

Utilizzo di ricevitori a basso costo e del software goGPS per il monitoraggio geodetico

Stefano Caldera (*), Eugenio Realini (*),
Riccardo Barzaghi (**), Mirko Reguzzoni (**), Fernando Sansò (*)

(*) Geomatics Research and Development (GRoD) s.r.l. - Via Cavour 2, 22074 Lomazzo (CO), Italy
stefano.caldera@g-red.eu, eugenio.realini@g-red.eu, fernando.sanso@polimi.it

(**) DICA, Politecnico di Milano - Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano (MI), Italy
riccardo.barzaghi@polimi.it, mirko.reguzzoni@polimi.it

Riassunto

I rischi naturali e quelli legati a cedimenti di strutture ed infrastrutture richiedono di attivare sistemi di monitoraggio, al fine di mitigarne gli effetti in termini di costi economici e sicurezza per la popolazione. Uno dei possibili approcci per controllare tali rischi consiste nella determinazione continua della posizione di un certo insieme di punti e nel fornire un pronto allarme quando viene superata una certa soglia sulla deformazione del sistema complessivo.

L'uso di tecniche geodetiche e in particolare di sistemi GPS/GNSS per monitorare le deformazioni è una pratica ormai comune, tipicamente svolta installando una rete di ricevitori di qualità geodetica che garantiscono accuratezze dell'ordine dei millimetri con un giorno di latenza. Di recente è stato studiato l'uso alternativo di dispositivi a più basso costo, mostrando la possibilità di ottenere buoni risultati. In questo lavoro viene valutato anche l'impatto del software utilizzato per l'analisi dati per verificare se sia possibile realizzare un sistema completo a basso costo, sia dal punto di vista hardware che software. A tal fine sono stati svolti una serie di esperimenti di posizionamento relativo processando i dati con differenti pacchetti software. Il principale risultato di questo lavoro può essere riassunto nel fatto che utilizzando un ricevitore GPS a basso costo u-blox e analizzando i dati con il software *free e open source* goGPS è possibile individuare movimenti dell'ordine di pochi millimetri utilizzando basi corte, ovvero è possibile realizzare un servizio di monitoraggio.

Abstract

Natural hazards and those related to large structure and infrastructure failures ask for a prompt monitoring system in order to mitigate the effects in terms of life safety and economical protection. A possible approach to perform such a monitoring consists in the continuous determination of the position of a set of points in time and in generating a prompt alarm when a certain threshold on the deformation of the whole system is exceeded.

The use of geodetic techniques, and in particular of GPS/GNSS systems, to monitor deformations is nowadays a common practice. This is typically performed by setting a network of geodetic GPS/GNSS receivers, allowing accuracies of the order of millimeters with one day latency. The use of lower cost devices has been recently studied, showing that good results can be achieved. In this paper the impact of the software used for the data analysis is also investigated with the purpose of verifying whether a fully low-cost monitoring system, i.e. both hardware and software, can be set up. To this aim a series of relative positioning experiments where data are processed by different software packages is performed.

The main result of this work can be summarized in the fact that using a low cost u-blox GPS receiver and analyzing its data with the free and open source goGPS software, one can detect movements of the order of few millimeters when a short baseline with daily solutions is used. In other words this means that a low-cost monitoring service is actually feasible.

Introduzione

Un sistema di monitoraggio geodetico consiste sostanzialmente nella determinazione continua della posizione di un certo insieme di punti nel tempo e nella generazione di un allarme quando viene superata una certa soglia sulla deformazione del sistema complessivo. Questo tipo di monitoraggio può essere realizzato tramite una rete di stazioni GNSS permanenti, come dimostrato da un'ampia letteratura sull'argomento (Roberts et al. 2004; Chan et al. 2006; Meng et al. 2007; Watson et al. 2007; Borghi et al. 2009; Kaloop and Li 2009; Fastellini et al. 2011; Wang 2011; Yi et al. 2013). Con una piccola rete di diametro massimo di 10 km si possono raggiungere facilmente accuratèzze millimetriche sulle coordinate delle stazioni che la costituiscono con una latenza giornaliera. Il principale problema di questa soluzione è il costo dei ricevitori geodetici che porta ad una riduzione del loro numero all'interno della rete e di conseguenza al degrado dell'efficienza del sistema di monitoraggio. Recentemente la comunità geodetica ha rivolto l'attenzione sulla possibile applicazione di ricevitori a basso costo per sostituire almeno in parte i ricevitori geodetici all'interno di un sistema di monitoraggio (Heunecke et al. 2011; Buchli et al. 2012; Benoit et al. 2014; Cina and Piras 2014). I risultati ottenuti sono molto promettenti, ma la realizzazione di un vero sistema di monitoraggio a basso costo richiede anche l'utilizzo di pacchetti software economici. Lo scopo di questo articolo è proprio quello di verificare che il software *free* e *open source* goGPS (Realini and Reguzzoni 2013; Herrera et al. 2015) sia in grado di svolgere questo compito. A tal fine vengono riportati i risultati di un esperimento preliminare basato sull'uso di un ricevitore a basso costo u-blox e su due basi corte di 70 m e di circa 2.8 km.

L'esperimento

L'hardware utilizzato nell'esperimento consiste in due stazioni permanenti GNSS, per le quali è disponibile una lunga serie storica, e un ricevitore a basso costo nel punto da monitorare (tenuto fermo durante tutto l'esperimento). Più precisamente le due stazioni permanenti sono:

- MILA che utilizza un ricevitore TOPCON Odyssey E con antenna TPSCR3 GGD CONE, posizionato presso il Campus Leonardo del Politecnico di Milano;
- PROV che utilizza un ricevitore TOPCON Legacy E con antenna JAVAD RegAnt, posizionato presso la sede della Provincia di Milano.

Il ricevitore a basso costo era un u-blox EVK-6T (*evaluation kit* con modulo LEA-6T) con la sua antenna standard ANN-MS, vedi Figura 1. L'antenna era fissata su una basetta metallica di circa 15×15 cm² grazie alla sua base magnetica. La basetta era avvitata sopra una palina, a sua volta fissata all'angolo di una ringhiera sul tetto di un edificio del Politecnico di Milano (edificio Nave), vedi Figura 2. L'antenna si trovava a circa 70 m da quella di MILA e circa 2.8 km da quella di PROV (Figura 3). Il ricevitore, collegato all'antenna tramite un cavo coassiale di 5 m, era invece posizionato in un locale chiuso, accanto a un PC portatile che permetteva il *download* continuo dei dati.



Figura 1 - Ricevitore in singola frequenza u-blox EVK-6T con la sua antenna ANN-MS.



Figura 2 - Installazione dell'antenna ANN-MS del ricevitore u-blox EVK-6T sul tetto dell'edificio Nave (a sinistra) e dettaglio della basetta metallica usata come sostegno per il fissaggio dell'antenna (a destra).



Figura 3 - Disposizione dei ricevitori coinvolti nell'esperimento.

Per quanto riguarda l'aspetto software, i dati acquisiti dai vari ricevitori sono stati processati utilizzando i seguenti applicativi: Bernese GPS Software 5.2 (Dach et al. 2007), Leica Geo Office Combined (LGO) e goGPS. Il primo è il software scientifico di riferimento della comunità geodetica, il secondo è un noto software commerciale della società Leica Geosystems e infine il terzo, come detto in precedenza, è un software *free* e *open source* sviluppato principalmente in MATLAB, vedi anche <http://www.gogps-project.org>.

L'analisi dei dati

Prima di tutto i dati delle due stazioni permanenti corrispondenti a 77 giorni di misura (da DOY 21/2014 a DOY 97/2014) sono stati inquadrati all'interno di IGB08, vincolando le stazioni di GRAS, GRAZ, MEDI, PADO, PFA2, TORI, WTZR e ZIMM alla soluzione ufficiale IGS. Nella compensazione sono state introdotte cinque stazioni aggiuntive appartenenti alla rete permanente EUREF (EPN), vedi Figura 4. La compensazione della rete è stata realizzata tramite il software Bernese, gestendo l'analisi dati tramite il tool RegNet (Biagi and Caldera 2011).

A questo punto le osservazioni del ricevitore u-blox corrispondenti a 37 giorni di misura con una frequenza di campionamento di 1 Hz sono stati processati con i tre software prima citati, ottenendo soluzioni giornaliere. Poiché in questo studio si è interessati al monitoraggio di deformazioni (qui il ricevitore u-blox è stato mantenuto fermo), la presenza di eventuali *bias* nella stima assoluta delle coordinate è di secondaria importanza. L'indice di interesse è invece la stabilità della soluzione giornaliera nel tempo, ovvero la sua ripetibilità; questo indice è calcolato semplicemente come la deviazione standard delle coordinate stimate giorno per giorno per tutto il periodo di test. I risultati ottenuti sia per la base rispetto a MILA che per quella rispetto a PROV sono riportati in Tabella 1.

Tutte le soluzioni calcolate, indipendentemente dal software utilizzato, sono in singola frequenza e utilizzano le effemeridi trasmesse. Per quanto riguarda i ritardi atmosferici, per la troposfera è stato utilizzato il modello di Saastamoinen (1972) in tutti i software, mentre per la ionosfera è stato utilizzato il modello di Klobuchar (1987) in LGO e goGPS e il modello di Geckle e Feen (1982) nel Bernese. Infine per quanto riguarda il fissaggio delle ambiguità, goGPS fa uso del metodo LAMBDA (Teunissen 1995), Bernese del metodo SIGMA (Dach et al. 2007) mentre per LGO, essendo un software commerciale, non si hanno esplicite indicazioni sul metodo utilizzato.



Figura 4 - Rete per l'inquadramento di MILA e PROV in IGB08. Stazioni IGS in rosso, stazioni EPN in blu.

Tabella 1 - Ripetibilità in mm delle soluzioni giornaliere nelle tre componenti (Est, Nord, Up) rispetto alle due basi considerate nell'esperimento e usando i tre diversi software di processamento dati.

	Base rispetto a MILA			Base rispetto a PROV		
	σ (EST)	σ (NORD)	σ (UP)	σ (EST)	σ (NORD)	σ (UP)
Bernese	0.7	0.8	0.4	0.8	0.6	1.0
LGO	0.9	0.8	0.6	0.9	0.8	1.3
goGPS	0.7	0.9	0.5	1.1	0.8	1.3

Conclusioni e aspetti ingegneristici

I risultati riportati in Tabella 1 mostrano delle ripetibilità dell'ordine o addirittura inferiori al millimetro nelle tre componenti, con prestazioni leggermente migliori da parte del Bernese. In altri termini questo dimostra la fattibilità di un sistema di monitoraggio completamente a basso costo, sia dal punto di vista hardware (per esempio usando ricevitori u-blox) sia dal punto di vista software (per esempio usando goGPS), garantendo la possibilità di monitorare spostamenti 3D dell'ordine di 2-3 mm, almeno nel caso di basi corte.

Ovviamente l'effettiva realizzazione di un sistema di monitoraggio richiede lo sviluppo di un'unità di acquisizione, memorizzazione e trasmissione dei dati del ricevitore e di un centro di calcolo in grado di processare questi dati e generare eventuali allarmi. Un sistema di questo tipo, denominato *GeoGuard* (<http://www.geoguard.eu/>), è stato per esempio prodotto dalle due società GRed (<http://www.g-red.eu/>) e Proteco (<http://www.proteco.it/>).

In particolare il sistema *GeoGuard* è costituito da due componenti principali, vedi anche Figura 5:

- la *GeoGuard Monitoring Unit* (GMU): dotata di un ricevitore per la navigazione satellitare GNSS di nuova generazione basato su tecnologia a singola frequenza. La rete di sensori è composta da una o più GMU, integrata eventualmente con la strumentazione aggiuntiva necessaria a rispondere a specifiche esigenze;
- il *GeoGuard Cloud*: è il sistema che raccoglie e organizza i dati acquisiti, verifica l'integrità del flusso degli stessi, esegue l'elaborazione dei dati provenienti dal posizionamento e dalla rete di sensori, ne analizza i risultati e li invia al cliente.

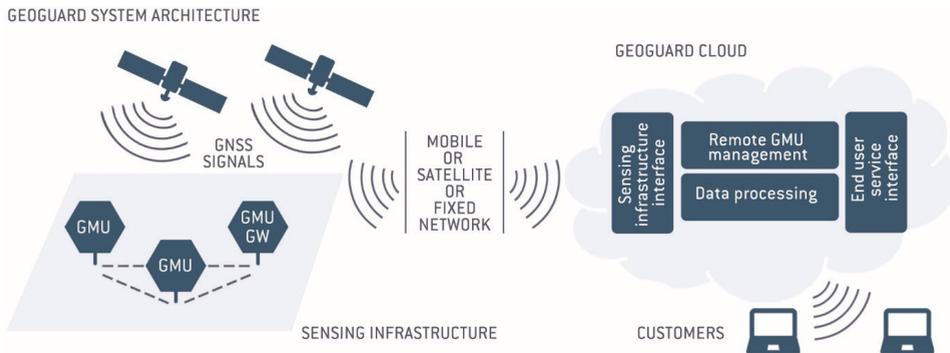


Figura 5 - Schema del sistema GeoGuard e sua suddivisione in GeoGuard Monitoring Unit e GeoGuard Cloud.

La GMU è un'unità a controllo remoto specificamente progettata per operare in ambienti estremi e può essere alimentata in diverse modalità. Il *GeoGuard Cloud* gestisce remotamente le GMU tramite una comunicazione bidirezionale, che consente sia l'acquisizione dei dati che il controllo remoto delle unità. Le GMU possono operare in una rete locale autonoma, connessa al *GeoGuard*

Cloud attraverso un singolo punto esterno di collegamento (GW). La singola GMU comprende (vedi anche Figura 6):

- il modulo di elaborazione: comprende la CPU a microprocessore e l'unità di memorizzazione dati locale;
- il modulo di comunicazione: comprende le funzioni di comunicazione Ethernet, GSM / 3G LTE e collegamenti radio M2M;
- il modulo di posizionamento: è dotato di un ricevitore GNSS a singola frequenza e un accelerometro MEMS a 3 assi per rilevare posizione, orientamento e vibrazioni del dispositivo;
- il modulo di rilevamento: è dotato di I/O digitali ed analogici e di un bus di comunicazione "industry standard" per connettere qualsiasi sensore che possa essere necessario a rispondere a specifiche esigenze applicative;
- il modulo di alimentazione: fornisce l'alimentazione da corrente alternata (AC) e corrente continua (DC) da diverse fonti, tra cui il fotovoltaico.

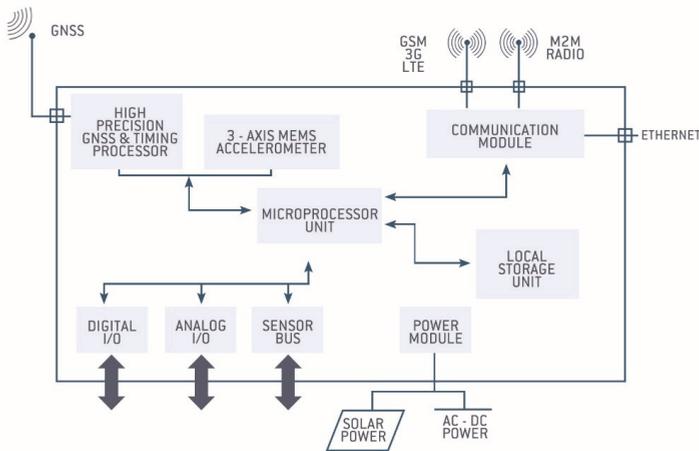


Figura 6 - Schema della GeoGuard Monitoring Unit (GMU).

La *GeoGuard Cloud* è invece la componente centrale del servizio *GeoGuard*: riceve ed elabora i dati della rete di sensori e fornisce le informazioni risultanti al cliente. Comprende le seguenti funzioni:

- l'interfaccia alla rete di sensori: riceve i dati grezzi di posizionamento GNSS e dei sensori, nonché i metadati dalla rete di sensori stessi;
- la gestione remota delle GMU: fornisce tutte le informazioni necessarie per la gestione del servizio, compresi i dati amministrativi e quelli relativi agli accordi con il cliente;
- l'elaborazione dei dati: è realizzata specificatamente per sfruttare al meglio le misure provenienti dai ricevitori GNSS e fornire analisi statistiche e di qualità relative alle osservazioni effettuate e ai risultati ottenuti (stima di *trend* e identificazione di discontinuità nelle serie temporali dei dati rilevati dai sensori), al fine di segnalare eventuali *early warnings*;
- l'interfaccia per l'utente finale che rende disponibili i risultati ottenuti in due diverse modalità: un'applicazione *web* che consente agli utenti finali di visualizzare i dati dei servizi *GeoGuard*, vedi Figura 6; una API REST, che consente una rapida e facile integrazione dei servizi *GeoGuard* con eventuali sistemi informativi preesistenti.

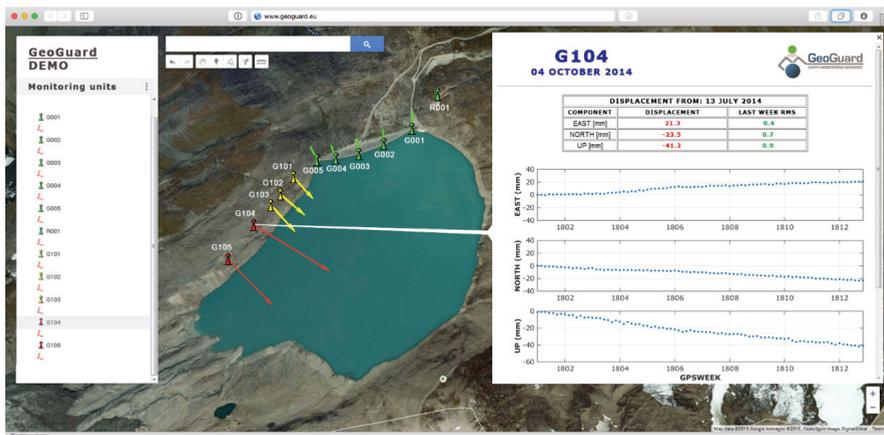


Figura 7 - Esempio di interfaccia grafica del GeoGuard Cloud.

Riferimenti bibliografici

- Benoit L., Briole P., Martin O., Thom C. (2014). "Real-time deformation monitoring by a wireless network of low-cost GPS", *Journal of Applied Geodesy*, 8(2): 1-10.
- Biagi L., Caldera, S. (2011). "The automation of permanent networks monitoring: remarks and case studies", *Applied Geomatics*, 3(3): 137-152.
- Borghi A., Aoudia A., Riva R. E. M., Barzaghi R. (2009). "GPS monitoring and earthquake prediction: A success story towards a useful integration", *Tectonophysics*, 465(1): 177-189.
- Buchli B., Sutton F., Beutel J. (2012). "GPS-equipped wireless sensor network node for high-accuracy positioning applications", *Wireless Sensor Networks*, G. Picco, W. Heinzelman (eds), Lecture Notes in Computer Science, Springer Berlin Heidelberg, 179-195.
- Chan W. S., Xu Y. L., Ding X. L., Dai W. J. (2006). "An integrated GPS-accelerometer data processing technique for structural deformation monitoring", *Journal of Geodesy*, 80(12): 705-719.
- Cina A., Piras M. (2014). "Performance of low-cost GNSS receiver for landslides monitoring: test and results", *Geomatics, Natural Hazards and Risk* (pubblicato online), 3-20.
- Dach R., Hugentobler U., Fridez P., Meindl M. (2007). *Bernese GPS software version 5.0*. Astronomical Institute, University of Bern.
- Fastellini G., Radicioni F., Stoppini, A. (2011). "The Assisi landslide monitoring: a multi-year activity based on geomatic techniques", *Applied Geomatics*, 3(2): 91-100.
- Geckle W. J., Feen M. M. (1982). "Evaluation of the ionospheric refraction correction algorithm for single-frequency Doppler navigation using TRANET-II data", PLANS'82-Position Location and Navigation Symposium, Atlantic City, NJ, 13-21.
- Herrera A. M., Suhandri H. F., Realini E., Reguzzoni M., de Lacy M. C. (2015). "goGPS: open-source MATLAB software", *GPS Solutions* (pubblicato online), DOI 10.1007/s10291-015-0469-x.
- Heunecke O., Glabsch J., Schuhbaeck S. (2011). "Landslide monitoring using low cost GNSS equipment - experiences from two alpine testing sites", *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 5(8): 661-669.
- Kalooop M. R., Li H. (2009). "Monitoring of bridge deformation using GPS technique", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 13(6): 423-431.

- Klobuchar J. A. (1987). "Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 23(3): 325-331.
- Meng X., Dodson A. H., Roberts G. W. (2007). "Detecting bridge dynamics with GPS and triaxial accelerometers", *Engineering Structures*, 29(11): 3178-3184.
- Realini E., Reguzzoni M. (2013). "goGPS: open source software for enhancing the accuracy of low-cost receivers by single-frequency relative kinematic positioning", *Measurement Science and Technology*, 24(11): 115010.
- Roberts G. W., Meng X., Dodson A. H. (2004). "Integrating a global positioning system and accelerometers to monitor the deflection of bridges", *Journal of Surveying Engineering*, 130(2): 65-72.
- Saastamoinen J. (1972). "Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging satellites", *The Use of Artificial Satellites for Geodesy*, Wiley Online Library, 247-251.
- Wang G. (2011). "GPS landslide monitoring: single base vs. network solutions - a case study based on the Puerto Rico and Virgin Islands permanent GPS network", *Journal of Geodetic Science*, 1(3): 191-203.
- Watson C., Watson T., Coleman R. (2007). "Structural monitoring of cable-stayed bridge: analysis of GPS versus modeled deflections", *Journal of Surveying Engineering*, 133(1): 23-28.
- Yi T. H., Li H. N., Gu M. (2013). "Recent research and applications of GPS-based monitoring technology for high-rise structures", *Structural Control and Health Monitoring*, 20(5): 649-670.