



# Politecnico di Torino

## Porto Institutional Repository

[Book] I sensori inerziali di basso costo per la navigazione geodetica

*Original Citation:*

De Agostino M. (2010). *I sensori inerziali di basso costo per la navigazione geodetica*. Scuola di Dottorato - Politecnico di Torino, Torino.

*Availability:*

This version is available at : <http://porto.polito.it/2495532/> since: February 2012

*Publisher:*

Scuola di Dottorato - Politecnico di Torino

*Terms of use:*

This article is made available under terms and conditions applicable to Open Access Policy Article ("Public - All rights reserved") , as described at [http://porto.polito.it/terms\\_and\\_conditions.html](http://porto.polito.it/terms_and_conditions.html)

Porto, the institutional repository of the Politecnico di Torino, is provided by the University Library and the IT-Services. The aim is to enable open access to all the world. Please [share with us](#) how this access benefits you. Your story matters.

(Article begins on next page)



# I Sensori Inerziali di Basso Costo per la Navigazione Geodetica

Candidato:

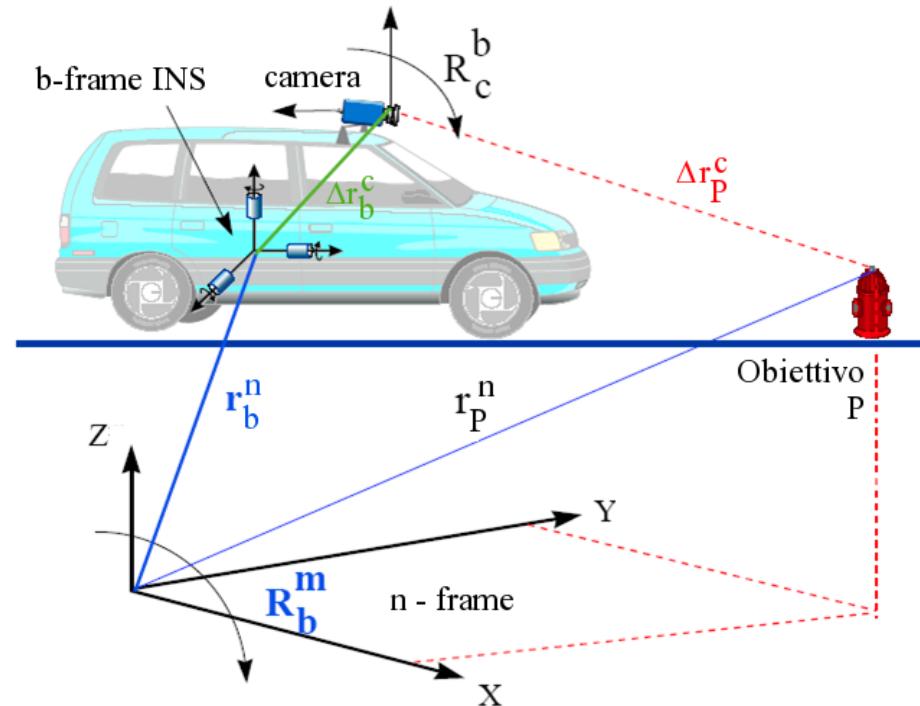
Ing. Mattia De Agostino

Relatore:

Prof. Ambrogio Maria Manzino

Coordinatore del Dottorato:

Prof.ssa Attilia Peano



# Indice della presentazione



*Navigare necesse est*  
*Plutarco, Vita di Pompeo*

- Parte I – Principi di Navigazione Inerziale
- Parte II – Le Incertezze di Misura
- Parte III – Algoritmi di Navigazione
- Parte IV – Applicazioni
- Conclusioni

# Parte I

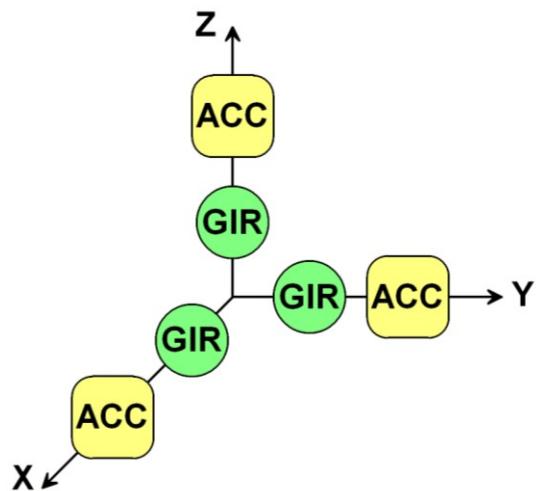
## Principi di Navigazione Inerziale

- Navigazione Inerziale
- Applicazioni Militari e Civili
- Schema di Funzionamento
- Classificazione dei Sensori Inerziali
- Tecnologie di Costruzione
- Sensori di Basso Costo

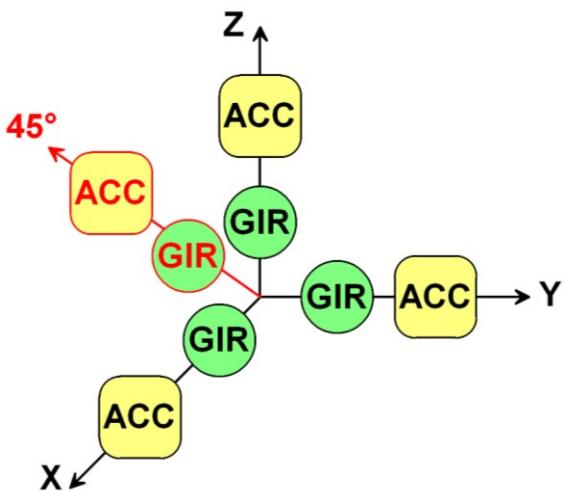


# Navigazione Inerziale

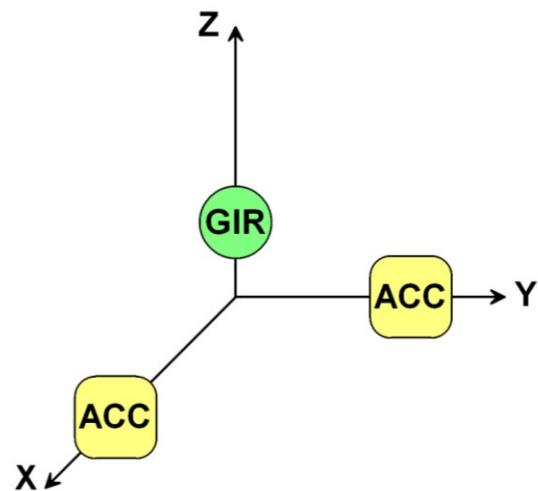
La navigazione INS (*Inertial Navigation System*) è basata sulla determinazione della variazione di posizione, velocità ed assetto (detti stati della navigazione) rispetto all'epoca precedente, a partire dalle accelerazioni e dalle velocità angolari misurate da una piattaforma IMU (*Inertial Measurement Unit*).



Configurazione tradizionale



Configurazione redundant skewed



Configurazione reduced

# Applicazioni Militari e Civili

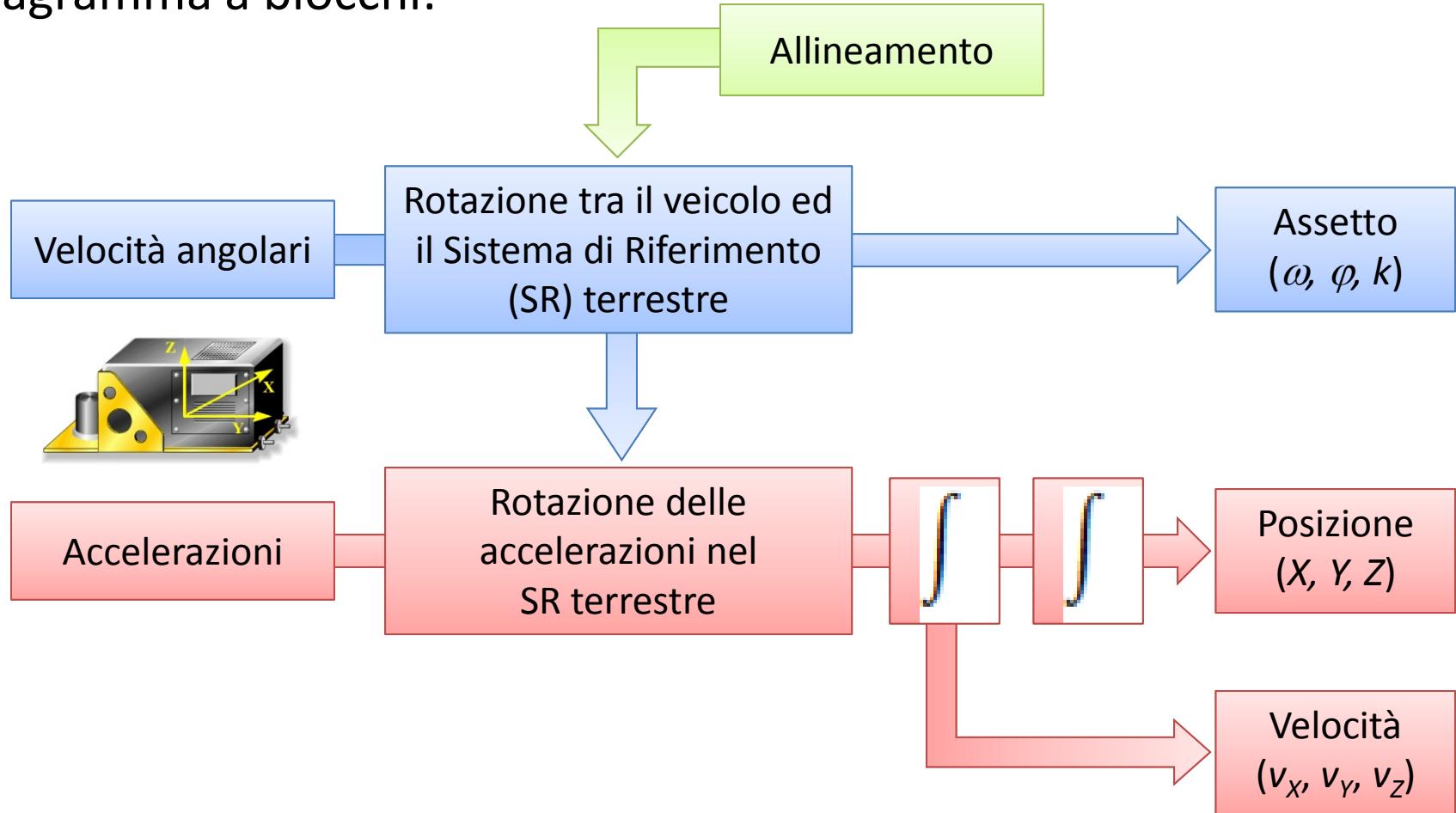


Controllo di mezzi  
(in tempo reale)

Navigazione Geodetica  
(in post-processamento)

# Schema di Funzionamento

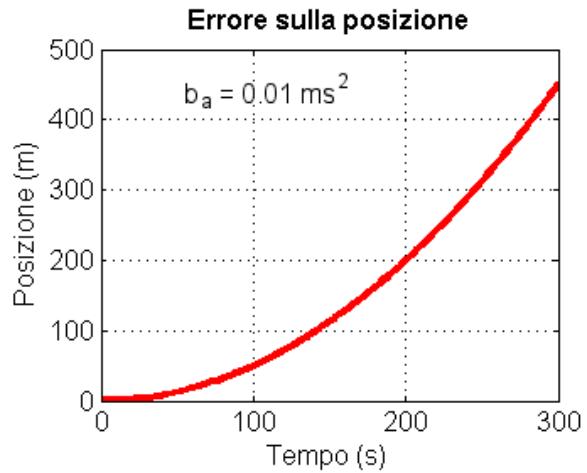
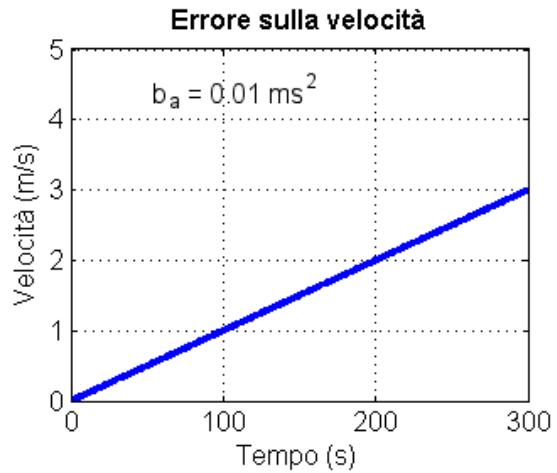
Il calcolo degli stati della navigazione avviene attraverso il seguente diagramma a blocchi:



# Errori nel Posizionamento

Le misure di accelerazioni e di velocità angolari presentano degli **errori**, che si ripercuotono sul posizionamento finale. Ad esempio, è semplice dimostrare che:

*Un errore nelle accelerazioni provoca un errore **proporzionale al tempo nella velocità** e **proporzionale al quadrato del tempo nella posizione**.*



- Un errore di **0.01 m/s<sup>2</sup>** comporta un errore nella posizione di:
- **1 metri** dopo **10 secondi**
  - **36 metri** dopo **1 minuto**
  - **900 metri** dopo **5 minuti**

# Classificazione dei Sensori Inerziali

Diverse categorie di sensori inerziali:



**Marine-grade**  
applicazioni navali,  
sottomarini, veicoli  
spaziali



**Aviation-grade**  
velivoli militari  
e civili



**Tactical-grade**  
veicoli/velivoli senza  
pilota, sistemi di  
rilevo mobile

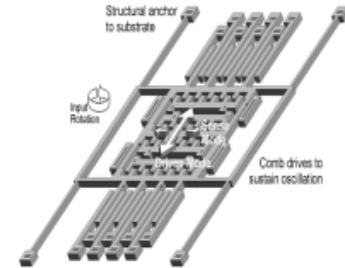
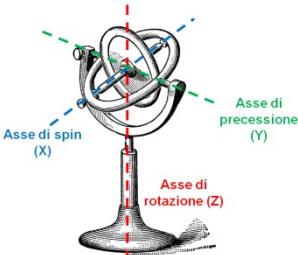
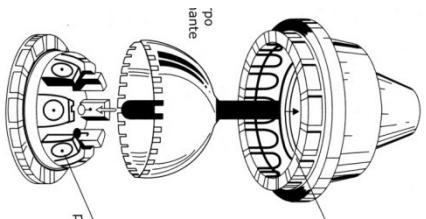
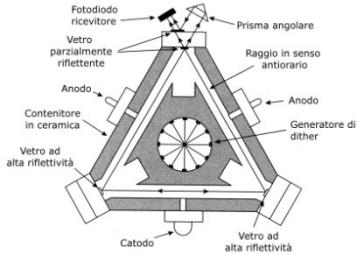


**Automotive-grade**  
sistemi ABS,  
sospensioni attive,  
airbag



# Tecnologie di Costruzione

Le precisioni dei sensori inerziali dipendono molto dalle tecnologie di costruzione. Ad esempio, nel caso dei giroscopi:



**Giroscopi ottici  
a vibrazione**

< 0.0001°/h (RLG)  
0.001 - 1°/h (FOG)

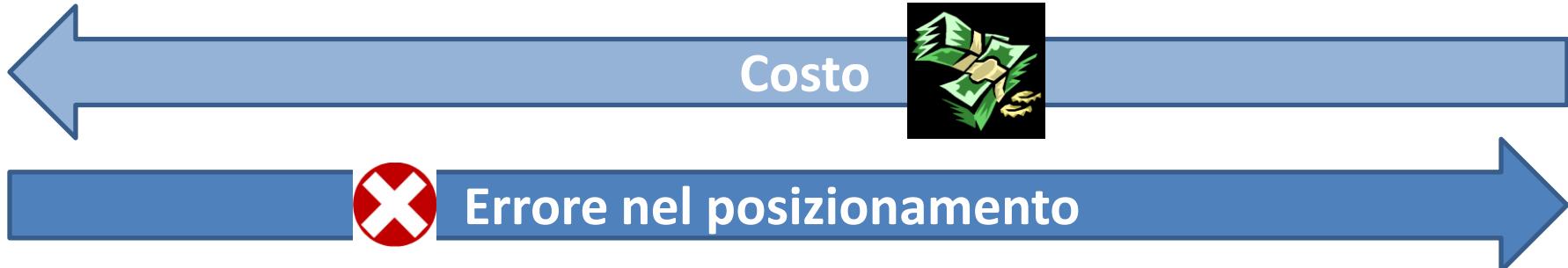
0.01°/h (HRG)  
1°/h (QRS)

**Giroscopi meccanici  
a massa rotante**

1-10°/h (RIG)  
1-50°/h (DTG)

**Giroscopi MEMS  
(a vibrazione)**

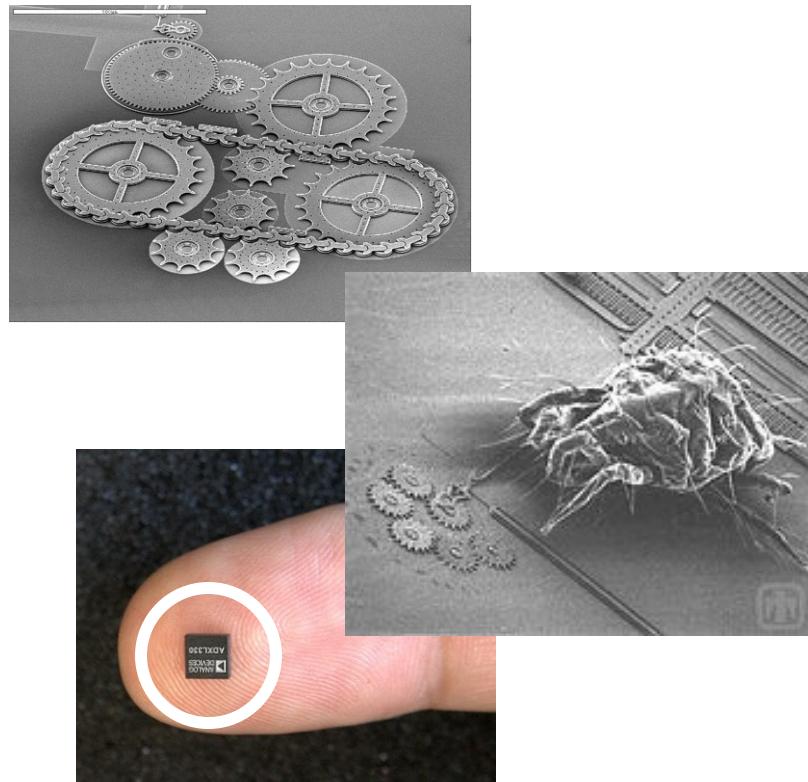
60-3600°/h



# I Sensori di Basso Costo

L'impiego di sensori inerziali per applicazioni civili ha dato la spinta per lo sviluppo di **sensori di basso costo** di tipo **MEMS** (*Micro-Electro-Mechanical System*).

Questa tecnologia consente di integrare in un unico componente **elementi meccanici** insieme con i **circuiti elettronici** per il controllo e l'elaborazione del segnale, **riducendo i costi e le dimensioni dei sensori.**

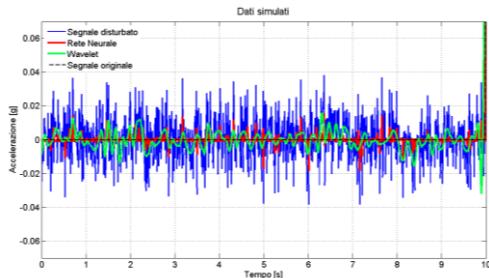


# I Sensori di Basso Costo

La riduzione nelle dimensioni comporta un aumento delle componenti di errore sistematico ed accidentale, e rende questi sensori molti sensibili alle variazioni termiche.

Tali errori possono essere ridotti attraverso:

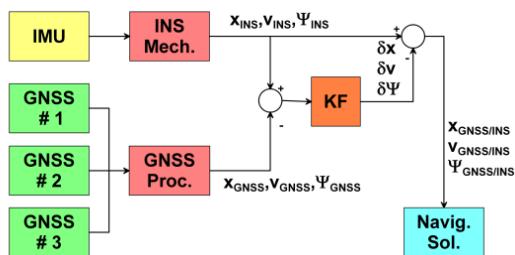
- **Algoritmi di Filtraggio**



- **Calibrazione dei sensori** in laboratorio



- **Algoritmi di integrazione**



## Parte II

# Le Incertezze di Misura

- Tipologie di Errore
- Modello di Errore
- Errori Accidentali
- Errori Sistematici
- Ripetibilità degli Errori



Disegno di **Gea Ferraris**



# Tipologie di Errore

Trattandosi di sensori di natura elettro-meccanica, le misure provenienti dalle piattaforme inerziali sono affette da:

- **Errori accidentali**: non prevedibili a priori, di segno alterno. L'origine di tali errori può essere interna (**rumore**) od esterna (**disturbo**) al sistema di misura.
- **Errori sistematici**: legati ad errori di modello, hanno la caratteristica di conservare valore e segno. Ad esempio, la presenza di un **bias** o di un **fattore di scala** all'interno delle misure, oppure effetti legati alla **non ortogonalità** della terna di accelerometri e di giroscopi.

# Modello di errore



Il segnale di output di accelerometri e giroscopi può essere **modellato** come:

$$\ddot{x}_{a,z} = b_{a,z} + s_{a,z} \cdot \ddot{x}_z + m_{a,zx} \cdot \ddot{x}_x + m_{a,zy} \cdot \ddot{x}_y + c_T \cdot (T - T_0) + v_{a,z}$$

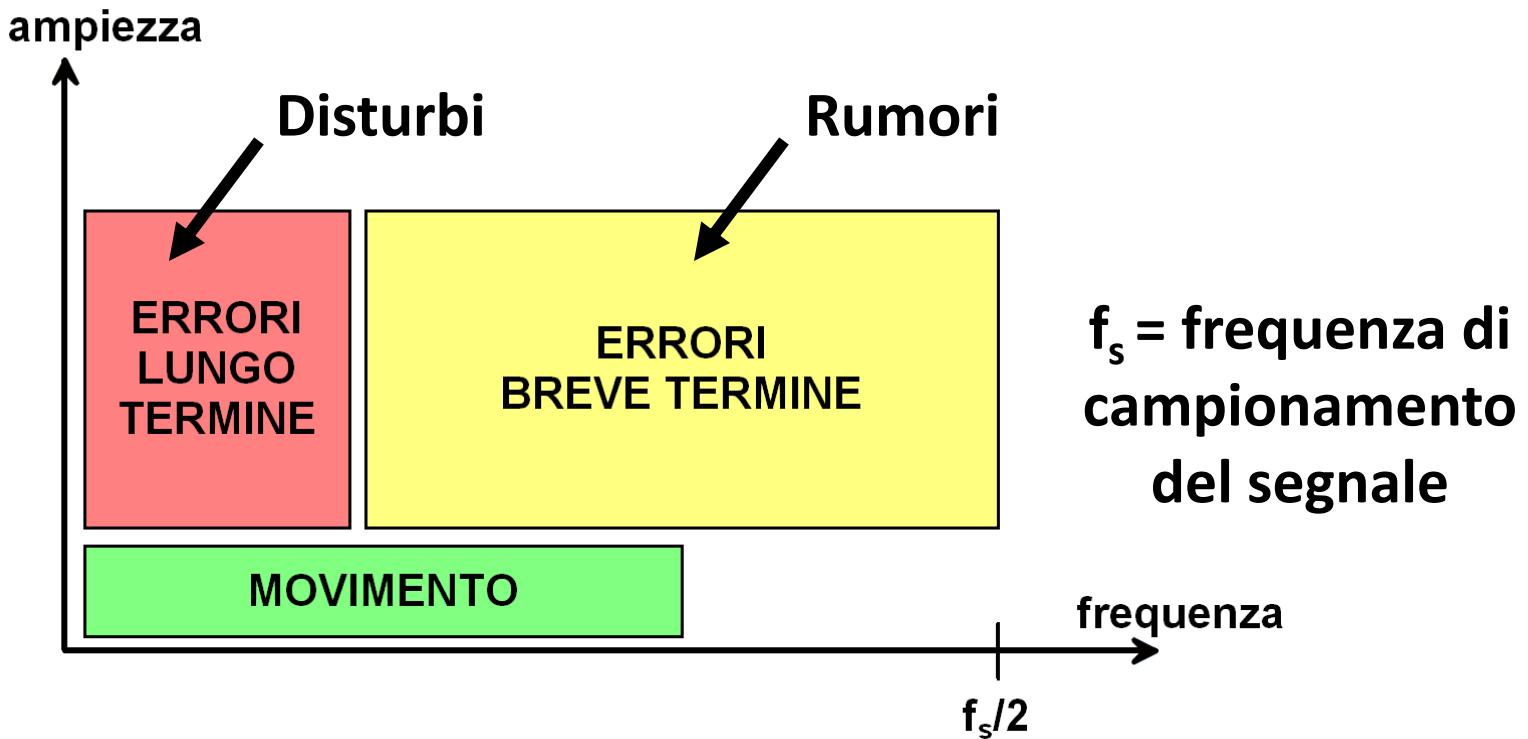
$$\dot{\omega}_{g,z} = \color{red}{b_{g,z}} + \color{orange}{s_{g,z}} \cdot \dot{\omega}_z + \color{red}{m_{g,zx}} \cdot \dot{\omega}_x + \color{red}{m_{g,zy}} \cdot \dot{\omega}_y + \color{blue}{c_T} (T - T_0) + \color{green}{v_{g,z}}$$

## Output sensore =

**Forze /  
Velocità angolari** + **Bias** + **Fattore di  
scala** + **Non ortogonalità degli  
assi**  
+ **Correzione  
termica** + **Componente  
accidentale**

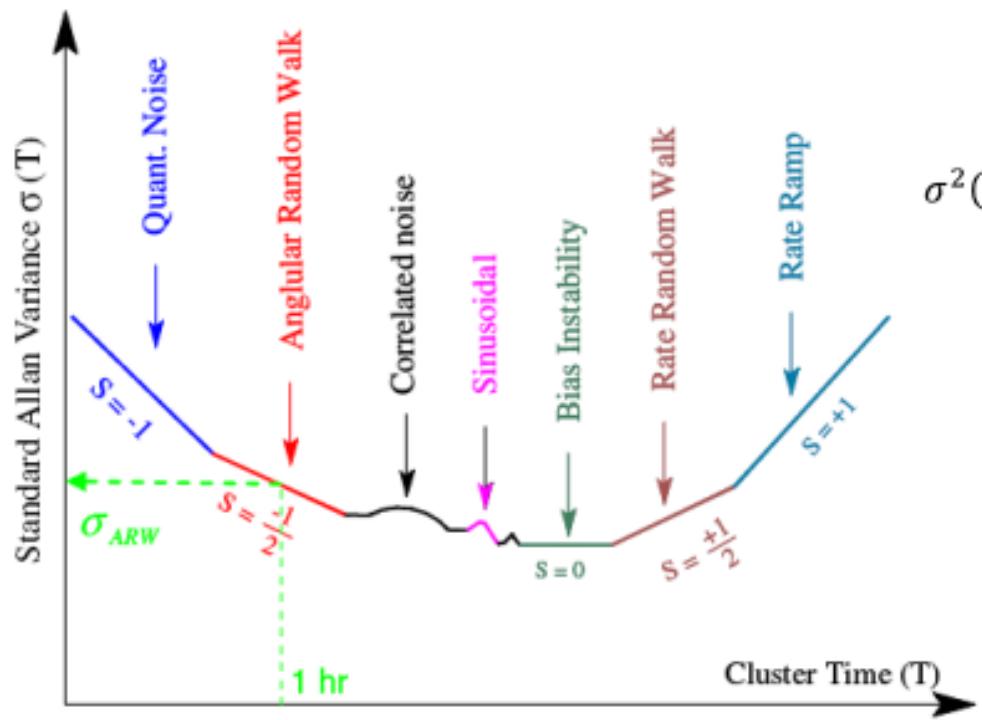
# Errori Accidentali

Sebbene inclusi generalmente all'interno del termine di **componente accidentale di misura**, rumori e disturbi possono essere distinti attraverso le loro **caratteristiche spettrali**.



# Errori Accidentali

La **caratterizzazione degli errori accidentali** caratteristici del sensore avviene mediante l'analisi dell'andamento della **varianza di Allan** del segnale acquisito.

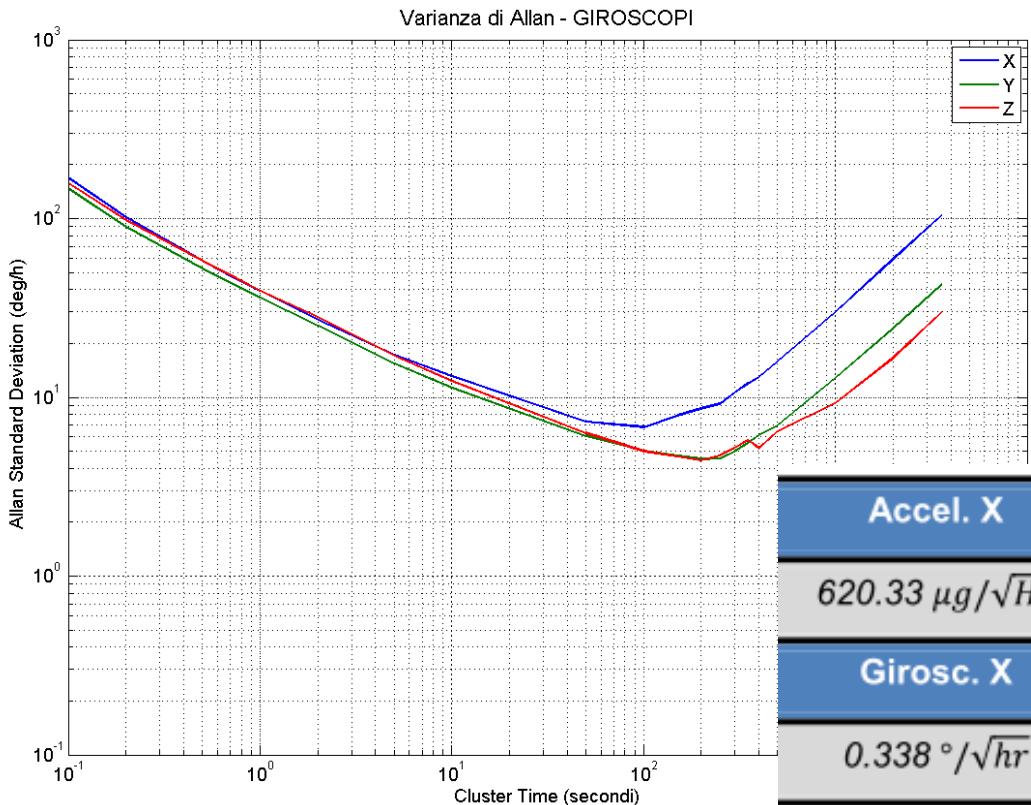


(fonte: El-Diasty et al., 2007)

$$\sigma^2(T) = \frac{1}{2T^2(N-2n)} \sum_{k=1}^{N-2n} (x_{k+2n} - 2x_{k+n} + x_k)^2$$

# Errori Accidentali

Esperimenti di misura di lunga durata (24 h di dati *full rate*) su diversi sensori inerziali in un ambiente indisturbato.



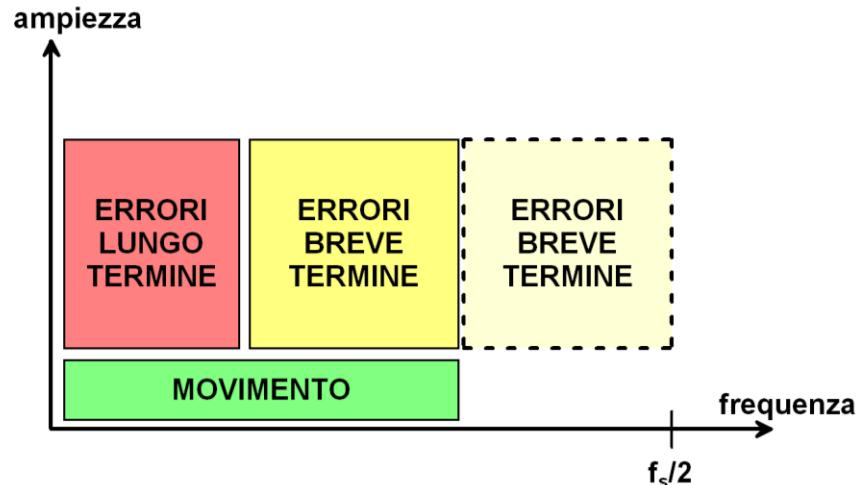
Accel. X	Accel. Y	Accel. Z
$620.33 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	$542.16 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	$667.66 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$
Girosc. X	Girosc. Y	Girosc. Z
$0.338^\circ/\sqrt{\text{hr}}$	$0.306^\circ/\sqrt{\text{hr}}$	$0.347^\circ/\sqrt{\text{hr}}$

Valori ricavati per il sensore Crossbow IMU 400-CC

# Errori Accidentali

La riduzione della componente accidentale di rumore può avvenire attraverso procedure di **filtraggio** del segnale, come ad esempio:

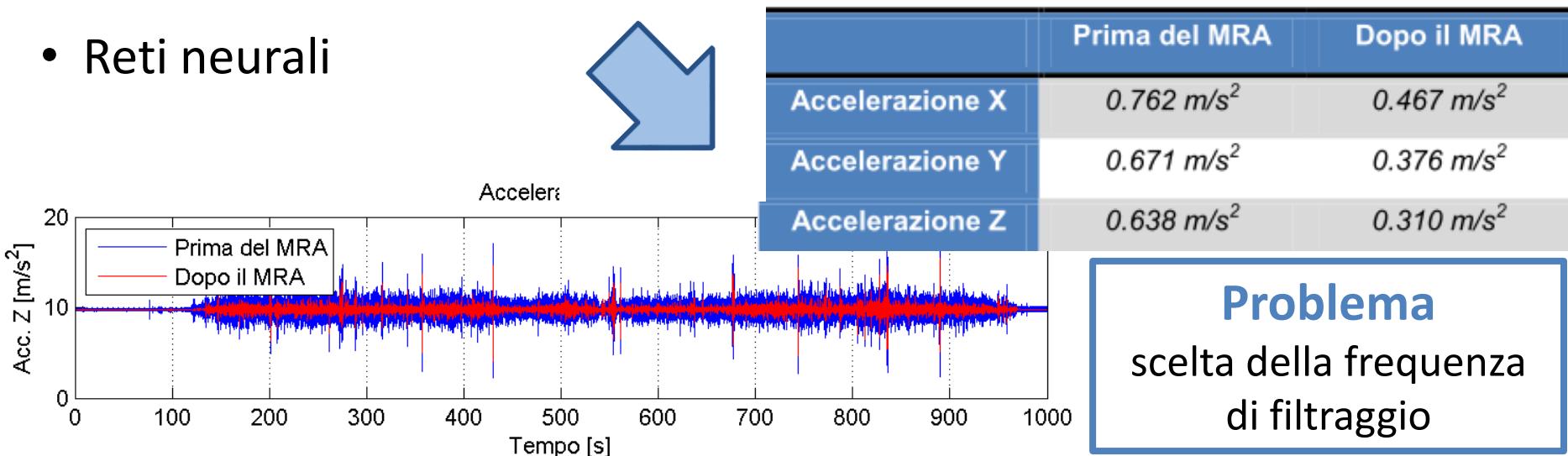
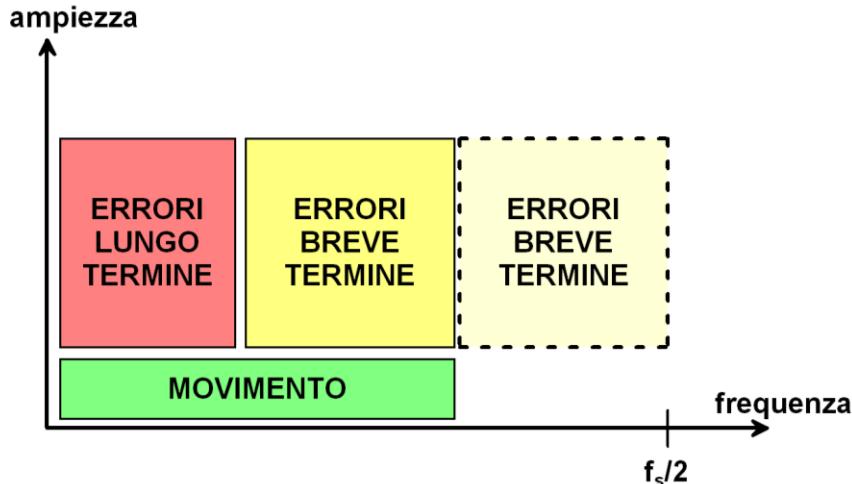
- Trasformata di Fourier
- **Analisi wavelet multirisoluzione (MRA)**
- Reti neurali



# Errori Accidentali

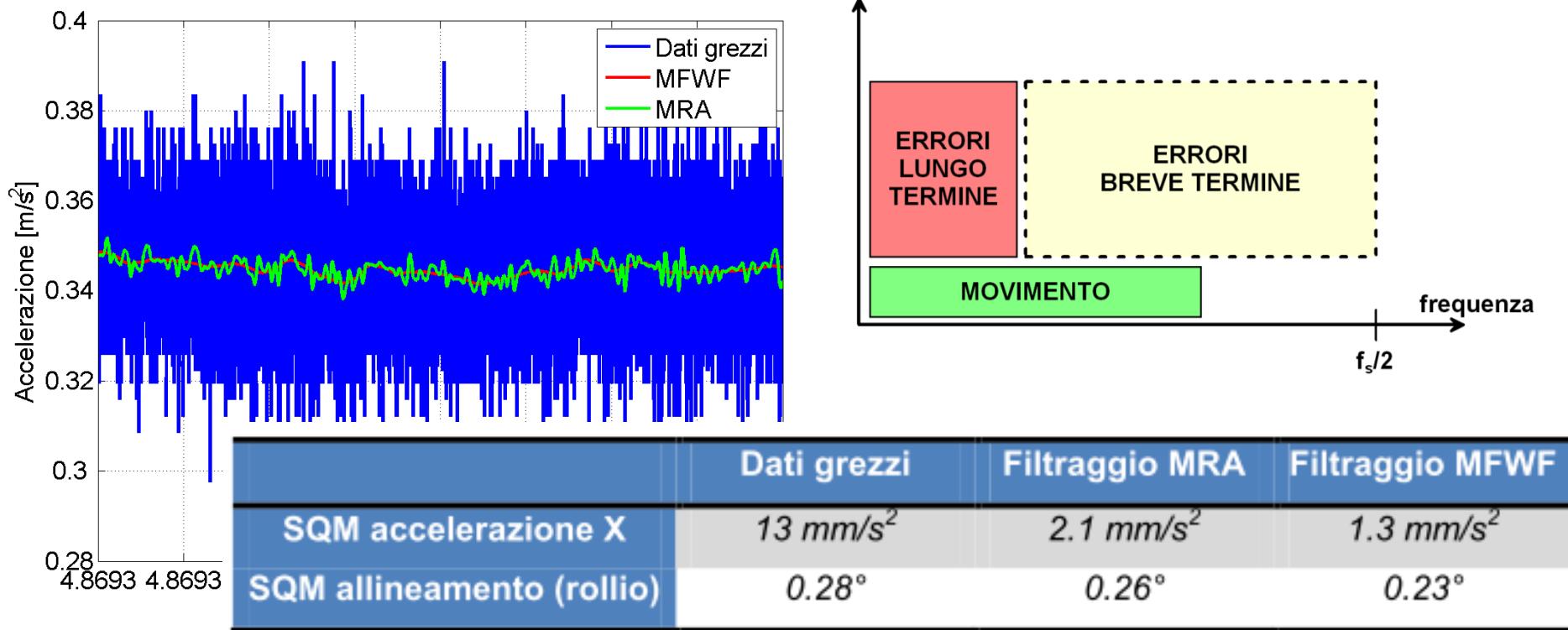
La riduzione della componente accidentale di rumore può avvenire attraverso procedure di **filtraggio** del segnale, come ad esempio:

- Trasformata di Fourier
- **Analisi wavelet multirisoluzione (MRA)**
- Reti neurali



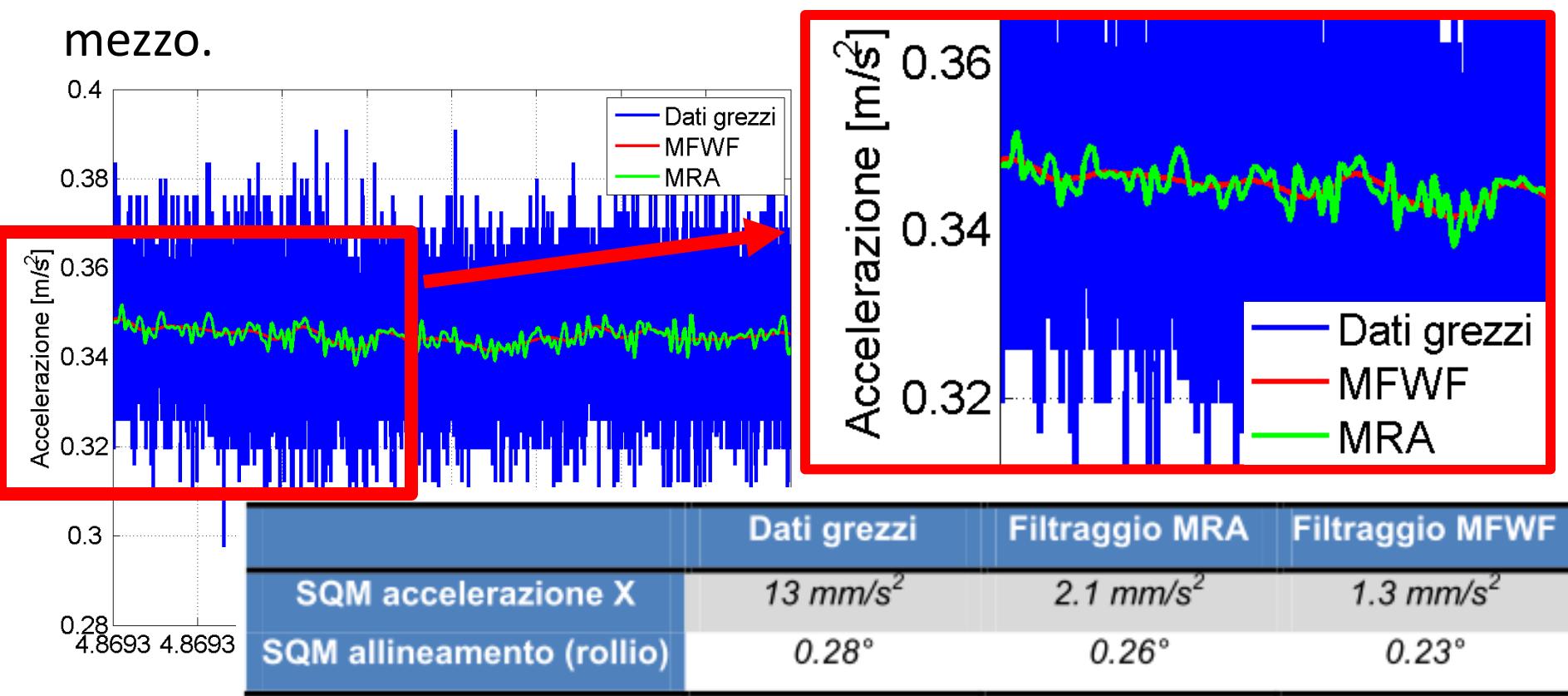
# Errori Accidentali

Sviluppo di una procedura di filtraggio wavelet adattiva (denominata **MFWF – Multi-Frequency Wavelet Filtering**), in grado quindi di far variare il livello di analisi in funzione della dinamica del mezzo.



# Errori Accidentali

Sviluppo di una procedura di filtraggio wavelet adattiva (denominata **MFWF – Multi-Frequency Wavelet Filtering**), in grado quindi di far variare il livello di analisi in funzione della dinamica del mezzo.





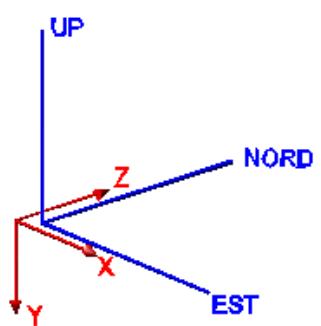
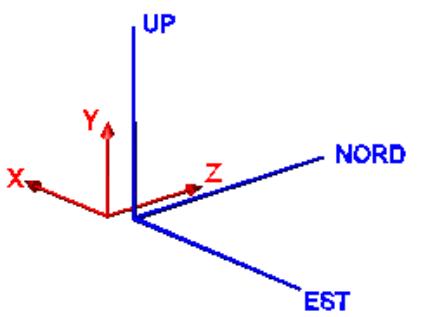
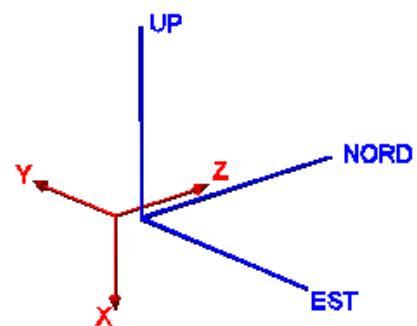
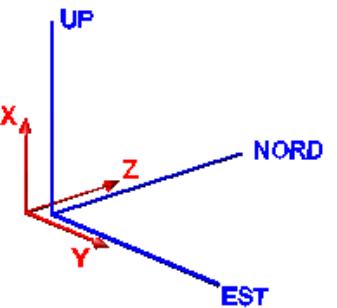
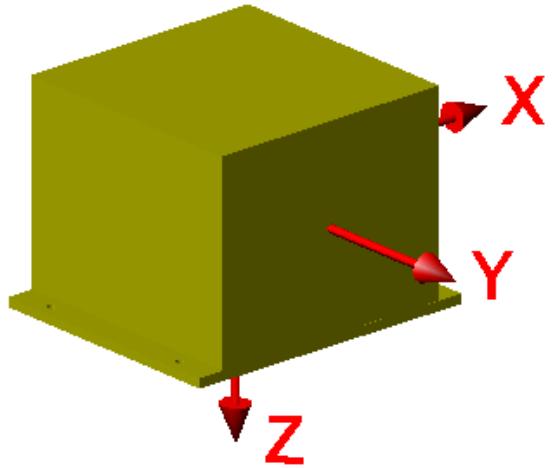
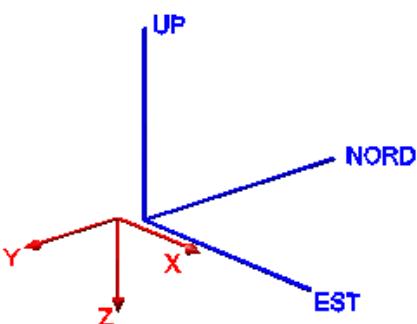
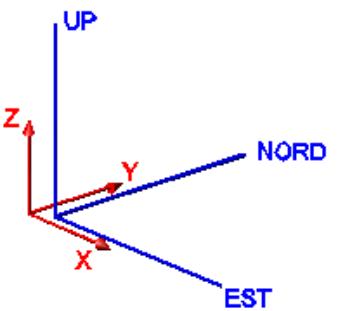
# Errori Sistematici

Gli errori sistematici possono essere ricavati attraverso una procedura di calibrazione, denominata **Test Statico delle Sei Facce** (*Six Position Static Test* - Standard IEEE 517).

Tale procedura consiste nel lasciare per **un intervallo di tempo sufficientemente lungo** il sensore appoggiato su ciascuna faccia, registrando l'output degli accelerometri e giroscopi.

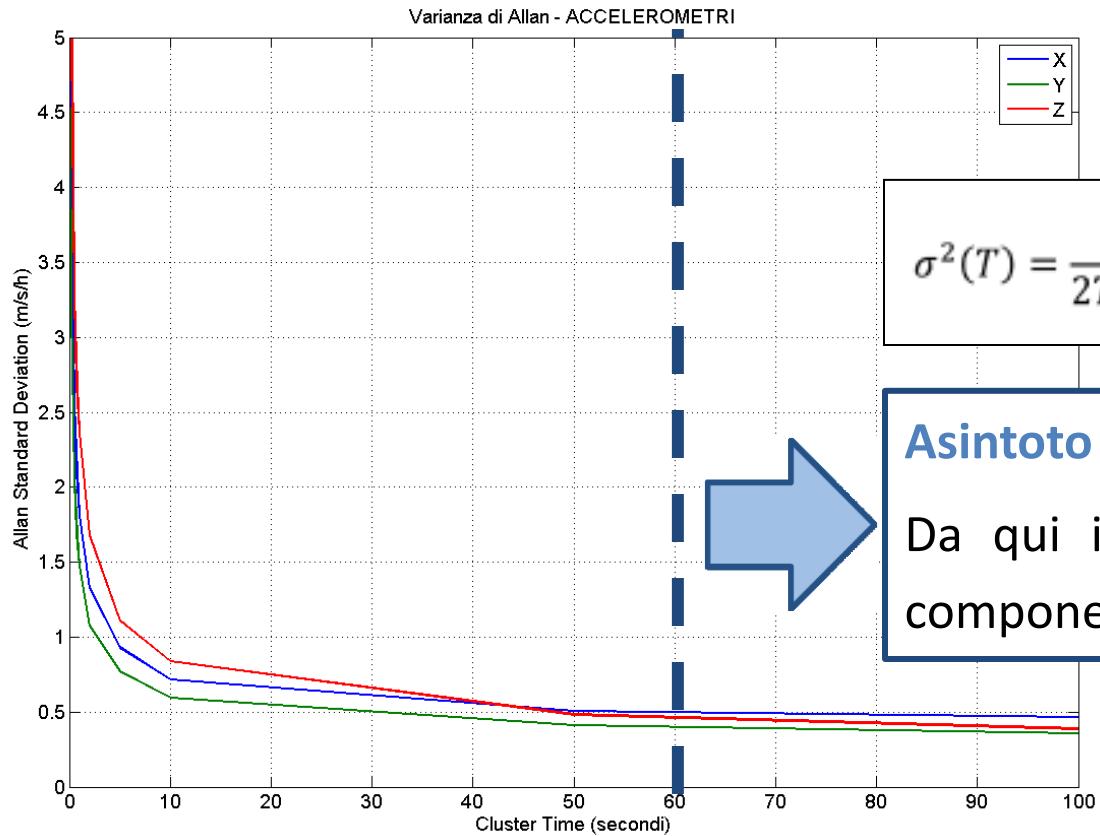
Dal **confronto tra gli output delle due facce opposte** (esattamente come accade con la regola di Bessel) si ha una stima degli errori sistematici.

# Errori Sistematici



# Errori Sistematici

La **durata della calibrazione** è stata determinata analizzando nuovamente l'andamento della **varianza di Allan** calcolata sul segnale acquisito.



$$\sigma^2(T) = \frac{1}{2T^2(N-2n)} \sum_{k=1}^{N-2n} (x_{k+2n} - 2x_{k+n} + x_k)^2$$

**Asintoto orizzontale ( $t = 60$  s):**  
Da qui in poi l'influenza della componente accidentale è nulla

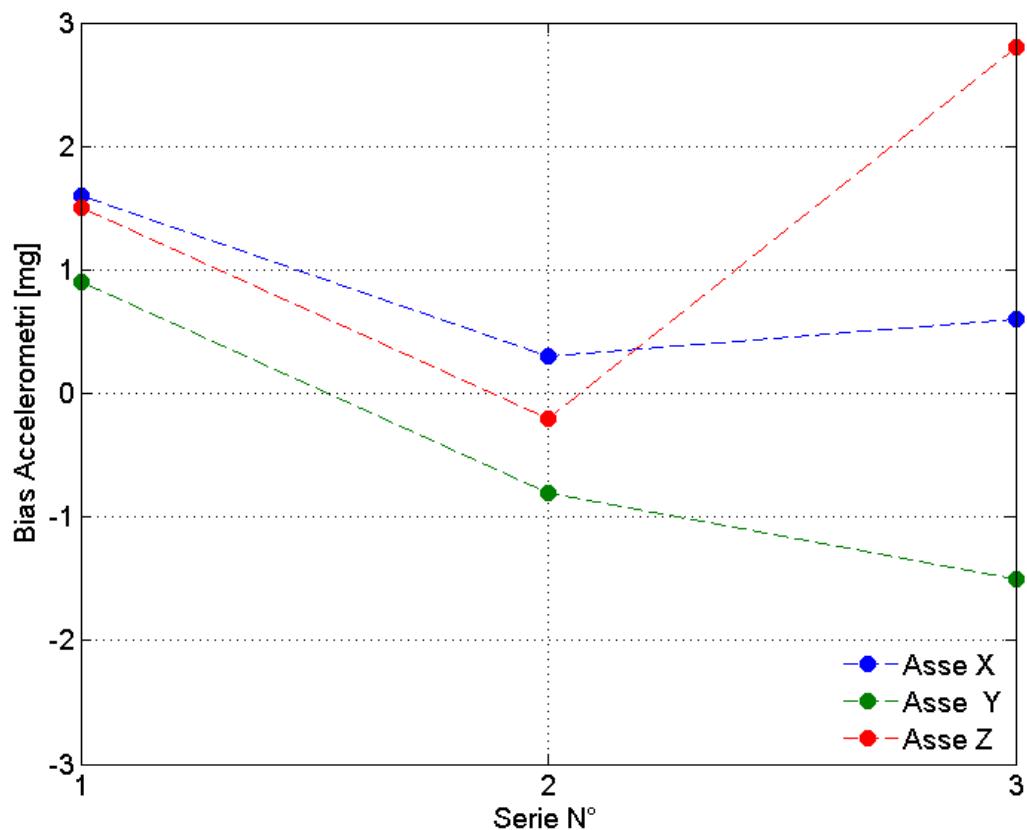
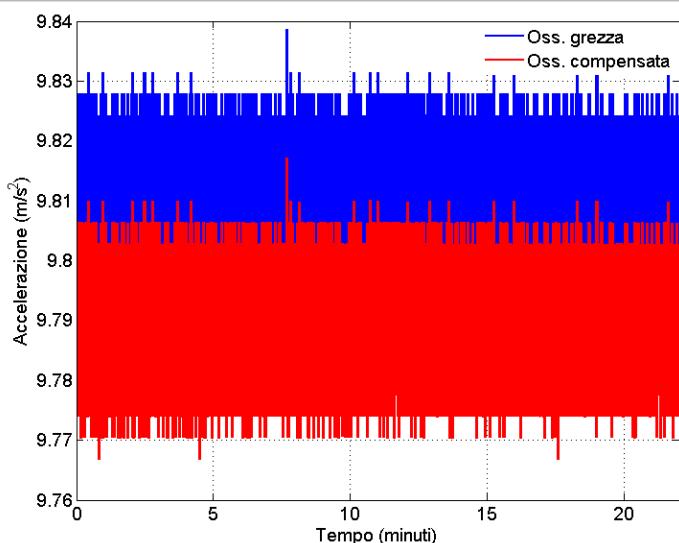
# Errori Sistematici

Accel.	$b_x$	$b_y$	$b_z$	$s_x$	$s_y$	$s_z$
1 <sup>a</sup> serie	1.6 mg	0.9 mg	1.5 mg	-0.01 %	0.0 %	-0.06 %
2 <sup>a</sup> serie	0.3 mg	-0.8 mg	-0.2 mg	0.01 %	0.01 %	-0.04 %
3 <sup>a</sup> serie	0.6 mg	-1.5 mg	2.8 mg	-0.01 %	0.01 %	-0.04 %

Crossbow IMU 400-CC

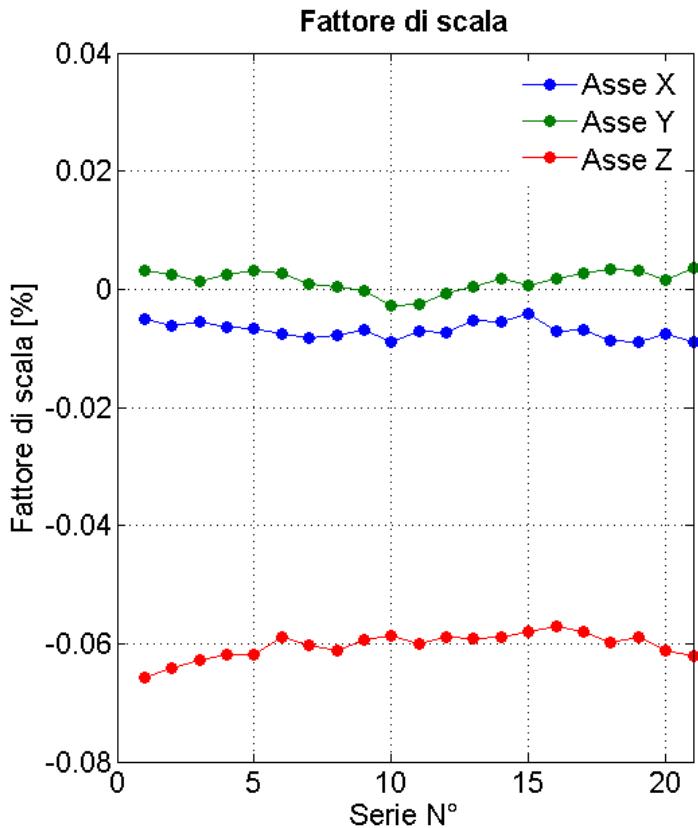
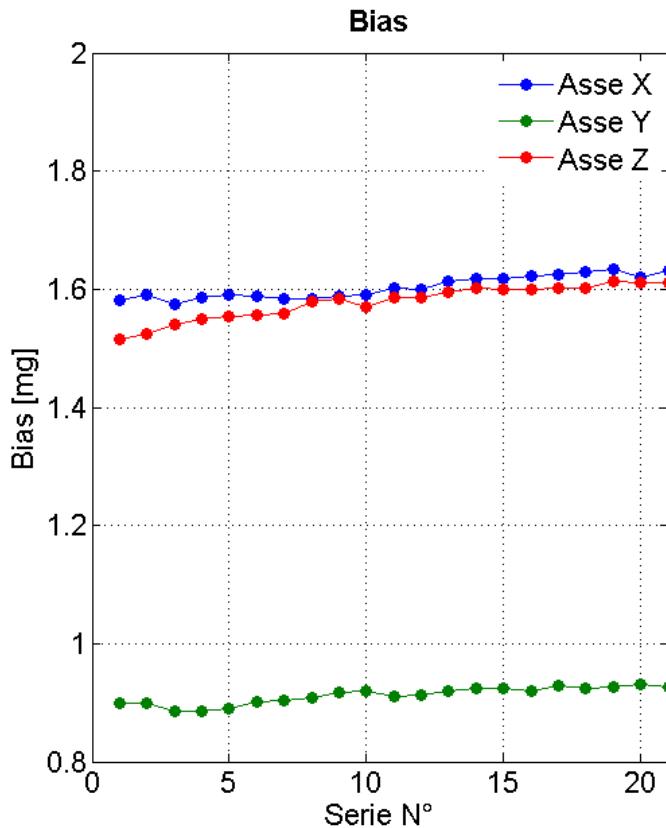


Girosc.	$b_x$	$b_y$	$b_z$
1 <sup>a</sup> serie	-0.34°/s	0.07°/s	0.10°/s
2 <sup>a</sup> serie	-0.50°/s	-0.05°/s	-0.01°/s
3 <sup>a</sup> serie	-0.59°/s	-0.07°/s	-0.03°/s



# Errori Sistematici

Tali procedure hanno permesso di studiare anche la **ripetibilità dei sistematismi nella sessione di misura:**



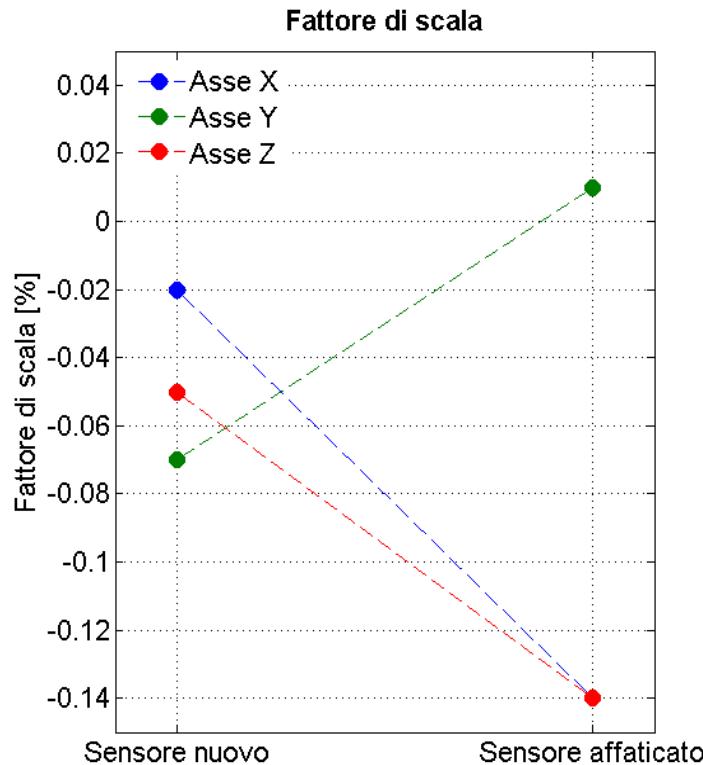
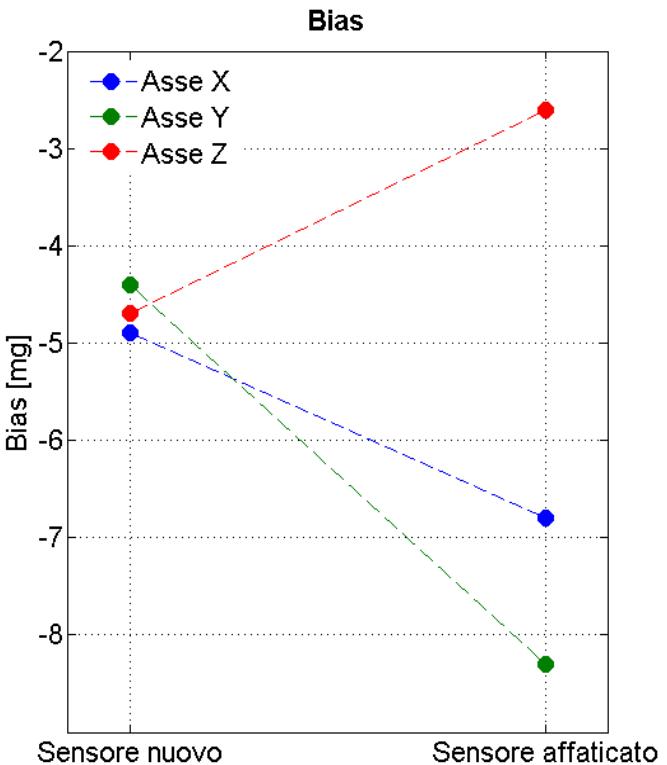
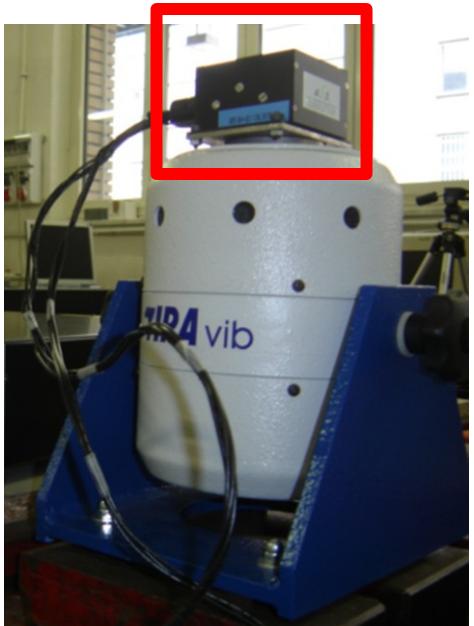
Crossbow IMU 400-CC

# Ripetibilità degli errori

Per ultimo, è stata stimata la **ripetibilità** degli errori sistematici ed accidentali **in seguito all'affaticamento meccanico del sensore**.



**Axis AIS 402**



(in collaborazione con il “Laboratorio di Progettazione e Caratterizzazione di Microsistemi” del Politecnico di Torino)

# Parte III

## Algoritmi di Navigazione

- Navigazione Assistita
- Integrazione *loosely-coupled*
- Integrazione *tightly-coupled*
- Confronto tra le due integrazioni
- Il Lisciamento Retro-Propagato
- Test in Ambiente Urbano
- Affidabilità dell'Integrazione



# Navigazione Assistita

A causa dei disturbi legati ai residui degli errori sistematici, i sensori inerziali di basso costo non consentono di effettuare navigazione di precisione in **modalità autonoma** per tempi lunghi.

Per tale motivo, tali sensori vengono in genere affiancati da **strumenti di natura diversa** (GNSS, odometri, magnetometri...) che **“assistono”** la navigazione inerziale.



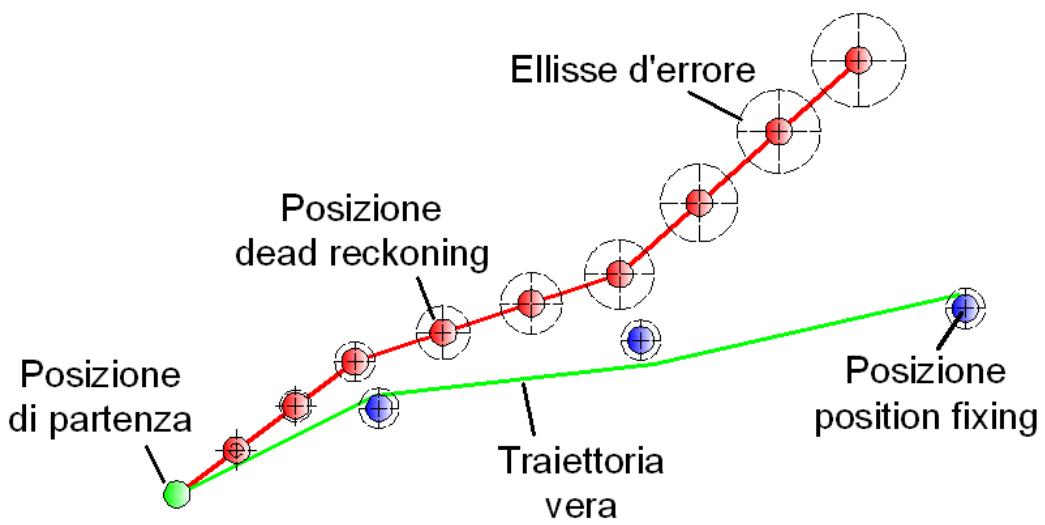
## Position Fixing

- La posizione è indipendente da quelle precedenti
- Es.: GPS



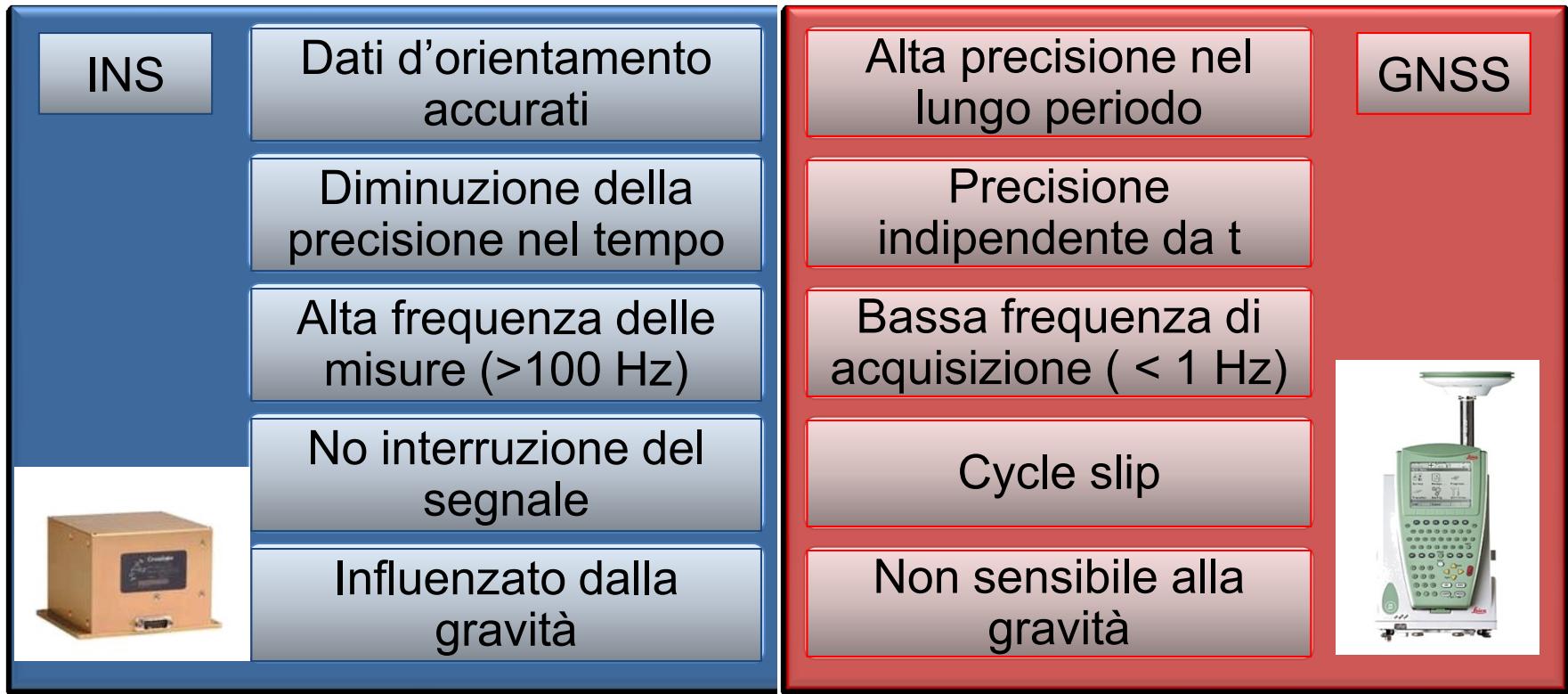
## Dead Reckoning

- La posizione dipende da quelle precedenti
- Es.: INS



# Navigazione Assistita

In particolare, il connubio tra il sistema **INS** ed il sistema **GNSS** è l'integrazione che ha preso più piede negli ultimi anni, soprattutto vista la **complementarietà** dei due sistemi.



# Integrazione *loosely-coupled*

L'algoritmo sviluppato è basato su un **Filtro di Kalman Esteso** (EKF) a 15 stati, appositamente calibrato per sensori a basso costo.

$$\mathbf{x}_{\text{kal}} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} & \Delta \mathbf{v} & \Delta \Psi \\ \Delta \mathbf{b}_a & \Delta \mathbf{d}_g \end{bmatrix}^T$$

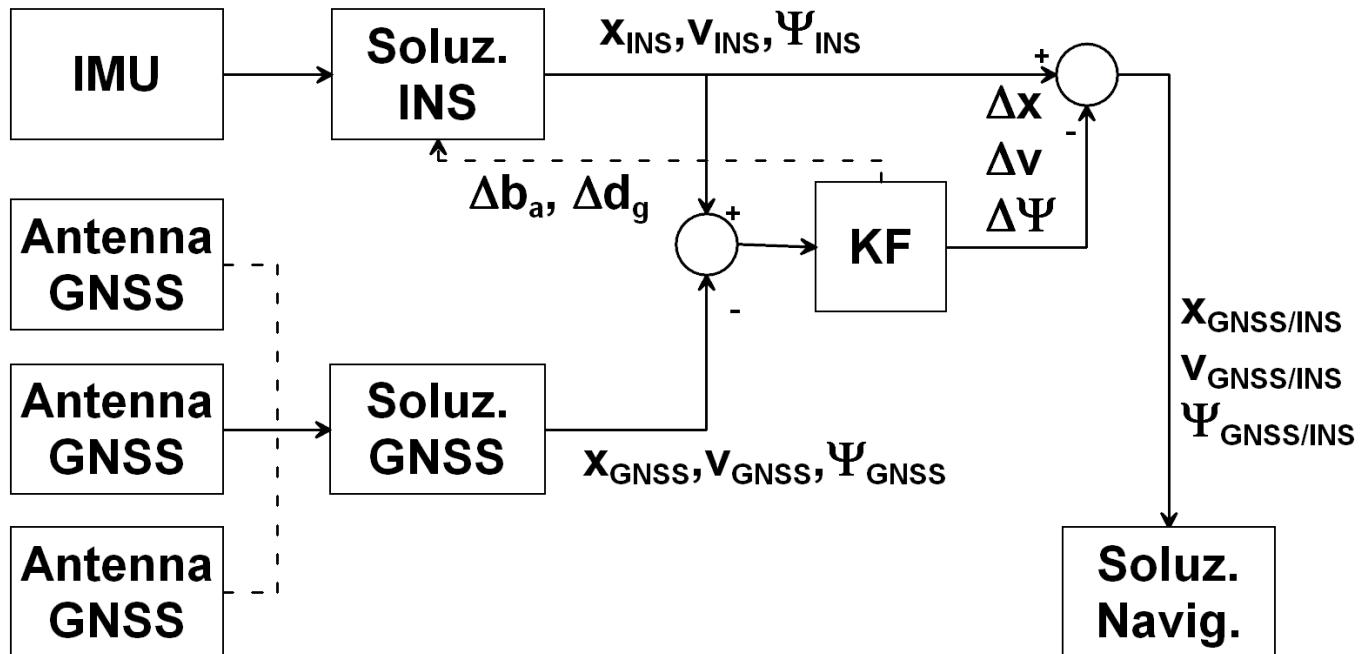
**Aggiornamento stati  
della navigazione**

**Aggiornamento  
bias e drifts IMU**

# Integrazione *loosely-coupled*

L'algoritmo sviluppato è basato su un **Filtro di Kalman Esteso** (EKF) a 15 stati, appositamente calibrato per sensori a basso costo.

$$\mathbf{x}_{\text{kal}} = \begin{bmatrix} \Delta x & \Delta v & \Delta \Psi & \Delta b_a & \Delta d_g \end{bmatrix}^T \quad \text{Servono almeno 4 satelliti!}$$



# Integrazione *tightly-coupled*

Le **misure** GNSS (non più le soluzioni!) vengono integrate direttamente con gli stati INS. Utilizzando le equazioni delle doppie differenze, ad esempio:

$$\mathbf{x}_{\text{kal}} = \begin{bmatrix} \Delta x & \Delta v \\ \mathbf{N}_{\text{RM}}^{ij} \end{bmatrix}^T$$

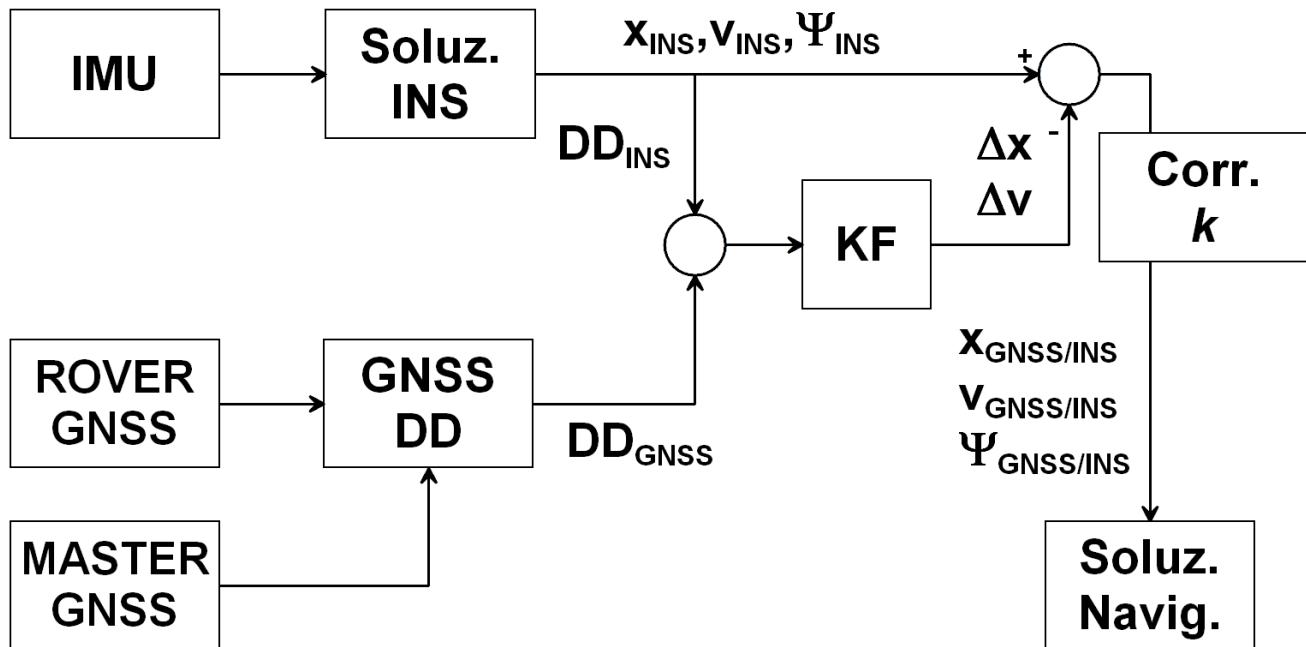
↓  
**Aggiornamento  
stati della  
navigazione**  
↓  
**Ambiguità  
DD**

# Integrazione *tightly-coupled*

Le **misure** GNSS (non più le soluzioni!) vengono integrate direttamente con gli stati INS. Utilizzando le equazioni delle doppie differenze, ad esempio:

$$\mathbf{x}_{\text{kal}} = \begin{bmatrix} \Delta x & \Delta v & N_{\text{RM}}^{ij} \end{bmatrix}^T$$

**Servono solo 2 satelliti!**





# Confronto tra le due integrazioni

Confrontando le architetture dei due sistemi:

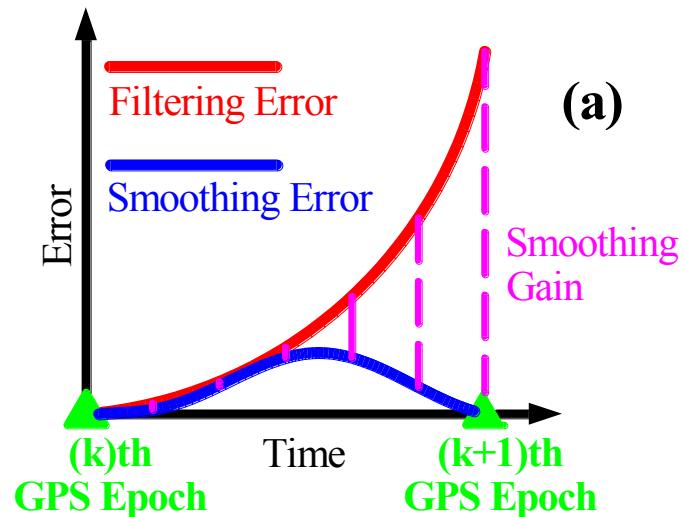
Variabile	Loosely coupled	Tightly coupled
Correzione con meno di 4 satelliti	No	Sì
Accuratezza della stima dei bias	Ridotta	Elevata
Carico computazionale	Basso	Alto
Complessità del sistema	Bassa	Alta

# Il Lisciamento Retro-Propagato

Alla fine del Filtro di Kalman, è possibile migliorare l'accuratezza della soluzione finale attraverso una procedura a ritroso, detta ***smoothing*** (***lisciamento***).

Questa procedura consente, per applicazioni non in tempo reale, di ottenere **benefici significativi** nella stima della soluzione finale.

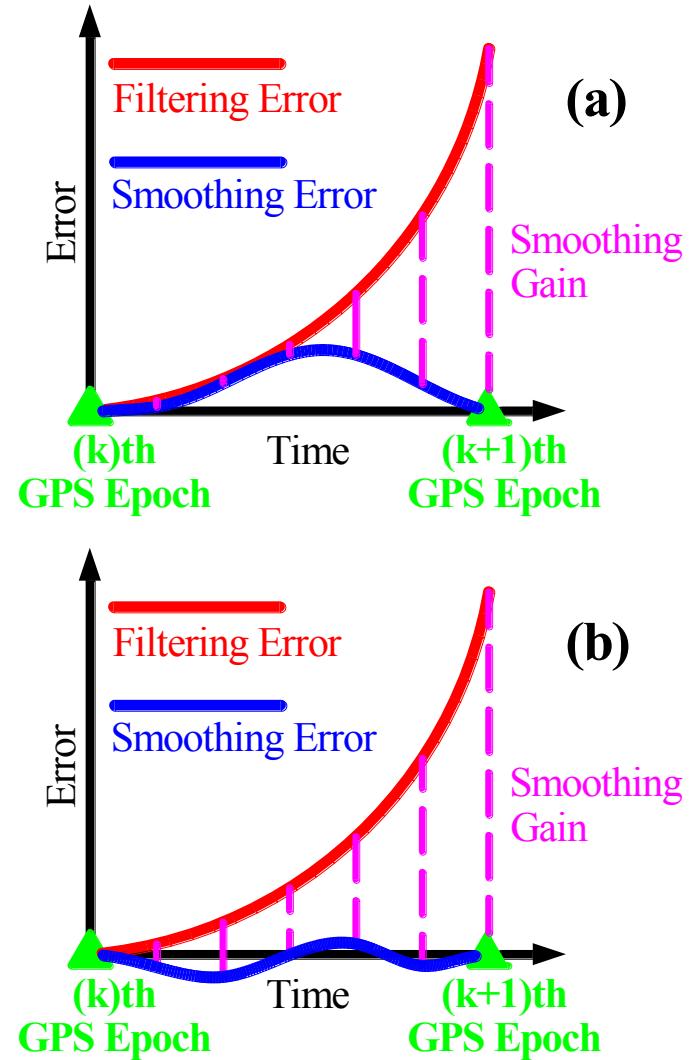
Tuttavia, esiste un errore residuo, con un **valore massimo** localizzato a metà tra le due epoch GNSS.



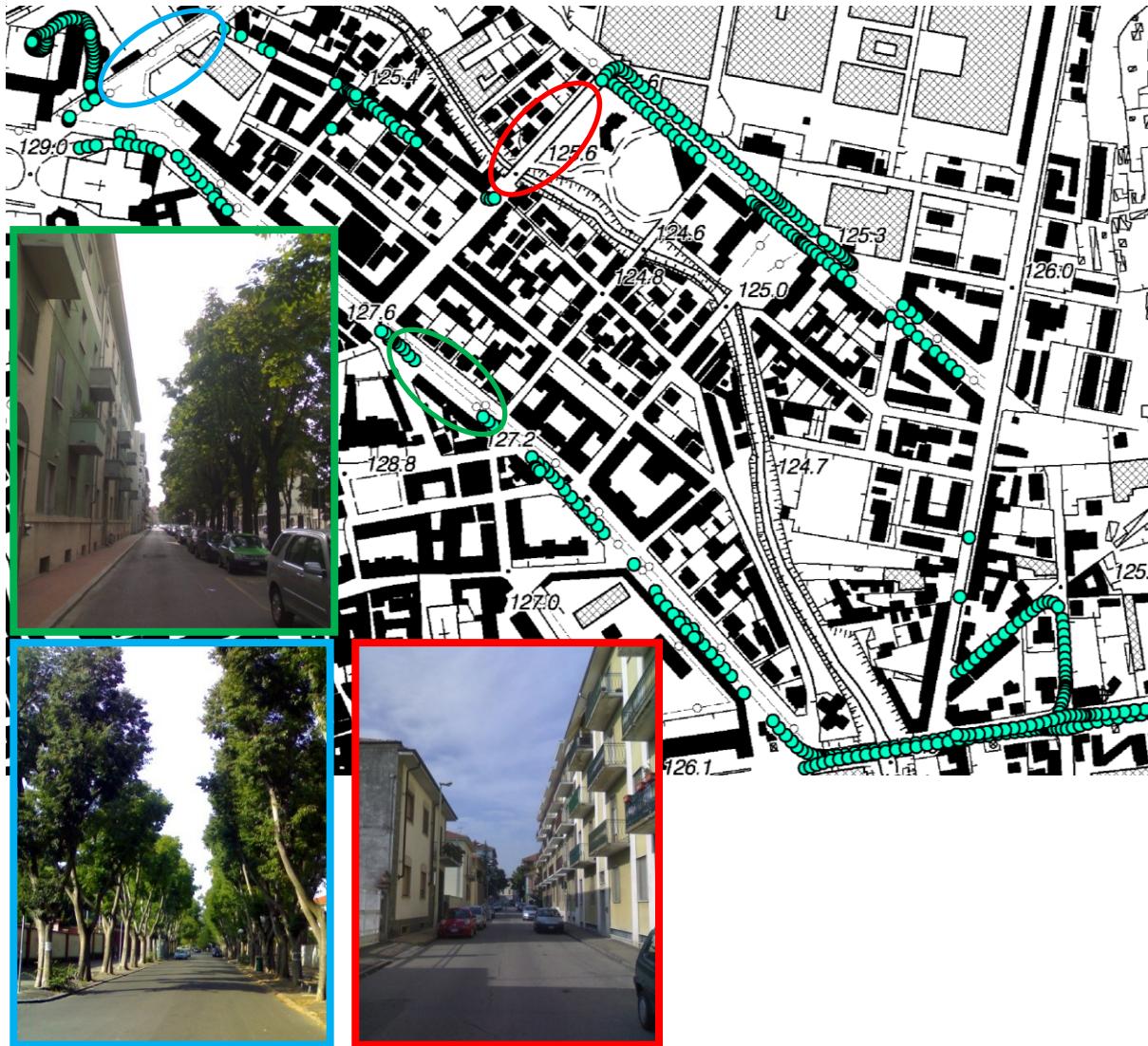
# Il Lisciamento Retro-Propagato

È stata realizzata una soluzione alternativa, utilizzando le informazioni provenienti dal Filtro di Kalman (filtro e lisciamento), **retro-propagando** gli effetti degli errori residui di accelerometri e giroscopi tra due epoch GNSS.

Tale procedura consente di **ridurre sensibilmente gli errori**, siccome è nota la legge di propagazione dei *bias* che influiscono sulla soluzione.



# Test in Ambiente Urbano

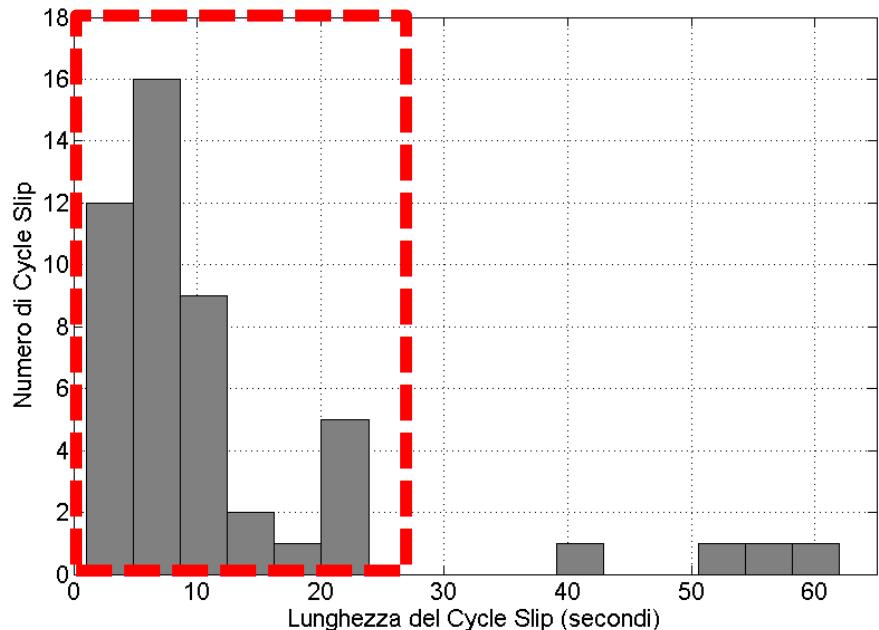


Allo scopo di valutare la lunghezza media dei *cycle slip* in un ambiente urbano, è stato condotto un test nel centro urbano di Vercelli (Piemonte)

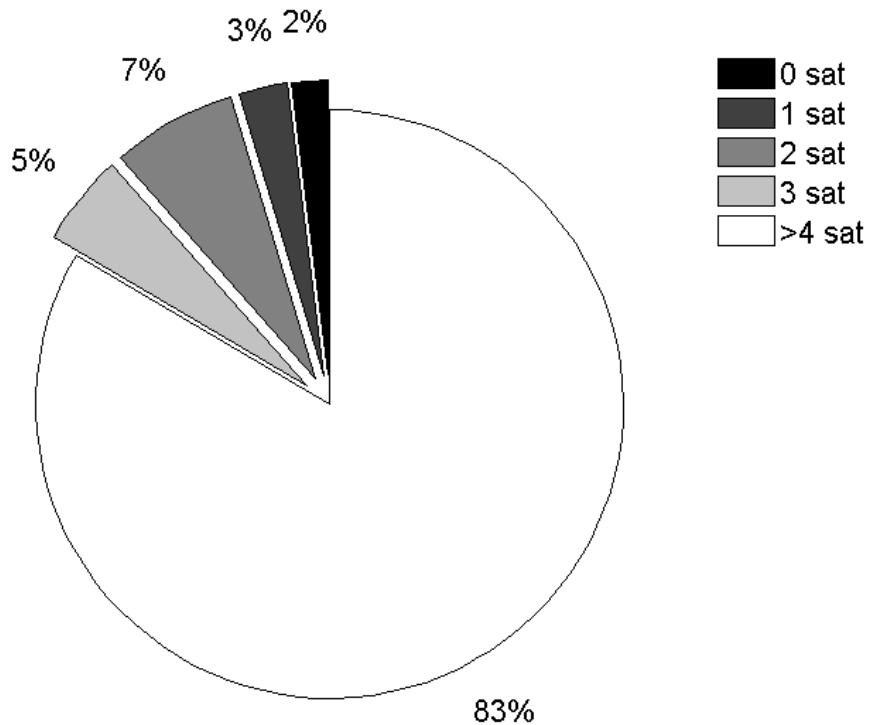
durata:  $\sim 40$  minuti

velocità: 50 km/h

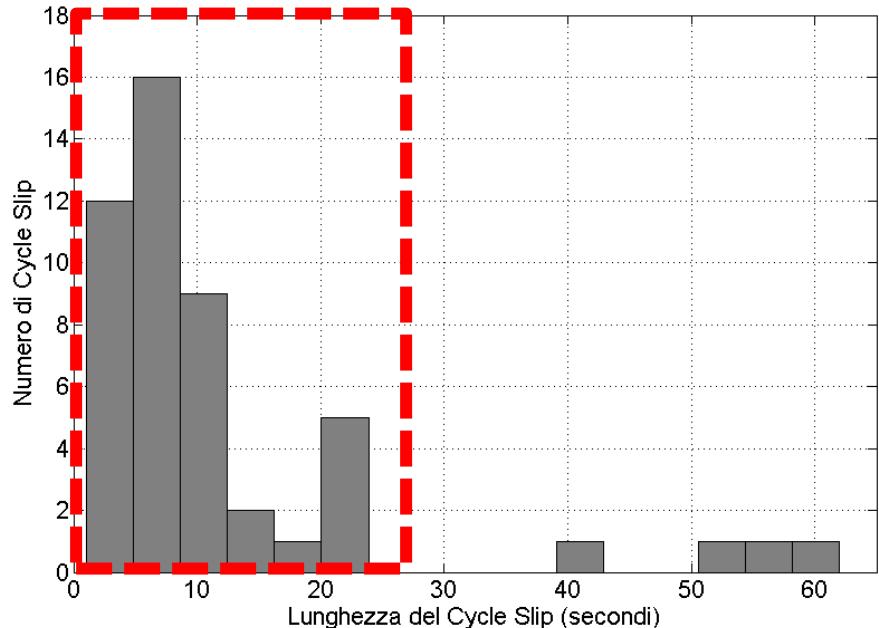
# Test in Ambiente Urbano



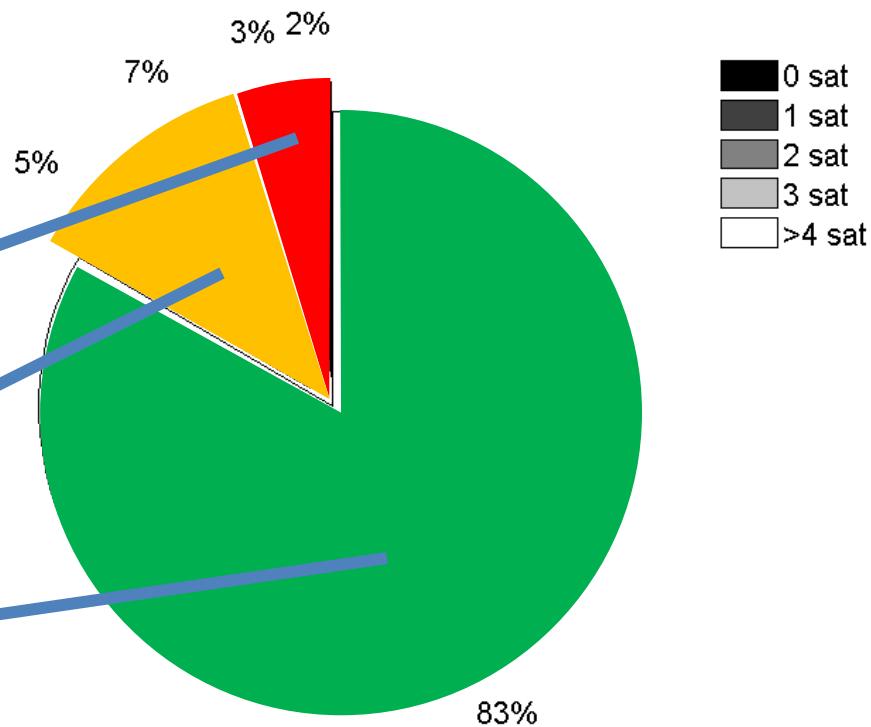
90% dei *cycle slip*  
in ambiente urbano ha una  
durata **minore di 20 - 25 s.**



# Test in Ambiente Urbano



90% dei *cycle slip*  
in ambiente urbano ha una  
durata **minore di 20 - 25 s.**



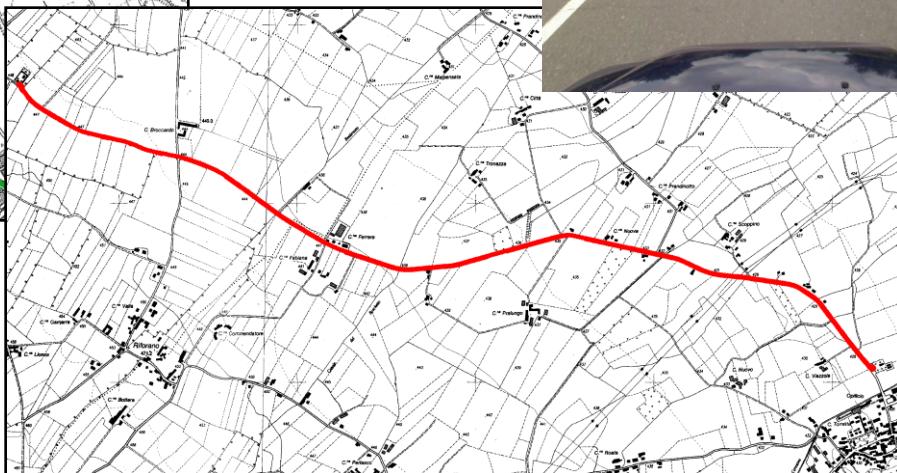
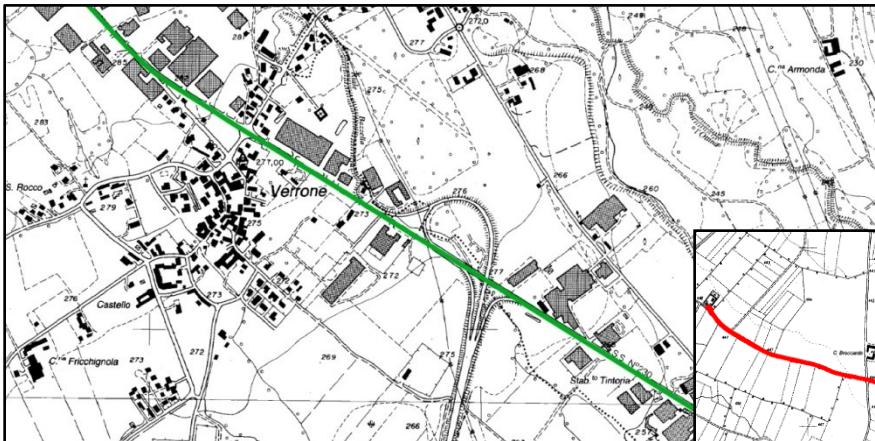
Qui un'integrazione non è mai possibile...

...e qui? Solo *tightly-coupled!*

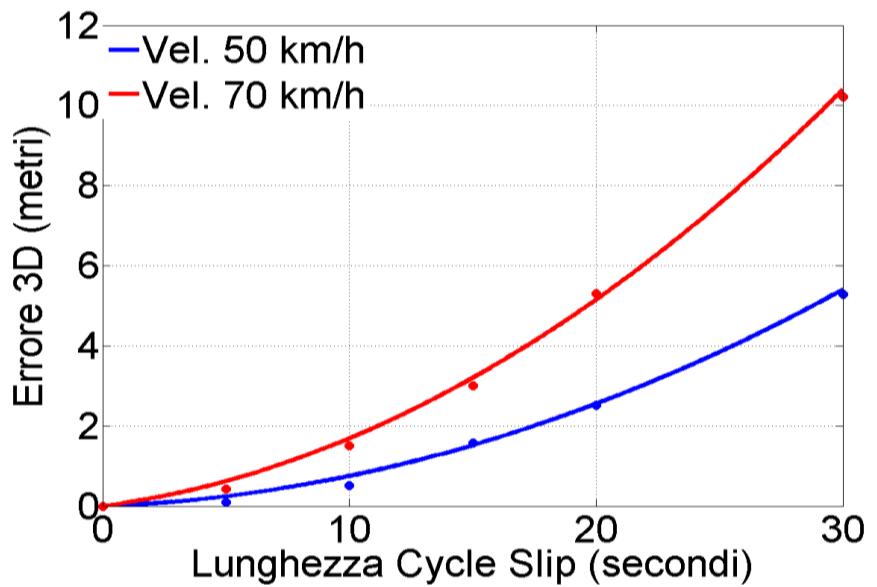
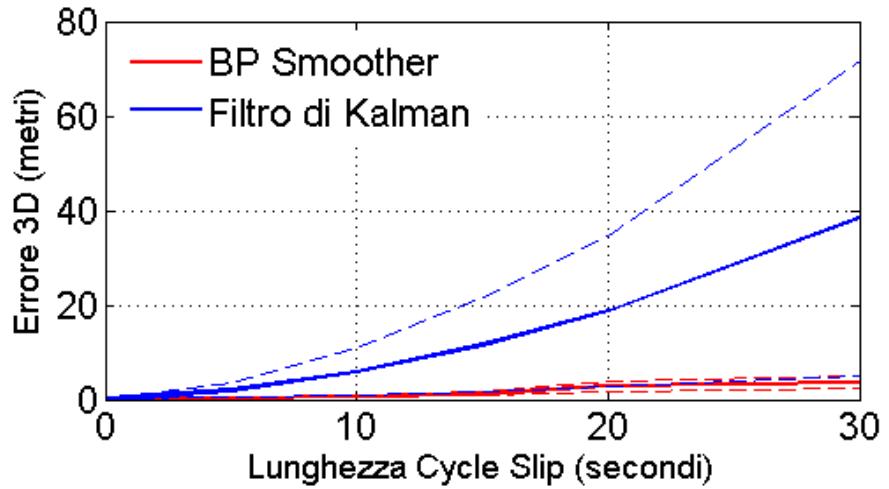
Qui entrambi gli algoritmi funzionano bene!

# Affidabilità dell'Integrazione

Allo scopo di valutare l'affidabilità pratica degli algoritmi di posizionamento GNSS/INS di basso costo, sono stati svolti alcuni test in ambienti privi di ostacoli, **simulando** poi perdite di segnale di diversa durata.



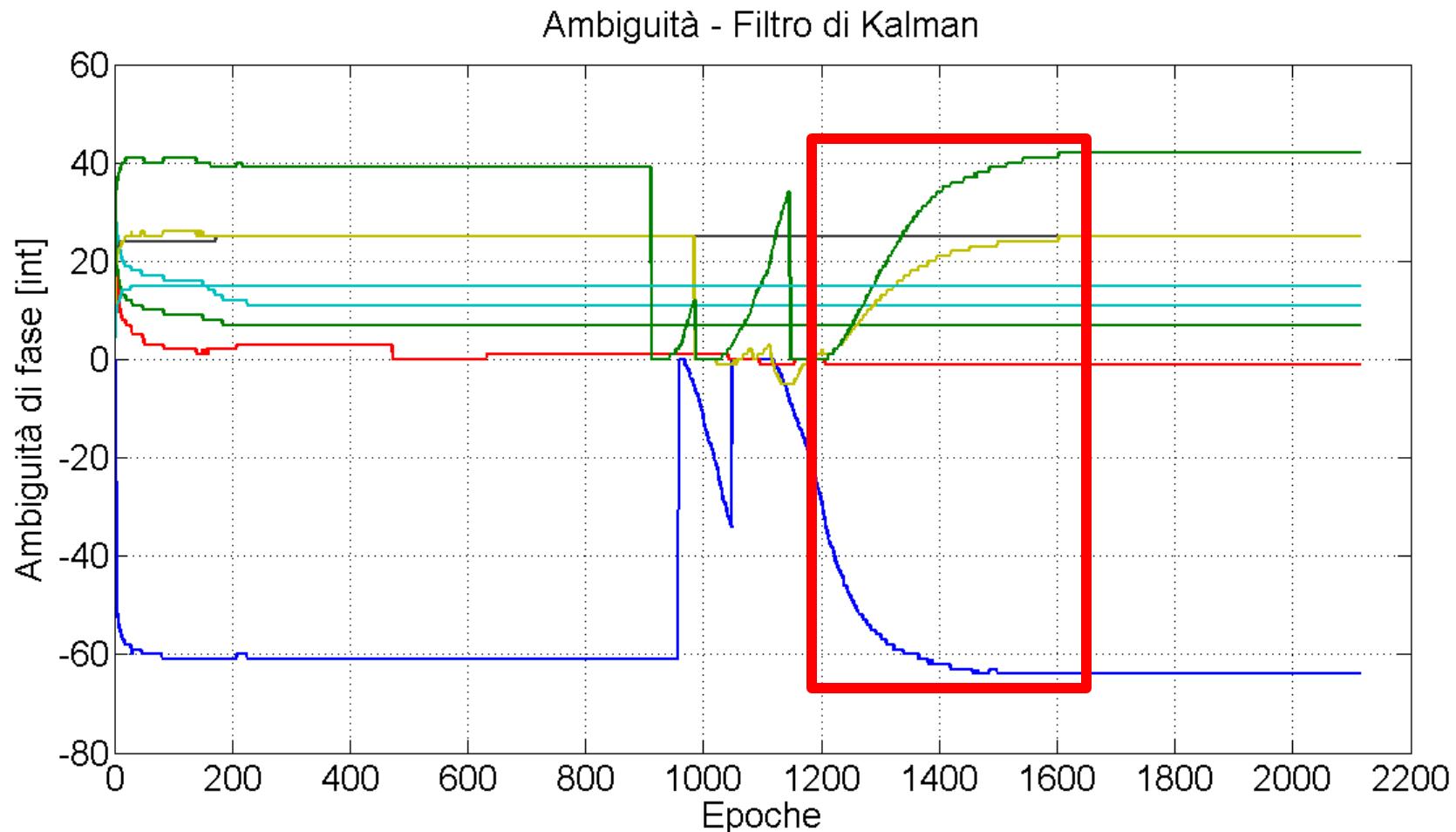
# Affidabilità dell'Integrazione



Durata CS	Filtro di Kalman [m]	BP Smoother [m]
5 s	$1.98 \pm 1.51$	$0.29 \pm 0.11$
10 s	$5.84 \pm 4.96$	$0.64 \pm 0.25$
15 s	$11.65 \pm 10.09$	$1.16 \pm 0.33$
20 s	$18.69 \pm 16.09$	$2.82 \pm 1.03$
30 s	$38.50 \pm 33.34$	$3.69 \pm 1.12$

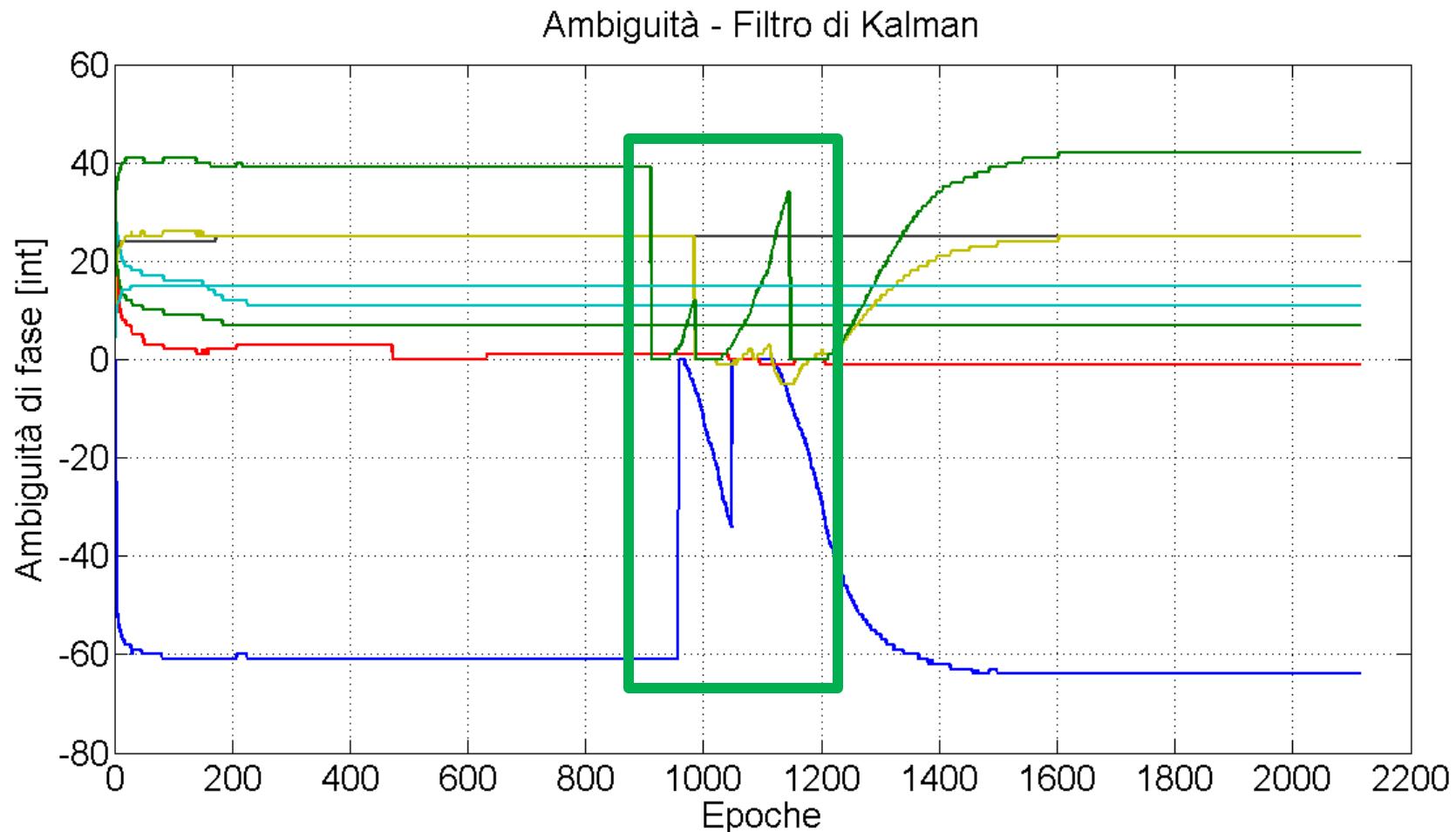
Durata CS	Test 50 km/h	Test 70 km/h
5 s	0.10	0.42
10 s	0.52	1.51
15 s	1.58	3.01
20 s	2.52	6.30
30 s	5.29	10.21

# Affidabilità dell'Integrazione



**... circa 300 epocha prima di ritornare a fissare l'ambiguità**

# Affidabilità dell'Integrazione



**Solo 3 satelliti in vista...ma mantengono l'ambiguità fissata!**

# Parte IV

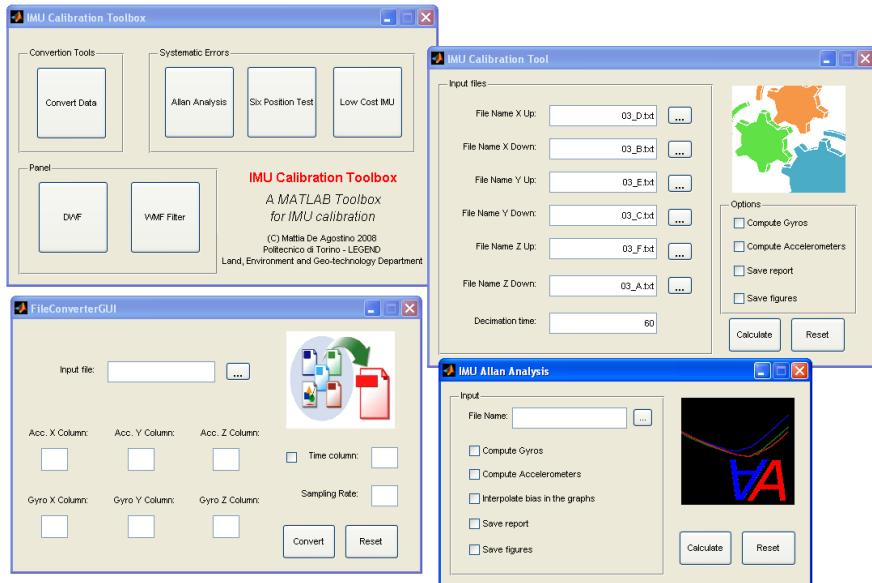
## Applicazioni

- Sviluppo Software
- Veicolo Rilevatore di Basso Costo
- Navigazione Pedestre



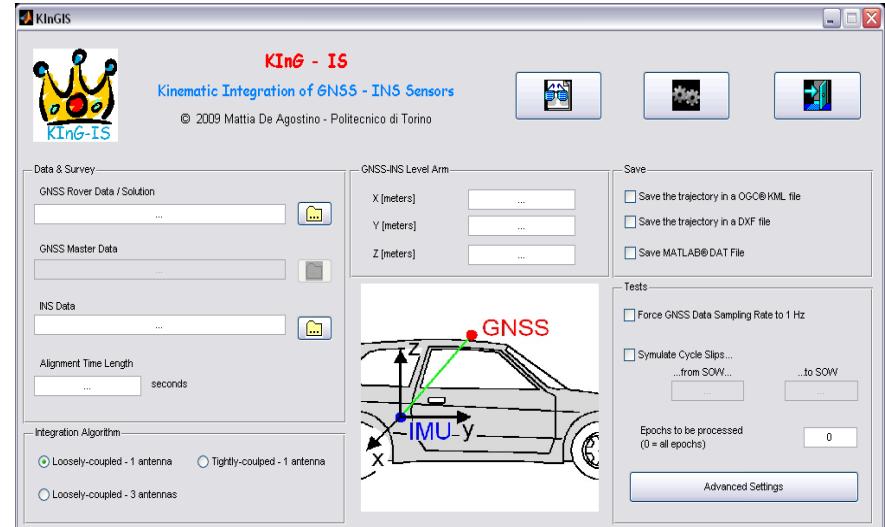
# Sviluppo Software

Tutti gli algoritmi sviluppati sono stati inseriti in **programmi in linguaggio MATLAB**, tutti dotati di **interfaccia grafica GUI (Graphical User Interface)**.



## ICT Toolbox

Serie di programmi per l'analisi  
dei dati IMU



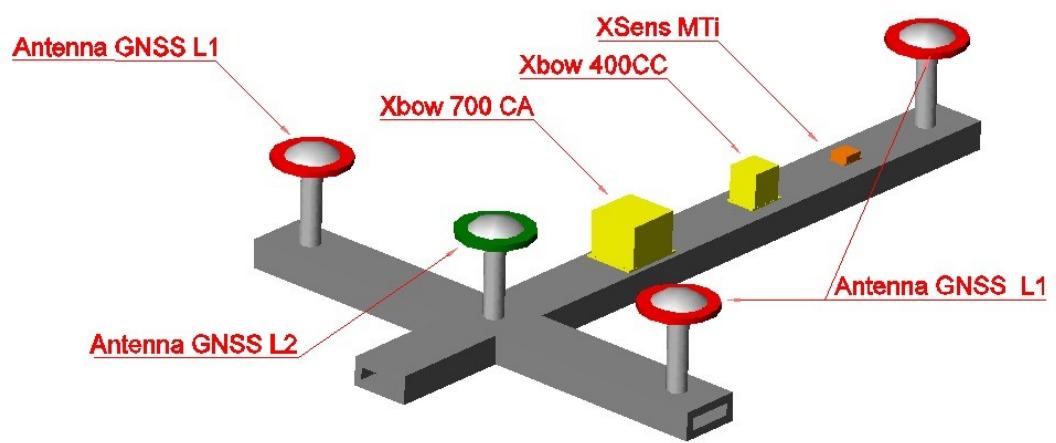
## KInG-IS

Programma per il posizionamento  
GNSS/INS

# Veicolo Rilevatore di Basso Costo

Veicolo rilevatore **LCMMS** (*Low Cost Mobile Mapping System*) a basso costo (entro 25.000 €) installabile ed utilizzabile su qualunque automezzo previa una fase di calibrazione. È composto da:

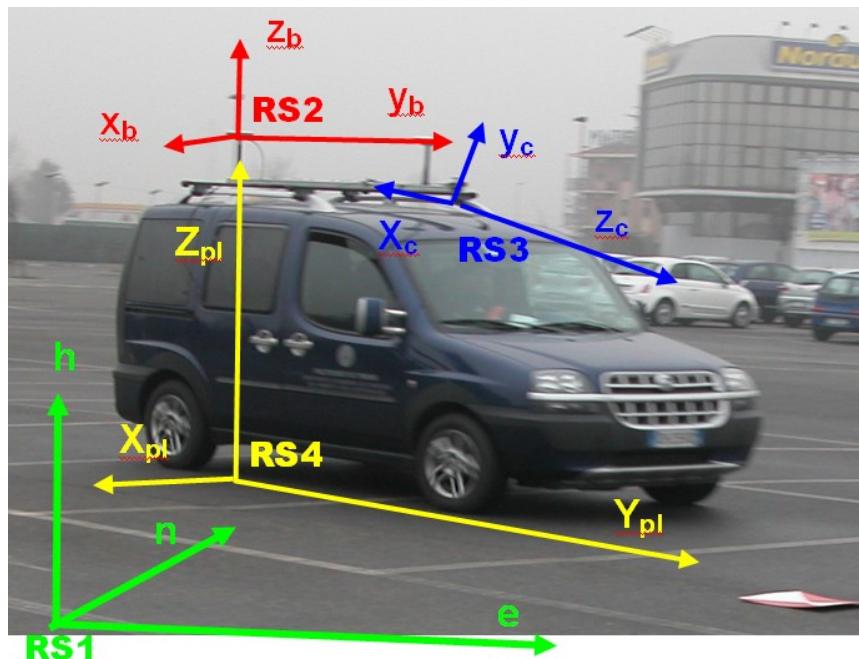
- fino a **4 ricevitori GNSS** di tipo geodetico / singola frequenza
- fino a **3 sensori inerziali**
- fino a **3 webcam** orientabili



# Veicolo Rilevatore di Basso Costo

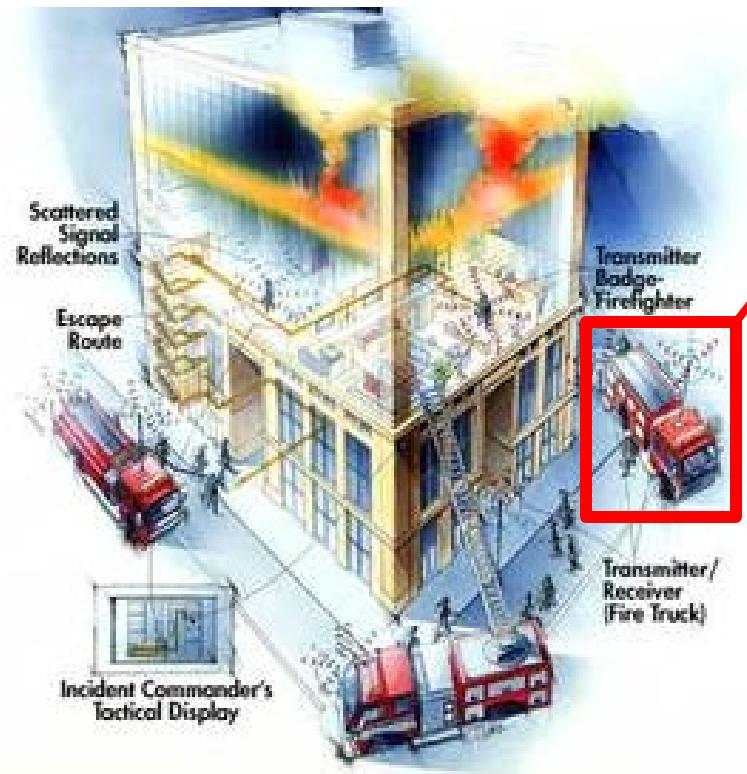
Il sistema richiede una **calibrazione** iniziale per:

- stima dei parametri di **orientamento interno delle camere** e definizione della curva di distorsione;
- orientamento dei **sistemi di riferimento** dei diversi sensori.



# Navigazione Pedestre

Applicazione legata al **posizionamento in tempo reale**, ad esempio per il monitoraggio delle squadre di soccorso all'**interno di edifici**.



Centro di controllo mobile



Sistema portatile, in grado di calcolare la posizione e di inviarla (via radio/GSM) ad un centro di controllo fuori dall'edificio.

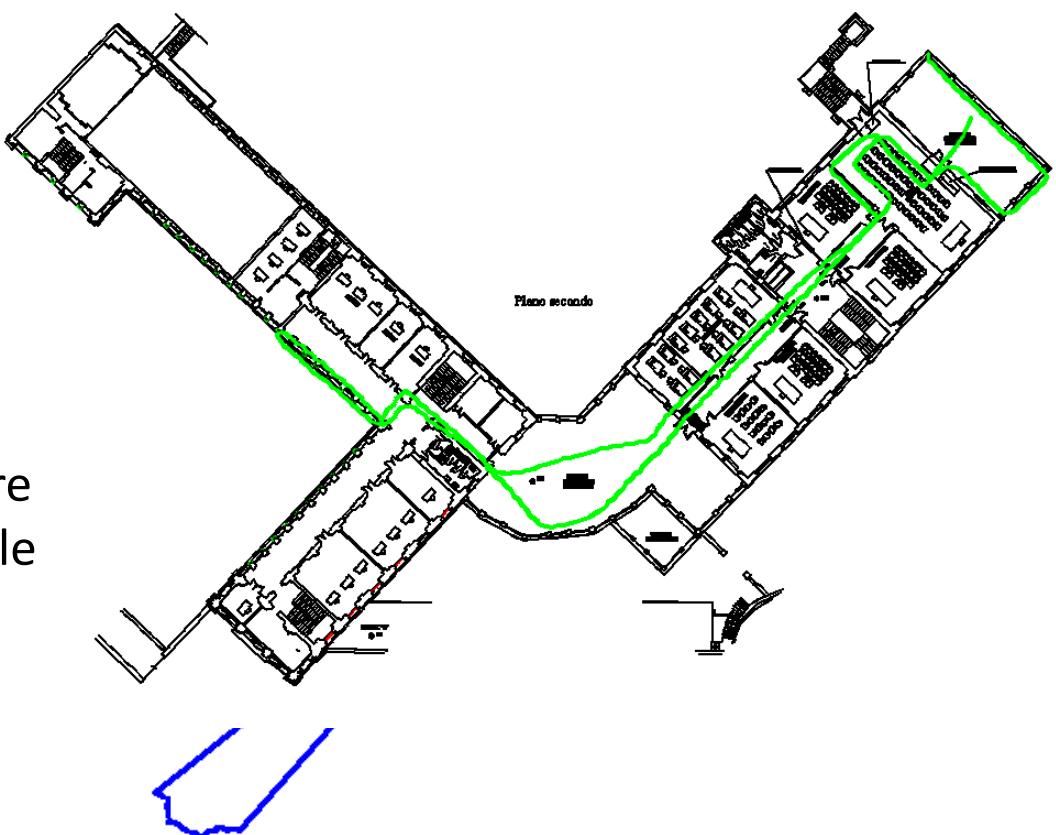
# Navigazione Pedestre



Antenna  
GPS

Occorre impiegare **algoritmi specifici** per il posizionamento

Sensore  
Inerziale





# I Numeri del Dottorato...

Nel corso del Dottorato di Ricerca sono state prodotte, in veste di autore e coautore, **40** pubblicazioni, di cui:

- **9** su riviste internazionali (di cui 3 in revisione)
- **3** su riviste nazionali
- **17** in congressi di rilevanza internazionale
- **11** in congressi di rilevanza nazionale

Vincitore dello “**ION-GNSS 2009 Student Paper Award**” conferito dal The Institute of Navigation (ION) per il lavoro “*Performance of Different Low-cost GNSS/INS Land Systems*”.

Vincitore del **premio come miglior poster ASITA 2008** per il lavoro “*Realizzazione di un GIS stradale con un veicolo rilevatore basso costo*”.

Partecipazione ai Progetti di Ricerca di Interesse Nazionale:

- **PRIN 2006** “*Galileo e il posizionamento satellitare modernizzato*”
- **PRIN 2007** “*La Geomatica a supporto delle azioni di Governo del Territorio*”
- **PRIN 2008** “*Impatto del nuovo sistema di riferimento geodetico nazionale sulle reti GNSS regionali.*”