

Politecnico di Torino

Dottorato di Ricerca in "Ambiente e Territorio"

XXII Ciclo (A.A. 2007-2009)



# I Sensori Inerziali di Basso Costo per la Navigazione Geodetica

Candidato:

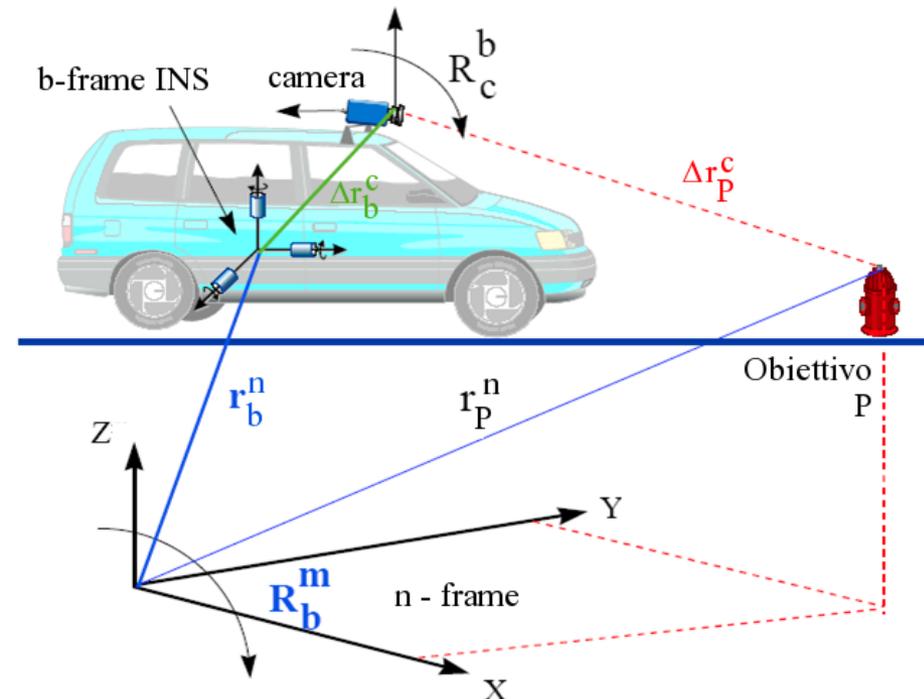
Ing. Mattia De Agostino

Relatore:

Prof. Ambrogio Maria Manzino

Coordinatore del Dottorato:

Prof.ssa Attilia Peano



Torino, 14 Aprile 2010

# 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

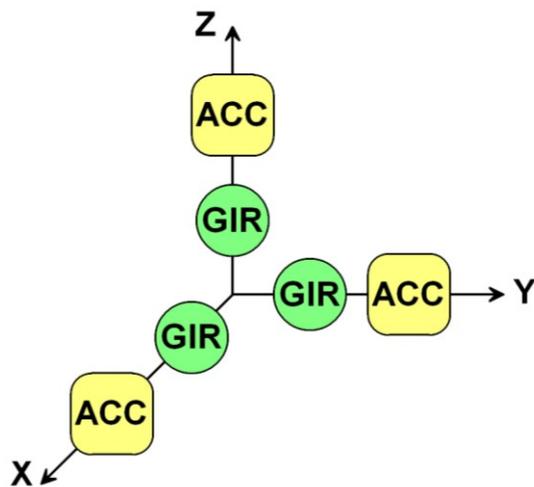
- Navigazione Inerziale
- Applicazioni Militari e Civili
- Schema di Funzionamento
- Classificazione dei Sensori Inerziali
- Tecnologie di Costruzione
- Sensori di Basso Costo



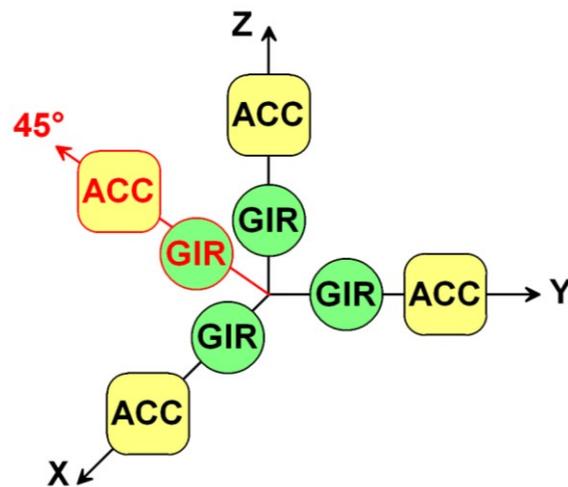
# Navigazione Inerziale



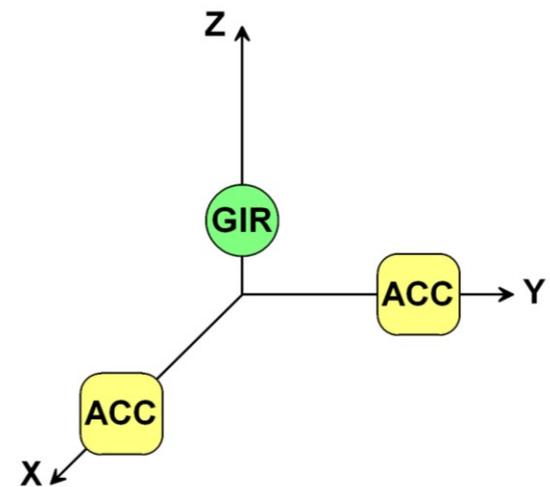
La navigazione INS (*Inertial Navigation System*) è basata sulla determinazione della variazione di posizione, velocità ed assetto (detti stati della navigazione) rispetto all'epoca precedente, a partire dalle accelerazioni e dalle velocità angolari misurate da una piattaforma IMU (*Inertial Measurement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



Configurazione tradizionale



Configurazione *redundant skewed*



Configurazione *reduced*

# Applicazioni Militari e Civili



Controllo di mezzi  
(in tempo reale)

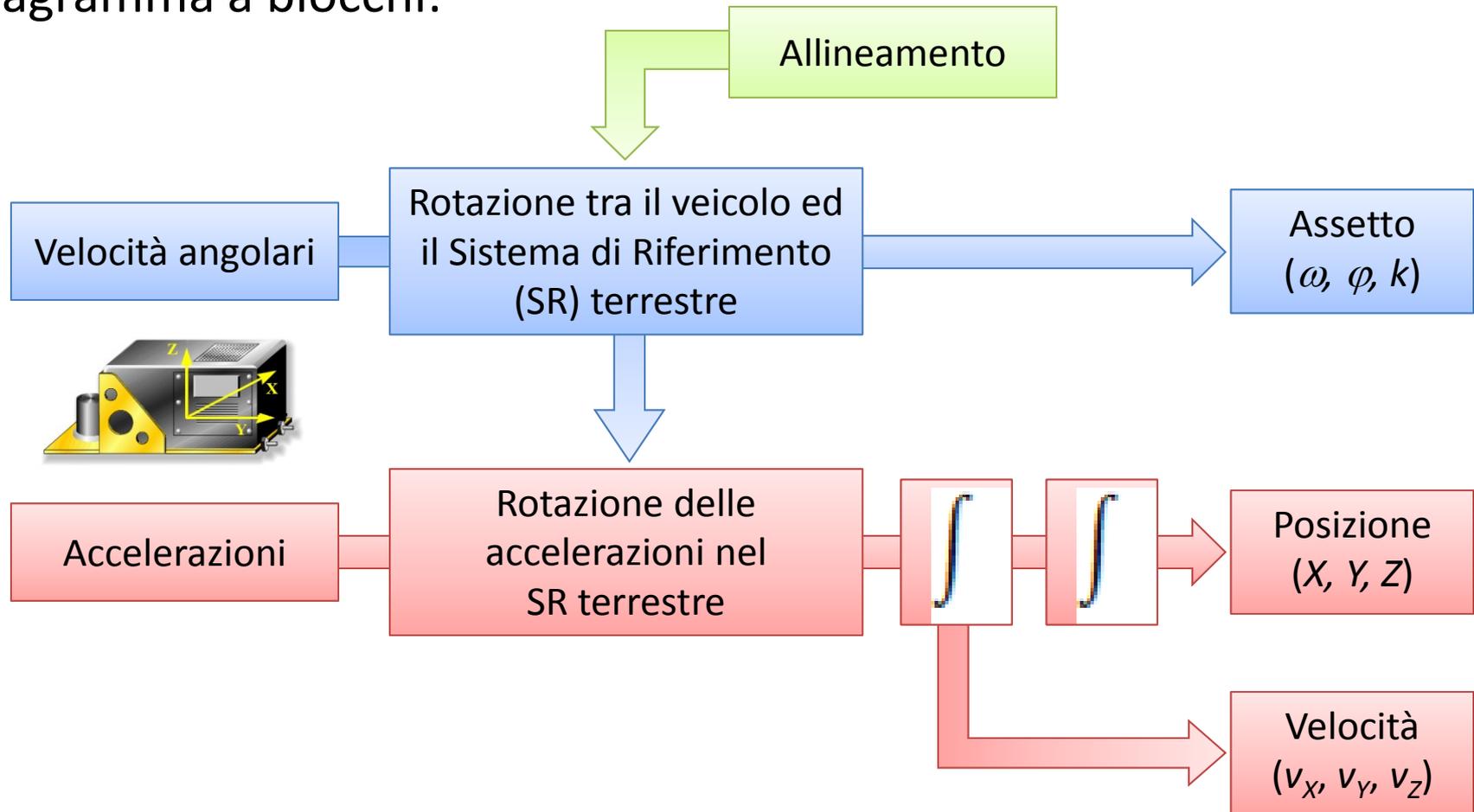


Navigazione Geodetica  
(in post-processamento)

# Schema di Funzionamento



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

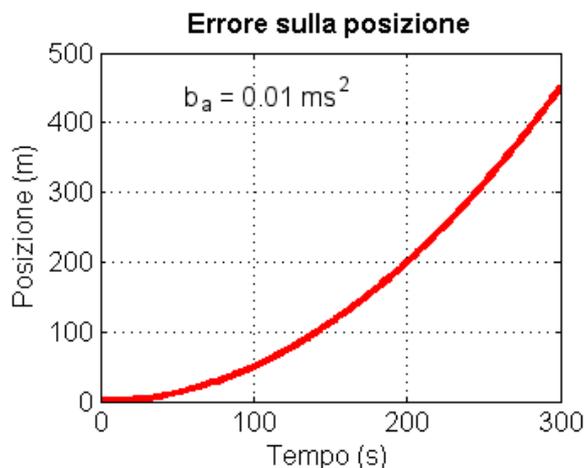
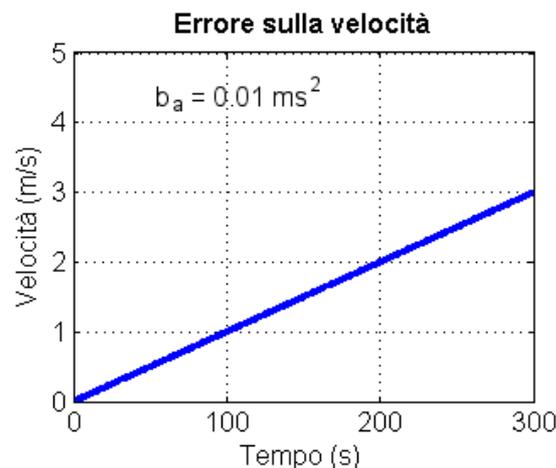


# Errori nel Posizionamento



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



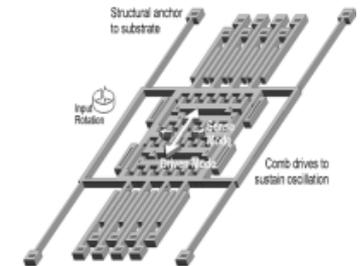
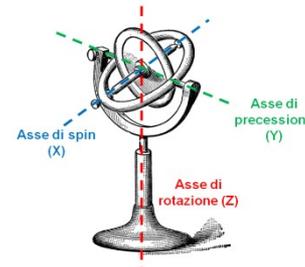
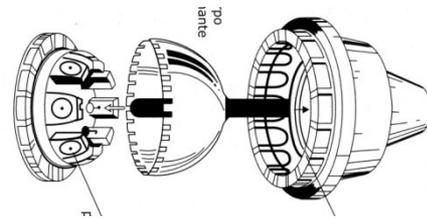
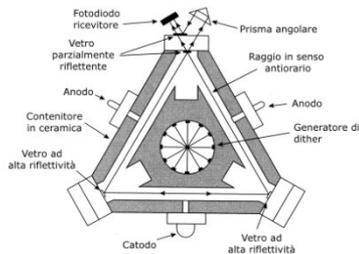
**Tactical-grade**  
veicoli/velivoli senza  
pilota, sistemi di  
rilievo mobile



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



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



**Giroscopi meccanici**

**Giroscopi meccanici**

**Giroscopi MEMS**

**a vibrazione**

**a massa rotante**

**(a vibrazione)**

**Giroscopi ottici**  
 $< 0.0001^\circ/h$  (RLG)  
 $0.001 - 1^\circ/h$  (FOG)

$0.01^\circ/h$  (HRG)  
 $1^\circ/h$  (QRS)

$1-10^\circ/h$  (RIG)  
 $1-50^\circ/h$  (DTG)

$60-3600^\circ/h$

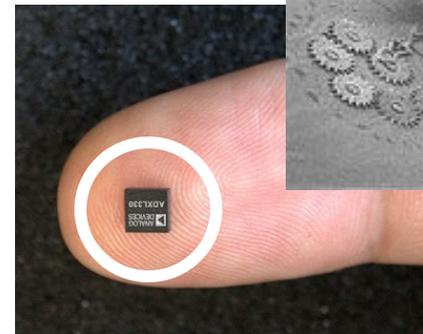
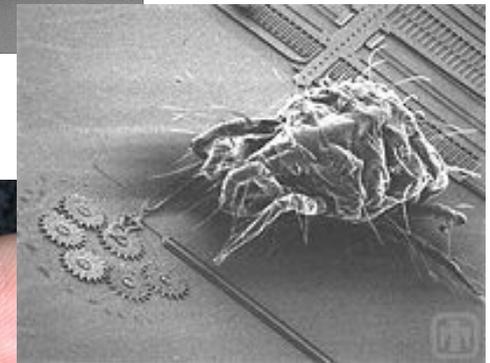
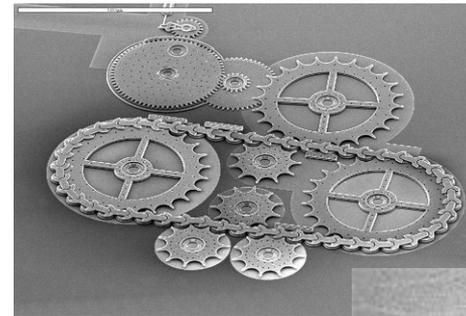


# I Sensori di Basso Costo



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.**



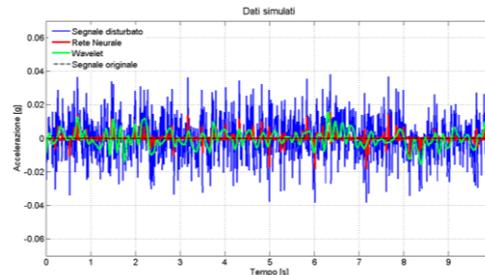
# I Sensori di Basso Costo



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

Tali errori possono essere ridotti attraverso:

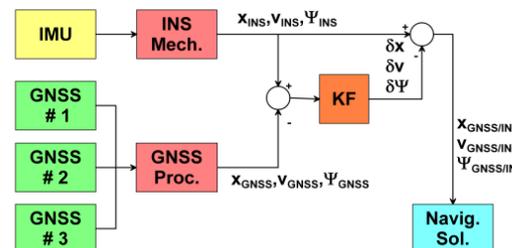
- Algoritmi di Filtraggio



- Calibrazione dei sensori in laboratorio



- Algoritmi di integrazione



# Parte II

## Le Incertezze di Misura

- Tipologie di Errore
- Modello di Errore
- Errori Accidentali
- Errori Sistemati
- 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:

$$\ddot{X}_{a,z} = b_{a,z} + s_{a,z} \cdot \ddot{X}_z + m_{a,zx} \cdot \ddot{X}_x + m_{a,zy} \cdot \ddot{X}_y + c_T (T - T_0) + V_{a,z}$$
$$\dot{\omega}_{g,z} = b_{g,z} + s_{g,z} \cdot \dot{\omega}_z + m_{g,zx} \cdot \dot{\omega}_x + m_{g,zy} \cdot \dot{\omega}_y + c_T (T - T_0) + V_{g,z}$$

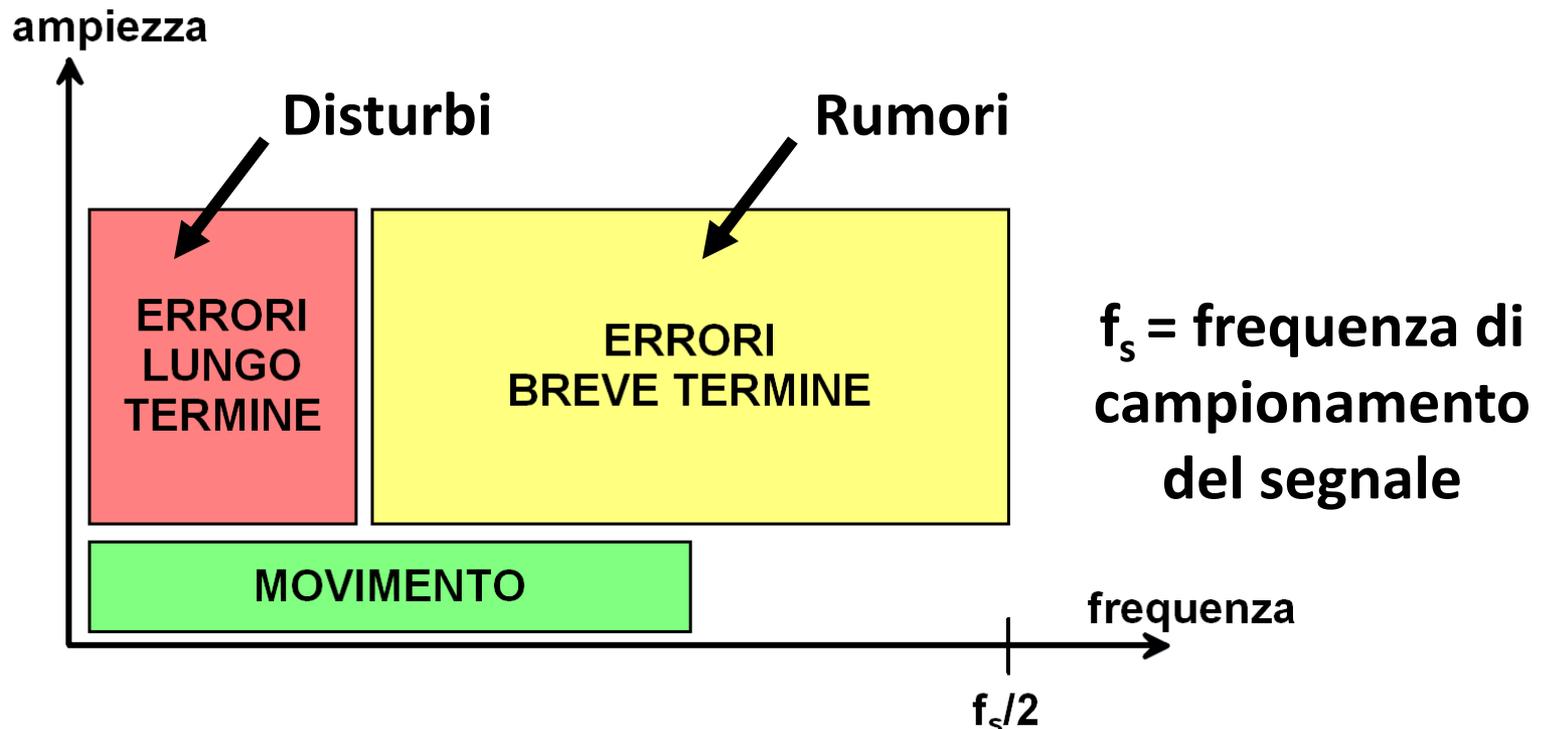
Output sensore =

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

# Errori Accidentali

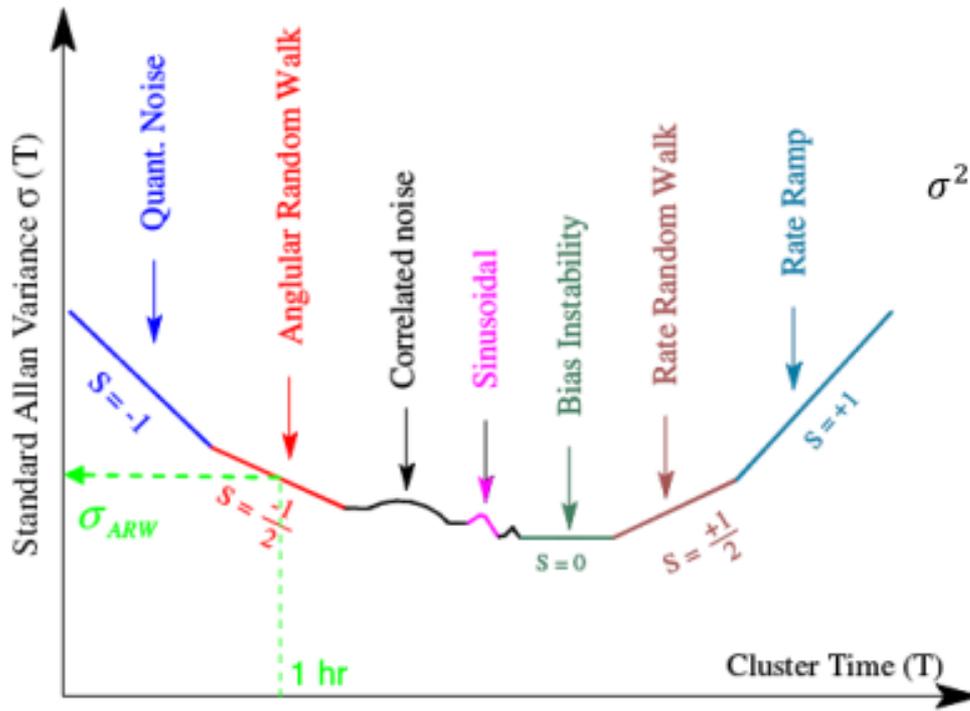


Sebbene inclusi generalmente all'interno del termine di **componente accidentale di misura**, rumori e disturbi possono essere distinti attraverso le loro **caratteristiche spettrali**.



# Errori Accidentali

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

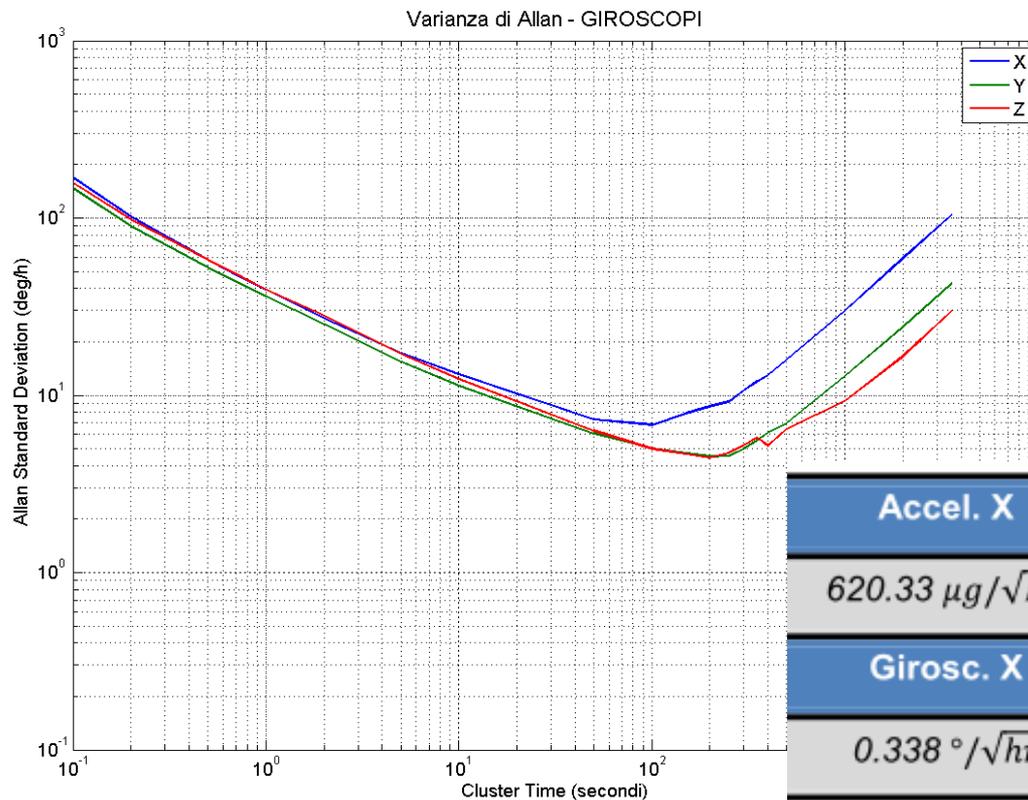


(fonte: El-Diasty et al., 2007)

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

# 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 $^{\circ}/\sqrt{\text{hr}}$     |

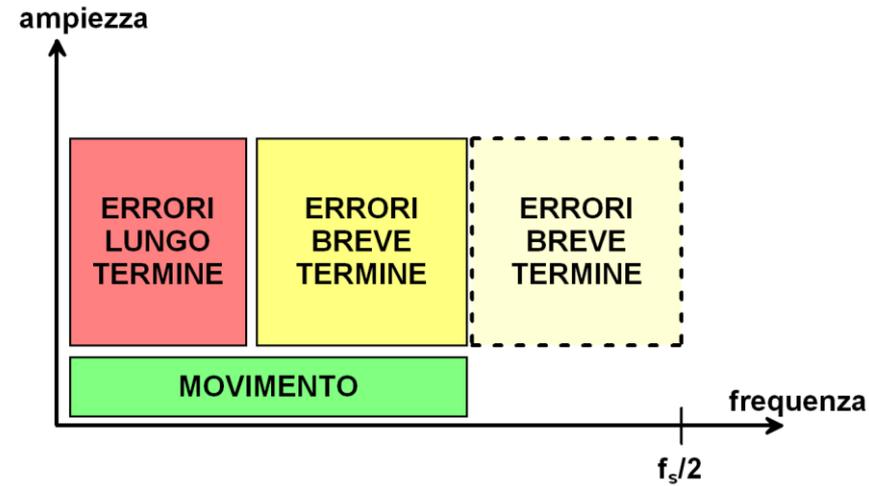
**Valori ricavati per il sensore Crossbow IMU 400-CC**

# Errori Accidentali



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

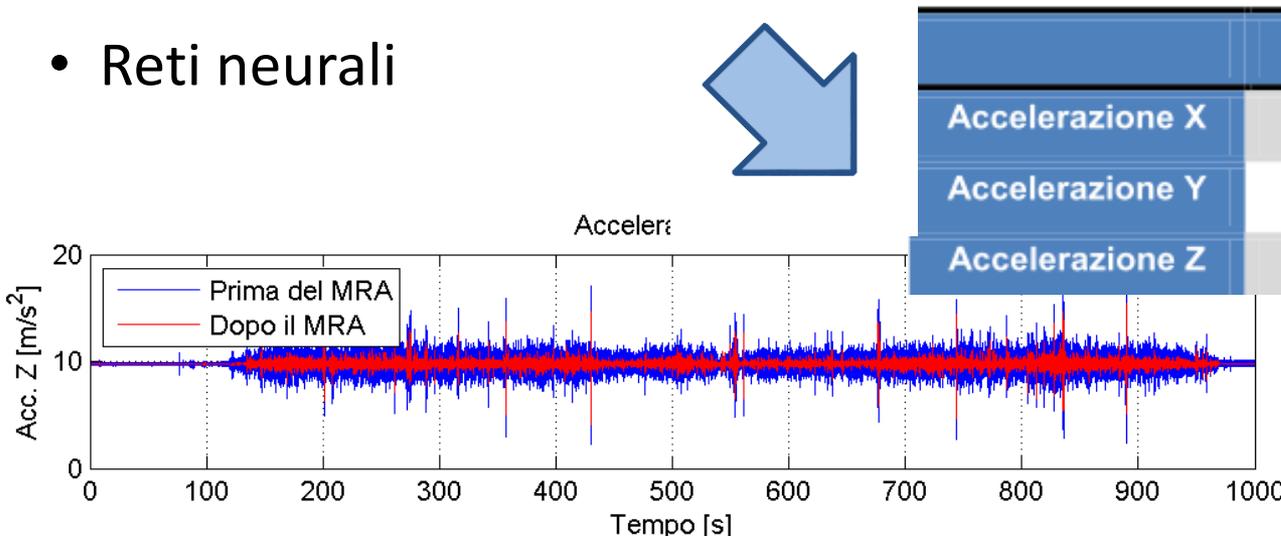
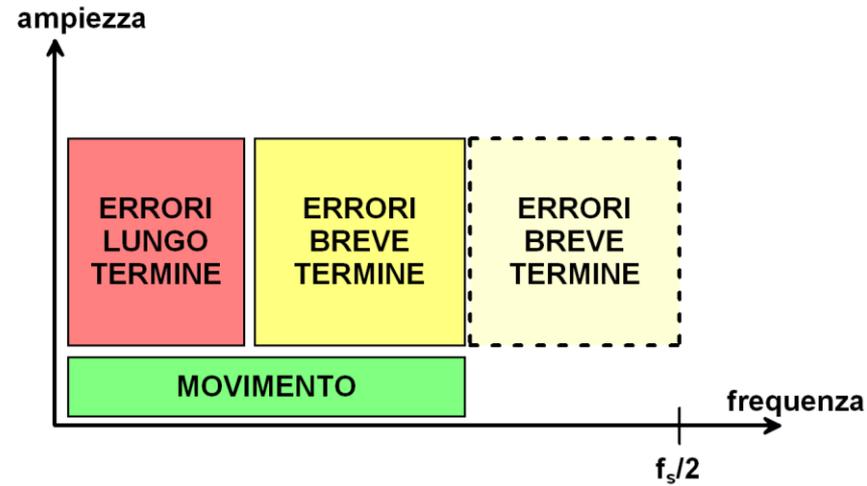
- Trasformata di Fourier
- **Analisi wavelet multirisoluzione (MRA)**
- Reti neurali



# 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

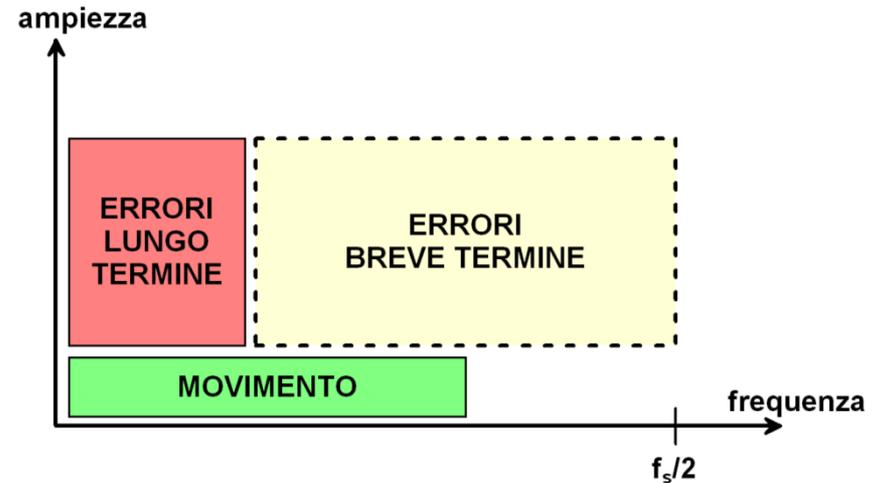
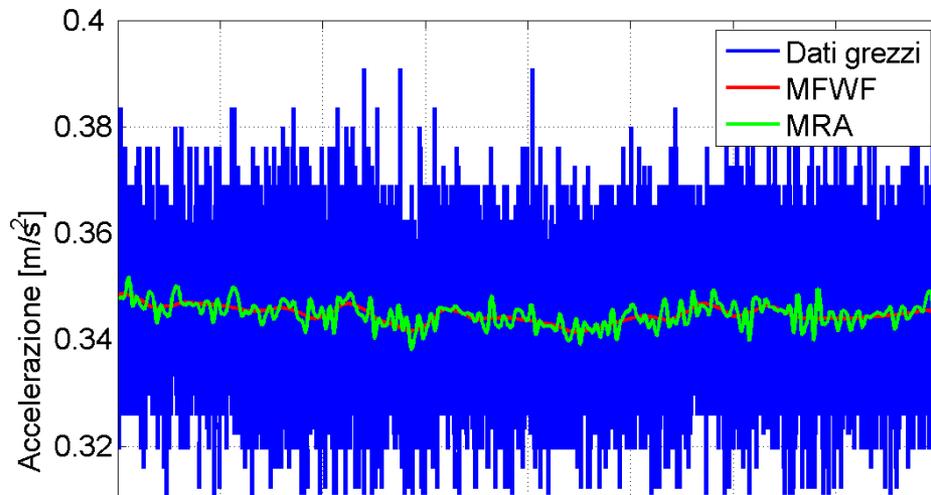


|                 | Prima del MRA          | Dopo il MRA            |
|-----------------|------------------------|------------------------|
| Accelerazione X | 0.762 m/s <sup>2</sup> | 0.467 m/s <sup>2</sup> |
| Accelerazione Y | 0.671 m/s <sup>2</sup> | 0.376 m/s <sup>2</sup> |
| Accelerazione Z | 0.638 m/s <sup>2</sup> | 0.310 m/s <sup>2</sup> |

**Problema**  
scelta della frequenza  
di filtraggio

# Errori Accidentali

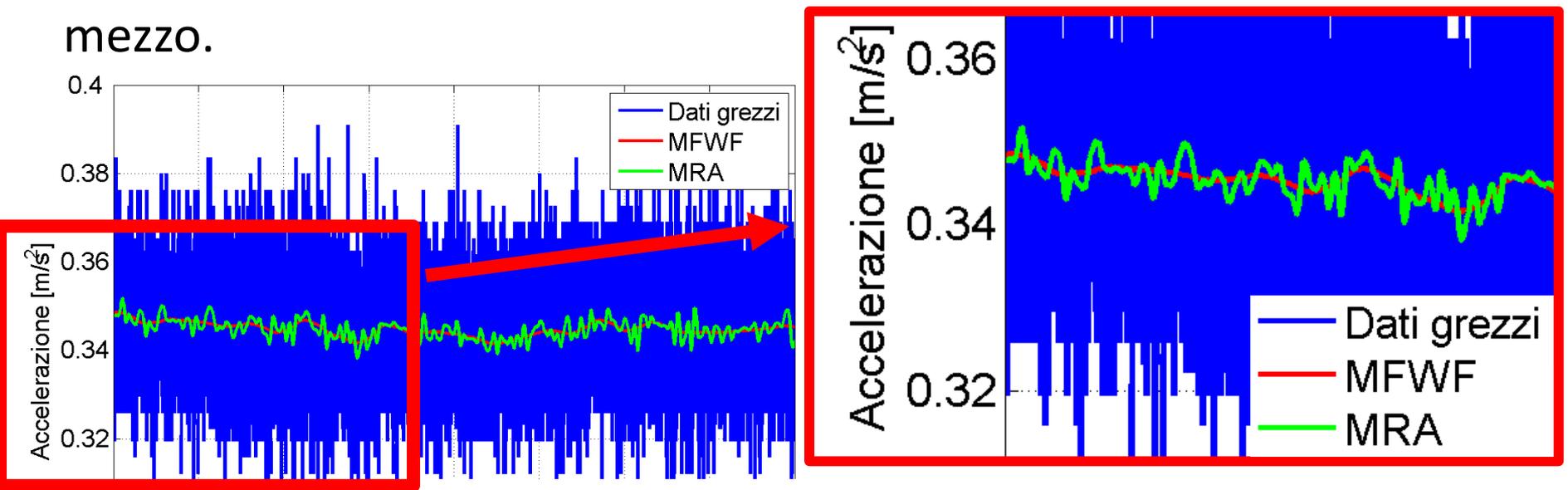
Sviluppo di una procedura di filtraggio wavelet **adattiva** (denominata **MFWF – Multi-Frequency Wavelet Filtering**), in grado quindi di far variare il livello di analisi in funzione della dinamica del mezzo.



|                           | Dati grezzi          | Filtraggio MRA        | Filtraggio MFWF       |
|---------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| SQM accelerazione X       | 13 mm/s <sup>2</sup> | 2.1 mm/s <sup>2</sup> | 1.3 mm/s <sup>2</sup> |
| SQM allineamento (rollio) | 0.28°                | 0.26°                 | 0.23°                 |

# 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.



|                           | Dati grezzi          | Filtraggio MRA        | Filtraggio MFWF       |
|---------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| SQM accelerazione X       | 13 mm/s <sup>2</sup> | 2.1 mm/s <sup>2</sup> | 1.3 mm/s <sup>2</sup> |
| SQM allineamento (rollio) | 0.28°                | 0.26°                 | 0.23°                 |

# Errori Sistematici

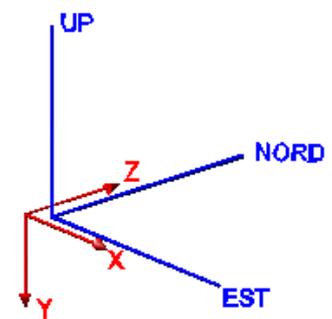
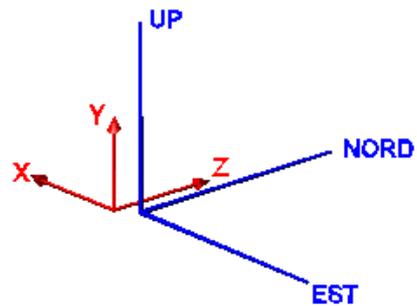
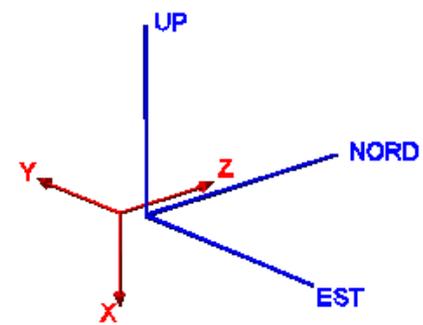
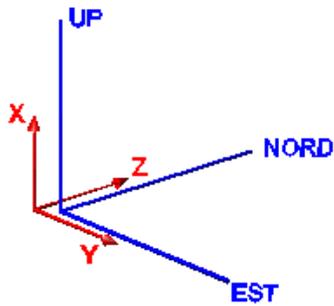
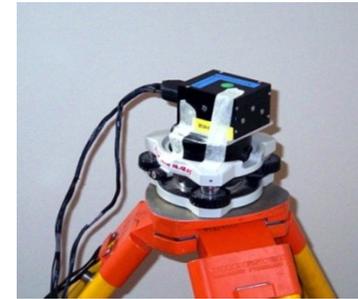
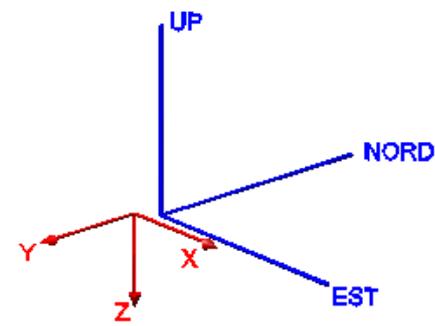
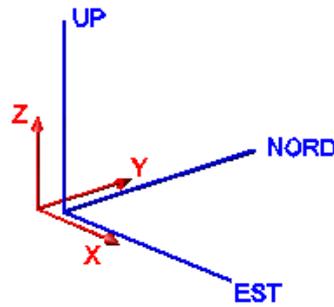
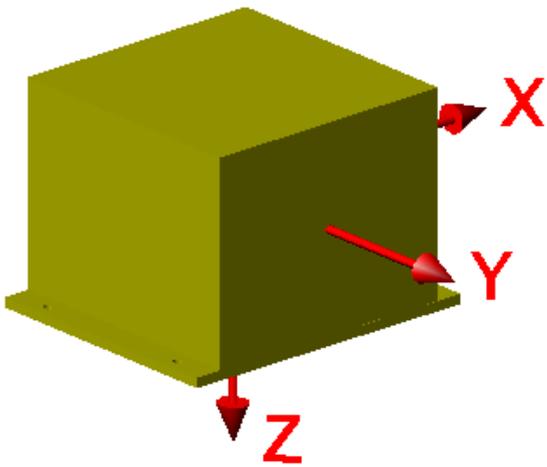


Gli errori sistematici possono essere ricavati attraverso una procedura di calibrazione, denominata **Test Statico delle Sei Facce** (*Six Position Static Test* - Standard IEEE 517).

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.

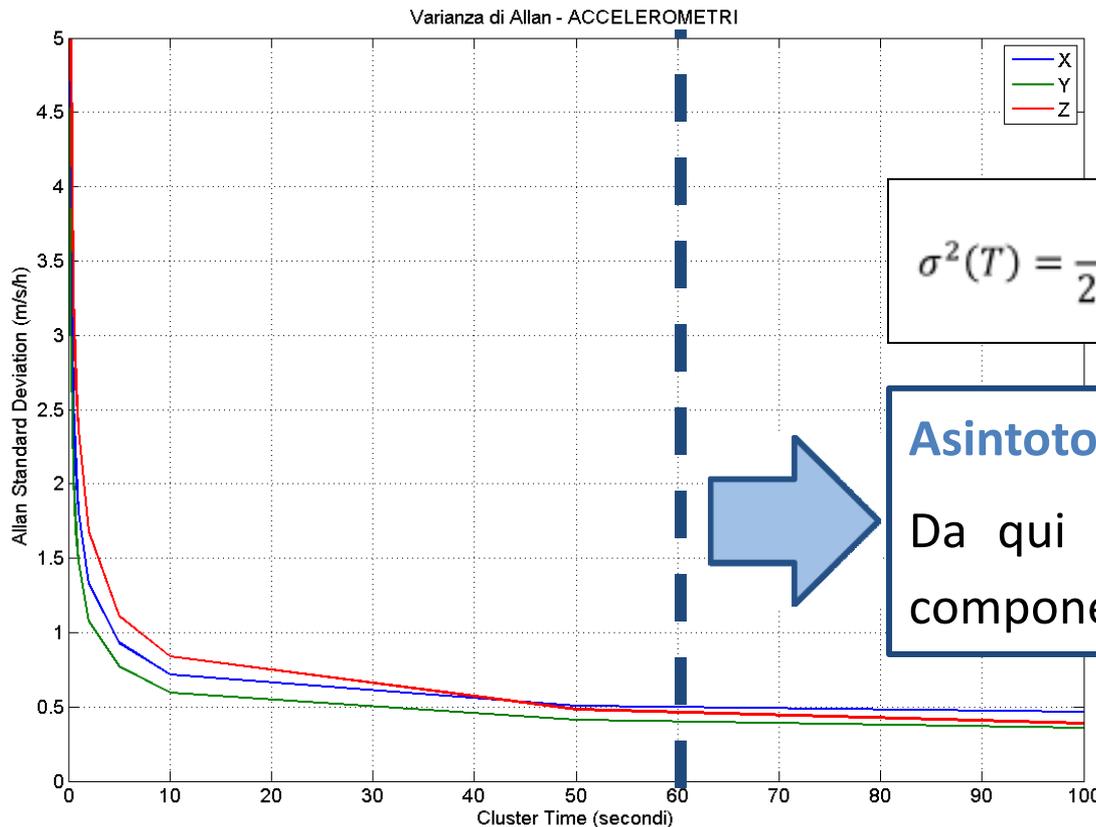
Dal **confronto tra gli output delle due facce opposte** (esattamente come accade con la regola di Bessel) si ha una stima degli errori sistematici.

# 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

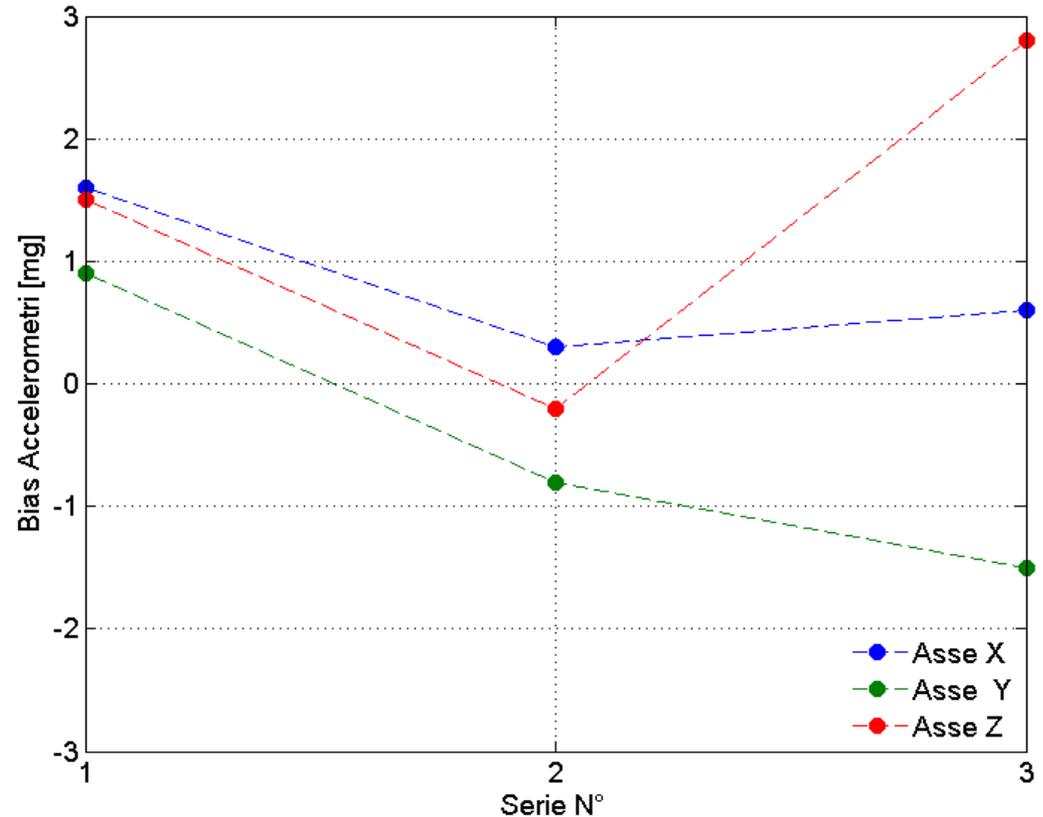
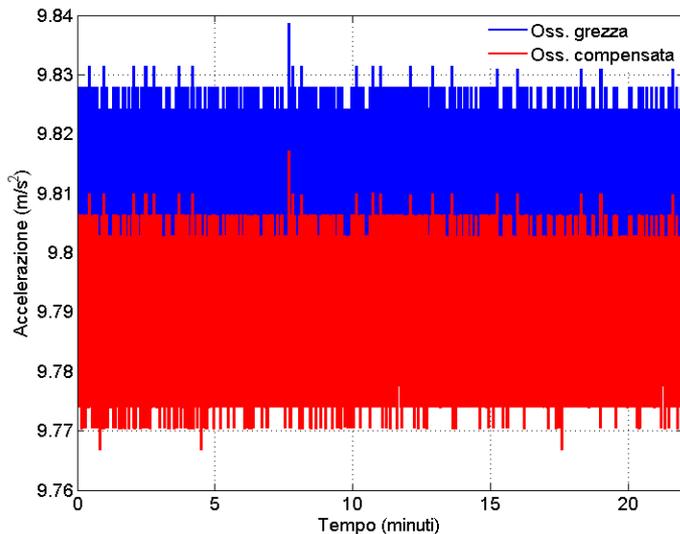
# Errori Sistematici

| 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

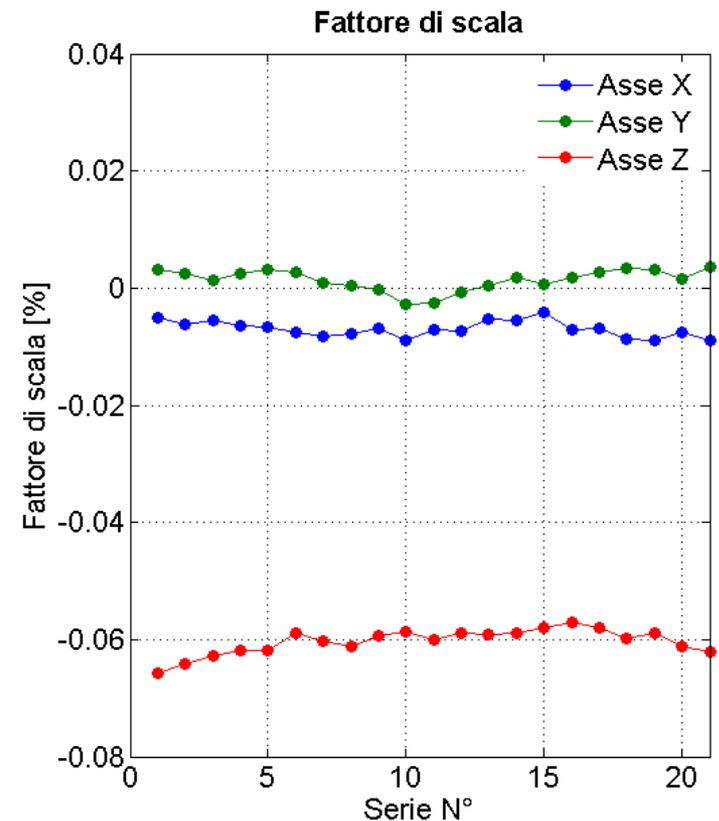
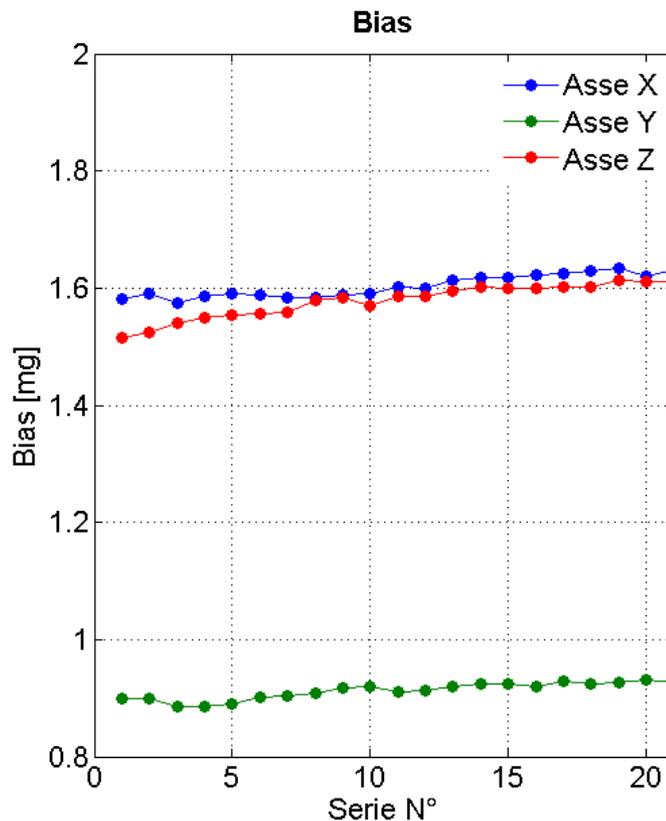


| Girosc.              | $b_x$    | $b_y$    | $b_z$    |
|----------------------|----------|----------|----------|
| 1 <sup>a</sup> serie | -0.34°/s | 0.07°/s  | 0.10°/s  |
| 2 <sup>a</sup> serie | -0.50°/s | -0.05°/s | -0.01°/s |
| 3 <sup>a</sup> serie | -0.59°/s | -0.07°/s | -0.03°/s |



# Errori Sistematici

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



Crossbow IMU 400-CC

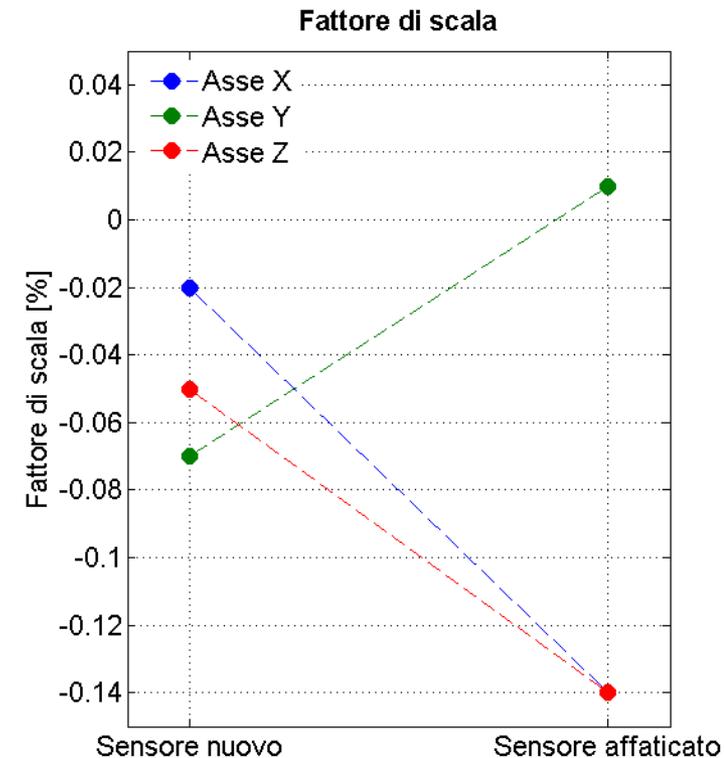
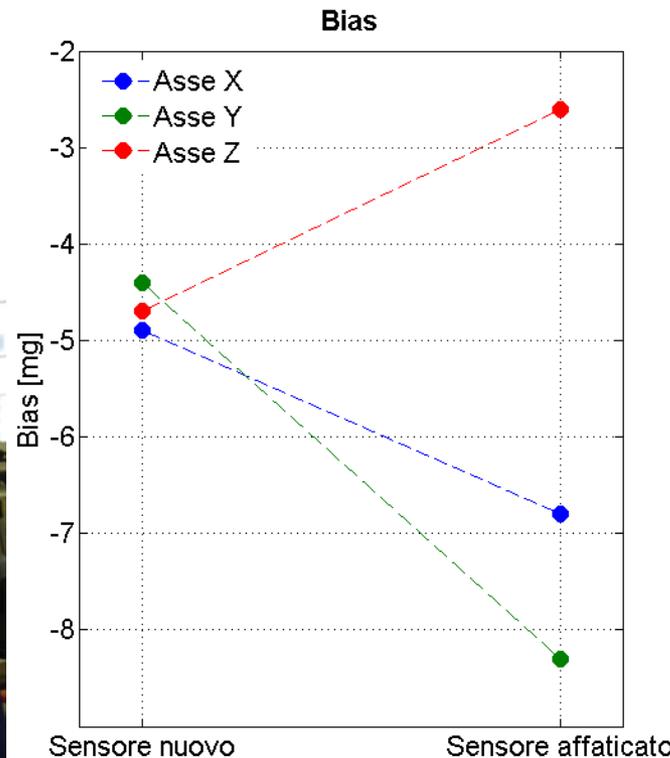
# Ripetibilità degli errori



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



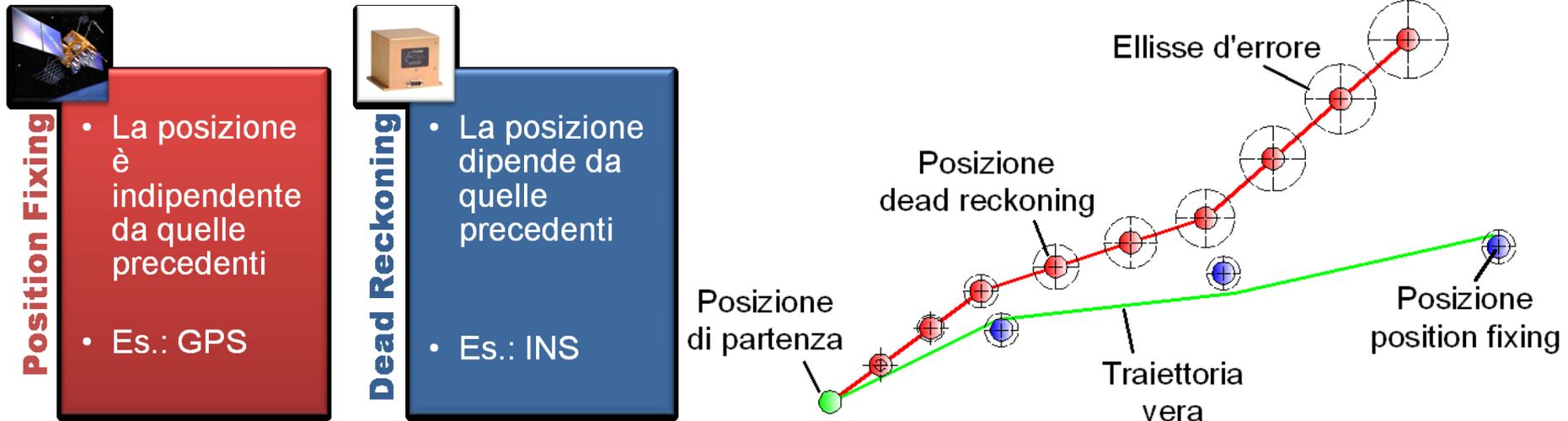
Disegno di Gea Ferraris

# 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.



# Navigazione Assistita



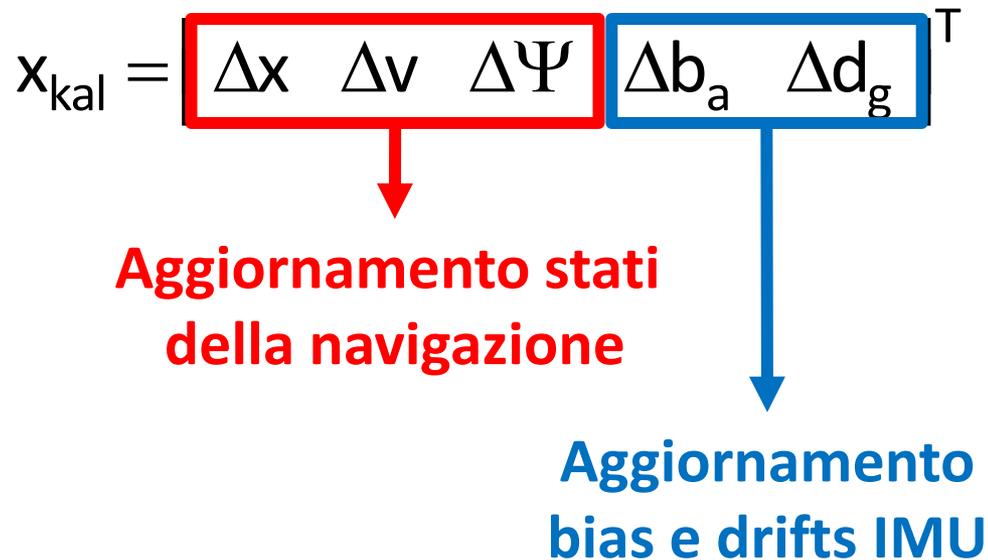
In particolare, il connubio tra il sistema **INS** ed il sistema **GNSS** è l'integrazione che ha preso più piede negli ultimi anni, soprattutto vista la **complementarietà** dei due sistemi.



# 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.



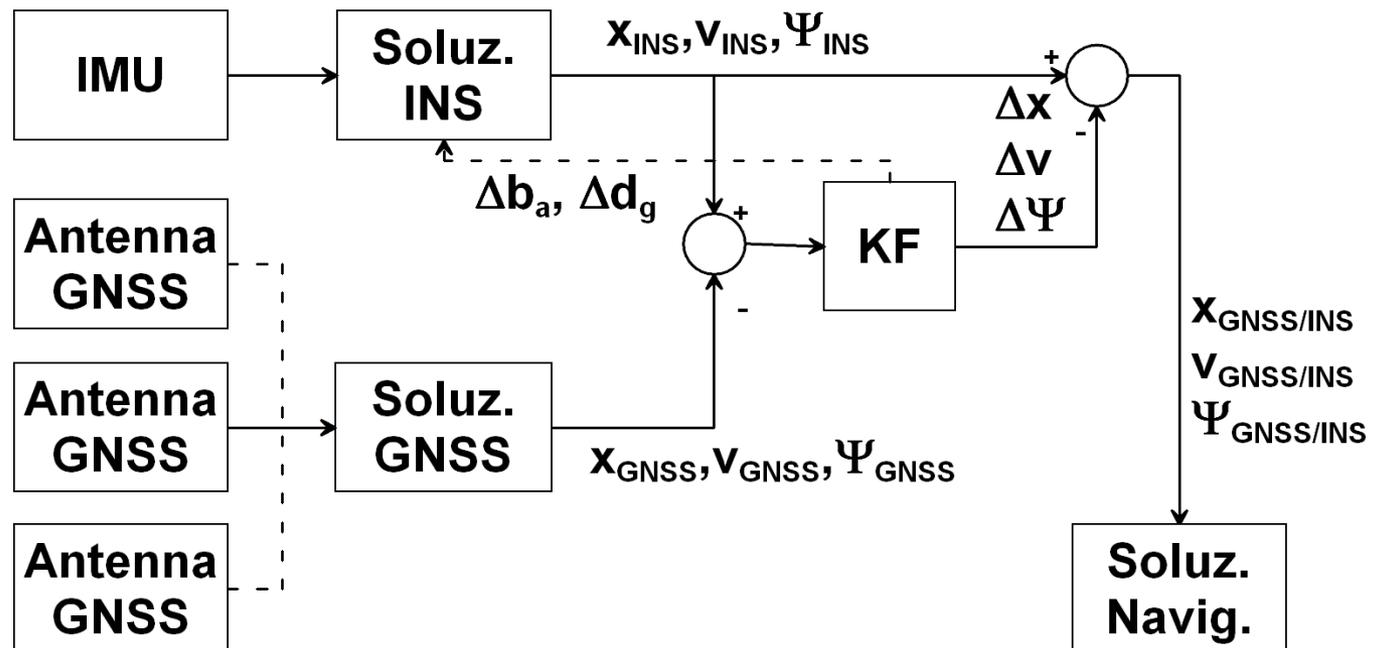
# Integrazione *loosely-coupled*



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

$$\mathbf{x}_{\text{kal}} = \left[ \Delta x \quad \Delta v \quad \Delta \Psi \quad \Delta b_a \quad \Delta d_g \right]^T$$

**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:

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

A red arrow points from the  $\Delta x$  and  $\Delta v$  components to the text 'Aggiornamento stati della navigazione'. A blue arrow points from the  $N_{\text{RM}}^{ij}$  component to the text 'Ambiguità DD'.

**Aggiornamento  
stati della  
navigazione**

**Ambiguità  
DD**

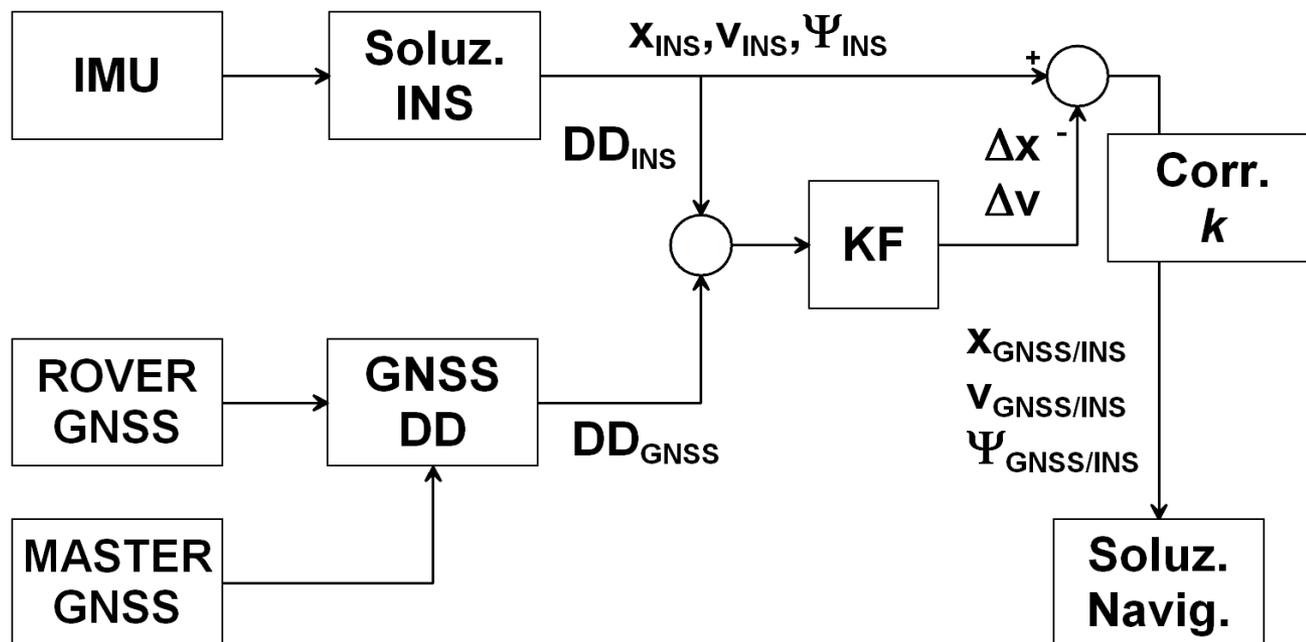
# Integrazione *tightly-coupled*



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

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

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 | <b>No</b>       | <b>Sì</b>       |
| Accuratezza della stima dei bias   | <b>Ridotta</b>  | <b>Elevata</b>  |
| Carico computazionale              | <b>Basso</b>    | <b>Alto</b>     |
| Complessità del sistema            | <b>Bassa</b>    | <b>Alta</b>     |

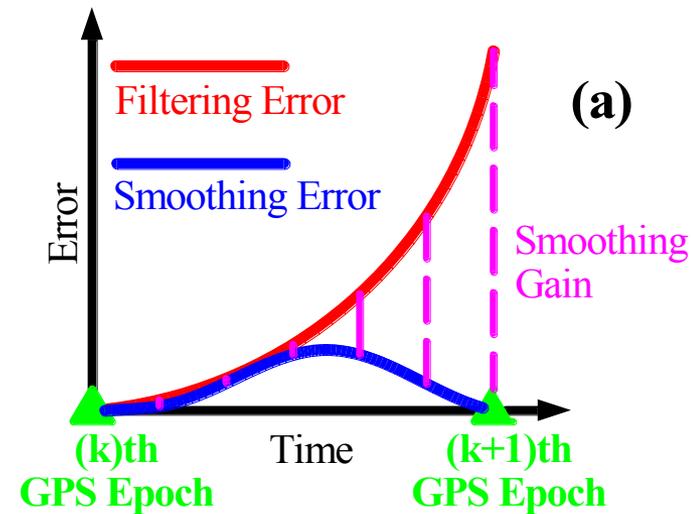
# Il Lisciamento Retro-Propagato



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 epoche GNSS.

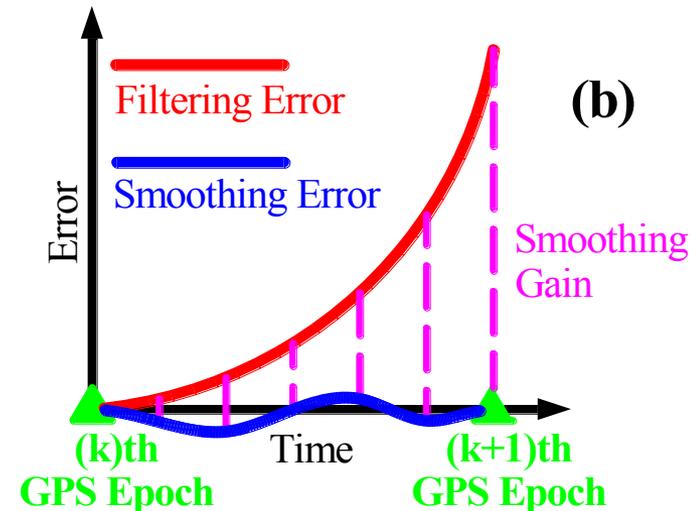
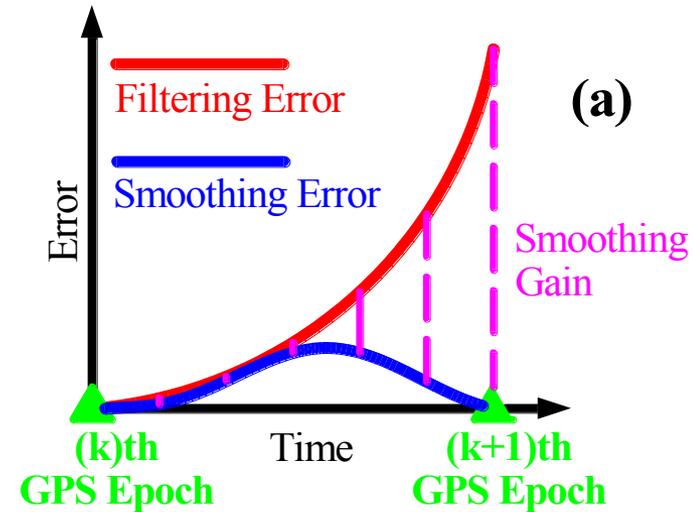


# Il Lisciamento Retro-Propagato

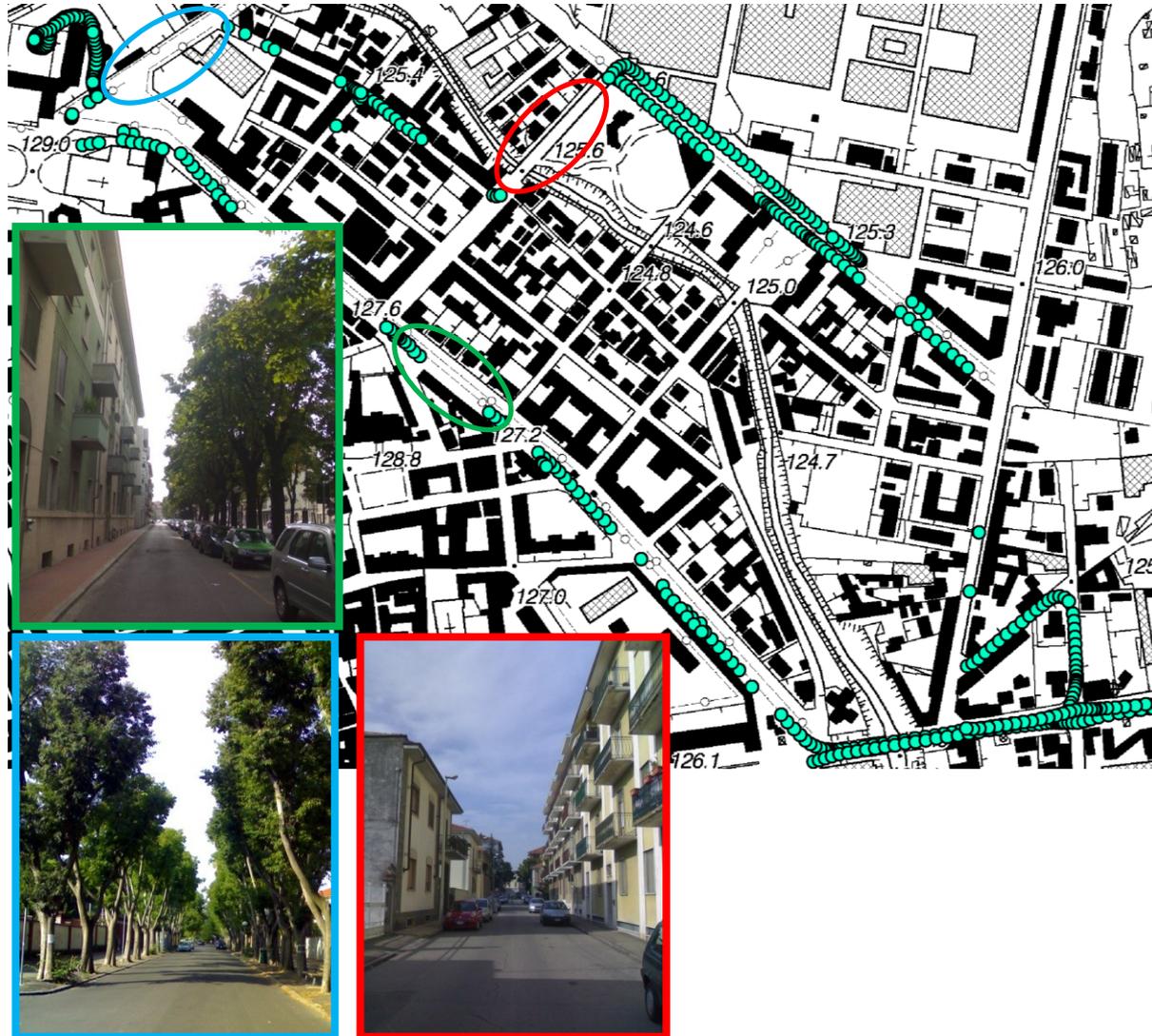


È stata realizzata una soluzione alternativa, utilizzando le informazioni provenienti dal Filtro di Kalman (filtro e lisciamento), **retro-propagando** gli effetti degli errori residui di accelerometri e giroscopi tra due epoche GNSS.

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



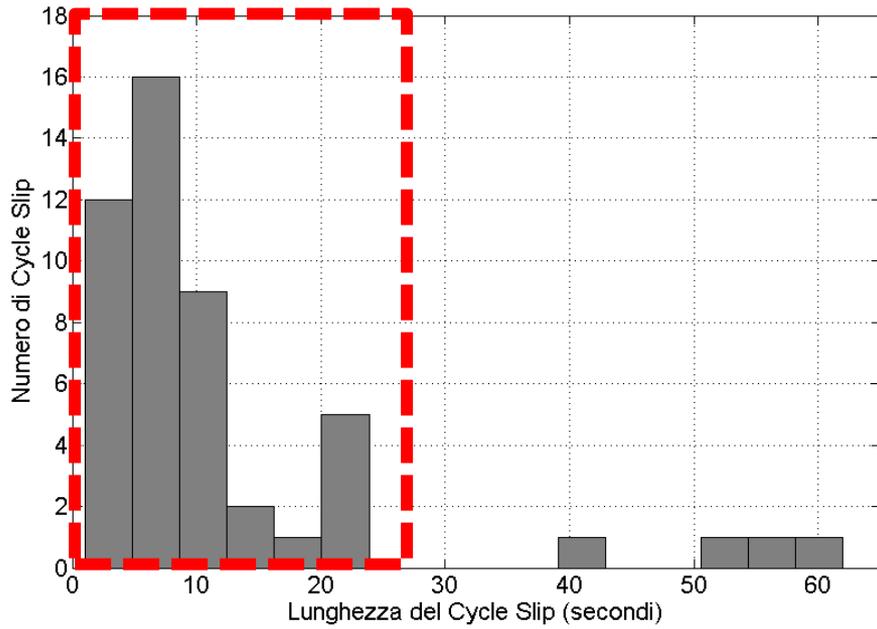
# Test in Ambiente Urbano



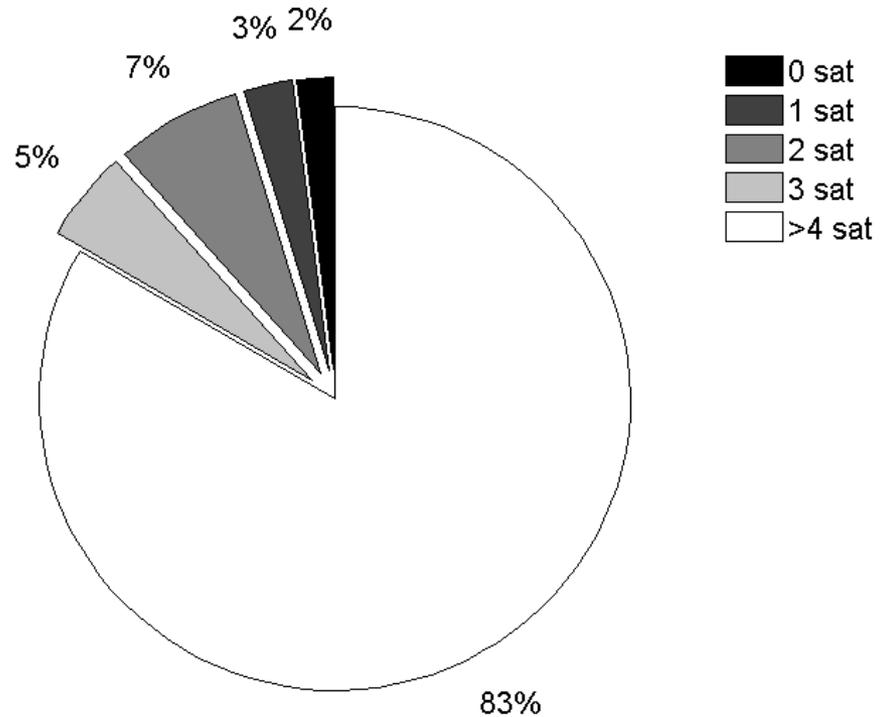
Allo scopo di valutare la **lunghezza media dei cycle slip** in un **ambiente urbano**, è stato condotto un test nel centro urbano di Vercelli (Piemonte)

durata: ~ 40 minuti  
velocità: 50 km/h

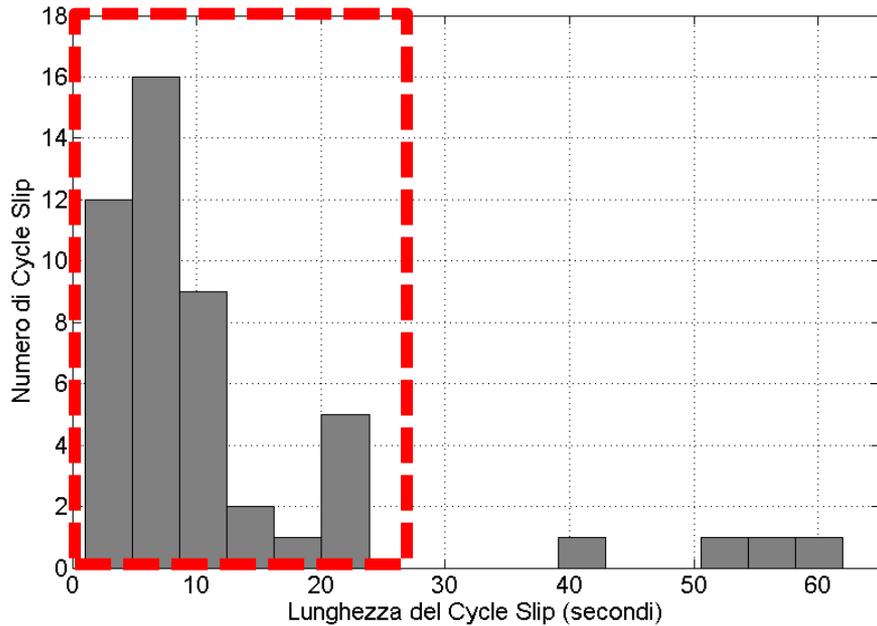
# Test in Ambiente Urbano



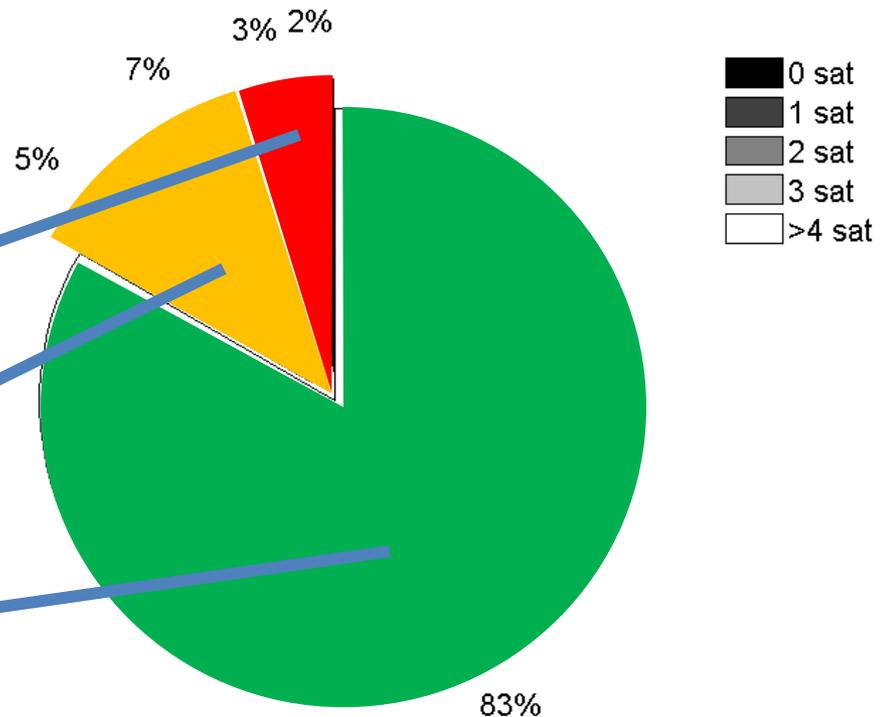
**90%** dei *cycle slip* in ambiente urbano ha una durata **minore di 20 - 25 s.**



# 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...

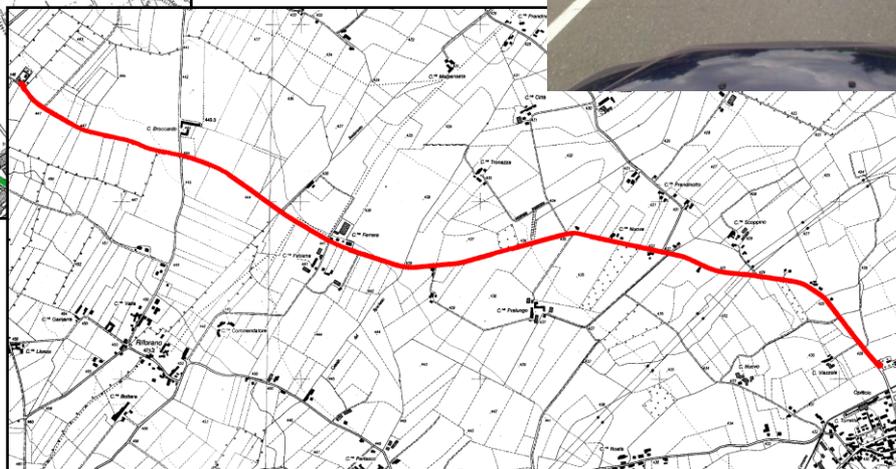
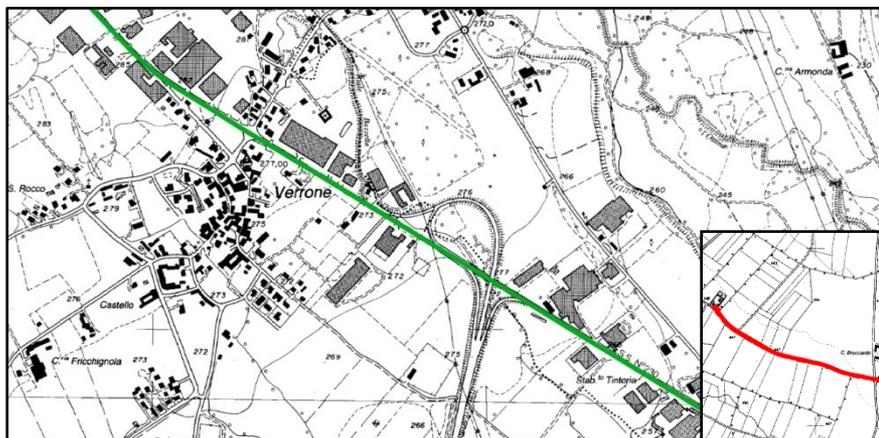
...e qui? Solo *tightly-coupled*!

Qui entrambi gli algoritmi funzionano bene!

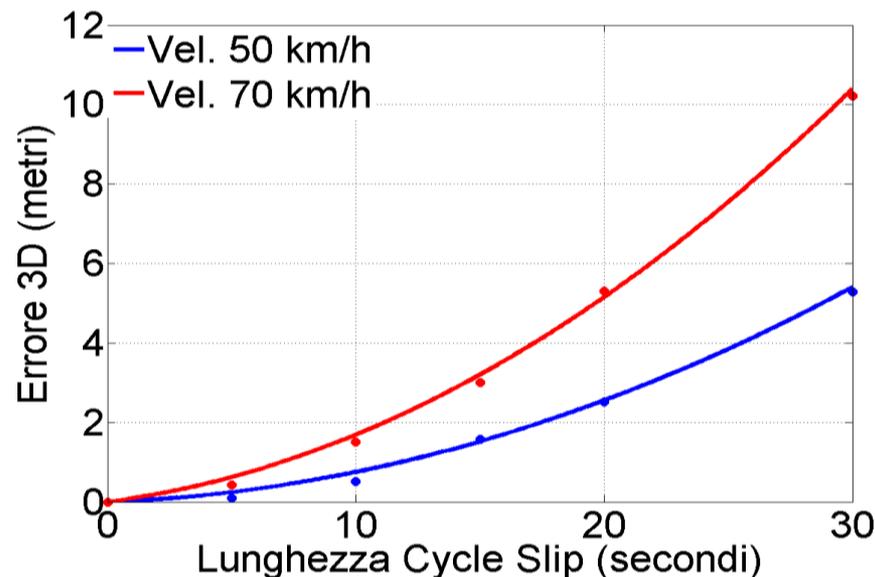
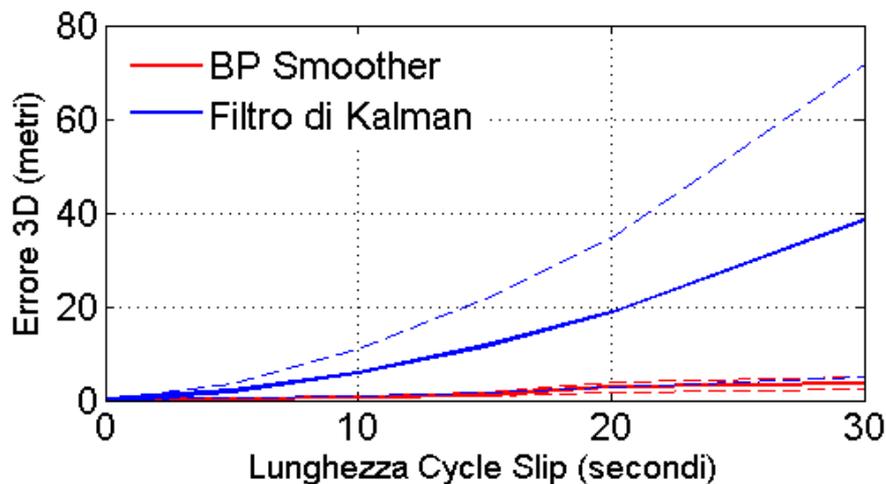
# Affidabilità dell'Integrazione



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.



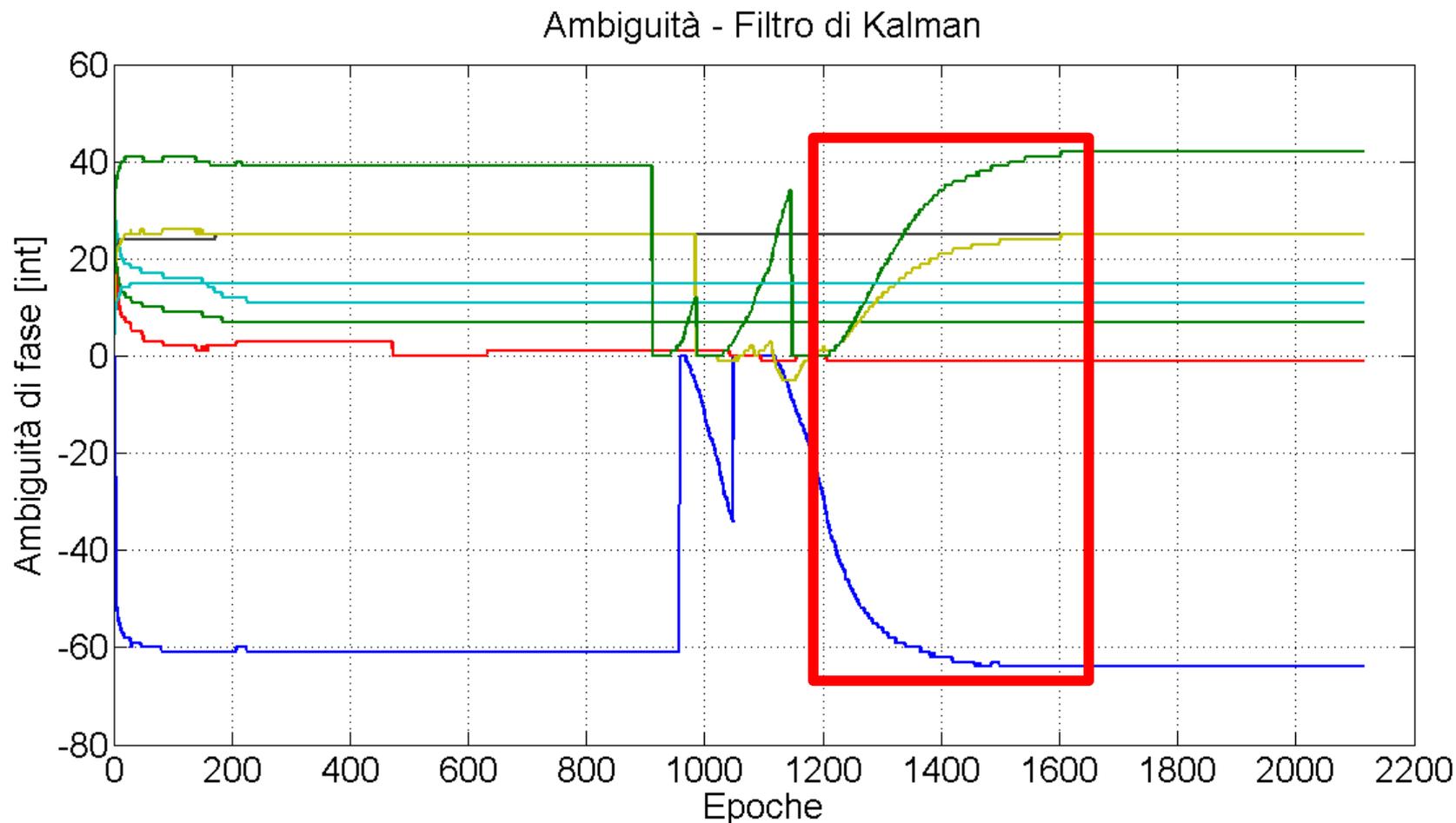
# Affidabilità dell'Integrazione



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

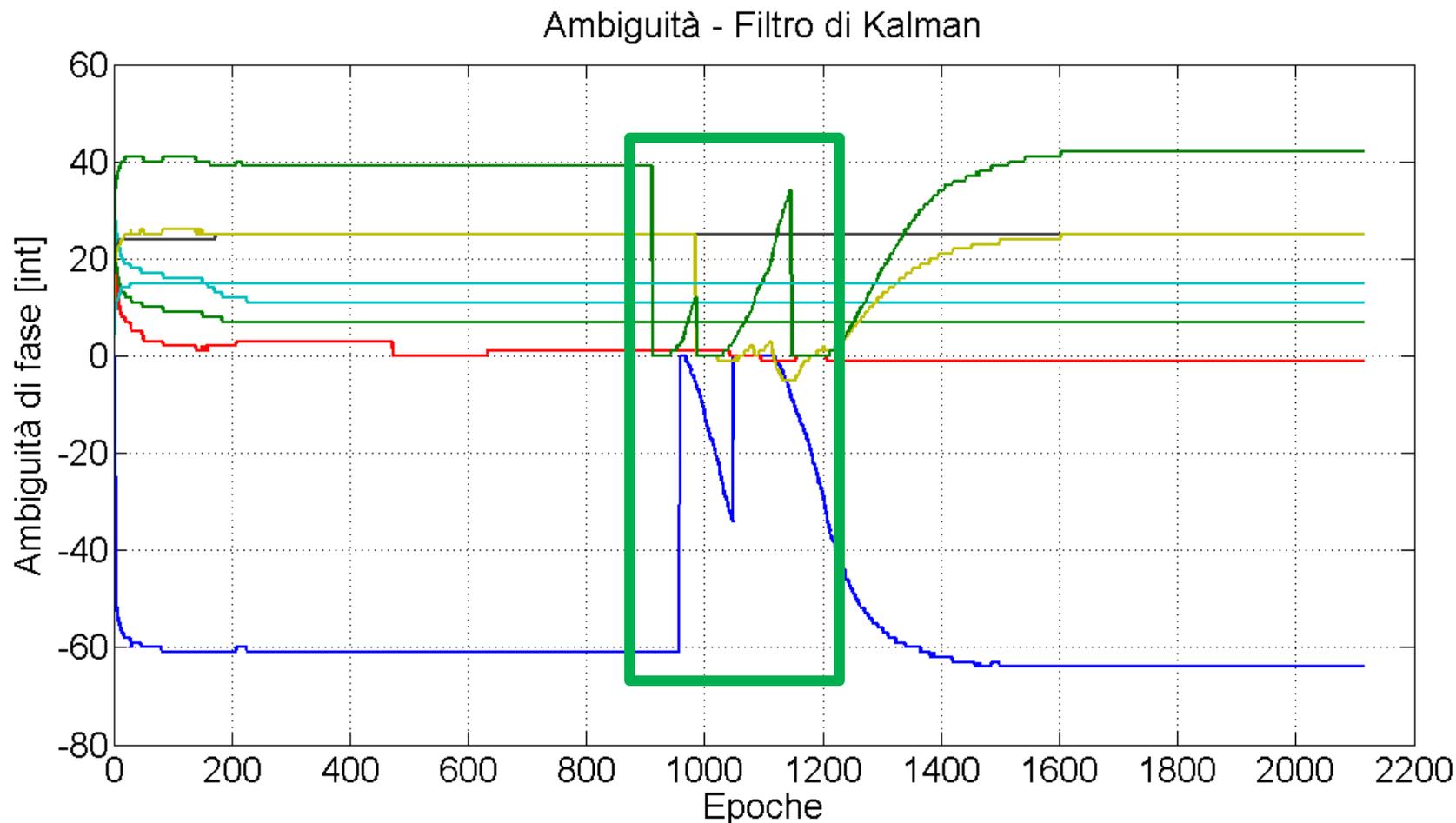
| Durata CS | Test 50 km/h | Test 70 km/h |
|-----------|--------------|--------------|
| 5 s       | 0.10         | 0.42         |
| 10 s      | 0.52         | 1.51         |
| 15 s      | 1.58         | 3.01         |
| 20 s      | 2.52         | 6.30         |
| 30 s      | 5.29         | 10.21  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

# Affidabilità dell'Integrazione



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

# Affidabilità dell'Integrazione



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

# Parte IV

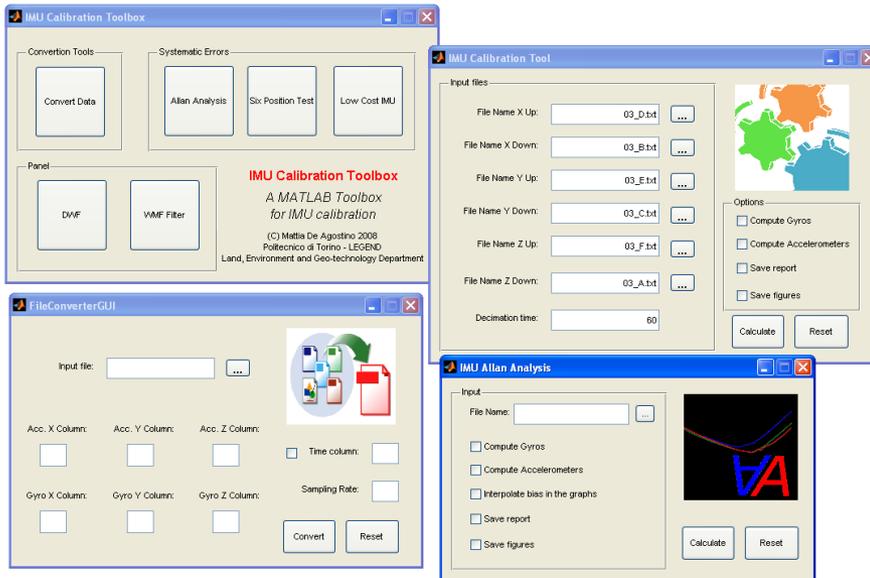
## Applicazioni

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



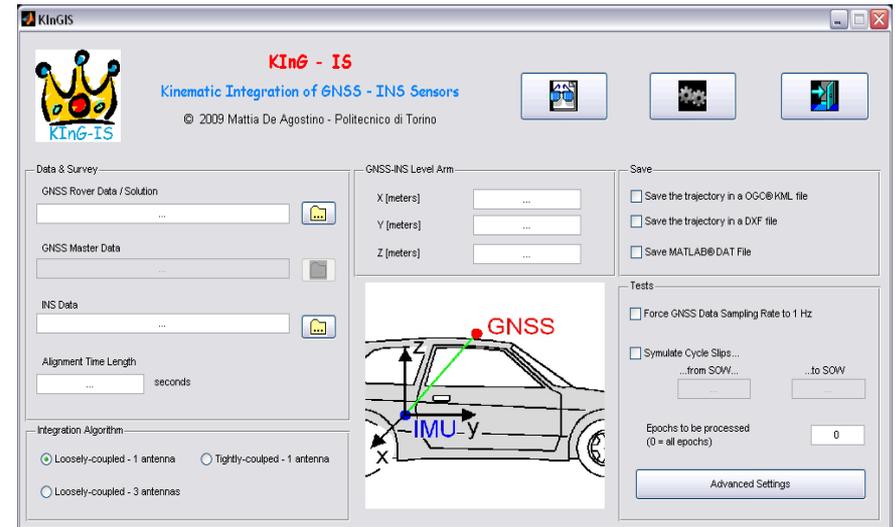
Disegno di Gea Ferraris

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

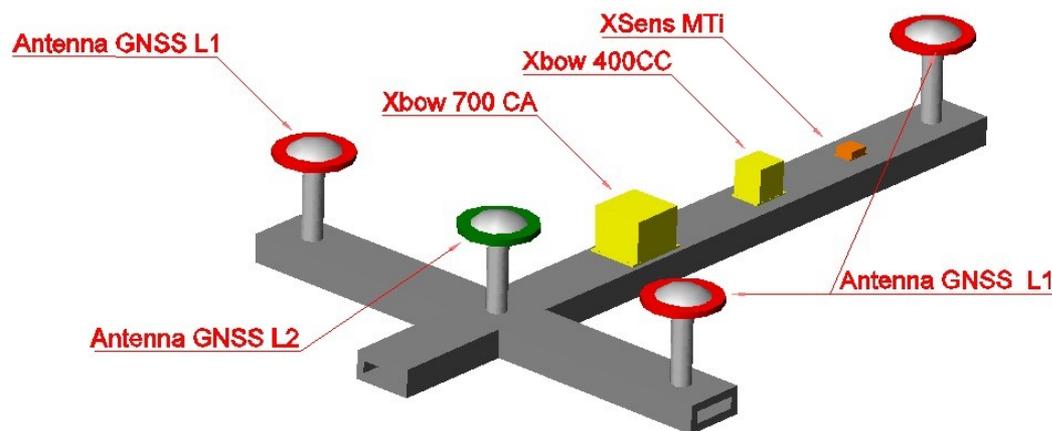
Programma per il posizionamento GNSS/INS

# 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

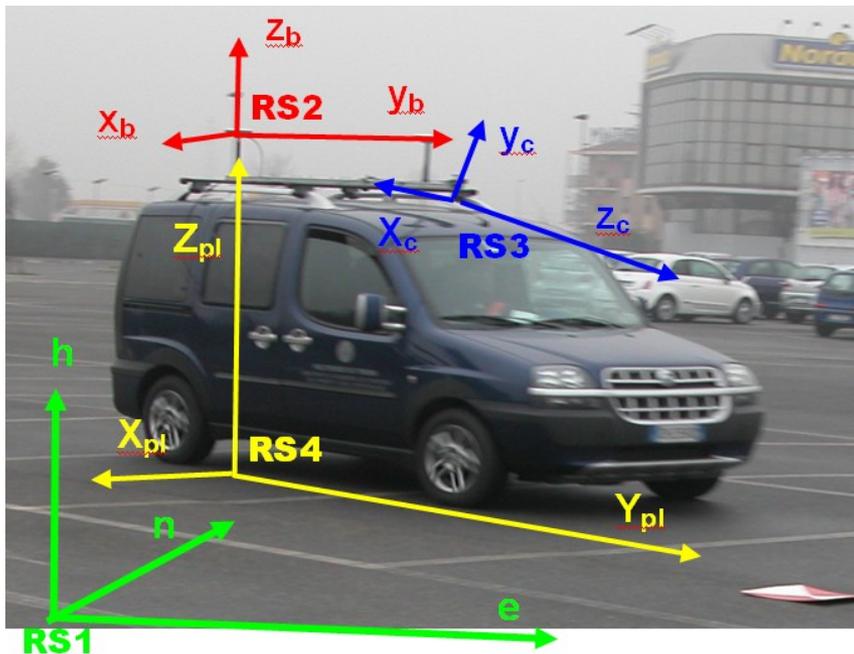


# Veicolo Rilevatore di Basso Costo



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

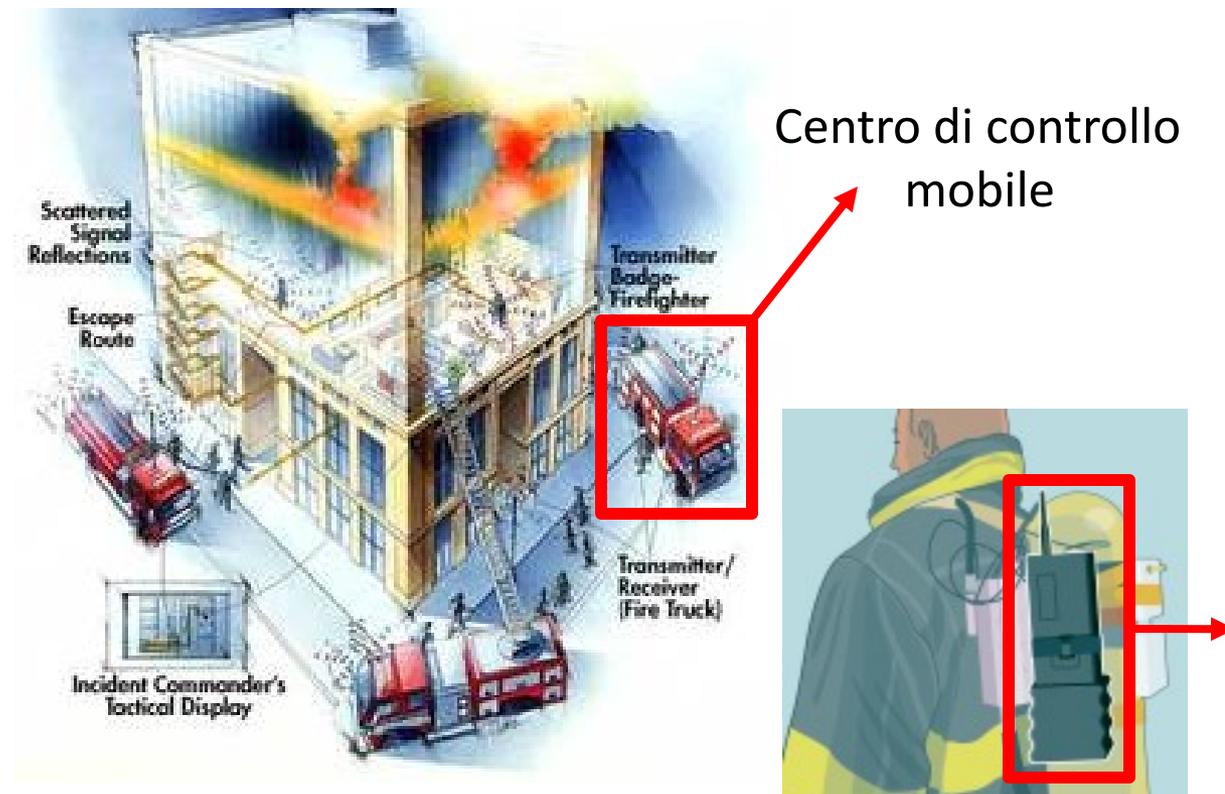
- stima dei parametri di **orientamento interno delle camere** e definizione della curva di distorsione;
- orientamento dei **sistemi di riferimento** dei diversi sensori.



# Navigazione Pedestre



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



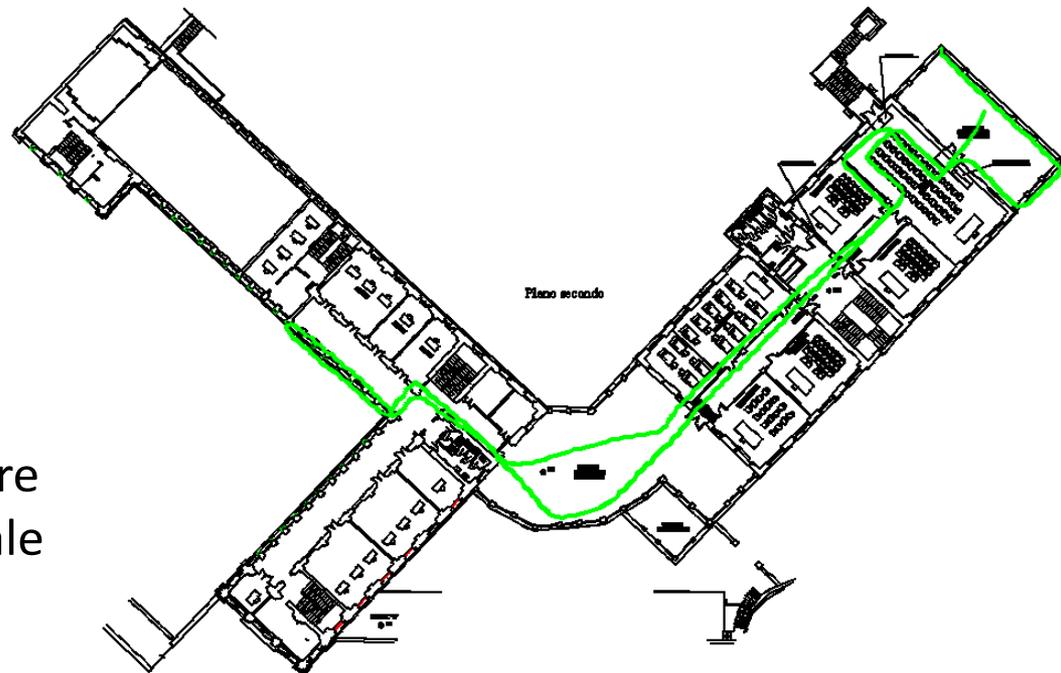
Sistema portatile, in grado di calcolare la posizione e di inviarla (via radio/GSM) ad un centro di controllo fuori dall'edificio.

# 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.*”