

# Dispositivi Minimamente Invasivi

per Diagnosi, Monitoraggio e Terapia

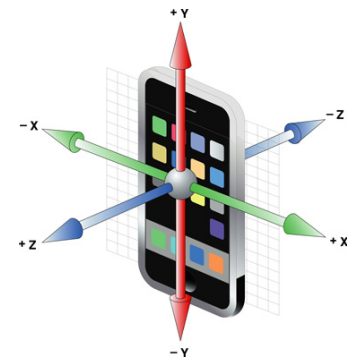
## Esercitazione 11

Nicola Carbonaro

[nicola.carbonaro@centropiaggio.unipi.it](mailto:nicola.carbonaro@centropiaggio.unipi.it)

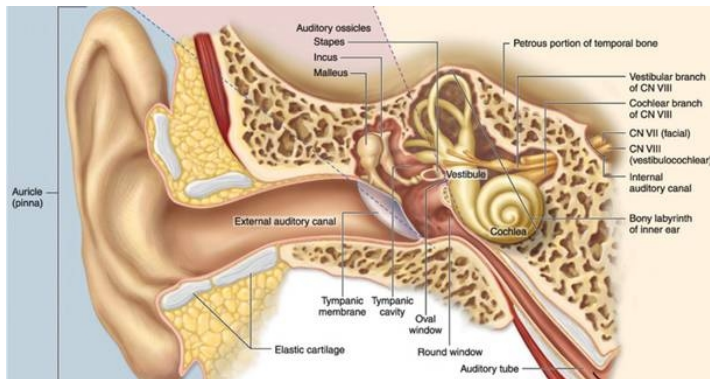
# Sensori Inerziali

- Negli ultimi anni gli sviluppi tecnologici, hanno permesso la costruzione di sensori sempre più economici e di dimensioni ridotte, che li rendono perfettamente idonei nell'integrazione in dispositivi "indossabili".
- MEMS - - > Micro Electro-Mechanical Systems
  - Accelerometri, Giroscopi, compassi digitali, sensori inerziali
- Accelerometri sono i sensori maggiormente usati
  - Integrati in smartphone, tablet..etc
- Principali applicazioni:
  - Monitorare il movimento, la postura, tipo e quantità di attività, eventi di caduta, stimare l'energia metabolica consumata, analisi del passo, e le attività quotidiane
  - Facilmente applicabili ai segmenti corporei di interesse



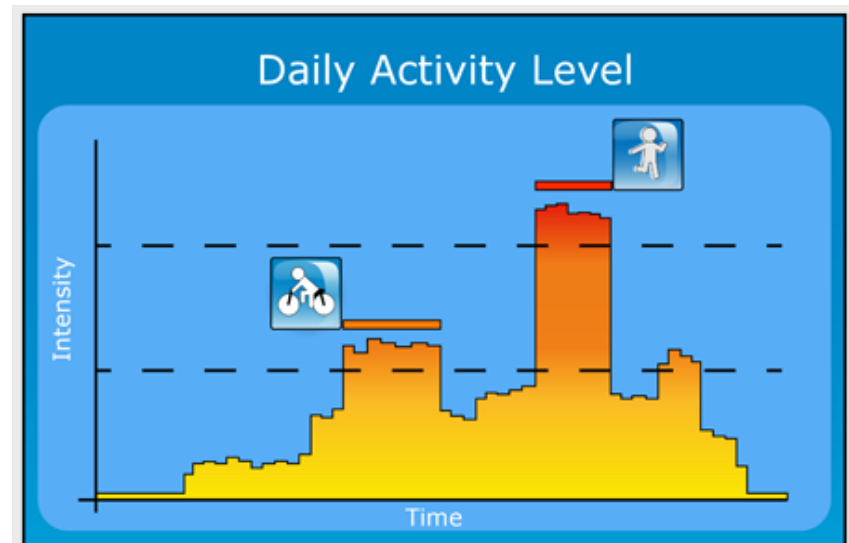
# Sensori inerziali

- Accelerazioni, velocità angolari
  - Indirettamente angoli articolari
- Sfruttano la proprietà dei corpi di mantenere costante la propria velocità se non disturbati da forze esterne
  - Esempio Sensore inerziale “biologico”
    - Sistema vestibolare umano
      - Sensibile alle accelerazioni lineari e angolari della testa
      - Equilibrio e mantenimento della postura eretta

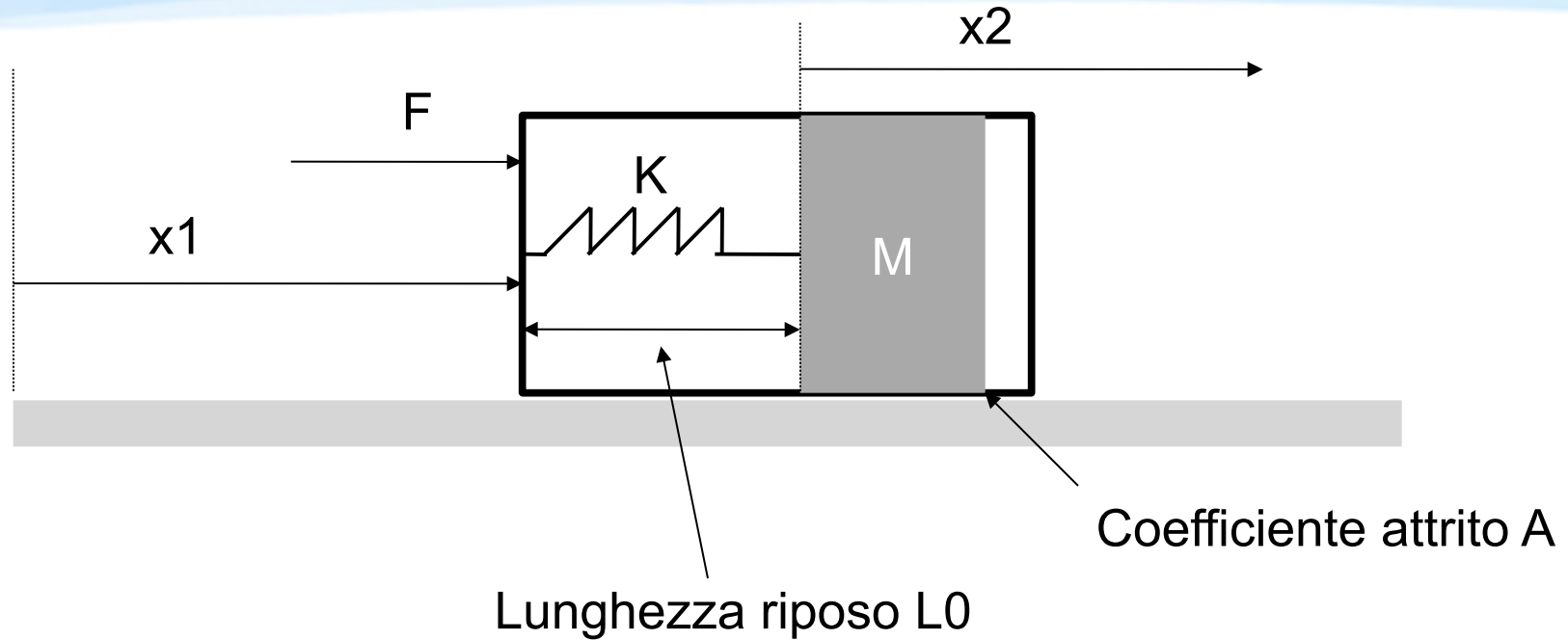


# Possibili applicazioni dell'accelerometro

- Le informazioni estratte dai segnali accelerometrici possono essere usate per identificare il contesto di valutazione di parametri fisiologici.
- Alcune ricerche usano il segnale accelerometrico per dare validità e robustezza alla misurazione del Heart Rate Variability (HRV)
  - Il segnale è poco considerabile quando il soggetto in esame svolge attività fisiche (pure di bassa intensità)
- E' possibile identificare l'intensità dell'attività dell'utente/paziente



# Principio Funzionamento Accelerometri



- Caso monodimensionale
- Esplicitiamo le equazioni del moto
  - Equilibrio forze

# Principio Funzionamento Accelerometri

$$x_3 = x_1 + L_0 + x_2$$

$$F_M = M \ddot{x}_3(t) = M \ddot{x}_1(t) + M \ddot{x}_2(t)$$

$$F_M = -A \dot{x}_2(t) - K x_2(t)$$

$$M \ddot{x}_1(t) = -M \ddot{x}_2(t) - A \dot{x}_2(t) - K x_2(t)$$

$$\ddot{x}_1(t) = -\ddot{x}_2(t) - \frac{A}{M} \dot{x}_2(t) - \frac{K}{M} x_2(t)$$

Sistema del secondo ordine:  
a regime la deformazione misurata  
è proporzionale all'accelerazione

Ho trovato un modello matematico che lega l'accelerazione del sistema (misurando) all'allungamento della molla che suppongo di poter misurare con un sensore di deformazione

$$\ddot{x}_1(t) = x(t) \quad \text{Misurando}$$

$$-x_2(t) = y(t) \quad \text{Uscita}$$

# Accelerometri Mono-assiali

## ■ Accelerometro monoassiale

- Massa collegata ad una molla libera di muoversi in una sola direzione

## ■ Principio di funzionamento

- A regime lo spostamento ( $x$ ) è proporzionale alla accelerazione subita dal sistema
  - Accelerazione sarà data dalla differenza tra  $a$  e  $g$  (acc. di gravità a cui la massa è sempre sottoposta)

$$K \cdot x = M(\mathbf{a} - \mathbf{g}) \cdot \mathbf{n} \quad (\mathbf{a} - \mathbf{g}) \cdot \mathbf{n} = \frac{K \cdot x}{M}$$

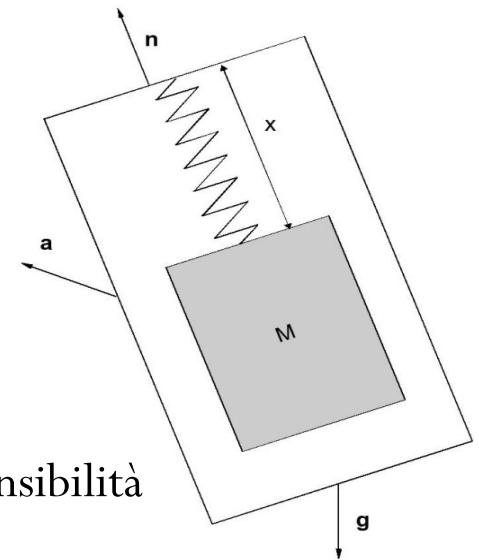
- Uscita accelerometro in tensione

$$V = k (\mathbf{a} - \mathbf{g}) \cdot \mathbf{n} + V_o = k(a_n - g_n) + V_o$$

- Segnale

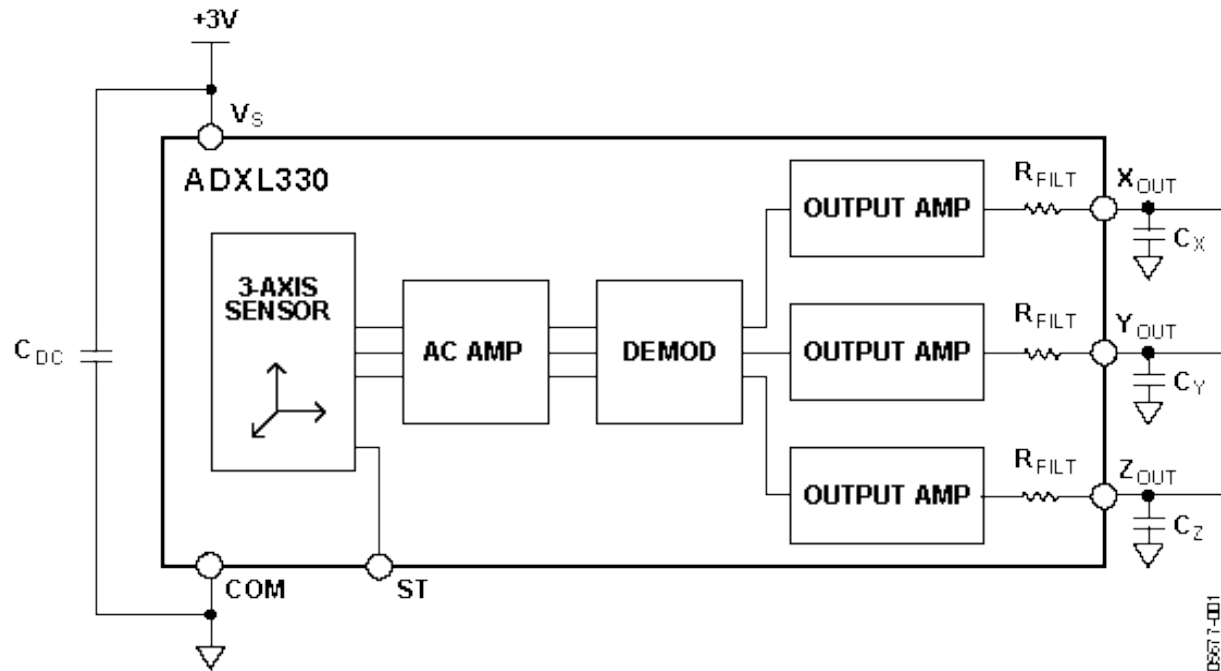
$$y_i = (\mathbf{a} - \mathbf{g}) \cdot \mathbf{n}_i + b_i + q_i$$

$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{n}_i \text{ versore asse di sensibilità} \\ b_i \text{ offset} \\ q_i \text{ termine di rumore} \end{array} \right.$



# L'accelerometro ADXL330

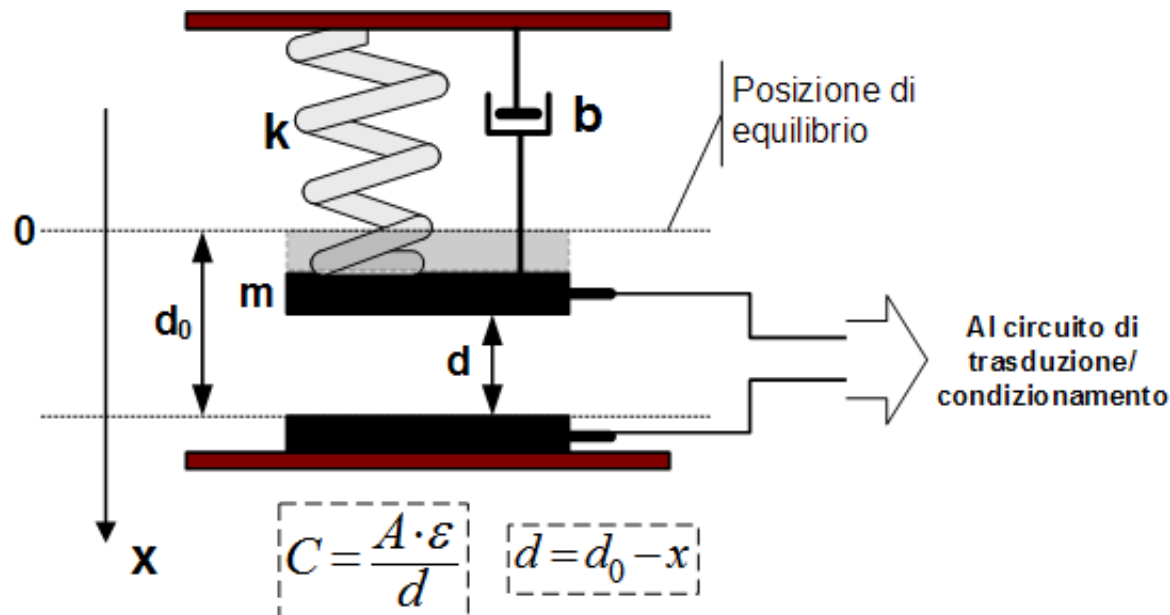
- L' [ADXL330](#) prodotto dal Analog Device è di piccole dimensioni, sottile, bassi consumi di potenza, analogico, ed è un completo sensore a 3 assi integrato in un unico chip.





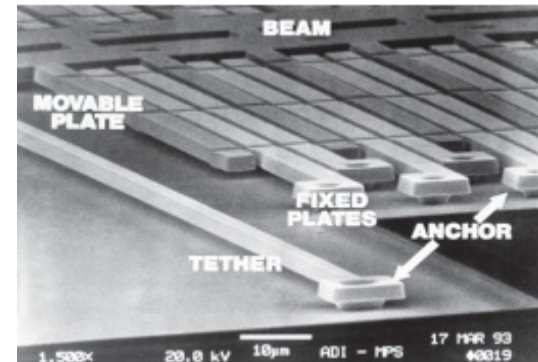
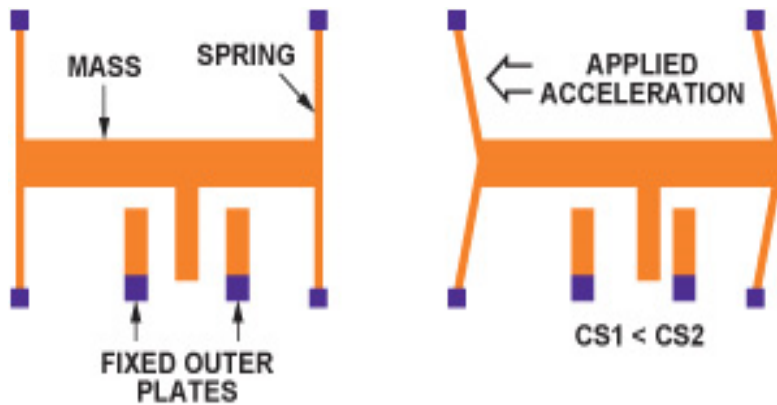
# Accelerometri Capacitivi

- Sfruttano come principio per il rilevamento dello spostamento della massa di prova, la variazione della capacità elettrica di un condensatore, associata alla variazione della distanza tra le sue armature.
- La massa stessa, realizzata con materiale conduttivo, costituisce un'armatura del condensatore, l'altra, o le altre due (se costruito con tecnologia differenziale), sono invece fisse alla struttura del dispositivo. La massa viene tenuta sospesa grazie ad un elemento elastico, in modo che le armature non si tocchino.



# Realizzazione fisica ADXL330

- la massa costituisce un'armatura di un condensatore compresa tra due armature fisse.
- elettricamente si va a realizzare è schematizzabile come due condensatori in serie con una connessione centrale comune corrispondente alla massa mobile

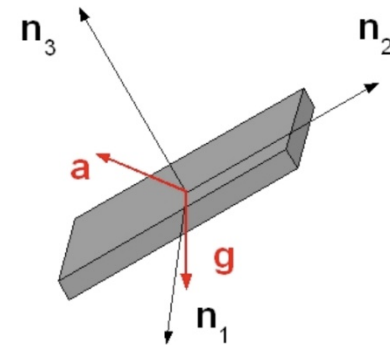


- La realizzazione del condensatore gioca un ruolo fondamentale: la distanza tra l'armatura mobile e quella fissa fornisce lo scostamento massimo possibile per la "Massa di Prova"
  - determina il limite sulla massima forza applicabile alla massa, ovvero un limite alla massima accelerazione misurabile.

# L'accelerometro ADXL330 (2)

- L'accelerometro misura l'accelerazione a cui è sottoposto e l'accelerazione di gravità.
- Considerando un sensore tri-assiale calibrato (i.e. off-set e sensitività compensata e l'uscita espressa in unità di g), il segnale accelerometrico ( $y$ ) è formato da due fattori:
  - uno è il vettore gravitazionale ( $g$ )
  - l'altro è dovuto all'accelerazione inerziale del sistema ( $a$ ), entrambi riferiti al sistema di riferimento del sensore:

$$\mathbf{y} = \mathbf{a} - \mathbf{g}$$
$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{pmatrix}$$

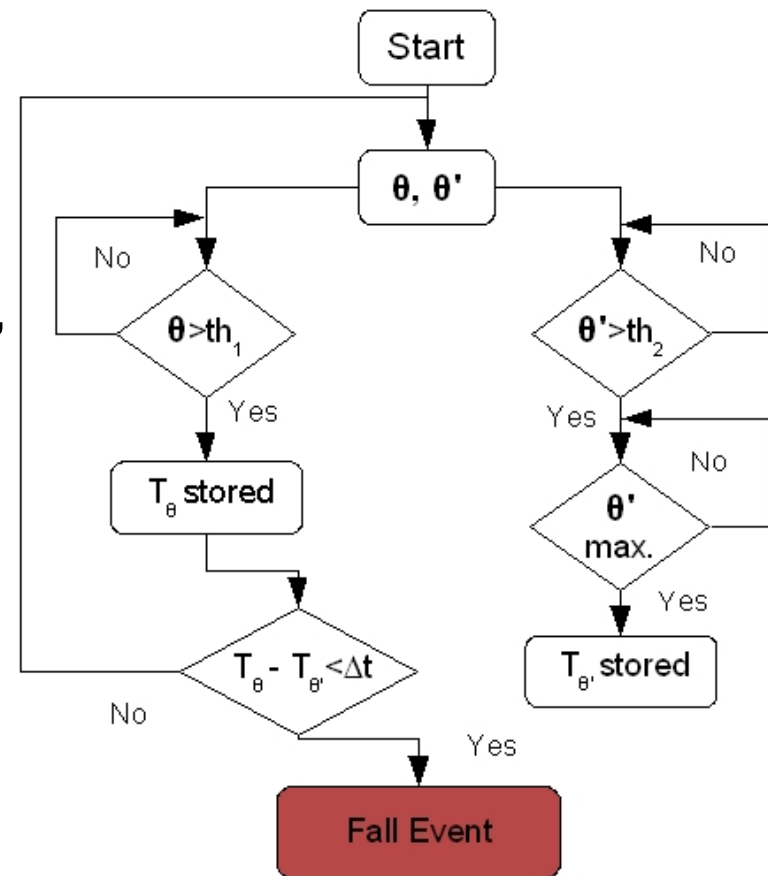


# Monitoraggio di Caduta

- Il concetto base è di rilevare inclinazioni critiche del tronco della persona monitorata in corrispondenza di alta velocità rotazionale

Ricostruzione di  $\theta$  e  $d\theta/dt$

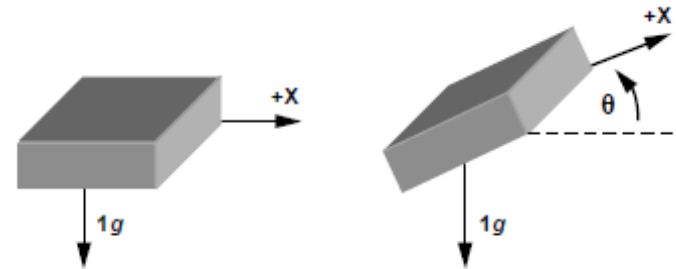
•  $\theta$  rappresenta l'inclinazione del tronco, stimata attraverso le componenti del segnale accelerometrico



# Monitoraggio di Caduta (II)

- L'inclinazione  $\theta$  è ottenuta attraverso la conoscenza del vettore gravitazionale misurata nel sistema di riferimento dell'accelerometro.

$$\mathbf{y} = \mathbf{a} - \mathbf{g} \quad \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{pmatrix}$$



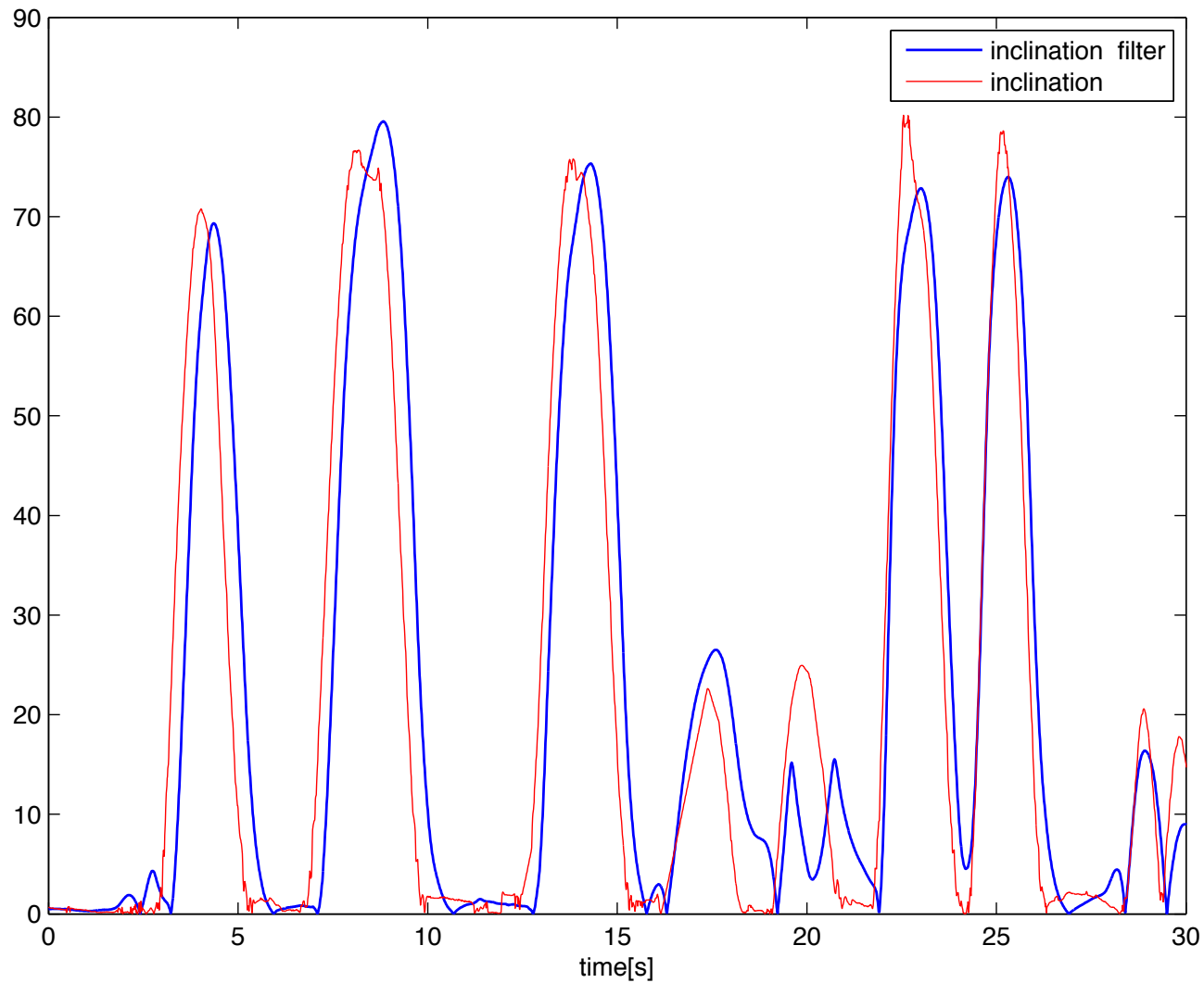
- In condizioni statiche è presente la sola componente gravitazionale
  - $\theta$  è semplice da valutare
- In condizioni dinamiche:
  - Accelerazione inerziale è sommata a quella gravitazionale
  - L'errore che si commette è più grande quando il soggetto effettua movimenti intensi (come correre o saltare)
  - $\theta$  non è stimabile

# Monitoraggio di Caduta (III)

- Lo scopo della tecnica di filtraggio è quella di effettuare una stima in tempo reale della componente  $g$
- Si usa un filtro di Kalman che attraverso la modellizzazione dell'effetto della gravità e dell'accelerazione del sistema sul segnale accelerometrico misurato permette una stima ottima di  $\theta$
- $A$ , matrice dello stato di transizione
- Modello di Stato  $x_k = Vg(k)$
- Processo di rumore  $n_k$ , covarianza  $Q$
- Rumore di Misura  $q_k \sim V a(k)$ , covarianza  $R$
- Equazioni del modello
  - $x_k = Ax_{k-1} + n_k$
  - $y_k = x_{k-1} + q_k$

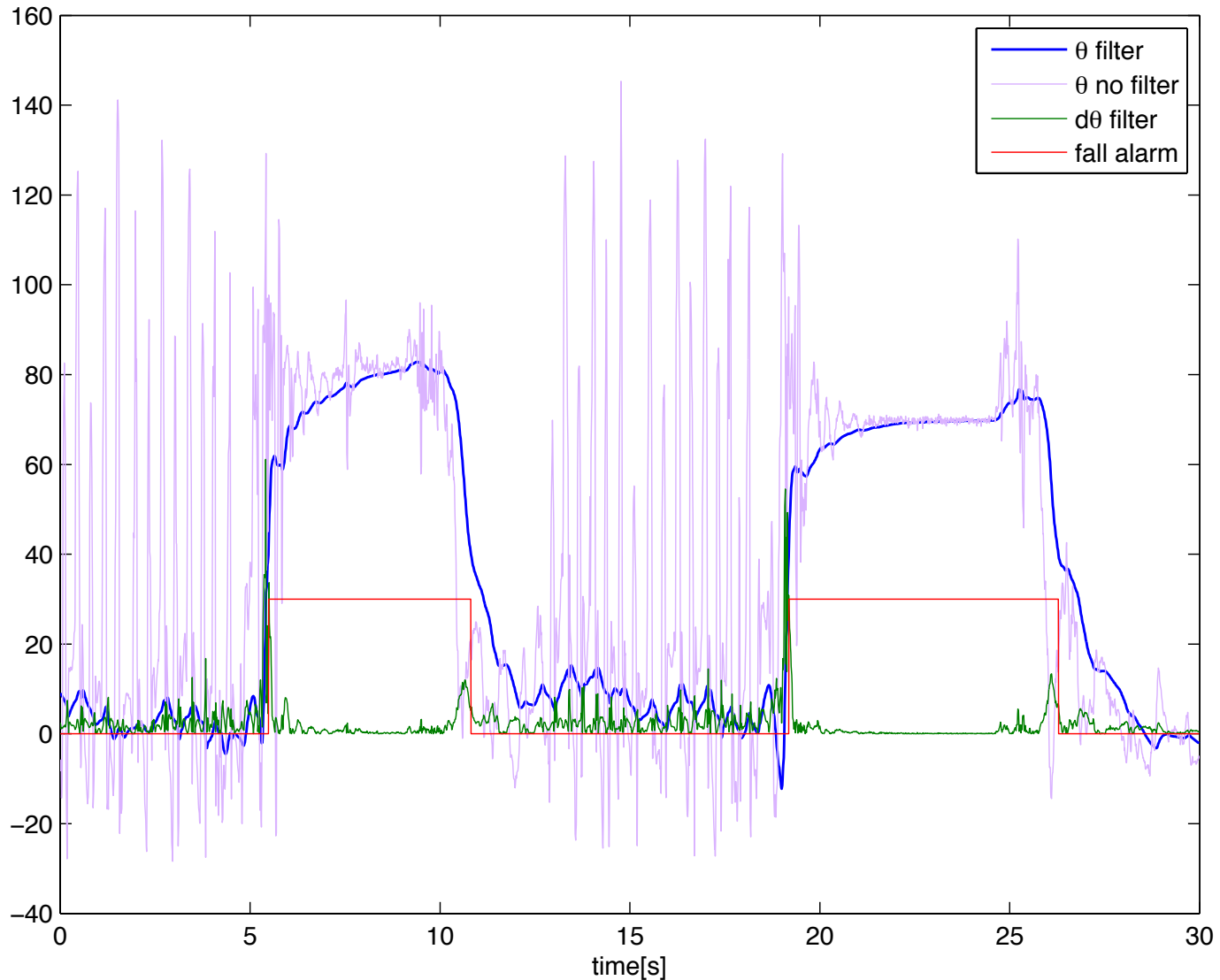
# Monitoraggio caduta (IV)

Validazione del sistema accelerometro con sistema a telecamere BTS



# Monitoraggio Caduta (V)

Segnali derivati dall'accelerometro e riconoscimento di cadute





# Calcolo del segnale SMA

- Un segnale che ci dà una stima della intensità di attività effettuata dall'utente è il “signal magnitude area” (SMA), estratto dai segnali di un accelerometro tri-assiale.
- In condizioni dinamiche l'accelerazione inerziale è sommata a quella gravitazionale
- Per poter stimare l'intensità dell'attività effettuata dall'utente si estrae il segnale SMA dalle componenti dell'accelerometro

$$SMA(k) = \frac{1}{N} \left( \sum_{Nk}^{N(k+1)-1} |a_1| + \sum_{Nk}^{N(k+1)-1} |a_2| + \sum_{Nk}^{N(k+1)-1} |a_3| \right)$$

# Calcolo del segnale SMA (II)

- Dobbiamo stimare le diverse componenti di accelerazione dal segnale misurato dell'accelerometro

$$SMA(k) = \frac{1}{N} \left( \sum_{Nk}^{N(k+1)-1} |a_1| + \sum_{Nk}^{N(k+1)-1} |a_2| + \sum_{Nk}^{N(k+1)-1} |a_3| \right)$$

- *3° IIR high-pass digital filter*       $y \rightarrow a_1, a_2, a_3$

<sup>2</sup> *Development of a novel algorithm for human fall detection using wearable sensors.*  
*Anania & Co. Proceedings of IEEE Sensors*

# Esempi di Applicazioni

