa de aumento dos erros de um SIM e não eliminá-las completamente.

SIM deve usar algoritmos para combinar as medidas dos giroscópios e dos magnetômetros para gerar uma medida mais precisa de orientação.

Redução da taxa de aumento do erro de posição calculada pelo Mtx obtida com o auxílio de magnetômetros.

Uso de estimadores de Kalman



INCLINÔMETROS



Medem inclinação em torno do eixo vertical.

Existem inclinômetros de 1 e de 2 eixos.

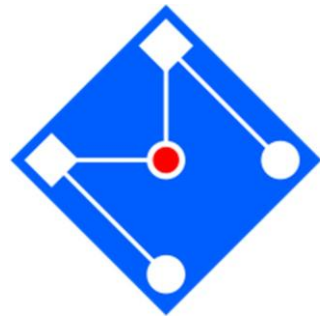
Inclinômetros de 2 eixos medem inclinações em torno da vertical em duas direções ortogonais.

Consistem de um fluido dielétrico com uma bolha de ar dentro inserido em um sensor capacitivo.

Princípio de funcionamento:

- Quando o sensor é inclinado \Rightarrow a bolha de ar se move dentro do fluido devido à força de gravidade e altera a capacitância do sensor;
- Alteração da capacitância resulta em um sinal proporcional à inclinação do sensor em torno do eixo de medida.

INCLINÔMETROS



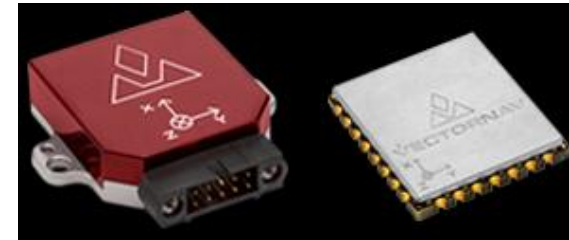
Capazes de medir inclinações de até $\pm 45^\circ$ com alta precisão e resposta linear.

Inclinação do sensor em eixos perpendiculares ao eixo de medida geram erros de medida \Rightarrow contudo o erro é menor do que 1% para inclinações cruzadas de até 45° .

Apresentam tempo de resposta baixo \Rightarrow da ordem de 0,3 segundos.

Problema \Rightarrow sensível a outras acelerações além da aceleração da gravidade, tal como, acelerações do veículo na direção perpendicular ao eixo de medida da inclinação.

SISTEMAS INERCIAIS COMERCIAIS



- 0.5° Static Pitch/Roll
- 1.0° Dynamic Pitch/Roll
- 5°/hr Gyro In-Run Bias (typ.)
- 800 Hz IMU Data
- ± 16 g Accelerometer Range
- $\pm 2000^\circ$ /sec Gyroscope Range

Xsens, BV. The Netherlands
VectorNav, USA

SISTEMAS INERCIAIS

Problema: deriva de integração. Estimador de Kalman

