

Sensori accelerometrici per il monitoraggio in continuo di versanti in frana

Maria Grazia D'Urso (*), Francesco Cavaliere (**), Mattia Crespi (***)

(*) Di.M.S.A.T. - Università di Cassino

Via G. Di Biasio, 43 – 03043 Cassino (FR) - durso@unicas.it

(**) Libero professionista Via A. Aligerno, 03043 Cassino (FR) cavalierefrancesco@inwind.it

(***) DICEA - Area Geodesia e Geomatica -Università La Sapienza

Via Eudossiana, 00184 Roma-mattia.crespi@uniroma1.it

Sommario

Molto spesso i tracciati stradali e ferroviari si sviluppano lungo rilievi potenzialmente franosi sia per la particolare formazione geologica di buona parte del territorio italiano, sia per particolari condizioni climatiche. Pertanto, unitamente alla realizzazione di opere di prevenzione, un efficiente monitoraggio dei dissesti che consenta di individuare, in tempo utile, l'eventuale instaurarsi di criticità o di allarme al fine di assicurare la sicurezza degli utenti e l'integrità delle strutture/infrastrutture costituisce il rimedio ottimale sia in termini sociali che economici per affrontare il rischio delle frane.

In questo lavoro si presenta una tecnica di monitoraggio, a basso costo e alta densità di punti di misura, dello strato superficiale di versanti in frana, fino allo spessore di circa 1 metro, realizzata mediante una rete di sensori accelerometrici a tecnologia MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems). Tali sensori comunicano in modalità wireless con un'unità di elaborazione e un sistema di trasmissione dati e funzionano da inclinometri; pertanto se resi solidali ad un elemento rigido infisso nel terreno consentono di monitorare l'inclinazione dell'elemento stesso. La variazione nel tempo di questa grandezza è rappresentativa della cinematica del movimento franoso del versante in cui l'elemento e il sensore sono infissi.

Scopo di questo lavoro è presentare i risultati dei test di calibrazione e di sensibilità di tali sensori al fine di stimare i principali parametri di errore sistematico (bias di origine, fattore di scala) al variare dei valori della frequenza di acquisizione delle misure, del fondo scala e della temperatura di funzionamento e di determinare l'errore quadratico medio.

Infine, vengono presentati i risultati della elaborazione di una serie temporale mensile in una rete pilota di tali sensori accelerometrici, monitorati in tempo reale, installata su un versante franoso prospiciente i binari di una linea ferroviaria della rete Circumvesuviana di Napoli.

Introduzione

Negli ultimi anni si è avuta una notevole diffusione di sensori accelerometrici nelle applicazioni geomatiche grazie allo sviluppo dei sensori micro-elettromeccanici (MEMS – *Micro-Electro-Mechanical Systems*). Tali sensori, caratterizzati da una sensibile riduzione delle dimensioni, del costo e del peso, sono ideali per l'integrazione con sensori di posizionamento satellitare GNSS, al fine di monitoraggi ambientali, topografici e navigazione.

Tuttavia, il segnale in uscita da tali sensori risulta essere fortemente disturbato dalla presenza di un rumore ad altissima frequenza, che rende molto complesso il trattamento delle osservazioni grezze. In aggiunta, nella maggior parte dei casi, tali sensori sono soggetti anche ad una incertezza *run-to-run* (Cazzaniga 2007) e pertanto alcuni errori di natura sistematica possono variare ogni volta che il sensore viene riacceso, con un'entità che può essere fino a 10 volte maggiore rispetto a quella del rumore di misura. Pertanto, per poter sfruttare appieno le potenzialità di tali tipologie di sensori è

necessario sottoporli preventivamente a diverse procedure di *calibrazione*, al fine di caratterizzare in maniera esaustiva il comportamento complessivo dei diversi tipi di errori sistematici e di valutare le entità degli errori accidentali.

Gli errori sistematici sono, in massima parte, rappresentabili per mezzo di un *bias* di origine (nel seguito indicato semplicemente come *bias*) e di un *fattore di scala* all'interno delle misure effettuate. I parametri che rappresentano errori di questa natura sono stimabili mediante tarature della piattaforma, effettuate tramite opportune procedure operative di *calibrazione*.

Gli errori accidentali, come noto, possono avere origine interna (e in tal caso viene definito *rumore*) o esterna (in tal caso prende il nome di *disturbo*) al sistema di misura e, come di consueto, possono essere globalmente caratterizzati tramite la stima dello scarto quadratico medio.

I sistemi con costo e precisione medio-alto generalmente presentano tecnologie di fabbricazione e algoritmi di controllo, contenuti all'interno del sensore stesso, che limitano gli effetti legati a queste due tipologie di errore, dopo averli opportunamente caratterizzati.

Nel caso dei sensori accelerometrici MEMS, proprio in quanto sensori a basso costo, le procedure di calibrazione e valutazione dello scarto quadratico medio devono essere svolte *off-line*, precedentemente all'impiego dei sensori medesimi.

Nei paragrafi successivi viene illustrata ed eseguita tale procedura di calibrazione e, successivamente, si discutono i risultati della elaborazione di una serie temporale mensile acquisita da una rete pilota di sensori accelerometrici MEMS installata su un versante franoso prospiciente i binari di una linea ferroviaria della rete Circumvesuviana di Napoli.

La calibrazione dei sensori accelerometrici MEMS

Test statico

Il metodo per la determinazione del **bias** e del **fattore di scala** degli accelerometri è quello proposto dallo Standard IEEE 517, e riproposto in letteratura (El-Sheimy, 2003; Titterton e Weston, 2004) con il nome di test statico delle sei facce (*six positions static test*) basato sulla misura per un tempo prolungato, solitamente almeno una decina di minuti, di grandezze note come, ad esempio, il vettore di accelerazione gravitazionale. Tenendo conto della letteratura i tre parametri che modellano complessivamente gli errori sistematici b_a , fattore di scala s_a e parametro di correzione termica c_T compaiono nel modello matematico espresso dalla relazione:

$$\underline{a}_a = \underline{a} + g + b_a + s_a \cdot g + c_T(T - T_0) + v$$

ove \underline{a}_a è la misura dell'accelerometro, \underline{a} è l'accelerazione del punto, g è l'accelerazione gravitazionale terrestre, T la temperatura durante la misura, T_0 la temperatura all'accensione dello strumento e v è il noise di osservazione.

Nel nostro caso è stata considerata una terna di accelerometri MEMS triassiali, dotati di alimentazione autonoma e modalità di trasmissione wireless, cortesemente messa a disposizione dalla Società Strago s.r.l. Via Campana 233, 80078 Pozzuoli- Napoli che ha provveduto anche all'assemblaggio dei diversi componenti elettronici. Tale terna di sensori effettua l'acquisizione secondo le direttive impartite da un altro sensore inerziale denominato "master" che si occupa della gestione dell'acquisizione e del download dei dati. L'unità master è alimentata a 15 V mediante un trasformatore ed è collegata ad un computer dotato di un'uscita seriale nonché del software di gestione dei dati SMAMID 2.0. La terna di sensori inerziali è stata montata su una piastra metallica che può essere posta in posizione orizzontale con grande accuratezza. Per tale motivo è stato predisposto un treppiede munito di una basetta geodetica, livellata per mezzo di una livella torica di precisione. Sul treppiede è stato montato un teodolite al secondo, al cui cannocchiale è stata resa solidale la piastra metallica con gli accelerometri, che può essere pertanto orientata a piacimento nello spazio con grande accuratezza; in particolare, la piastra può essere resa orizzontale. Per evitare di disturbare le misure con la componente *run-to-run* del bias, è, inoltre, necessario prestare particolare cura affinché il sensore non venga mai spento durante la prova e non subisca variazioni di corrente.

Durante la prova calibrazione è necessario impedire il più possibile che le misure vengano disturbate da agenti esterni come brusche accelerazioni o sensibili variazioni di temperatura. In particolare, quest'ultimo parametro risulta il più difficile da controllare dato che il sensore stesso tende a surriscaldarsi durante il suo funzionamento.

I parametri bias e fattore di scala così stimati rappresentano l'effettivo errore sistematico dello strumento e possono essere utilizzati per compensare le osservazioni grezze del sensore rappresentate dalle accelerazioni.

Durante l'esecuzione del test, il sensore inerziale è posto su un piano livellato, con il sistema di riferimento posizionato alternativamente in alto e in basso, per tutte le sei posizioni possibili degli assi. Gli assi del sensore vengono sempre posizionate in modo da ottenere una rotazione di 180° gradi tra le due facce opposte.



Figura 1 – Acquisizione in configurazione "z_up".

Test di validazione dei parametri di acquisizione

Tale test si propone di caratterizzare la strumentazione accelerometrica variando i parametri di acquisizione quali la frequenza di acquisizione e il valore di fondo scala. La frequenza è stata variata dal valore minimo di 40Hz al valore massimo 640Hz considerando anche un valore intermedio di 160Hz; viceversa il valore del fondo scala è stato variato dal valore di $\pm 2g$ al valore di $\pm 6g$.

Analisi dei risultati

L'intera procedura di calibrazione del "test statico a sei facce" fin qui descritta è stata applicata ad una terna di sensori accelerometrici, denominati nelle tabelle n.1, 2 e 3 come schede n.3 n.4 e n.5, per i quali il sistema di riferimento assunto è sempre coincidente con gli assi Nord, Est e verticale.

La sperimentazione è stata compiuta nel corso di due giornate di misura, lasciando ciascun sensore fermo su ogni faccia per 15 minuti e lasciando trascorrere, dopo ogni cambio di posizione, almeno 5 minuti per eliminare eventuali movimenti residui del sensore che potevano essere generati durante il passaggio da un assetto ad un altro.

Successivamente, l'intera procedura di calibrazione descritta per il test statico in laboratorio è stata ripetuta all'esterno, al fine di caratterizzare il comportamento della strumentazione alla temperatura esterna che al momento della prova, è risultata essere di circa 20°C.

Come si può osservare dalle tabelle i valori del bias dell'accelerometro oscillano attorno ad un valore medio per tutta la sessione di misura con ampiezza di $10^{-3} g$, in ogni direzione mentre, per i fattori di scala, si osservano valori dell'ordine di 10^{-3} . I valori delle componenti dell'accelerazione grezza, compensati con i valori medi del bias e del fattore di scala si presentano sensibilmente ridotti.

L'analisi dei parametri di precisione ottenuti per i tre sensori mostra una sostanziale stabilità dei parametri sistematici durante il periodo di misura. Al di fuori di particolari casi operativi, legati a scenari in cui vi è ad esempio una sensibile variazione di temperatura, è ragionevole accettare, la tesi secondo cui, all'interno di sessioni di misura di qualche ora, i parametri sistematici possano essere considerati costanti (Sansò, 2006). In conclusione, attesa l'importanza dei parametri di calibrazione all'interno degli algoritmi di integrazione multi-sensore, è necessario ripetere le procedure di calibrazione, ad intervalli di tempo regolari, in funzione della frequenza e della modalità di utilizzo del sensore, in maniera da poter disporre di una stima realistica degli errori.

Il sistema è costituito da una rete discreta di sensori accelerometrici a tecnologia MEMS a basso costo, di facile installazione e ad alta densità di punti di misura che permette un monitoraggio della configurazione superficiale del rilievo franoso, affiancata da un sistema pluviometrico. Il sistema opera in continuo e fornisce in tempo reale l'informazione sull'instaurarsi di situazione di allarme tramite l'invio di messaggi GSM.

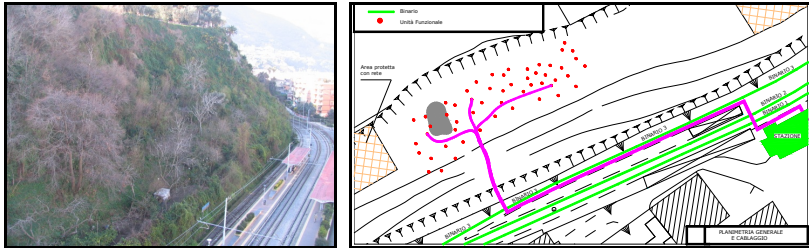


Figura 3 – Planimetria generale del sito e cablaggio.

Il sistema di monitoraggio degli spostamenti superficiali è composto da:

1. Rete wireless di UF (Unità Funzionali) accelerometriche MEMS;
2. UAD (Unità di Acquisizione Dati);
3. Unità di trasmissione dei segnali di allarme al Centro di Controllo (CdC) e ad Utenti Remoti (UR) predefiniti, che saranno raggiunti da sms.

La rete di UF è costituita da 53 unità di cui 3 master, che si occupano della gestione dell'acquisizione, del download dei dati dalle rimanenti unità (slave) e dell'upload dei dati verso la UAD, e 50 unità slave, che effettuano l'acquisizione.

Le unità slave, funzionando in modalità wireless ed essendo alimentate a batteria, sono collocate nei punti di interesse senza richiedere alcun tipo di cablaggio.

Il software installato sulle UF slave consente loro di acquisire per una durata di 1 secondo e con un intervallo di 15 minuti. Il software installato sulla UAD consente di inviare opportuni comandi alle unità master e di raccogliere i dati acquisiti, salvandoli sul proprio disco fisso, e di eseguire le operazioni di elaborazione dei dati inviati dalle UF slave al fine di calcolare l'inclinazione della UF slave, la variazione di inclinazione rispetto a quella iniziale e di determinare lo stato di ogni UF e del sistema globale sulla base di criteri configurabili dall'utente.

Le UF sono montate su dei chiodi metallici, di lunghezza di 100 cm, i quali sono infissi per battitura nel terreno. I sensori accelerometrici sono disposti nei nodi di una maglia ad una distanza reciproca non superiore agli 8-10 metri e funzionano come inclinometri, cosa possibile in quanto ognuno di essi misura la componente dell'accelerazione di gravità lungo 3 assi ortogonali (Mannara et al., 2009).

Risultati

L'analisi dei dati raccolti permette di tracciare l'andamento delle variazioni dell'inclinazione per ciascun asse, ovvero degli spostamenti angolari dei singoli sensori e, quindi, delle porzioni di terreno su cui insistono. In linea generale, si è osservato che solo occasionalmente, e su un numero molto ridotto di punti misura, si sono verificate delle variazioni di inclinazione dell'ordine di qualche centesimo di grado.

Tipicamente, le variazioni di inclinazione rispetto all'asse "z" verticale, riportate nei grafici seguenti a titolo esemplificativo, sono contenute entro pochi decimi di grado; ciò sembrerebbe indicare che il pendio è attualmente soggetto a movimenti lenti almeno relativamente alla coltre superficiale monitorata. In particolare, la sommatoria dei singoli spostamenti angolari fornisce grafici che evidenziano leggeri spostamenti del versante in frana.

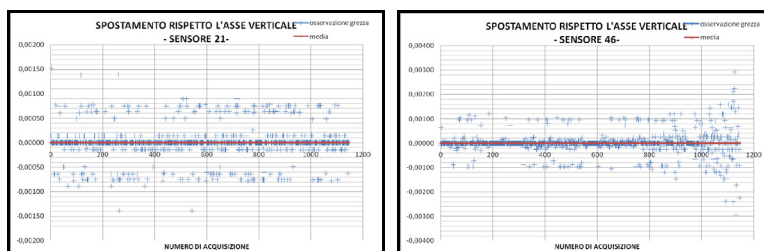


Figura 4 – Risultati degli spostamenti.

Tali risultati si riferiscono ad un caso di studio di una serie storica di dati mensili, ma, al fine di valutare gli spostamenti dei sensori destinati al monitoraggio del versante in frana, occorre effettuare un'analisi di serie storiche su un adeguato *set* di dati.

Lo studio svolto è mirato alla stima di angoli a partire da accelerazioni storicamente registrate nel mese di novembre 2008 nel sito di Castellammare di Stabia (Na); in particolare è stata studiata l'individuazione di discontinuità, spesso non note a priori, e l'identificazione di *cluster* internamente coerenti rispetto alle condizioni di osservazione.

Come è noto l'analisi di serie temporali di soluzioni di coordinate è uno strumento importante sia a monte che a valle del processo di compensazione delle misure grezze. In particolare trova applicazione nelle tecniche di monitoraggio ambientale, strutturale e nel posizionamento satellitare. Infine l'analisi temporale delle serie di soluzioni ricopre un ruolo importante anche nella definizione della precisione degli stessi risultati finali attraverso la valutazione della ripetibilità.

Ringraziamenti

Gli Autori ringraziano la società Strago s.r.l. per aver cortesemente messo a disposizione i sensori, il software di elaborazione e la serie mensile di dati rilevati nonché l'intero Team di ricerca della stessa Strago per gli utili consigli e suggerimenti ricevuti nel corso di questo studio.

Si ringrazia inoltre il sig. Fabio Sammartino, Tecnico di Laboratorio del DICEA-Università di Roma "La Sapienza", che ha realizzato la piastra metallica di supporto per gli accelerometri e il suo collegamento al teodolite al secondo utilizzati in fase di calibrazione.

Bibliografia

- De Marchi A., Lo Presti L., "Incertezze di misura", *C.L.U.T.*, 1993 Torino
- De Agostino M., "Appunti di navigazione inerziale", *Politecnico di Torino* 2006
- Sansò F., "Navigazione geodetica e rilevamento cinematico", *Polipress, Milano* 2006, pp.171-237
- Mannara G., Sarnataro A., Sposito P., Piccolo G., Ciancia N., Infante S., "Rete di sensori accelerometrici MEMS per il monitoraggio in continuo di rilievi franosi in ambito ferroviario", *SEF2009*
- El-Sheimy N., "Inertial Techniques and INS/DGPS Integration", *Department of Geomatics Engineering, 2003 Calgary*
- Mannara G., Infante S., Barbati N., "Guida all'uso del sistema hardware e del software di gestione", *STRAGO Ricerche* 2009
- N. E. Cazzaniga, G. Forlani, "Integrazione di dati INS/GPS", *8° Conferenza Nazionale ASITA, Roma, 2004*
- Titterton D.H., Weston J.L., "Strapdown inertial navigation technology", II ed., *American Institute of Aeronautics and Astronautics IEE, 2004*