

Il monitoraggio dei movimenti e delle deformazioni con tecniche geomatiche di basso costo

Alberto Cina ^(a), Ambrogio Manzino ^(a), Alessandro Battino ^(a),
Iosif Horea Bendea ^(a), Paolo Maschio ^(a), Paolo Mollo ^(b), Roberto Borri ^(b),
Simone Scarafia ^(b), Claudio Ferrero ^(b), Marco Boeris Frusca ^(b),
Matteo Maglioli ^(b), Marzio Pipino ^(c), Vittorio Vallero ^(c), Mattia De Agostino ^(c)

^(a) Politecnico di Torino, C.so Duca degli Abruzzi 24, 10129, Torino, Italia, tel: 011/0907700, mail: (nome.cognome@polito.it)

^(b) CSP Innovazione nelle ICT s.c.a r.l., Strada del Lionetto 6, 10146, Torino, Italia, tel: 011/4815111, mail: (nome.cognome@csp.it)

^(c) CSI Piemonte, C.so Unione Sovietica 216, 10134, Torino, Italia, tel: 011/3168724, mail: (nome.cognome@csi.it)

Riassunto

L'osservazione dell'evoluzione di fenomeni di dissesto ha una importanza strategica sul nostro territorio. Un importante precursore di fenomeni franosi è il movimento o la deformazione degli stessi: tali parametri possono essere osservati con tecniche geomatiche. Le misure topografiche o GNSS con ricevitori geodetici (multi-frequenza e multi-costellazione) sono ormai ben consolidate nel trattamento e nella precisione. La realizzazione di sistemi basati su questi sensori non è tuttavia a basso costo, specie se consideriamo tecniche GNSS applicate su molti punti di controllo per una descrizione dettagliata del fenomeno, o installazioni soggette a pericoli oggettivi e dunque da considerarsi praticamente "a perdere". Ricevitori GNSS singola frequenza sono oggi reperibili a costi minori di cento euro e possono, sotto opportune ipotesi e ingegnerizzazioni, costituire alternative ai ricevitori geodetici. Nell'ambito di un progetto di ricerca finanziato da CSI Piemonte per lo studio di tecnologie di monitoraggio a basso costo, sono stati sviluppati sistemi di acquisizione, trasmissione ed elaborazione dati basati su sensori GNSS singola frequenza di minuscole dimensioni. Il sistema costituisce una sorta di piccola stazione permanente GNSS, integrata con accelerometri per la stima di inclinazione e vibrazioni e con sensori meteorologici. È corredata di micro PC con processore ARM e interfacce di comunicazione wireless a lungo raggio per la trasmissione in tempo reale delle misure. Il sistema risulta caratterizzato da consumi elettrici molto contenuti ed è di rapida installazione in siti anche complessi dal punto di vista dell'accesso, dell'alimentazione e comunicazione. Vengono esposti nella nota i risultati delle prove di accuratezza dei sensori GNSS eseguite in laboratorio, le procedure di calibrazione dei sensori e la loro ingegnerizzazione, oltre ai primi risultati sulle installazioni situate nel nord del Piemonte su alcune zone di dissesto.

Introduzione

L'utilizzo di strumentazione GNSS per il monitoraggio è ormai una tecnica consolidata sia a livello di grande scala (ad esempio su frane e smottamenti)

che di piccola scala, fino ad arrivare ad applicazioni quali il monitoraggio di strutture come ponti e/o edifici. Molto spesso vengono impiegate strumentazioni geodetiche che permettono il raggiungimento di accuratèzze centimetriche in real-time con tecniche NRTK e sub-centimetriche in post-processing tramite compensazione o utilizzo del Virtual RINEX (Cina et al., 2014), sfruttando entrambe le frequenze (L1 e L2) del segnale. Tale strumentazione permette di ottenere un'elevata affidabilità, oltre che una ottima accuratezza, a discapito di un costo elevato (circa 10k€ a strumento). Negli ultimi anni si è passati anche per il monitoraggio all'utilizzo di strumentazione di basso costo, come quella mostrata ad esempio nelle Figure 1 che, se diminuisce almeno un ordine di grandezza il costo, decrementa però in parte sia la precisione sia dell'affidabilità del posizionamento.

Questi ed altri aspetti qui non riportati sono stati affrontati in un progetto di ricerca bandito dal CSI Piemonte dal titolo "*Attività di ricerca e sviluppo sulle tecnologie e strumenti della geomatica per il monitoraggio di versanti in dissesto e infrastrutture*". Il progetto prevede, oltre ad una fase di studio e sperimentazione in laboratorio, lo sviluppo di attività di monitoraggio in tre siti caratterizzati da movimenti franosi di diversa natura, posto nella provincia del Verbano-Cusio-Ossola nei comuni di Loreglia (2 siti a circa 100 m di distanza), Madonna del Sasso (2 siti a circa 20 m di distanza) e Crodo.

Le centraline multi sensore per il monitoraggio

Il sistema di monitoraggio di basso costo realizzato, mostrato nelle Figure 1, è costituito da una centralina multi-sensore, dotata di una scheda GNSS mass market singola frequenza tipo u-Blox 8T (circa 100 € di costo), un accelerometro triassiale (da circa 130 €), sensori di umidità relativa e temperatura (circa 50 € di costo), scheda micro PC e dispositivo di trasmissione dati. La scheda micro PC è basata su piattaforma ARM commerciale (Ledato NanosG20), alla quale è stata connessa una scheda di espansione, progettata con lo scopo principale di integrare i convertitori analogico-digitali (ADC) necessari all'accelerometro ed al caricabatteria, e adattare le tensioni richieste dai vari componenti. Le principali funzionalità del blocco PC/scheda di espansione sono la lettura dei sensori, l'elaborazione dei dati letti e l'invio di questi ultimi verso una piattaforma di memorizzazione ed elaborazione. Per quanto riguarda l'alimentazione è stata utilizzata, dove disponibile, la rete elettrica presente in loco (le due installazioni di Madonna del Sasso ed una delle due a Loreglia); negli altri due siti (l'altra installazione di Loreglia e l'installazione di Crodo), l'alimentazione viene fornita da un sistema autonomo, formato da pannello fotovoltaico, accumulo con batteria al gel sigillata e regolatore di carica, dimensionato anche per la trasmissione in real time dei dati GNSS, degli accelerometri. Le apparecchiature elettroniche trovano sistemazione in una scatola di derivazione per impianti elettrici con grado di protezione IP56 (GEWISS 44209) collocata sempre in un punto discretamente riparato nei pressi dell'antenna GNSS e dei sensori. Per il trasferimento al centro di elaborazione dei dati catturati dalle centraline posizionate sulle frane identificate, sono state utilizzate 3 diverse tecnologie di comunicazione radio wireless:

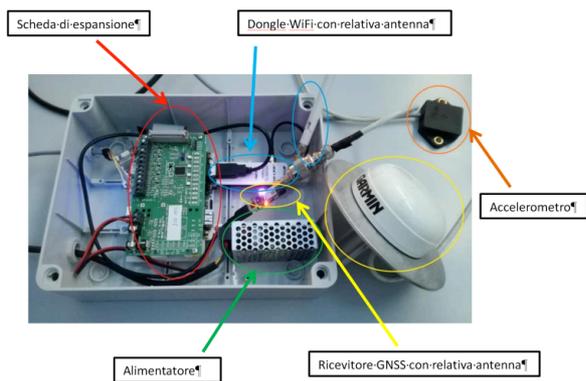


Figure 1: Componenti della centralina multi sensore e installazioni

1. Comunicazione a Banda Larga tramite tecnologia Wireless IEEE 802.11n
2. Comunicazione a Banda Larga tramite tecnologia 4G LTE
3. Comunicazione a Banda Stretta tramite tecnologia LoRa™

Dall'analisi in laboratorio è emerso come, per inviare dati provenienti da GNSS e accelerometro, sia necessaria una banda di alcune decine di kbit/s; risulta chiaro quindi come gli standard a banda ultralarga 802.11n, retro compatibile con quello a banda larga 802.11g e 4G LTE, siano sufficienti per il trasferimento in tempo reale dei dati acquisiti dai sensori.

Una delle principali limitazioni della tecnologia Wireless 802.11n è la massima distanza di comunicazione raggiungibile, soprattutto considerando i bassi consumi necessari all'installazione in campo e le antenne utilizzate. Per tale motivo, approfittando del carattere del progetto, si è scelto di sperimentare anche la tecnica LoRa™ (acronimo di Long Range). Questa tecnica di modulazione proprietaria, basata sulle tecniche spread-spectrum e sulla variazione frequenziale dello spettro con correzione degli errori FEC, garantisce comunicazioni a lungo raggio, migliorando significativamente la sensibilità del ricevitore, rendendola robusta al rumore.

Alla luce dei test di connessione eseguiti in laboratorio e delle caratteristiche di connettività disponibili nei diversi siti di installazione, sono state pertanto adottate le due architetture seguenti:

1. Connettività Wireless IEEE 802.11n (frane di Loreglia e di Madonna del Sasso). La centralina invia due flussi dati: un primo flusso verso la piattaforma SDP (Smart-Data Platform) di Regione Piemonte, con i dati dell'accelerometro e di telemetria (temperatura e umidità), i quali sono scaricati dal centro di controllo ed elaborazione per il post processing; un secondo flusso invece viene inviato al centro di controllo ed elaborazione, contenente i dati grezzi raccolti dal ricevitore GNSS, i quali sono post-processati e successivamente inviati alla piattaforma SDP
2. Connettività LoRa e 4G LTE (frana di Crodo). I dati dell'accelerometro e della telemetria (temperatura, umidità, carica batteria) sono trasmessi alla piattaforma SDP della Regione Piemonte, mediante rete di accesso costituita da un gateway LoRa, installato presso il comune di Crodo, in grado di rilanciare i dati su internet, verso la piattaforma SDP. I dati GNSS

sono inviati al server di elaborazione del Politecnico di Torino, sfruttando la tecnologia LTE.

Ricevitori GNSS di basso costo per monitoraggio

La precisione di un ricevitore in singola frequenza, una volta fissata l'ambiguità di fase, è stata testata in precedenti esperienze [Cina Piras, 2015] [Bellone et al. 2014] [Dabove Manzino 2014]. Dovendo valutare la posizione delle antenne nelle varie centraline, sia rispetto alla posizione eseguita con strumenti geodetici, sia riguardo a possibili futuri smontaggi e manutenzioni, si è voluto calcolare la posizione del centro di fase di queste antenne.

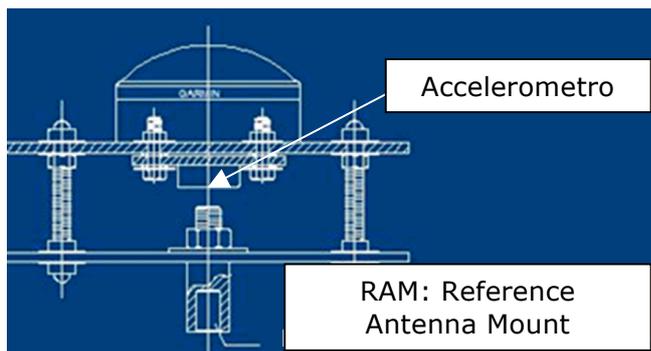


Figura 2: Disegno schematico della monumentazione delle antenne

Per valutare la posizione del centro di fase si è costruito nel laboratorio del Politecnico di Torino un supporto di alluminio molto simile a quello delle centraline installate, ma differente per quanto riguardava la distanza dalla montatura in basso del filetto metallico al piatto in alluminio (RAM, Reference of Antenna Mount). Nel caso del suddetto supporto, tale distanza era di 81.4 mm. La distanza tra il RAM e la parte terminale in plastica dell'antenna era di 140mm.

La posizione del centro di fase è stata determinata attraverso una procedura di "antenna swap", che consiste nel situare un'antenna di centro di fase incognito su un punto, e un'antenna ben nota su un punto vicino. Si fanno misure per un certo periodo di tempo e poi, per lo stesso periodo si eseguono misure invertendo la posizione delle due antenne.

Se si deve calcolare anche la variazione del centro di fase rispetto all'azimuth e allo zenit servono almeno 24-48 ore di misure. Se invece serve solo conoscere la posizione tridimensionale del centro di fase, bastano anche meno misure. Nel nostro caso occorre conoscere solo queste tre costanti. I calcoli hanno fornito una buona ripetibilità (circa 1 mm) permettendo di determinare che, altimetricamente la posizione del centro di fase L1 si trova, pressoché centrato rispetto all'antenna, ad un'altezza verticale di 3.3 mm sopra la sua cupola.

Per quanto concerne le elaborazioni delle misure che arrivano dalle cinque centraline, occorre sintetizzare quanto segue: le elaborazioni attualmente sono giornaliere, sia a motivo della distanza dalle stazioni permanenti più vicine (appartenenti alla rete S.P.IN. GNSS di Regione Piemonte e Regione Lombardia) che, per i siti di Loreglia è poco superiore ai 15 km, sia per poter avere una quantità di dati sufficienti a fissare correttamente l'ambiguità di fase ad intero, sia infine per la tipologia di movimenti del fenomeno franoso dove sono state installate le centraline, e caratterizzate da movimenti particolarmente lenti (pochi cm/anno). In seguito, per i siti di Madonna del Sasso si tenterà di eseguire elaborazioni orarie. I trattamenti eseguiti per decine di giorni con l'uso dei RINEX virtuali forniti dalla rete S.P.IN. hanno restituito risultati più rumorosi rispetto a quelli delle stazioni reali, non tanto a causa della leggera incertezza introdotta dalla tipologia di prodotto, ma principalmente a motivo del fatto che i siti si trovano nella parte settentrionale

del Piemonte, vicini ai bordi dell'area coperta dalla rete SPIN. Per i due siti di Loreglia e i due di Madonna del Sasso, oltre al calcolo della posizione, viene eseguito il calcolo deformativo tra le due stazioni vicine. I trattamenti avvengono con l'uso dei programmi della libreria open-source RTKLIB, per mezzo della versione a linea di comando degli stessi. A un server arrivano i flussi in formato RTCM3 di tutte le stazioni. Questi flussi, interrotti dalla mezzanotte UTC e ripresi pochi secondi dopo, sono convertiti in files in formato RINEX. Sullo stesso server vengono depositati giornalmente i dati delle stazioni permanenti più vicine. Per ciascuna stazione di monitoraggio viene eseguito il calcolo differenziale rispetto alle stazioni permanenti, rispetto al RINEX virtuale generato anch'esso a partire dai flussi RTCM della rete e, per Madonna del Sasso e Loreglia anche fra le due installazioni vicine. Vengono considerate valide solo le soluzioni con "ratio" maggiore di 3 secondo il criterio Lambda. Dai rapporti di output vengono estratti dei sunti che permettono di aggiornare dei files di testo che contengono tutti i rapporti giornalieri per tutti i trattamenti. Tali rapporti così aggiornati vengono spediti a una mailing list assieme a delle elaborazioni grafiche e statistiche di cui portiamo un esempio nelle Figure 3.

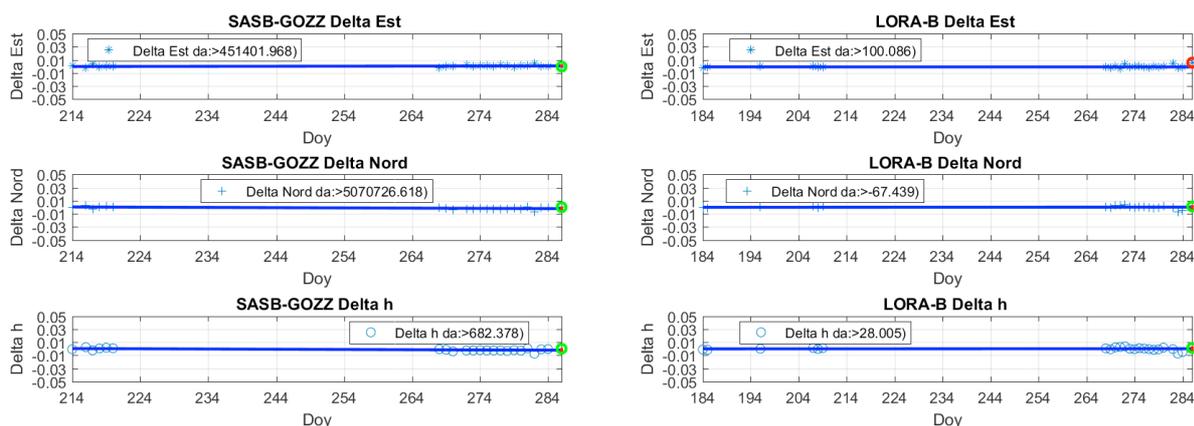


Figure 3: Elaborazioni grafiche statistiche di un sito di Madonna del Sasso e tra i ricevitori delle due siti di Loreglia.

Si sono eseguite procedure che prevedono l'analisi statistica inferenziale sulla significatività degli spostamenti e delle deformazioni. Questa analisi è accompagnata da tre rapporti ed una mail. Per le tre componenti (E,N,h) di queste sette analisi, cinque spostamenti e due deformazioni, sono state eseguite due tipologie di controllo:

- a. Un controllo di un possibile spostamento veloce sul giorno corrente,
- b. Un controllo della significatività delle velocità di spostamento.

Per ciò che riguarda gli spostamenti veloci, viene calcolata con metodi robusti una retta di tendenza e previsto lo spostamento al giorno corrente senza utilizzare questo dato. Se lo spostamento previsto è all'interno dell'intervallo di due volte il valore dello scarto quadratico medio robusto,, allora non viene segnalata alcuna anomalia; in caso contrario, si fornisce all'interno del report giornaliero un codice di "semaforo giallo". Nel caso in cui questo l'indice semaforico giallo persista per almeno due giorni, allora viene segnalato,

attraverso un un indice di “semaforo rosso”, un possibile spostamento della centralina, che dovrà essere verificata dai tecnici esperti del settore. Per gli spostamenti lenti viene calcolata la significatività robusta della pendenza della retta di regressione. Se è significativa e se supera in valore assoluto i 3mm su 100 giorni viene, per ogni componente, segnalato tale valore nello stesso rapporto semaforico descritto e qui riportato come esempio per la parte inerente gli spostamenti veloci. Di seguito si riporta un report di esempio:

```
## SINTESI DI PROCESSAMENTO DELLE STAZIONI ##
Ultimo aggiornamento: 13/10/2018      Legenda dei processamenti:
LAg - Stazione di Loreglia A (LORA) - spostamento rispetto a GOZZANO
LBg - Stazione di Loreglia B (LORB) - spostamento rispetto a GOZZANO
SAg - Stazione di M. Sasso A (SASA) - spostamento rispetto a GOZZANO
SBg - Stazione di M. Sasso B (SASB) - spostamento rispetto a GOZZANO
CRd - Stazione di Crodo (CROD) - spostamento rispetto a DOMODOSSOLA
LAB - Deformazione nella frana di Loreglia (LORA - LORB)
SAB - Deformazione nella frana di M. Sasso (SASA - SASB)
```

Legenda indice di qualità:

```
0= non ci sono dati ad ambiguità fissata oggi (NO/DATA)
1= fix ma nessuno spostamento (VERDE)
2= fix e spostamento oltre due sigma (GIALLO)
3= fix e spostamento oltre due sigma per due o più giorni (ROSSO)
```

```
| ----- |
| <-      Indice di qualità      -> |
| ----- |
|  LAg | LBg | SAg | SBg | CRd | LAB | SAB |
DOY| E N h|E N h|E N h|E N h|E N h|E N h|E N h|
283| 2 2 2|2 1 1|1 1 1|1 1 1|1 2 2|1 2 2|1 1 1|
284| 1 1 1|1 1 1|0 0 0|1 1 1|0 0 0|1 3 3|0 0 0|
286| 1 1 1|0 0 0|0 0 0|1 1 1|0 0 0|2 1 1|1 1 1|
```

Accelerometri di basso costo per la misura delle inclinazioni

La misura dell’inclinazione (tilt), o della sua variazione, di un manufatto, struttura o anche solo del palo o pilastrino di supporto su cui è installata una strumentazione di monitoraggio come un’antenna GNSS è uno dei parametri di interesse da monitorare. A titolo di esempio, si consideri lo spostamento di 1mm sulla cima di un palo o di un pilastrino di altezza pari ad 1 metro: esso corrisponde ad un angolo di 64 mgon. L’inclinazione del supporto ove si staziona con gli strumenti di misura deve poter essere osservata quindi con precisioni di qualche centesimo di grado sessagesimale, specie se lo strumento è posto in alto per questioni di visibilità ottica o satellitare.

Un approccio di misura del *tilt* si basa su *accelerometri*: sensori tanto semplici concettualmente quanto sofisticati nella loro realizzazione, veri capolavori di micro elettronica. Nella maggior parte degli accelerometri il principio di funzionamento è il medesimo: si basa sulla rilevazione dell'inerzia, ovvero la resistenza alla variazione del moto, di una massa quando viene sottoposta ad un'accelerazione. Il calcolo degli assetti può essere fatto a partire dalle accelerazioni nel sistema “*body*” col classico metodo della conversione da coordinate rettangolari a polari sferiche. Con un *accelerometro triassiale* possiamo determinare l’angolo di deviazione Φ dalla verticale ovvero le sue componenti planimetriche $e \psi$ nel sistema strumentale o “*body*”.

Un sensore composto da tre accelerometri ortogonali può essere influenzato da alcuni tipi di errore su ogni asse: un *bias* traslativo; un fattore di scala; la non ortogonalità dei tre assi. Essi possono essere stimati globalmente con la misura delle accelerazioni sulle sei facce su cui è possibile ruotarlo. Il modello di errore può essere espresso nella forma matriciale (1) attraverso la matrice di calibrazione. In essa i termini rappresentano:

- la quarta colonna contiene i valori dei bias traslativi sui 3 assi;
- gli elementi diagonali della matrice 3x3 sono i fattori di scala dei 3 assi;
- gli elementi fuori diagonale rappresentano i fattori di non ortogonalità.

$$\begin{matrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{matrix} = \begin{matrix} e_1^1 & e_1^2 & e_1^3 & e_1^4 \\ e_2^1 & e_2^2 & e_2^3 & e_2^4 \\ e_3^1 & e_3^2 & e_3^3 & e_3^4 \end{matrix} \begin{matrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ 1 \end{matrix} \quad [1]$$

l_x, l_y, l_z sono le letture sui tre assi mentre t_x, t_y, t_z rappresentano i valori teorici che dovrebbero avere tali letture. In questo modo si costruisce un sistema con 12 incognite relative agli elementi della matrice 3x4 di calibrazione e 3 equazioni per ogni epoca di misura e per ognuna delle sei facce, che può essere risolto con il principio dei minimi quadrati. I dodici parametri stimati vengono poi usati per la correzione delle misure degli accelerometri.

Nel campo degli accelerometri di basso costo, particolarmente interessante è il modello 4030 della TE Connectivity, accelerometro triassiale di piccole dimensioni e di poco peso, *rugged*. Esso è consigliato per monitoraggi strutturali e il costo, di circa 130 € lo rende ancora più interessante. Per verificare l'accuratezza dei dati inclinometrici, i valori angolari calcolati dalle accelerazioni sono stati confrontati con quelli di riferimento, ottenuti con un teodolite, al quale il sensore 4030 è stato reso solidale (Figura 4). Variando l'elevazione del cannocchiale viene confrontato l'angolo zenitale col valore ottenuto dall'inclinometro su ogni asse. Nel diagramma di Figura 5 osserviamo gli scarti tra misure zenitali e angolari accelerometriche sulla rotazione R_y .



Figura 4: verifica dell'accuratezza dell'inclinometro 4030

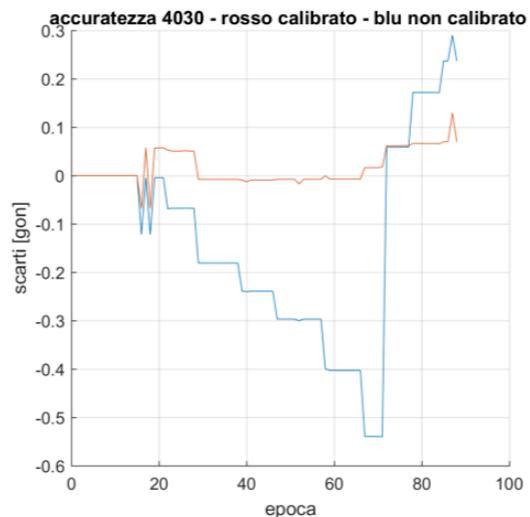


Figura 5: scarti R_y tra accelerometro 4030 e teodolite, con e senza calibrazione

Gli angoli sono ottenuti con e senza l'applicazione dei valori di calibrazione del sensore. Da questa prova si evince come il miglioramento ottenuto dalla calibrazione è stimabile in un ordine di grandezza: l'errore passa da $-0,141 \pm 0,200$ gon ad $0,016 \pm 0,035$ gon. Il calcolo degli angoli di assetto dalla centralina è inviato al centro di controllo sulla piattaforma SDP della Regione Piemonte, che può essere raggiunta dal sito <https://www.smartdatanet.it/>.

Conclusioni

Grazie all'avanzamento della scienza e delle moderne tecnologie, disponiamo oggi di sensori che, se adeguatamente calibrati e utilizzati, possono permettere anche in tempo reale il controllo di movimenti, deformazioni e vibrazioni. In quest'ambito si sono introdotti recentemente anche sensori di basso costo che in certe condizioni e dopo calibrazioni e verifiche statistiche possono anch'essi trovare impiego in operazioni di misura e controllo. La loro ingegnerizzazione può portare a soluzioni "multi sensore" economicamente sostenibili in operazioni di monitoraggio di fenomeni di dissesto o nel controllo di strutture.

Riferimenti bibliografici

A. Cina, M. Piras 2015. "Performance of low-cost GNSS receiver for landslides monitoring: test and results". *Geomatics, Natural Hazards and Risk* Vol. 6, Iss. 5-7, 2015.

Bellone, T., Dabove, P., Manzano, A.M., Taglioretti, C. (2014) Real-time monitoring for fast deformations using GNSS low-cost receivers. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 1-13. Available at: <http://dx.doi.org/10.1080/19475705.2014.966867>

Cina A.; Dabove P.; Manzano A.M.; Piras M. (2014) Augmented Positioning with CORSs Network Services Using GNSS Mass-market Receivers. In: 2014 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, PLANS 2014, Monterey, CA; United States, 5 May 2014 through 8 May 2014. pp. 359-366.

Dabove, P., Manzano, A.M. (2014). "GPS & GLONASS Mass-Market Receivers: Positioning Performances and Peculiarities". *Sensors* 2014, 14, 22159-22179

P. Dabove, A.M. Manzano, M. De Agostino. *Achievable positioning accuracies in a network of GNSS reference stations*. INTECH Open Access Publisher, 2012.

Cina A., De Agostino M., Manzano A., Porporato C. (2009). Merging low-cost receivers in a GNSS network of permanent stations. In: 22nd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, ION GNSS 2009. Savannah, GA (USA), 22-25 Sep. 2009, vol. 5, p. 3076-3084, ISBN: 9781615677481

Manzano A., Cina A., De Agostino M., Porporato C. (2009). I nuovi ricevitori GNSS basso costo in una struttura di reti permanenti GNSS. In: -. Atti 13a Conferenza Nazionale ASITA. Bari, 1-4 dicembre 2009, vol. 1, p. 706-716, ISBN: 9788890313226

CINA A, MANZINO A, PIRAS M. (2002). Controllo delle deformazioni con GPS in tempo reale. In: Atti conferenza nazionale ASITA "Geomatica per l'ambiente, il

territorio e il patrimonio culturale. vol. 1, p. 807-812, -:-, Perugia, 5-8 novembre 2002

CINA A., MANZINO A. (2000). Un approccio al controllo di deformazioni di reti permanenti GPS.. In: Workshop nazionale "rete nazionale di stazioni GPS permanenti". p. 106-111, PADOVA:-, 15-17 febbraio 1999.

