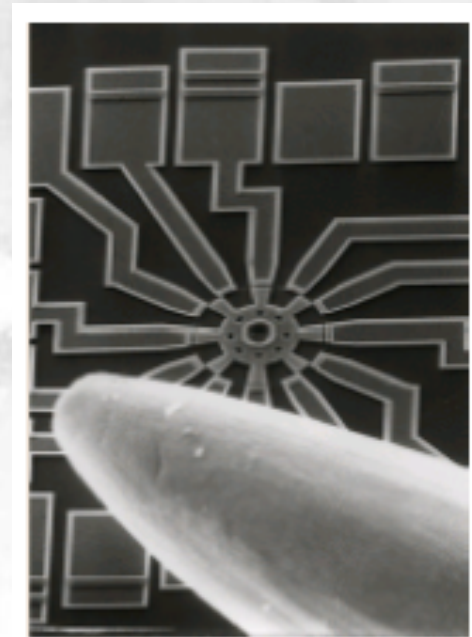


Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)



- I sistemi microelettromeccanici, indicati come **MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)**, sono stati studiati e sviluppati nelle ultime decadi.
- Oltre i sensori e gli attuatori micrometrici tradizionali, il campo copre i componenti ed i **sistemi integrati micromeccanici o micro-assemblati con l'elettronica sullo stesso substrato** o nello stesso package, ottenendo sistemi funzionali ad elevate prestazioni.
- Questi dispositivi e sistemi stanno giocando un ruolo di primo piano in molte importanti aree quali trasporto, comunicazioni, fabbricazione automatizzata per la produzione, monitoraggio ambientale, salute, sistemi di difesa ed un'ampia gamma di prodotti di consumo.
- I MEMS sono dispositivi piccoli e, quindi, presentano interessanti caratteristiche quali dimensioni totali, peso e dissipazione di potenza ridotti, così come maggiore velocità e precisione in confronto ai corrispondenti dispositivi macroscopici.
- di contro hanno prestazioni scadenti e quindi necessitano di accorgimenti algoritmici per trattarne le misure.

Generalità Sensori di Misura

Un Sensore di Misura (SM) ha diverse caratteristiche tra cui si ricorda:

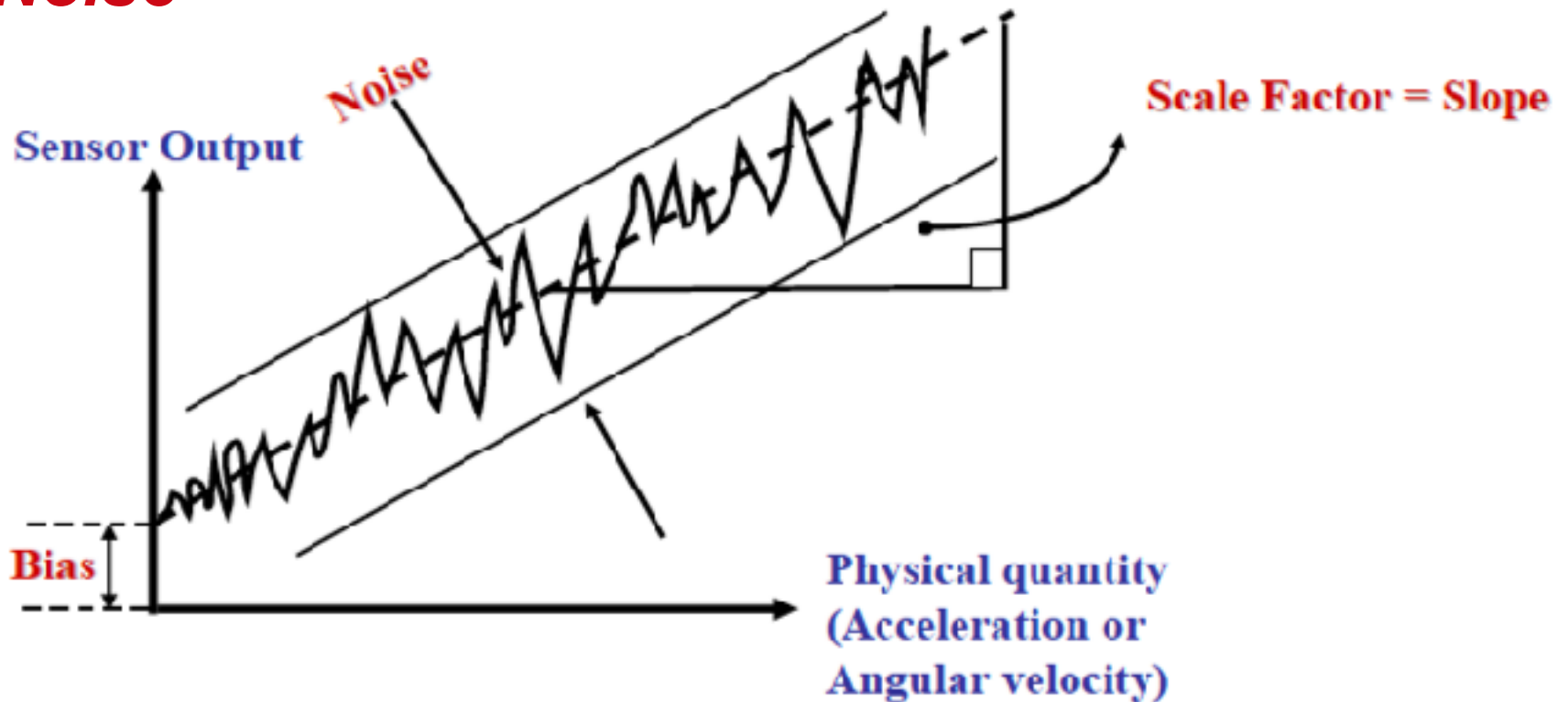
- **Ripetibilità** (*Repeatability*) - **più sessioni di misura**: capacità di un sensore di fornire la stessa uscita ad ripetute applicazione di uno stesso ingresso (con condizioni al contorno identiche).
- **Stabilità** (*Stability*) - **stessa sessione di misura**: capacità di un sensore di fornire la stessa uscita mentre misura una grandezza costante in un periodo di tempo.
- **Deriva** (*Drift*): cambiamento di una grandezza con il tempo. *Zero-Drift* si intende il cambiamento che avviene ad ingresso nullo



Performance IMU

Le prestazioni di un IMU (accelerometro o giroscopio) sono definiti in termini di:

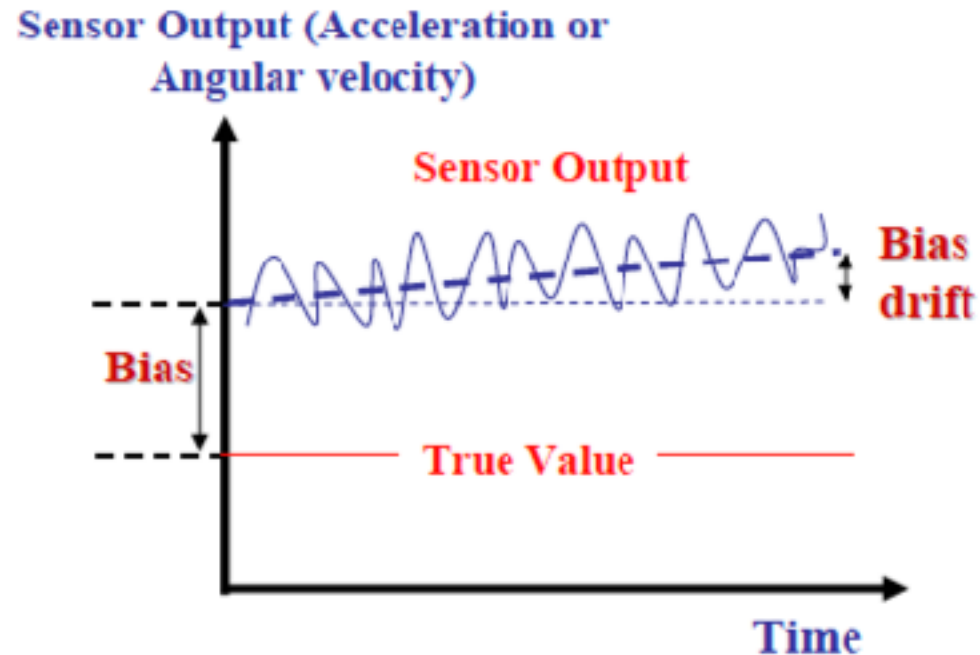
1. **Bias**
2. **Scale Factor**
3. **Noise**



Performance IMU - Bias

Un *Bias* consiste in due parti

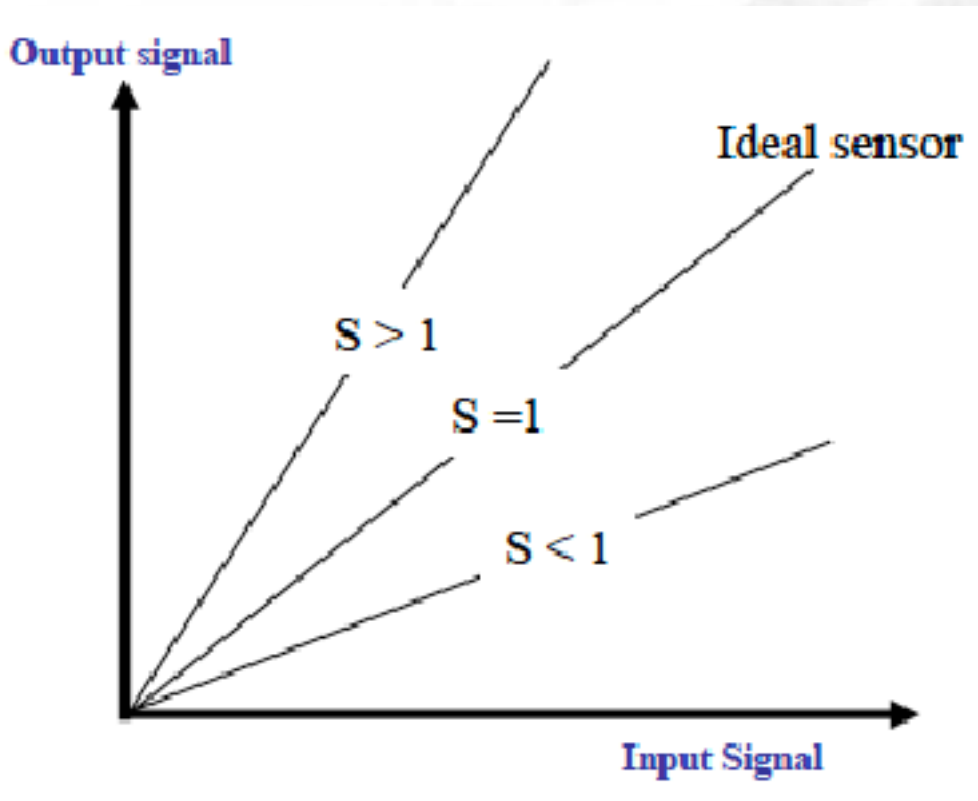
1. **Bias offset** contributo deterministico che rappresenta l'errore sistematico delle misure fornite dall'IMU
2. **Bias Drift** contributo aleatorio (stocastico) che rappresenta la velocità alla quale un sensore IMU accumula errori



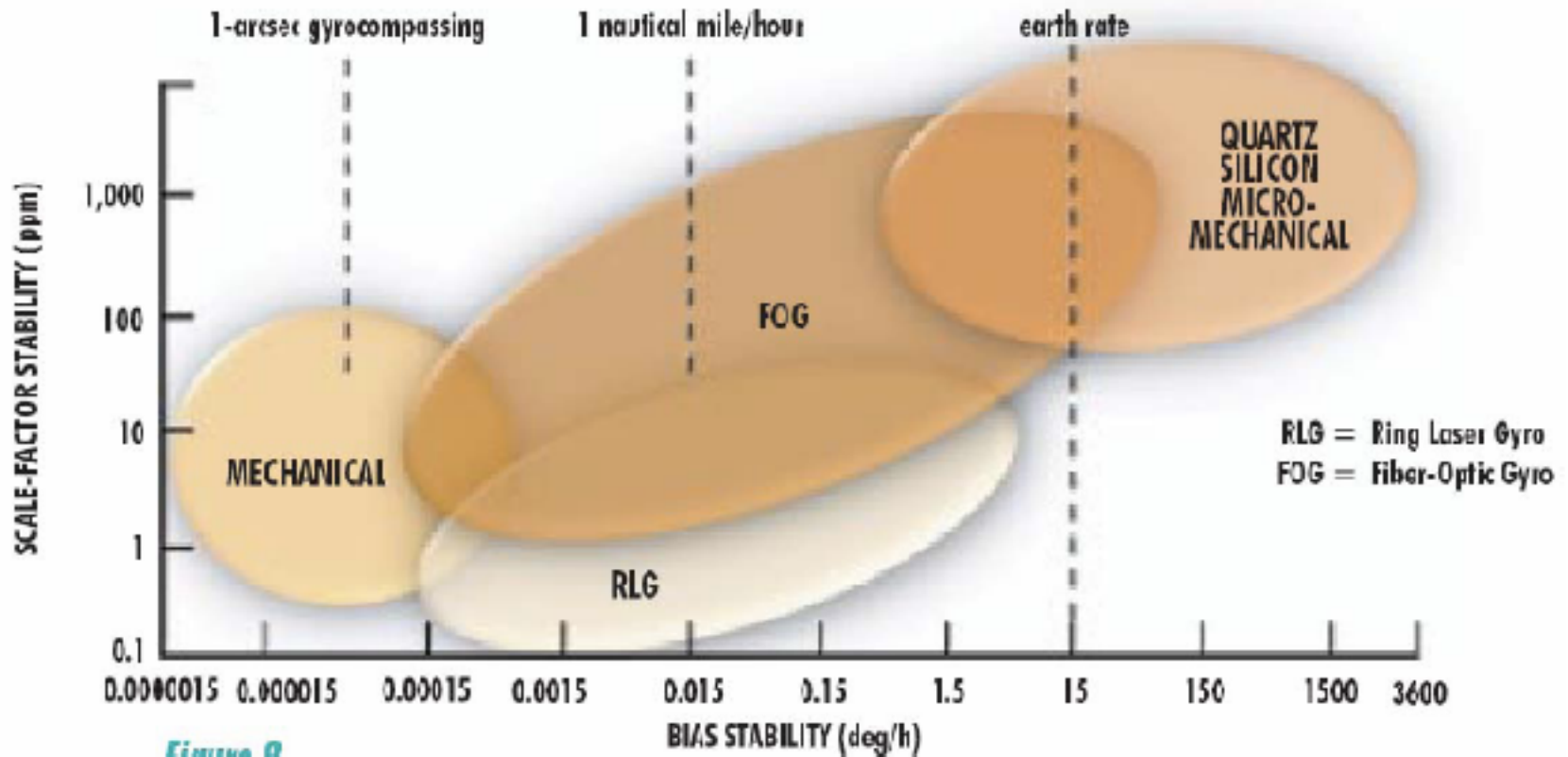
- Il **Bias offset** è deterministico e corretto in fase di calibrazione
- Il **Bias drift** è aleatorio e pertanto modellato come processo stocastico

Performance IMU - Bias

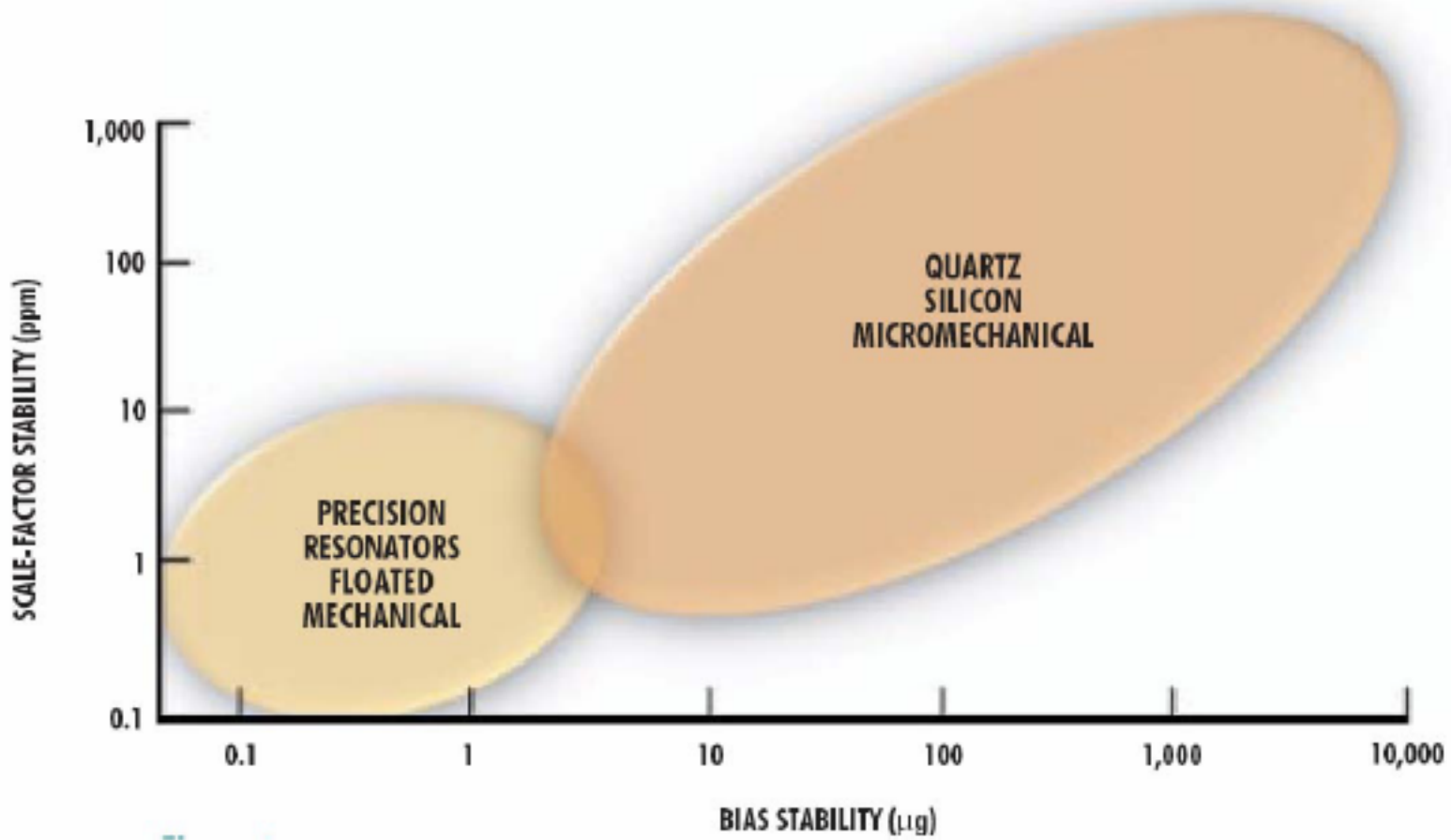
- Il Fattore di Scala (**Scale Factor**): rapporto tra il segnale di uscita di un sensore e la grandezza fisica in ingresso ed è espresso in parti per milioni (*ppm*)



Accelerometri



Giroscopi



Equazione di misura di un sensore inerziale MEMS

Tutti i sensori sono affetti da errori che ne degradano l'accuratezza, suddivisi in:

- **errori deterministici** e possono essere determinati attraverso specifiche procedure in laboratorio
- rimanenti **errori non sono deterministici ma vanno modellati stocasticamente.**



✦ Per un sensore MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) che stima una grandezza f le fonti di errore sono:

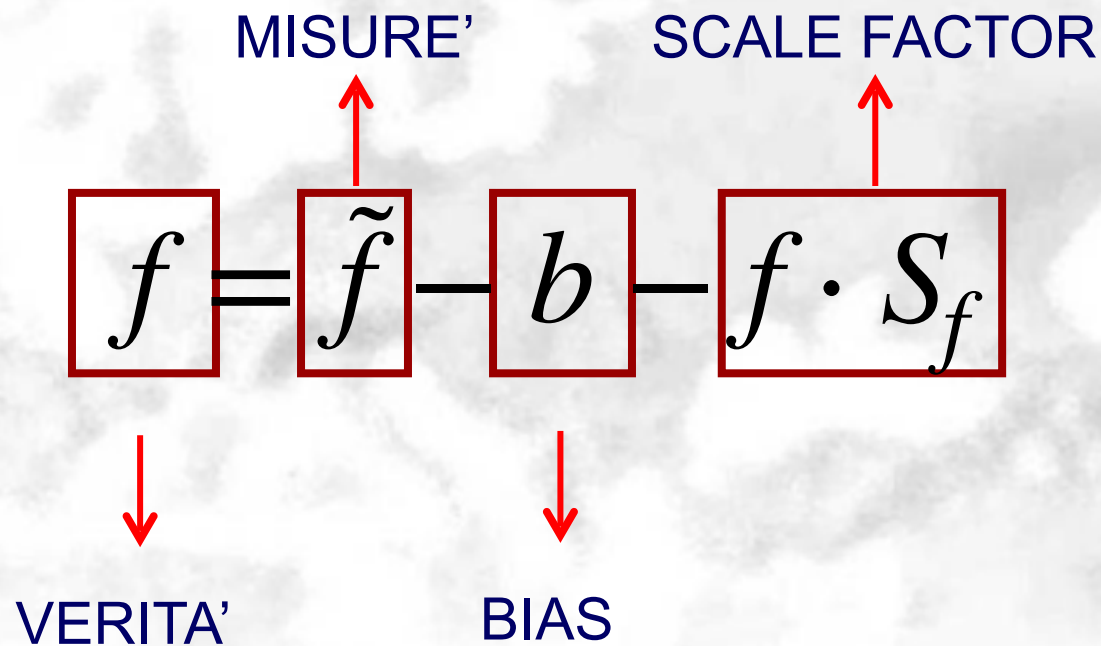
1. Bias (*turn on bias e bias drift*) b
2. Fattori di scala S
3. Rumore del sensore η
4. Errori relativi alla disposizione non corretta del sensore nel nostro m

$$\tilde{f} = f + b + f \cdot S + f \cdot m + \eta \quad \tilde{f} \text{ indica la misura}$$

- **L'errore di montaggio** (non ortogonalità degli assi di una terna di riferimento cartesiana) è causato da imperfezioni nel montaggio della terna di misura dei sensori, per cui ogni asse sensibile misura forze che agiscono lungo i due assi ad esso ortogonali
- Tale errore ha natura deterministica e può essere calibrato in laboratorio
- gli errori di non-ortogonalità sono, di solito, inclusi nelle equazioni di misura dei sensori MEMS e modellati stocasticamente ma possono essere trascurati per sensori calibrati

$$\tilde{f} = f + b + f \cdot S + \boxed{f \cdot m} + \eta \quad \tilde{f} \text{ indica la misura}$$

Performance di un sensore sono in generale funzione di due parametri importanti e cioè il **BIAS** e lo **SCALE FACTOR**



→ In prima approssimazione trascuriamo queste ultime due fonti di errore (li abbiamo calibrati), ottenendo:

$$\tilde{f} = f + b + \eta$$

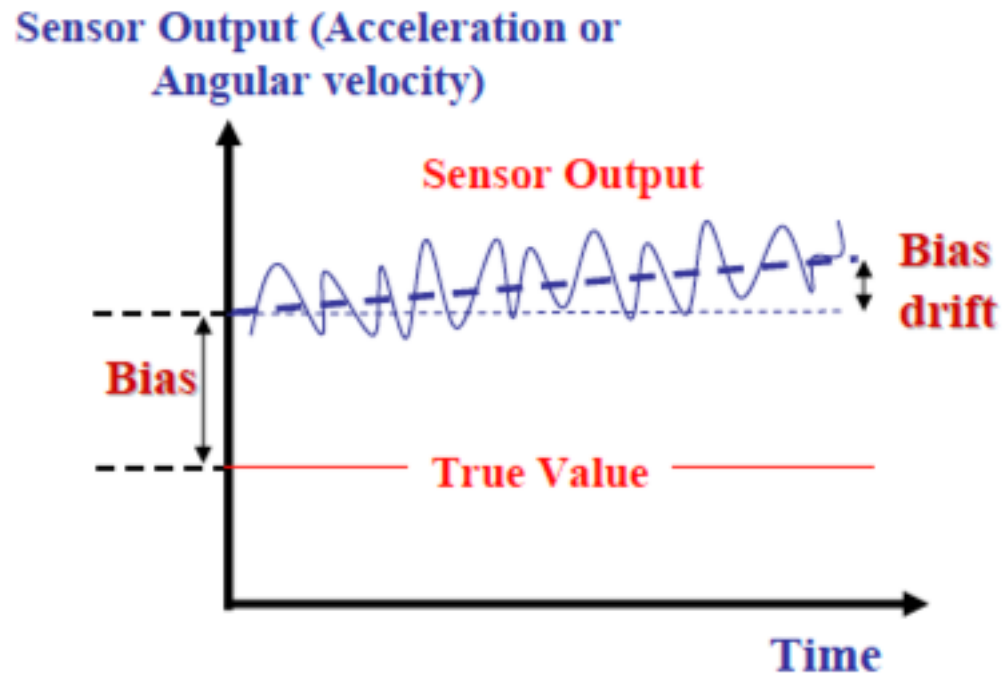


$$\delta f = \tilde{f} - f = b + \eta$$

Errore = Bias + Rumore

- Il **bias** di un sensore è definito come **la media dei suoi output** quando **l'input è nullo**, durante uno specifico periodo con fissate condizioni operative.
- Il bias di solito è costituito da due parti: una parte deterministica detta "**bias offset**" o "**turn-on bias**" ed una componente stocastica detta "**bias drift**" o "**in-run bias**".

$$b = b_0 + b_d$$



- Il **turn-on bias** è essenzialmente l'**offset della misura** ed è costante durante una singola sessione;
- ha natura deterministica e può dunque essere determinata attraverso una procedura di calibrazione.
- Il turn-on bias è di solito trascurabile in IMU ad alte prestazioni, mentre in sensori a basso costo (MEMS) può essere piuttosto grande e **può essere stimato in un opportuno filtro di Kalman**

$$b = \boxed{b_0} + b_d$$

✈ Il **bias drift** è la velocità a cui si accumulano gli errori nei sensori, ha natura random e deve quindi essere modellato come un opportuno **processo stocastico** (Gauss-Markov del primo ordine)

$$b = b_0 + \boxed{b_d}$$

$$\dot{b}_d = -\beta b_d + w_{dGM} \quad \text{Processo GM-primo ordine}$$

β Reciproco del tempo di correlazione

w_{dGM} Rumore (bianco) del processo GM