

Una prova di sensibilità di sensori accelerometrici triassiali

Maria Grazia D'Urso (*), Mattia Crespi (**), Nunzio Barbatì (***)

(*) Di.M.S.A.T., Università di Cassino, via G. Di Biasio 43, 03043 CASSINO (FR), Italy, Tel. +39 0776 299 4309
Fax +39 0776 299 3939, mob.:+39 - 339 47 44 449, durso@unicas.it

(**) Area di Geodesia e Geomatica, DICEA, Università di Roma "La Sapienza", Via Eudossiana 18
00184 ROMA, Tel. e fax 0644585097, mattia.crespi@uniroma1.it

(***)Di.M.S.A.T., Università di Cassino, Via G. Di Biasio 43, 03043 CASSINO (FR), Italy
mob.: +39 3283022961, n.barbati@unicas.it

Sommario

E' noto che i sensori accelerometrici a tecnologia MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) possono comunicare in modalità wireless con un'unità di elaborazione e un sistema di trasmissione dati e possono funzionare da inclinometri; sperimentazioni preliminari in tal senso sono state condotte e presentate negli scorsi anni. In particolare, se resi solidali ad un elemento rigido, tali sensori consentono di misurare e monitorare l'inclinazione dell'elemento stesso in quanto la variazione nel tempo dell'inclinazione è rappresentativa della cinematica del punto al quale l'elemento e il sensore sono vincolati. Tale applicazione è significativa nell'ambito delle tecniche di monitoraggio geomatico low-cost, in particolare nella determinazione dei movimenti di versanti in frana in quanto è possibile ottenere informazioni sull'evoluzione cinematica della sua parte superficiale. Scopo di questo lavoro è presentare e sviluppare una prima analisi dei risultati di una prova di sensibilità di tali sensori accelerometrici triassiali tramite il sistema di misura SMAMID svolta presso l'Università di Cassino. Nella prova alcuni sensori di classe MEMS sono stati installati solidalmente ad un teodolite mediante il quale potevano essere imposti spostamenti angolari con alta precisione. La misura degli angoli tramite un accelerometro triassiale è stata condotta valutando le variazioni della componente di gravità sui tre assi, poiché il sistema SMAMID è in grado di misurare anche accelerazioni statiche. A partire da una condizione iniziale sono state imposte variazioni dell'angolo zenitale con il passo di 1 gon, registrando di volta in volta le accelerazioni in contemporanea con tre sensori MEMS. Lo scopo dell'esperienza è stato, pertanto, quello di valutare quale fosse il livello di accuratezza delle inclinazioni che si potevano ricavare dai sensori accelerometrici assumendo come riferimento quelli imposti con il teodolite. I risultati ottenuti vengono presentati e discussi.

Abstract

It is well known that MEMS- (Micro-Electro-Mechanical Systems) based accelerometer sensors can communicate in a wireless mode both with a processing unit and with a data transmission system; moreover they can operate as inclinometers. Preliminary experiments in this direction have been conducted and presented in recent years. In particular, if the sensors are fixed to a rigid element, they allow one to measure and monitor the inclination of the same element since the variation in time of the inclination is representative of the kinematics of the point at which the element and the sensor are bound. This application is significant in the geomatic low-cost monitoring techniques, particularly in determining slope movements during landslides, at least in the superficial part of the slope. The purpose of this paper is to present the results of a sensitivity test of triaxial accelerometer sensors through the SMAMID measurement system. During such tests some MEMS-based sensors were firmly fixed to a theodolite in which angular displacements with high precision could be imposed. The measure of the angles through triaxial accelerometers has been carried out by

evaluating the variations of the gravity component on three axes, since the SMAMID system can also measure static accelerations. Starting from an initial condition, variations of the zenith angle have been imposed with step of 1 gon, recording simultaneously the three accelerations by means of three MEMS sensors. Therefore, purpose of the test was to ascertain which level of accuracy of inclinations could be derived from accelerometer sensors by taking as reference values those imposed with the theodolite. The results are presented and discussed.

I sensori SMAMID

La recente introduzione dei dispositivi MEMS (*Micro Electro-Mechanical Systems*) ha aperto un vasto campo di studi ed applicazioni in diversi settori dell'ingegneria. La tecnologia MEMS consente di incorporare dispositivi meccanici di dimensioni micrometriche – ad esempio sensori – in un substrato di semiconduttore, integrandoli quindi in normali chip e fornendo così uno strumento utile e al tempo stesso snello ed efficace per la misura di grandezze fisiche.

Tra i sistemi di misura con sensori MEMS attualmente presenti sul mercato, si è avuta la possibilità di impiegare il sistema di misura SMAMID sviluppato dalla STRAGO S.p.A.. Una rete di misura di tipo SMAMID è composta da una o più Unità Funzionali (UF) con capacità di acquisizione e trasmissione di dati accelerometrici.

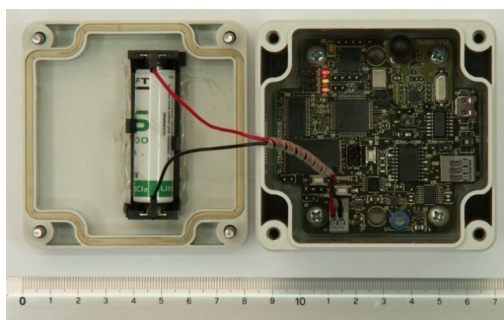


Figura 1 – Unità funzionale SMAMID.

Le caratteristiche del sistema consentono l'acquisizione contemporanea per i tre assi con parametri selezionabili ad una risoluzione di 12 bit. Le UF SMAMID sono in grado di acquisire a trigger, con soglia sulle accelerazioni, a comando manuale, a orari prefissati oppure anche in continuo. SMAMID funziona in completa autonomia: può essere alimentato sia da un pacco batterie che da un alimentatore esterno. È possibile costruire una rete di unità funzionali autonome gestite da un PC centrale, in modalità wired (RS485) o wireless (adottando un protocollo proprietario). In definitiva ciascuna UF va considerata come uno strumento di misura delle accelerazioni completamente autonomo, semplice e funzionale. Occorre precisare che la UF misura accelerazioni anche di tipo statico, come l'accelerazione di gravità; è quindi possibile in linea teorica stimare l'inclinazione rispetto alla verticale e impiegare le UF SMAMID come inclinometri.

La prova sperimentale

In particolare nel presente lavoro si è condotto un esperimento per valutare le prestazioni di tali strumenti come inclinometri.

Lo schema di prova ha previsto l'uso di tre UF SMAMID (identificate dai codici 16, 30 e 36), installate tramite un'apposita piastra costruita per essere resa solidale ad un teodolite. Ciascuna unità UF è dotata di un accelerometro triassiale con assi di misura perpendicolari tra loro (x, y, z) che materializzano il sistema di riferimento della UF (Figura 2). La colorazione adottata in figura per le direzioni dei tre assi delle UF verrà utilizzata nel seguito per identificare grafici o valori

relativi a ciascuna di queste direzioni; inoltre, per asse o direzione di misura, si intenderà sempre quella relativa al sistema di riferimento relativo delle UF, salvo diverse specificazioni.

Lo scopo dell'esperienza è stato quello di comparare i valori di inclinazione che si possono ricavare dai sensori accelerometrici con quelli letti sul teodolite, assunti come riferimento in quanto ritenuti di accuratezza certamente superiore a quelli ottenibili dai sensori MEMS sulla base di precedenti prove sperimentali di carattere preliminare.



Figura 2 – Strumentazione di prova.

In partenza la direzione x delle UF corrisponde alla posizione zenitale del teodolite di 300 gon; l'asse z è quello verticale.

Con il teodolite si sono imposte variazioni angolari zenitali con il passo di 1 gon ad intervalli di alcune decine di secondi: si è iniziato dal valore di 300 gon e si sono raggiunti i 284 gon. Le registrazioni delle accelerazioni tramite le tre UF SMAMID sono state svolte in contemporanea pilotate da un'altra UF (master) in modalità wireless, evitando quindi qualsiasi cavo di collegamento. Le variazioni zenitali dell'asse di collimazione del teodolite consistono, in effetti, in una rotazione degli assi di misura delle UF, x, e z, rispetto all'asse y. La rotazione avviene in senso antiorario rispetto al sistema di riferimento delle UF di figura 2.

Il grafico successivo mostra l'andamento dei valori di accelerazione dell'asse x in funzione del tempo così come acquisiti dalla UF n°30 con frequenza di campionamento di 40 punti al secondo per una durata della prova di 800 secondi.

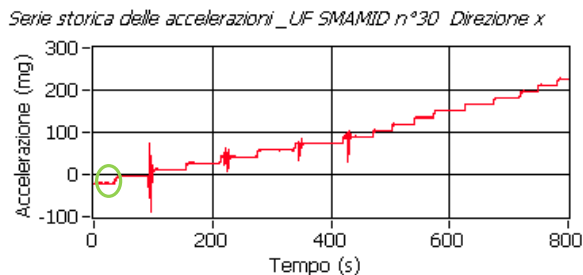


Figura 3 – Serie storica delle accelerazioni durante la prova di inclinazione; UF 30 asse x.

È immediato interpretare tale grafico: i punti dove si verificano degli incrementi improvvisi delle accelerazioni, come quello cerchiato in verde, corrispondono agli istanti in cui si varia l'inclinazione dell'asse di collimazione del teodolite e quindi l'inclinazione dell'asse x delle UF. Gli "scalini" nel segnale rappresentano quindi il passaggio da una fase alla successiva; si notano, inoltre, intervalli di alcuni secondi durante i quali l'inclinazione dell'asse di collimazione è stata mantenuta costante (e di conseguenza anche l'accelerazione non è variata).

Il valore di inclinazione può essere calcolato impiegando metodi che scelgono di combinare i valori di accelerazione rilevati su uno o più assi di misura dell'accelerometro. Nel seguito si presenta inizialmente il processo di elaborazione per il metodo monoassiale, illustrando dapprima l'approccio e, successivamente, commentando i risultati. Gli stessi ragionamenti vengono successivamente ripetuti per il metodo biassiale, effettuando infine i confronti tra i due diversi metodi di calcolo delle inclinazioni¹.

Il metodo monoassiale

Preliminare ad ogni analisi è la pre-elaborazione del dato; essa consiste nel riportare le accelerazioni nell'unità di misura desiderata, nel depurarle di effetti non voluti (quali, ad esempio, eventi impulsivi che spostano l'asse di collimazione e disturbano la misura dell'accelerazione statica) ed estrarre (con riferimento, ad esempio, ai grafici riportati in figura 3), le registrazioni relative agli intervalli temporali in cui l'asse di collimazione non si sposta o subisce disturbi di alcun genere. Il passo successivo consiste nel valutare l'accelerazione statica di un asse coinvolto nella rotazione².

Si tenga presente che i sensori della SMAMID UF riescono a valutare sia fenomeni di natura statica, ovvero accelerazioni costanti nel tempo, sia fenomeni oscillatori di tipo dinamico, nell'ambito della banda di frequenza resa disponibile dalla frequenza di campionamento, nel nostro caso 20 Hz.

Il contenuto di accelerazione che rimane costante in un determinato tempo può quindi essere estratto semplicemente effettuando la media di tutti i campioni in quel tempo; in tal modo le variazioni dinamiche vengono eliminate dal segnale. Selezionando un intervallo avente durata T in cui il teodolite è fermo, si può calcolare un valore medio di accelerazione statica per la direzione x nel tempo T, nel seguito semplicemente indicato come \bar{A}_x . Questa grandezza tiene conto non solo della componente relativa di gravità in direzione x, A_{xg} , ma anche del valore di offset strumentale A_{xoff} , che è sempre presente e variabile per ciascun accelerometro e che deve essere valutato ed eliminato dalle osservazioni:

$$\bar{A}_x = A_{xoff} + A_{xg} \quad [1]$$

Nell'ipotesi che il valore di offset non vari in maniera significativa tra le misure effettuate a diversi valori di inclinazione angolare (cioè in tempi diversi), si può ottenere la variazione di inclinazione per differenza, assumendo una misura di riferimento iniziale. L'ipotesi di valore di offset costante è confermata da precedenti esperienze di misura eseguite con tale sistema di sensori SMAMID resi solidali ad un teodolite; nel corso di tali esperienze si è constatato che, effettivamente, il valore di offset non è variato per l'intera sessione di misura (D'Urso et Al., 2010).

Applicando tale ipotesi direttamente alle misure ottenute nel test di inclinazione essa viene ulteriormente chiarita. Si consideri ad esempio di voler ricavare il valore di inclinazione con il segnale di accelerazione nella direzione x corrispondente alla lettura dell'angolo zenitale pari a 299 gon. Si considerino i grafici degli intervalli temporali della figura 3 in cui l'asse di collimazione del teodolite è posto a 300 e 299 gon.

¹ Si noti che con inclinazione limitata al piano xz, non ha senso proporre un metodo con i tre assi, in quanto l'asse y non risente di nessuna variazione;

² Sebbene la rotazione dovrebbe essere rilevata sia sulla componente z che sulla componente x dell'accelerazione, in genere si impiega l'asse meno soggetto all'accelerazione di gravità, ovvero nel nostro caso l'asse x, per le ragioni che saranno evidenziate nel seguito.

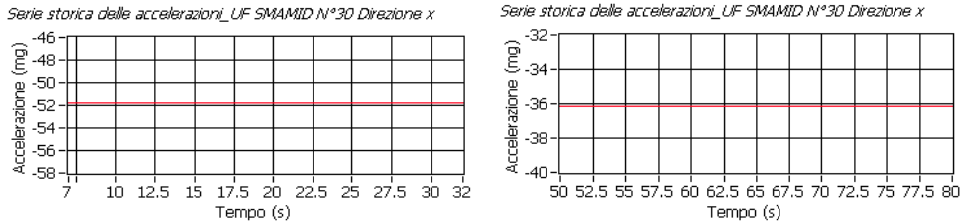


Figura 4 – Serie storica accelerazioni - prova di inclinazione UF 30 asse X gon 300 (sinistra) e gon 299 (destra).

Su queste due serie storiche di valori di accelerazioni si possono calcolare i valori mediati tra tutti i campioni, ottenendo due grandezze $\bar{A}_{x(300)}$, $\bar{A}_{x(299)}$.

Considerando il sistema di riferimento della prova e considerando che le accelerazioni sono espresse in unità di g (accelerazione di gravità), in maniera che il modulo totale delle accelerazioni rimanga sempre costante ed uguale ad 1 g, si può scrivere semplicemente:

$$\alpha(299) = \sin^{-1} A_{xg(299)} \quad [2]$$

Poiché si è supposto che il valore di offset sia costante e poiché a 300 gon si può ritenere A_{xg} praticamente nullo (potendosi assumere il sensore orizzontale in corrispondenza della prova con angolo zenitale di 300 gon), è sufficiente depurare il valore di accelerazione ottenuto a inclinazione 299 del valore di $\bar{A}_{x(300)}$ che si ottiene nella prova a 300 gon (assunto quindi uguale all'offset), ossia:

$$A_{xg(299)} = \bar{A}_{x(299)} - \bar{A}_{x(300)} = A_{xg(299)} + A_{xoff} - A_{xg(300)} - A_{xoff} \quad [3]$$

nell'ipotesi che

$$A_{xg(300)} = 0 \quad [4]$$

In questo modo, sfruttando i valori medi delle accelerazioni ricavabili dai grafici, si ottiene un valore di 0.895°, corrispondente a circa 0.994 gon, ovvero molto prossimo alla variazione di 1 gon, e cioè al valore atteso. Si può quindi procedere analogamente per le altre inclinazioni imposte.

I risultati per l'asse x

Il metodo illustrato in precedenza permette di calcolare tutte le inclinazioni. I risultati sono riassunti in un grafico di confronto tra i valori angolari misurati, cioè quelli ricavati dalle accelerazioni, e i valori angolari attesi, ossia quelli imposti al teodolite espressi in gon.

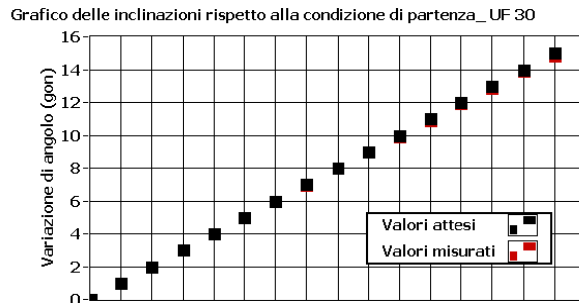


Figura 5 – Valori inclinazione misurati ed attesi UF 30 metodo singolo asse (asse x).

Si evince dalla figura 5 che le differenze sono davvero minime, con una leggera sottostima nei valori ricavati dalle accelerazioni. Per valutare queste differenze nel dettaglio si riporta poi un grafico con i valori di scarto sia in termini assoluti (valore atteso meno valore misurato), che in

termini relativi, normalizzando lo scarto assoluto per il valore atteso, cioè quello del teodolite. Sull'asse delle ascisse, per rendere immediato il confronto con la relativa sessione di prova, le inclinazioni sono espresse in gon.

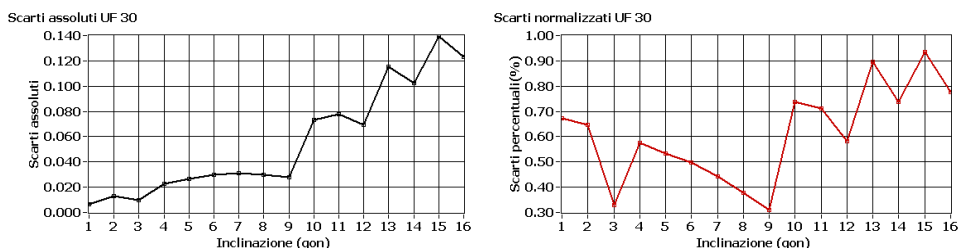


Figura 6 – Valori scarti UF 30 metodo singolo asse (asse x); scarti assoluti (sinistra), scarti normalizzati (destra).

Dal grafico degli scarti assoluti, si nota con chiarezza che le differenze, in valore assoluto, tra il valore reale e il valore misurato aumentano con l'inclinazione. Inoltre, questa variazione prevede sempre una sottostima del valore misurato. Si deve infine sottolineare che lo scarto normalizzato non ha un andamento ben definito, sebbene una tendenza ad aumentare con l'inclinazione si evidenzia dal valore di 10 gon in poi; in ogni caso esso è al di sotto dell'1%.

Si riassume in una tabella il valore dello scarto medio (in gon) ottenuto come media tra gli scarti che si ottengono alle diverse inclinazioni per tutte e tre le UF impiegate.

Inclinazione raggiunta (gon)	Scarto medio UF 16 (gon)	Scarto medio UF 30 (gon)	Scarto medio UF 36 (gon)
11 (11 step -1-11 gon)	0.04	0.03	0.05
16 (16 step -1-16 gon)	0.07	0.05	0.08

Figura 7 – Scarti medi per UF metodo singolo asse (asse x).

In definitiva, per tutte le UF si evince, per inclinazioni superiori ai 10 gon, una tendenza all'incremento dell'errore. Considerando un valore di risoluzione di accelerazione minimo di 1 mg, risulta che il minimo valore apprezzabile di angolo, in linea teorica, è 0.07 gon. Assumendo il valore dell'errore di risoluzione delle UF SMAMID di 1 mg, pari alla loro precisione strumentale³, in linea con altre esperienze e con dati di letteratura, risulta che i valori di inclinazione sono affetti almeno da un errore di 0.07 gradi centesimali. Pertanto, gli scarti medi ottenuti sono in linea con questo errore.

I risultati per l'asse z

Poiché l'inclinazione si svolge nel piano xz, le variazioni della componente di gravità dovrebbero rispecchiarsi in maniera analoga anche sull'asse z delle accelerazioni. Si mostra un grafico delle accelerazioni rilevate in z, distinguendo due fasi di variazione degli angoli in due grafici diversi.

³ Il valore di 1 mg come risoluzione è da intendersi valido nel caso di acquisizioni a 40 Hz e per i soli assi orizzontali. Supponendo di considerare la precisione uguale alla risoluzione si trascurano altre fonti di errore quali la non linearità o la correlazione con altri assi, il cui contributo in questa prima fase di esperienza di misura si considera trascurabile.

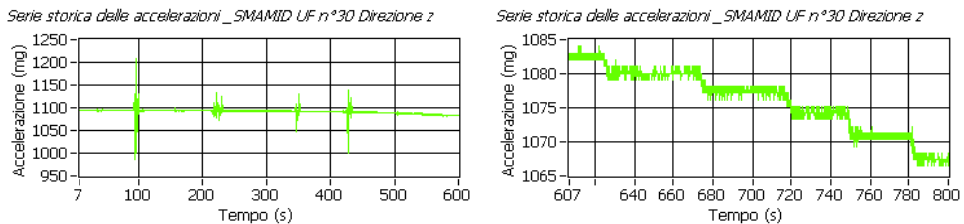


Figura 8 – Serie storica accelerazioni asse z UF 36; variazione da 300 a 289 gon (sinistra); variazione da 289 a 284 gon (destra).

Dall’esame della figura 8 è immediato notare che è riscontrabile il tipico andamento a scalini, ben visibile in sulla componente x, soltanto dopo cinque variazioni angolari: il valore delle accelerazioni è praticamente costante a parte gli istanti in cui si varia l’asse di collimazione e le UF risentono di effetti dinamici.

In linea con i ragionamenti precedenti, la formula da impiegare per il calcolo è:

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{A_{gz}(\text{gon})}{g} \quad [5]$$

dove

$$A_{gz}(\text{gon}) = \bar{A}_z(\text{gon}) - A_{z\text{off}} \quad [6]$$

L’angolo per l’inclinazione di un gon deve essere calcolato come la variazione del coseno tra i 300 e i 299 gon; in tal modo si ottiene una componente di accelerazione statica A_{gz} di 999.8 mg, ovvero uno scarto di soli 0.12 mg rispetto al valore di gravità 1000 mg normalmente presente all’inizio. Questo corrisponde ad una variazione minima di accelerazione che si confonde nell’errore di risoluzione, stimato per l’asse z in 3 mg^4 . Applicando questo ragionamento, il primo valore di inclinazione ricavabile sull’asse z (0.997 g) si ritrova ad una variazione di almeno 5 gon. Pertanto, è ragionevole affermare che dai grafici precedenti non si evinca nessuna variazione della componente z prima di superare una soglia critica di 5-6 gon di inclinazione. Pur escludendo questi primi punti e procedendo nel calcolo delle inclinazioni in maniera analoga al caso dell’asse x, si nota che le differenze rispetto ai valori attesi sono notevoli.

Si riportano gli andamenti degli scarti rispetto ai valori attesi. I grafici mostrano una chiara tendenza alla diminuzione degli scarti con l’aumento dell’inclinazione; ad esempio gli scarti normalizzati diminuiscono dal 70% al 10%.

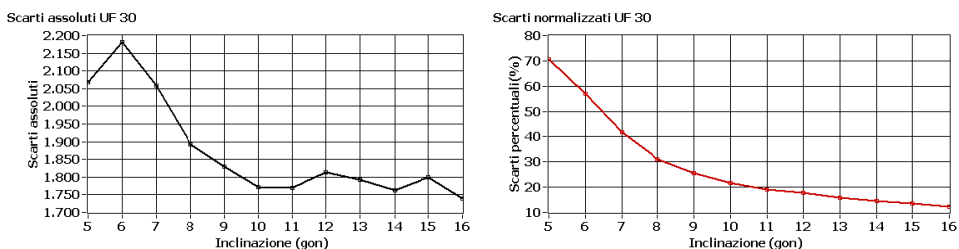


Figura 9 – Valori scarti UF 30 metodo misura singolo asse (asse z).

⁴ Per l’asse z l’errore di risoluzione è stimato pari a 3 mg, contrariamente agli assi x-y dove è valutato pari ad 1 mg. È una caratteristica costruttiva di SMAMID. Procedendo all’inverso ed inserendo i valori di risoluzione si possono ricavare i valori minimi di angolo rilevabili, considerando una condizione di partenza con l’asse z parallelo alla gravità, tali angoli risultano: 0.07 gon per l’asse x e 5 gon per l’asse z. Tale calcolo è stato eseguito supponendo un offset nullo.

Il metodo biassiale

Incrociando i risultati sugli scarti che si ottengono con i due metodi, si nota che l'errore che si commette con l'accelerazione dell'asse x tende ad aumentare man mano che aumenta l'inclinazione; al contrario per l'asse z, sembra che all'aumentare della variazione lo scarto tenda leggermente a ridursi. Per provare a bilanciare tali effetti si può impiegare la funzione tangente che valuta entrambi gli assi di misura nello stesso tempo. In questo caso la funzione da impiegare per calcolare le inclinazioni è:

$$\alpha = \text{tag}^{-1} \left(\frac{AG_x(\text{gon})}{AG_z(\text{gon})} \right) \quad [7]$$

ove, come definito in precedenza, valgono

$$AG_x(\text{gon}) = \bar{A}_x(\text{gon}) - A_{xoff}; \quad AG_z(\text{gon}) = \bar{A}_z(\text{gon}) - A_{zoff} \quad [8]$$

Dal grafico che segue in figura 10 si evince che la tendenza dello scarto aumenta con l'aumentare della inclinazione.

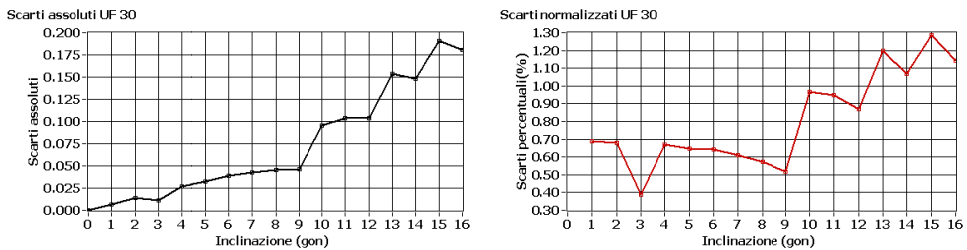


Figura 10 – Valori scarti UF 30 metodo misura 2 assi.

Gli scarti, sia nei valori che negli andamenti, appaiono quindi abbastanza simili al metodo con un asse in direzione x, pertanto appare utile riportare una tabella con i valori medi degli scarti per le tre UF così da poter confrontare il valore di questi scarti con quelli del metodo monoassiale. Si può notare che gli scarti del metodo biassiale sono leggermente superiori a quelli ottenuti con il metodo ad un asse in direzione x; tuttavia il contributo di errore determinato dall'impiego dell'asse z, nel metodo biassiale viene di molto attenuato e i valori di scarto per le inclinazioni sono vicini a quelli che si ottengono dalla sola analisi con asse x. Il metodo monoassiale nella direzione x è sicuramente quello più efficace per piccole inclinazioni; tuttavia si presume che avvicinandosi ai 45°, la preferenza rispetto al metodo a due assi, si inverte, rendendo quindi impossibile la misura con il singolo asse per intervalli di inclinazione più ampi. In virtù di questi risultati è ragionevole supporre che il metodo a 2 assi possa presentare il notevole vantaggio di essere applicabile su un intervallo di inclinazioni molto più ampio.

Inclinazione raggiunta (gon)	Scarto medio UF 16 (gon)	Scarto medio UF 30 (gon)	Scarto medio UF 36 (gon)
11 (11 step -1-11 gon)	0.04	0.04	0.08
16 (16 step -1-16 gon)	0.08	0.07	0.11

Figura 11 – Confronto scarti metodo 1 asse x, metodo 2 assi.

Una stima preliminare delle incertezze

Si è indagata preliminarmente, ma certamente ulteriori analisi sono necessarie, la stima delle incertezze con cui possono essere calcolate le inclinazioni. È interessante valutare se gli scarti in valore assoluto (valore reale - valore misurato) ottenuti con i diversi metodi siano compatibili con le

incertezze che si possono prevedere supponendo come unica fonte di errore quelli noti del sistema di misura SMAMID⁵. A tal riguardo si è ipotizzato, in base ad altre esperienze di misure effettuate con SMAMID, che nelle condizioni di prova⁶ la precisione sia uguale al valore minimo di risoluzione (1 mg) e che lo strumento risulti lineare nel range di misura.

Si è verificato che per il metodo monoassiale le incertezze previste in tal modo sarebbero più basse, quasi di un ordine di grandezza, rispetto agli scarti ottenuti dal confronto con i valori del teodolite. La natura delle differenze tra gli scarti medi delle diverse UF andrebbe ricercata nell'ambito di una più approfondita valutazione delle fonti di incertezza della risoluzione nella misura delle accelerazioni delle UF SMAMID quali variazioni di offset, fattori di conversione differente, in questa fase trascurati; tali componenti di errori potrebbero essere significative anche per la determinazione dell'offset.

Conclusioni

Le prove preliminari svolte presso l'Università di Cassino hanno consentito di conseguire i seguenti risultati. Innanzitutto si è assicurato il corretto funzionamento del sistema di misura di sensori accelerometrici MEMS con sistema di misura SMAMID; tale sistema è composto da unità funzionali (UF) ciascuna dotata di accelerometro triassiale, gestibili in modalità di rete wireless da un PC centrale. Inoltre è stato verificato che, tramite opportuni processi di trattamento dei dati, le accelerazioni registrate con le UF sono utilizzabili per l'estrazione di informazioni sull'inclinazione. È stata svolta una prova di rotazione nel piano xz, registrando le accelerazioni di tre UF installate solidalmente ad un teodolite fatto opportunamente ruotare con il passo di 1 gon in un intervallo definito, facendo variare l'angolo zenitale da 300 a 284 gon.

Per l'elaborazione dei risultati si sono implementati due metodi diversi, uno che impiega i valori di accelerazione di ciascuna UF di un singolo asse, l'altro che cerca di combinare le accelerazioni relative a 2 assi. Per le variazioni di angolo impostate nella prova sperimentale si sono ottenuti dei risultati preliminari di inclinazione ricavata a partire dai valori di accelerazione misurati lungo l'asse x. Viceversa, il valore di inclinazione ottenuta da misure di accelerazione lungo l'asse z ha riscontrato degli errori non accettabili; questa difficoltà relativa all'uso dell'asse z è in parte giustificata dal fatto che per le prime variazioni di inclinazione, il valore di accelerazione lungo z rimane inferiore al limite strumentale di risoluzione dell'accelerazione. Si è, inoltre, notato che all'aumento di inclinazione lo scarto ottenuto con il metodo relativo all'asse x tende ad aumentare; viceversa lo scarto ottenuto con il metodo relativo all'asse z tende a diminuire. Con il metodo a due assi si sono ottenuti scarti leggermente maggiori rispetto al metodo con asse x, ma si è riscontrato il vantaggio di poter impiegare le accelerazioni anche quando uno dei due assi raggiunge il limite di risoluzione.

Considerando tutte le variazioni angolari impostate durante la prova sperimentale, lo scarto tra i valori angolari reali e quelli misurati, ossia determinati attraverso le misure di accelerazione misurate mediante la componente lungo l'asse x, è pari a circa 0.05 gon, intendendo questo valore come quello medio tra le tre diverse UF. Viceversa, impiegando il metodo biassiale per gli stessi dati sperimentali si raggiunge un valore di scarto assoluto di 0.08 gon. In ogni caso stimando, almeno in prima approssimazione, un valore di precisione strumentale dei sensori UF SMAMID intorno a 0.07 gon, è possibile affermare in via preliminare che, in termini medi, sia il metodo monoassiale lungo l'asse x che il metodo biassiale forniscono valori di inclinazione comparabili con quelli imposti al teodolite.

Ciò consente di affermare che il metodo biassiale è utile per variazioni angolari che possono coprire l'intero range di misura dell'inclinazione. Al contrario per piccole variazioni di angolo dovrebbe essere sufficiente applicare il metodo monoassiale, considerando l'asse meno soggetto alla componente di gravità, perché affetto da errore inferiore.

⁵ Si è considerato l'errore di lettura del teodolite molto più piccolo dell'errore di accelerazione della UF.

⁶ Scala a 2 g, 3 assi, frequenza di campionamento di 40 Hz.

L'applicazione di questi metodi ad una rete di accelerometri (inclinometri) di tipo SMAMID consentirebbe un approccio multisensore e distribuito con i vantaggi della connessione wireless e dell'alimentazione a batteria; pertanto esso potrebbe costituire un interessante sistema di misura in ambito geomatico anche per il monitoraggio di fenomeni a lenta variabilità, quali le frane.

Restano però da approfondire alcuni aspetti relativi all'errore ed alla precisione di tali metodi di elaborazione, al fine di comprenderne i limiti e ottimizzarne le applicazioni. In quest'ottica saranno svolte a breve ulteriori campagne di prova orientate a misurare su un intervallo di inclinazione più esteso e ad impiegare anche altri sensori di inclinazione di tipo tradizionale per una ulteriore comparazione.

Bibliografia

- [1] A. Baldi "M.E.M.S. Micro Electro Mechanical Systems" - DIADI 2000 - Ricerca % Impresa per l'innovazione in Piemonte
- [2] K. Tuck, "Tilt Sensing Using Linear Accelerometers" from Freescale Semiconductor Application Note, AN3461 Rev 1, 05/2007
- [3] S. Nasiri, D. Sachs, M. Maia (InvenSense) "Selection and integration of MEMS-based motion processing in consumer apps" – DSP Design Line
- [4] ST Microelectronics "LIS3LV02DQ: 3-Axis - $\pm 2g/\pm 6g$ digital output low voltage linear accelerometer" - AN2041 Application Note
- [5] Avnet, Silica, Analog Devices "High Performance MEMS Inertial Sensors for Industrial Applications" - from "Best of Sensors Expo 2010"
- [6] STRAGO SPA, S.Infante, Guida all'uso del sistema SMAMID, 2010
- [7] M.G. D'Urso, F.Cavaliere, M. Crespi "Sensori accelerometrici per il monitoraggio in continuo di versanti in frana" - Atti 14ª Conferenza Nazionale ASITA- Brescia, 2010

Ringraziamenti

Si ringrazia la STRAGO Spa per aver messo a disposizione la strumentazione SMAMID per svolgere le prove e la necessaria assistenza nell'impiegare il sistema nelle modalità più indicate ai nostri scopi.

Un ringraziamento particolare va all'ing. Giovanni Mannara per l'attenzione mostrata verso le tematiche di ricerca e la lungimiranza dimostrata nella realizzazione di tali sistemi di misura.