

# **MOTO DI UN CORPO RIGIDO NELLO SPAZIO:**

**Descritto da 6 parametri:**

- un vettore posizione
- 3 parametri di assetto

Conoscenza di tali parametri fondamentale per la **georeferenziazione diretta** delle immagini acquisite dal MMS

Allo stato attuale **INS e GPS** sono gli strumenti che garantiscono le **6 informazioni indipendenti** con precisione e continuità

# SENSORI PER LA NAVIGAZIONE

**Navigazione:** metodi e tecniche per determinare posizione e assetto di un oggetto in moto, tipicamente in un sistema **ECEF (Earth Centered Earth Fixed)**.

Per fornire tali dati ad ogni istante, occorre che i dati di misura ci consentano di calcolare gli stati di navigazione: **posizione, velocità e assetto** negli istanti di campionamento e di predirli negli istanti voluti.

(NB serve anche la velocità: altrimenti non so in che direzione mi sto muovendo!)

Sensori:

**INS** (Inertial Navigation System): determina tutti gli stati;

**GPS** (GNSS) determina la posizione (se più GPS allora anche l'assetto);

**Odometro** solo le distanze.

# SENSORI PER LA NAVIGAZIONE

Ci sono due modalità/filosofie per la navigazione:

**Dead Reckoning System:** la posizione/assetto attuale dipendono dalle precedenti + la misura di direzione e velocità nell'ultimo  $\Delta t$ : *Esempi: odometro, IMU, GPS di fase* integrano osservazioni nel tempo: questo influenza le caratteristiche degli errori (correlati temporalmente)

**Position fixing:** ogni dato di posizione è indipendente dagli altri; al più è legato a reference points

*Esempi: GPS di codice*

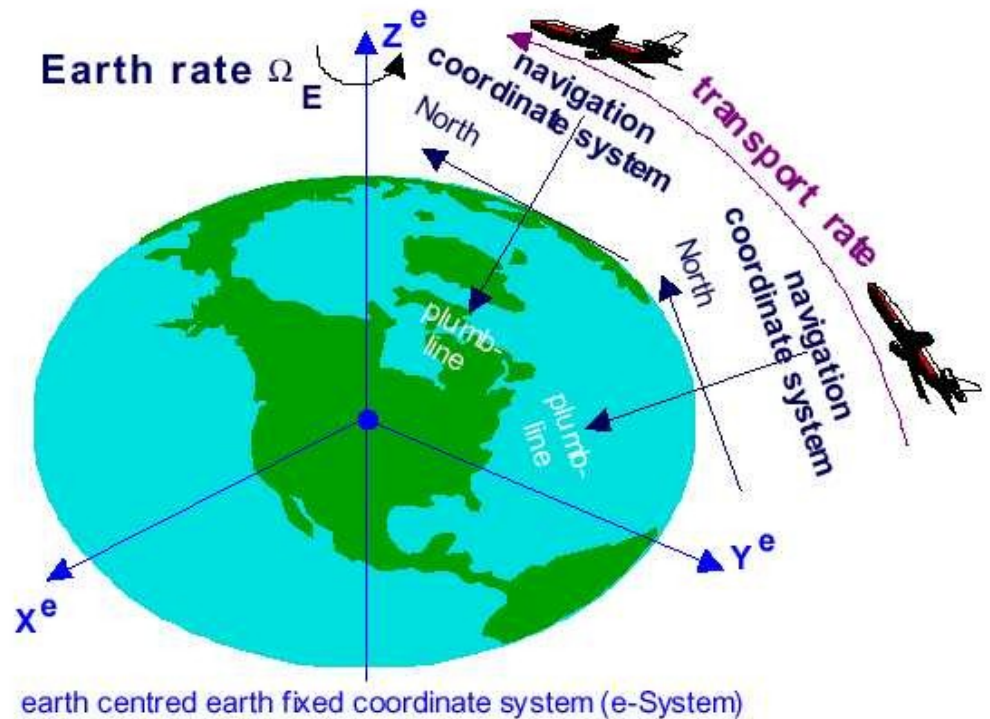
# Navigazione inerziale e sistemi di riferimento

La dinamica del veicolo può essere descritta in un sistema inerziale (*i-frame*), ovvero un sistema in cui vale la 2<sup>a</sup> legge di Newton  $\mathbf{F} = m \mathbf{a}$ . Un sistema di questo tipo può essere definito con origine nel centro della Terra e orientamento rispetto alla sfera celeste con osservazioni astronomiche

Un sistema Earth-centered-Earth-fixed (*e-frame*) come il WGS84 può essere riportato ad un *i-frame* conoscendo w terra

Il moto del veicolo è di solito espresso in un local level frame: il sistema di navigazione (*n-frame*).

Il sistema body (*b-frame*) è solidale al veicolo; assi forward, right, down (through-the-floor).



Le misure di un INS sono riferite a questi sistemi

# COS'E' UN SISTEMA INERZIALE INS?

- E' un insieme di sensori che misurano le forze inerziali generate dal movimento di un oggetto.
- Misure triassiali di:
  - **Accelerazioni;**
  - **Velocità angolari**
- La navigazione è l'applicazione più frequente



# Navigazione inerziale: il principio

La navigazione inerziale è fondata sulle misure di accelerazione e di velocità angolare del body rispetto ad un sistema inerziale.

La posizione è ottenuta essenzialmente integrando le misure di accelerazione da **accelerometri**. Ne servono tanti quanti i GdL del moto: due se è piano, in direzioni ortogonali; altrimenti tre per un moto libero.

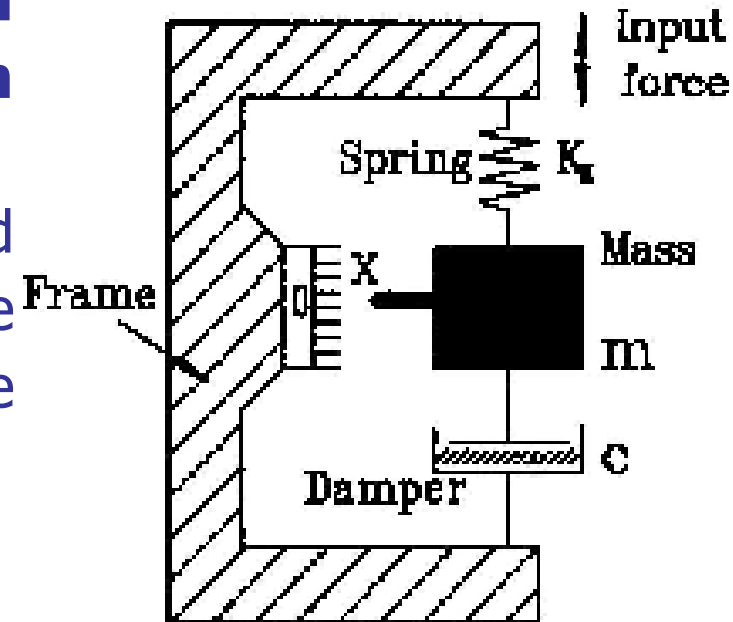
Usare solo gli accelerometri non basta, perché per effetto del moto del body, i loro **assi non restano allineati agli assi del navigation frame**. Inoltre, il navigation frame non è inerziale: agisce la forza centrifuga. I **giroscopi** sono necessari per calcolare la sequenza di trasformazioni

$b \rightarrow n \rightarrow e \rightarrow i$ -frames.

## Cos'è un ACCELEROMETRO?

L'accelerometro è un sensore di misura dell'accelerazione lungo un asse:

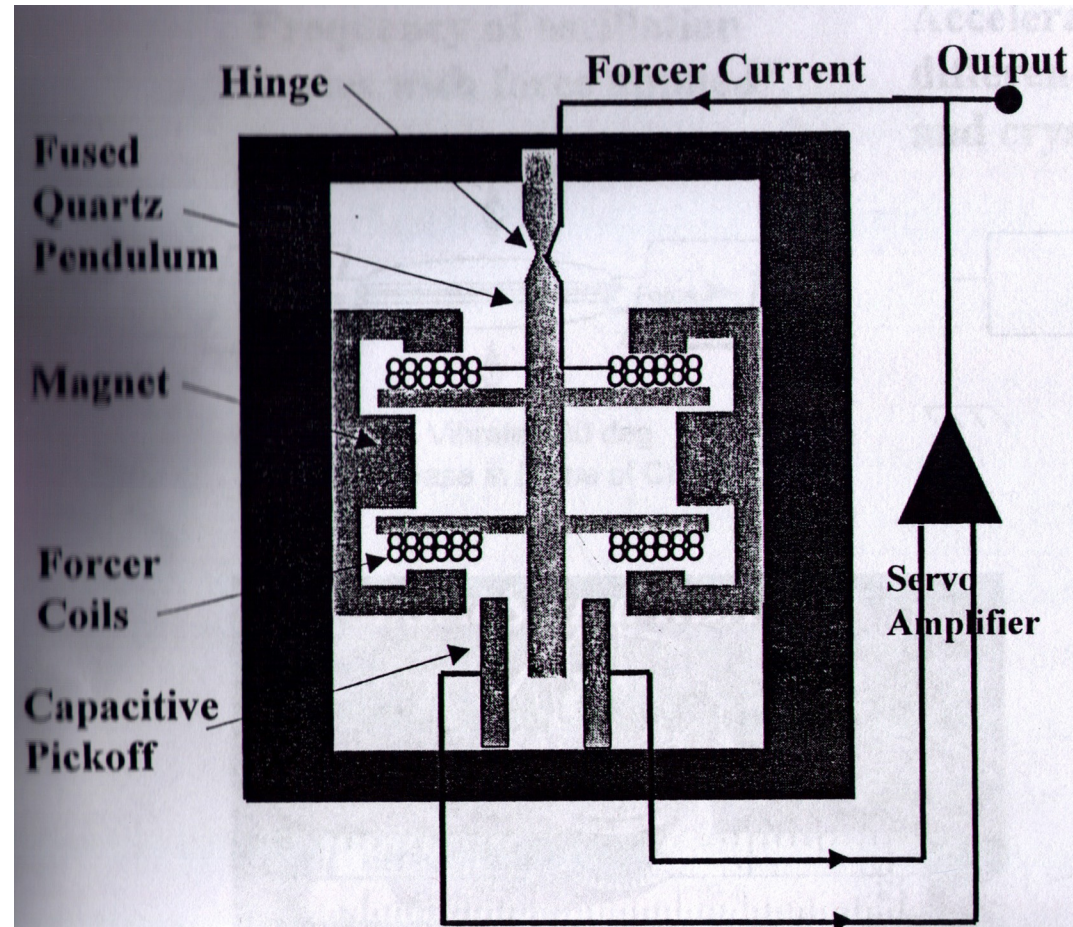
una massa di prova, di solito sospesa ad una molla, sottoposta ad un'accelerazione subisce uno spostamento, che viene trasformato in segnale elettrico.



# PENDULOUS QUARTZ ACCELEROMETER

**Accelerometro capacitivo:** spostamento della massa determinata come variazione della capacità elettrica di un condensatore al variare della distanza tra le armature.

Elemento in quarzo sensibile alle accelerazioni, su cui sono montate bobine che interagiscono con il campo magnetico generato dalla parte fissa (e magnetizzata) del dispositivo

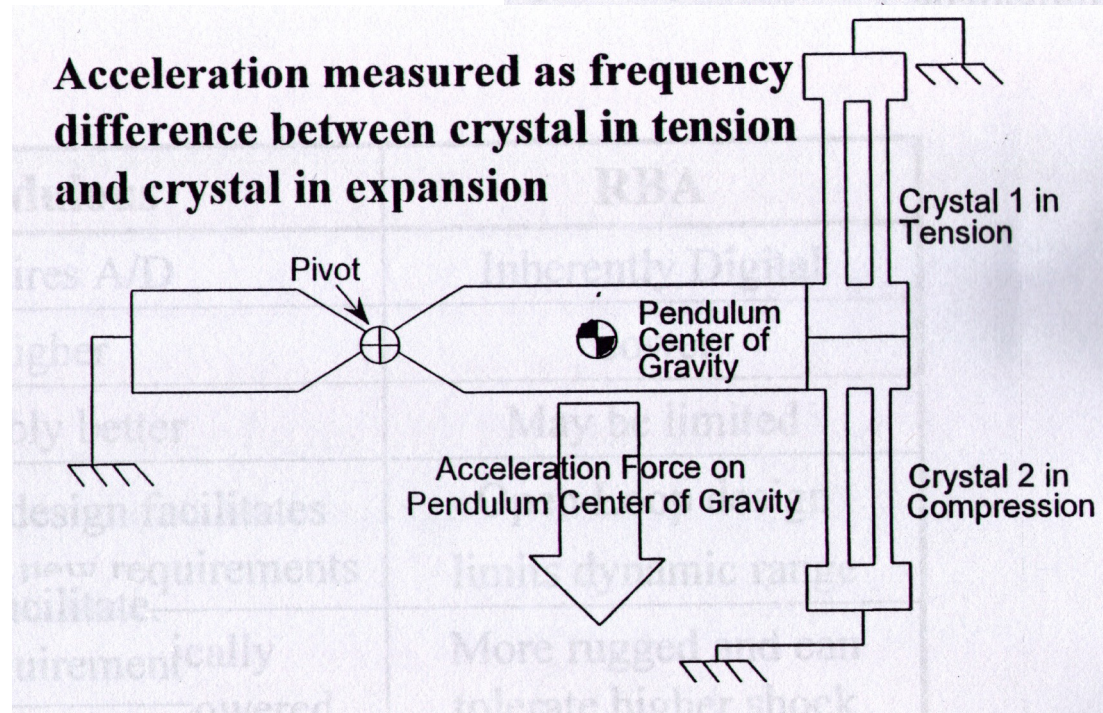
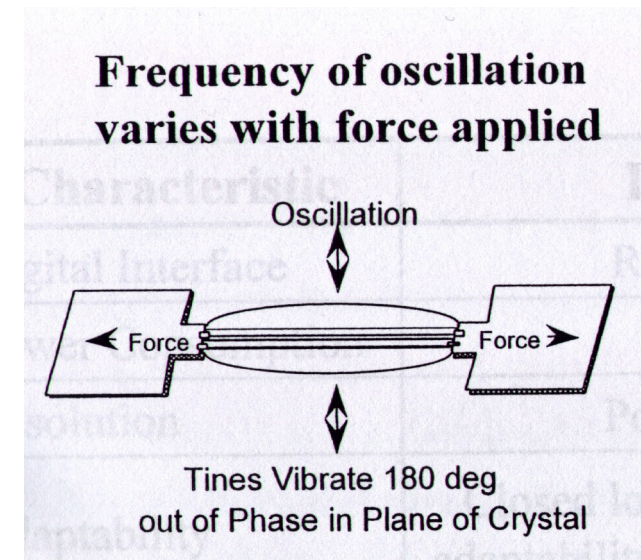




# QUARTZ RESONANT BEAM ACCELEROMETER

Si basa sulla variazione di frequenza di oscillazione di fasce di quarzo al variare della forza applicata

L'accelerazione misurata come differenza di frequenza tra le fasce in tensione e in compressione



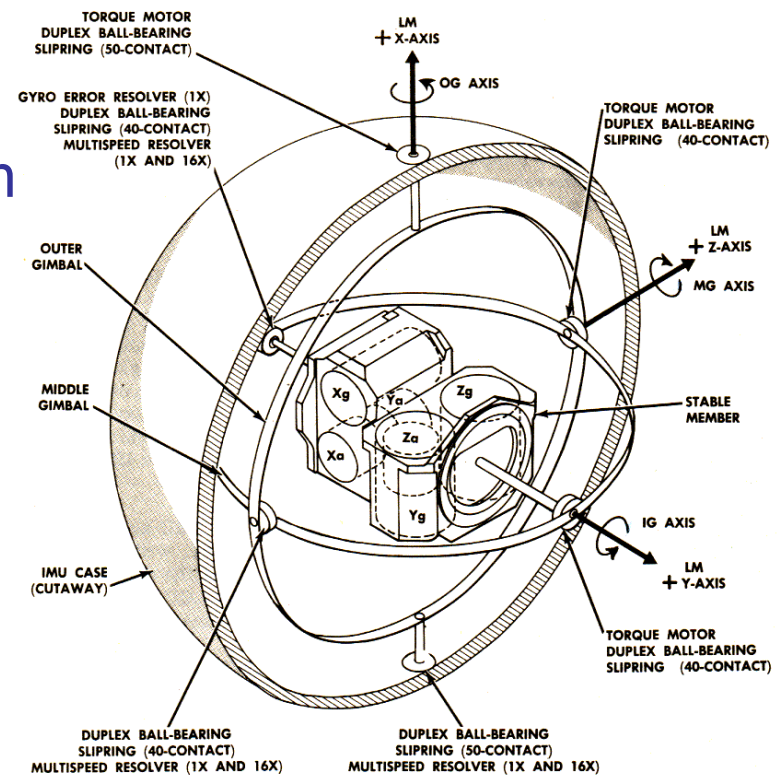
# Cos'è un GIROSCOPIO?

Il giroscopio è un dispositivo fisico rotante che, per effetto della legge di conservazione del momento angolare, tende a **mantenere il suo asse di rotazione orientato in una direzione fissa** permettendo di seguire nel tempo l'orientamento di una terna, nella fattispecie quella *n*-frame.

In commercio sono disponibili giroscopi a più gradi di libertà.

I **giroscopi meccanici** sono installati in piattaforme *gimbaled*:

- Micromotori e un controllo di retroazione mantengono la piattaforma allineata nel local level frame, ovvero lo *n*-frame
- elevate precisioni, costosi
- processamento dati semplice.



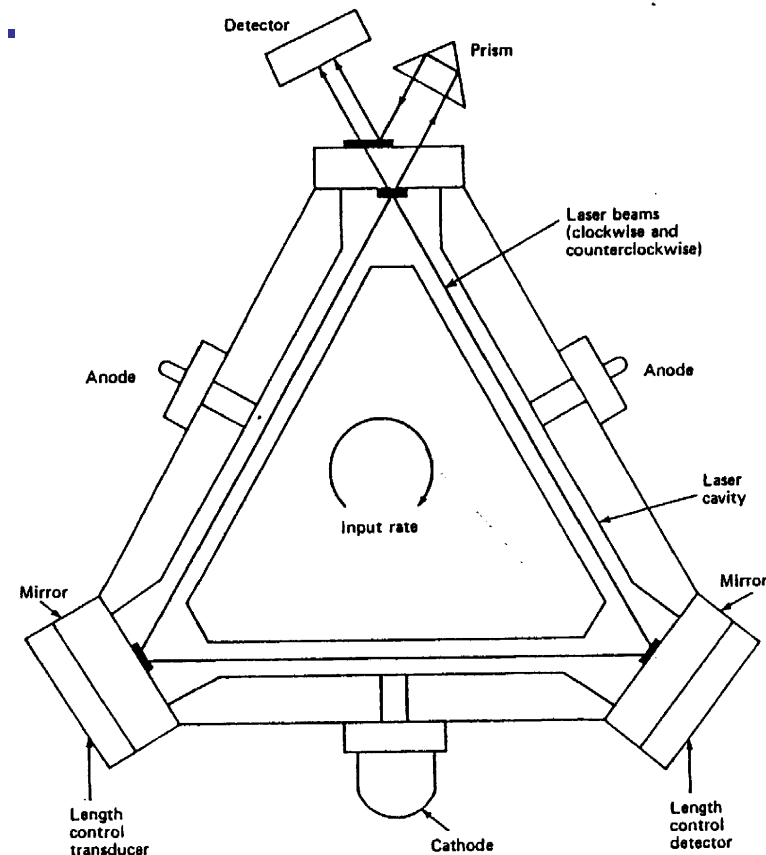
# Cos'è un GIROSCOPIO?

**RING LASER GYROS:** basato sul principio relativistico che la velocità della luce è costante in ogni riferimento inerziale, quindi se il tempo di percorrenza di due fasci di luce calcolato attraverso interferometro è diverso, allora il sistema ha subito una rotazione attorno all'asse perpendicolare al sistema.

Questi giroscopi non seguono meccanicamente il n-frame, ma determinano la precessione apparente **analiticamente**.

Sono meno precisi e meno costosi.

Le piattaforme che li montano sono definite **strapdown**: gli accelerometri sono fissati direttamente al body, per cui misurano nel *b-frame*



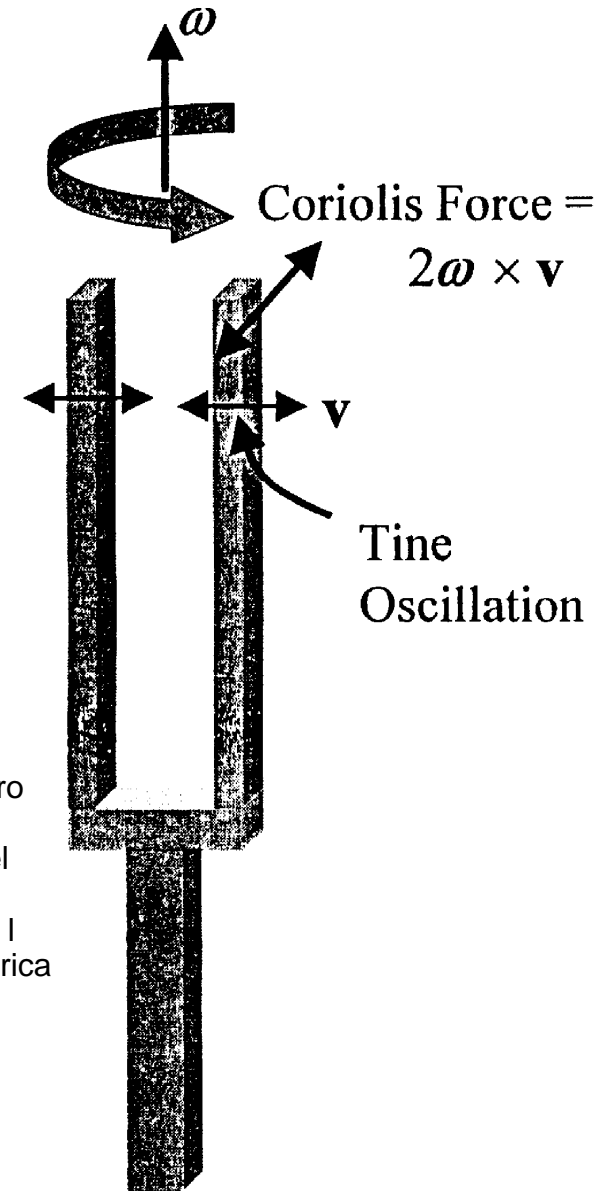
# Cos'è un GIROSCOPIO?

**MEMS** (Micro-Electrical Mechanical Systems):

- poco costosi
- miniaturizzati ( $\ll 1$  mm)
- impiegano come sensori cristalli piezoelettrici molto sensibili
- sfruttano la forza di Coriolis

La forza di Coriolis è una forza apparente, a cui risulta soggetto un corpo quando si osserva il suo moto da un sistema di riferimento che sia in moto rotatorio rispetto a un sistema di riferimento inerziale.

L'effetto piezoelettrico è presente in quasi tutti i materiali cristallini che sono privi di centro di simmetria. La struttura di tali cristalli è costituita da microscopici dipoli elettrici. In condizioni di quiete, questi dipoli elettrici sono disposti in maniera tale che le facce del cristallo abbiano tutte lo stesso potenziale elettrico. Quando viene applicata una forza dall'esterno, comprimendo il cristallo, la struttura del cristallo viene deformata e si perde la condizione di neutralità elettrica del materiale, per cui una faccia del cristallo risulta carica negativamente e la faccia opposta risulta carica positivamente

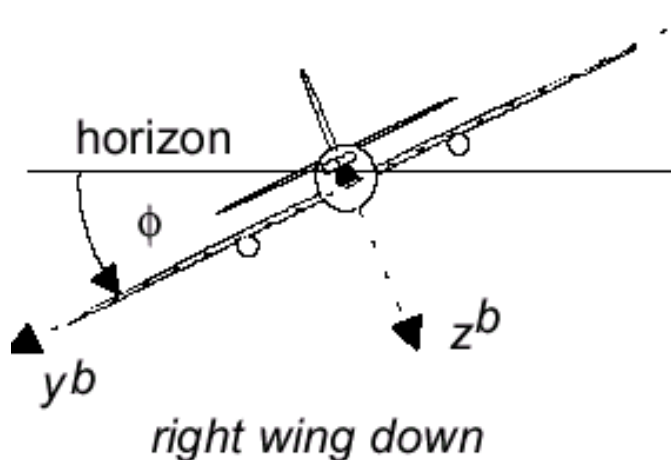


# ANGOLI DI EULERO

Nelle piattaforme strapdown gli accelerometri sono solidali al veicolo, quindi per introdurre le accelerazioni nelle equazioni di navigazione è necessario considerare le rotazioni dalla terna b-frame alla n-frame. Nell'ordine (inverso) sono:

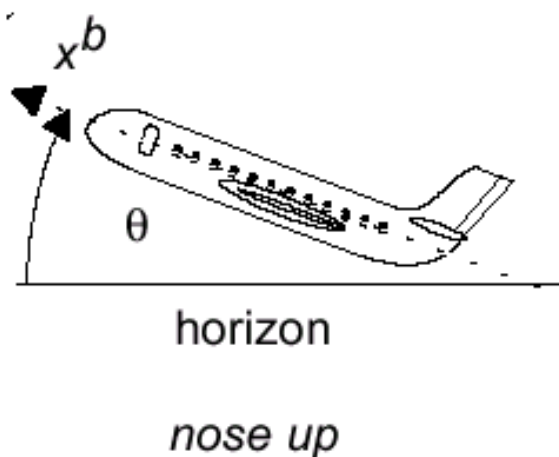
*Angolo di rollio*

roll  $\phi$



*Angolo di beccheggio*

pitch  $\theta$



*Angolo di prua*

heading  $\psi$

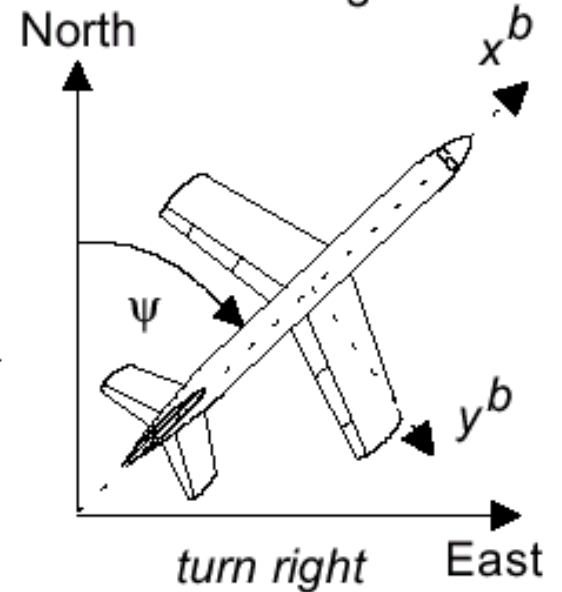
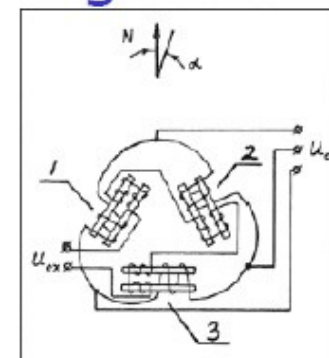


Figure 1: Definition of the body and the navigation coordinate systems and of the Euler angles  $\phi$ ,  $\theta$ ,  $\psi$

## ESEMPIO DI INS: NAV420

- 3 giroscopi MEMS rilevano le 3 velocità angolari
- 3 Accelerometri MEMS rilevano le 3 accelerazioni
- 1 Magnetometro triassiale rileva il campo magnetico terrestre
- 4 sensori di temperatura
- 1 DSP ( Digital Signal Processing)
- 1 Ricevitore ~~GPS~~  
GNSS



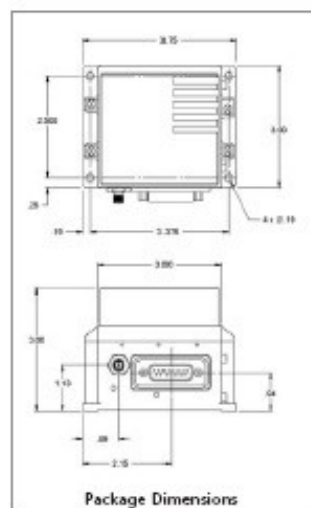
# NAV420

## MEMS-BASED NAVIGATION & AHRS SYSTEM

- ▼ Real-Time X, Y, Z Position with Velocity, Attitude, Heading and Inertial Outputs
- ▼ Built-In GPS Receiver with RTCM and WAAS Compatibility
- ▼ High Stability MEMS Sensors
- ▼ 100 Hz Output Data Rate
- ▼ Enhanced Performance Kalman Filter Algorithm
- ▼ EMI & Vibration Resistant
- ▼ Environmentally Sealed

### Applications

- ▼ Remotely Operated Vehicles
- ▼ Land Vehicle Guidance
- ▼ Avionics Systems
- ▼ Platform Stabilization



## NAV420

The Crossbow NAV420 is a combined Navigation and AHRS system that utilizes both MEMS-based inertial sensors and GPS technology to provide an unmatched value in terms of both price and performance. Developed in response to years of extensive application experience in a wide variety of Airborne, Marine and Land applications, the NAV420 also incorporates many new and enhanced design features including:

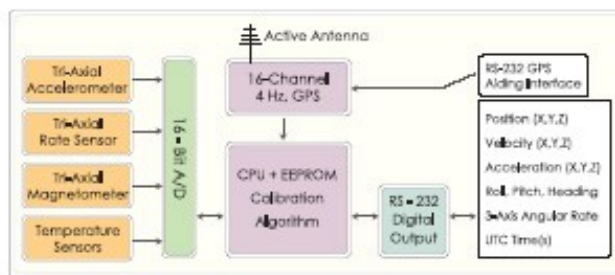
- Built-in GPS/Inertial Sensor integration for position and velocity measurement
- GPS clock data synchronization (1 PPS)
- High performance Kalman Filter algorithms
- Water resistant, vibration resistant, light-weight design
- EMI protection for trouble-free operation
- Continuous Built-in-Test
- Compatible with most of Crossbow's existing Inertial Systems



The NAV420 provides consistent performance over a wide temperature range in challenging EMI environments across a broad range of input power conditions. It finds uses in a number of different applications including remotely piloted vehicles, land vehicle guidance, uncertified avionics and platform stabilization.

This high reliability, strapdown inertial system provides attitude and heading measurement with static and dynamic accuracies that exceed traditional spinning mass vertical and directional gyros. With GPS integration, the NAV420 system also provides position and velocity data at up to 100 Hz. Velocity data includes aiding from the inertial instruments to improve stability and reduce the latency associated with standalone GPS measurements.

Each NAV420 system comes with a GPS antenna and User's Manual. Crossbow's NAV-VIEW software is also included to assist you in system development, evaluation, and data acquisition.



NAV/AHRS Block Diagram

- ▼ Real-Time X, Y, Z Position with Velocity, Attitude, Heading and Inertial Outputs
- ▼ Built-In GPS Receiver with RTCM and WAAS Compatibility
- ▼ High Stability MEMS Sensors
- ▼ 100 Hz Output Data Rate
- ▼ Enhanced Performance Kalman Filter Algorithm
- ▼ EMI & Vibration Resistant
- ▼ Environmentally Sealed

### Applications

- ▼ Remotely Operated Vehicles
- ▼ Land Vehicle Guidance
- ▼ Avionics Systems
- ▼ Platform Stabilization

Specifications	NAV420CA	Remarks
<b>Performance</b>		
Update Rate <sup>1</sup> (Hz)	2-100	Programmable
Start-up Time Valid Data (sec)	< 1	
Fully Stabilized Data (sec)	< 60	Under static conditions
<b>Position/Velocity</b>		
Accuracy <sup>2</sup> (m CEP)	3	Internal GPS, unaugmented
X,Y Velocity Accuracy (m/s rms)	< 0.4	
Z Velocity Accuracy (m/s rms)	< 0.5	
1PPS Accuracy (ns)	± 50	
<b>Attitude</b>		
Range: Roll, Pitch (°)	± 180, ± 90	
Accuracy <sup>3</sup> (° rms)	< ± 0.5	GPS available
(° rms)	< ± 2.0	GPS unavailable
Resolution (°)	< 0.1	
<b>Heading</b>		
Range (°)	± 180	
Accuracy <sup>3</sup> (° rms)	± 3	
Resolution (° rms)	< 0.1	
<b>Angular Rate</b>		
Range: Roll, Pitch, Yaw (°/sec)	± 200	
Bias: Roll, Pitch, Yaw (°/sec)	< ± 0.75	Scaled Sensor mode
Bias: Roll, Pitch, Yaw (°/sec)	< ± 0.05	AHRS mode, NAV mode
Scale Factor Accuracy (%)	< 1	
Non-Linearity (% FS)	< 0.5	
Resolution (°/sec)	< 0.05	



Bandwidth (Hz)	> 25	-3 dB point
Random Walk ( $^{\circ}/\text{hr}^{1/2}$ )	< 4.5	
<b>Acceleration</b>		
Input Range: X/Y/Z (g)	$\pm 10$	
Bias: X/Y/Z (mg)	< $\pm 12$	
Scale Factor Accuracy (%)	< 1	
Non-Linearity (% FS)	< 1	
Resolution (mg rms)	< 1.25	
Bandwidth (Hz)	> 10	-3 dB point
Random Walk (m/s/hr $^{1/2}$ )	< 0.5	
<b>Environment</b>		
Operating Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	-40 to +71	
Non-Operating Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	-55 to +85	
Non-Operating Vibration (g rms)	6	20 Hz - 2 KHz random
Non-Operating Shock (g)	1000	1 ms half sine wave
<b>Electrical</b>		
Input Voltage (VDC)	9 to 30	
Input Current (mA)	< 350	
Power Consumption (W)	< 5	at 12 VDC
Digital Output Format	RS-232	
<b>Physical</b>		
Size	(in)	3 x 3.75 x 3
	(cm)	7.62 x 9.53 x 7.62
Weight	(lbs)	< 1.3
	(kg)	< 0.58
Connector		"D" male
GPS Antenna Connector		SMA Jack

## Inertial navigation systems: error sources

Il comportamento dei giroscopi può essere modellato come una **componente random ad alta frequenza** e da **errori sistematici funzione del tempo** riassunti da un bias per unità di tempo ed un fattore di scala. Gli accelerometri hanno un comportamento più semplice: anche per essi in sintesi si ha un **bias per unità di tempo ed un fattore di scala**.

Nella maggior parte dei casi la componente random ad alta frequenza può esser ridotta efficacemente, grazie all'elevata frequenza di misura.

E' necessaria una **procedura di calibrazione per modellare gli errori sistematici**. Una fonte di dati indipendenti come posizione e velocità da un GPS può essere integrata nella soluzione per controllare le derive.

## **PREGI GPS**

**Alta precisione di posizione  
e velocità nel lungo periodo**

**Precisione indipendente  
dal tempo**

## **PREGI INS**

**Dati d'assetto accurati**

**Alta frequenza delle misure**

**Nessun periodo di interruzione  
della misura**

## **DIFETTI INS**

**Precisione elevata di posizione  
e velocità solo nel brevissimo  
periodo**

**Decremento di precisione nel tempo**

## **DIFETTI GPS**

**Dati d'assetto rumorosi**

**Bassa frequenza delle misure**

**Periodi di interruzione del  
segnale**



**INTEGRAZIONE INS/DGPS**