

GeoNet: un software per la compensazione di reti topografiche integrate

Lorenzo Rossi (*), Daniele Sampietro (**), Fernando Sansò (*)

(*) Politecnico di Milano, Polo Regionale di Como, Via Valleggio 11 22100 Como Italy,
web: <http://geomatica.como.polimi.it/>

(**) GReD, Via Valleggio 11, 22100 Como, Italy, Tel. +39-031332-7522, Fax +39-0313327519,
email: daniele.sampietro@g-red.eu

Riassunto

L'uso congiunto di ricevitori GNSS e stazioni totali, oggi sempre più frequente, pone il problema dell'integrazione di osservazioni classiche e GNSS e dei rispettivi sistemi di riferimento. Il software GeoNet, sviluppato da studenti, giovani ricercatori del Laboratorio di Geomatica del Politecnico di Milano in collaborazione con lo spin off GReD, risolve il problema con una compensazione rigorosa ai minimi quadrati di tutte le osservazioni topografiche direttamente in coordinate globali geodetiche. Tale scelta, che evita di considerare separatamente i sottomodelli planimetrico ed altimetrico, è necessaria per poter garantire una corretta integrazione delle osservazioni satellitari, generalmente espresse in un sistema di riferimento globale geodetico, con le osservazioni topografiche classiche, disponibili invece solamente in un sistema di riferimento locale.

Questo approccio, oltre a risultare formalmente più corretto, presenta anche il vantaggio di considerare intrinsecamente l'effetto della curvatura terrestre, non trascurabile per reti con dimensioni di qualche centinaio di metri. Il software GeoNet sfrutta inoltre le informazioni del modello globale del campo di gravità EGM08 per introdurre gli effetti della deviazione della verticale e dell'ondulazione del geoide nella compensazione della rete, operazione assolutamente necessaria per integrare in modo corretto osservazioni GNSS e topografiche.

Il software di compensazione GeoNet, realizzato sfruttando il linguaggio di programmazione offerto dall'applicativo di calcolo matriciale Matlab è inoltre completo di una semplice interfaccia grafica che permette l'importazione da vari formati di file e la gestione delle osservazioni e dei risultati.

Il lavoro è corredato da una serie di test di compensazioni di reti che offrono la possibilità di apprezzare la correttezza del software e le differenze, che possono arrivare anche ad alcuni centimetri in termini di posizionamento assoluto, tra i metodi classici e GeoNet.

Abstract

The combined use of GNSS receivers and total stations is becoming nowadays more and more frequent, presenting the problem of the integration of classical and GNSS observations and their reference systems. The GeoNet software, developed by students and young researchers of the Laboratory of Geomatics at Politecnico di Milano in collaboration with GReD (spin off company of Politecnico di Milano), solves the problem with a rigorous least squares compensation of all the observations directly in a global reference frame, using geodetic coordinates. This choice, which avoids to consider separately the planimetric and altimetric submodels, is necessary in order to ensure a correct integration of satellite observation, generally expressed in a global geodetic reference system, with the classic observations, available only in a local reference system.

This approach, beyond being formally correct, has also the advantage of naturally consider the effect of the curvature of the earth, not negligible even for networks with dimensions of a few hundred meters. Moreover GeoNet is able to consider the effects of the deflection of the vertical and geoid undulation in the network adjustment (derived from the global model of the gravitational

field EGM08), operation required in order to properly integrate GNSS observations and classic surveying.

The GeoNet software is built using the programming language offered by Matlab application and is equipped with a simple graphical interface that allows to import various file formats and to manage observations and results.

In the present work a series of tests of network adjustments that prove the ability to appreciate the correctness of the software and the differences, which may reach several centimeters in terms of absolute positioning, between the traditional methods and GeoNet are also shown.

Introduzione

Il diffondersi ed il miglioramento della qualità di osservazione della strumentazione topografica satellitare e in particolare dei sistemi GNSS rende oggi sempre più frequente l'utilizzo congiunto di questa tecnologia e di strumentazione topografica classica (i.e. stazione totale e livello) per vari generi di rilievi.

I sistemi GNSS e la strumentazione topografica classica presentano, infatti, caratteristiche complementari: se da un lato la strumentazione satellitare è di più facile utilizzo e fornisce risultati direttamente in un sistema di riferimento globale dall'altro presenta un decadimento della qualità nel posizionamento quando non siano visibili abbastanza satelliti, oppure quando la loro geometria non sia adeguata. Viceversa le osservazioni classiche, anche se richiedono maggior cura e competenza, possono sempre essere effettuate e portano a risultati, generalmente in un sistema di riferimento locale, di elevata accuratezza.

Un utilizzo integrato dei due sistemi porta notevoli vantaggi: in particolare è possibile misurare tutto ciò che non è osservabile con il GPS utilizzando la strumentazione classica e quindi compensare tutte le osservazioni contemporaneamente. Negli ultimi anni anche i produttori di strumenti si sono mossi in questa direzione producendo ognuno il proprio sistema integrato GNSS-Stazione totale (come ad esempio Leica SmartStation).

Tuttavia una volta raccolte le osservazioni è necessario integrarle in un'unica compensazione ai minimi quadrati che ottimizzi la stima delle coordinate della rete.

Per far questo è necessario riscrivere le equazioni d'osservazione classiche in forma vettoriale nel sistema di riferimento globale usato dai sistemi GNSS (WGS 84). È importante sottolineare che nella riscrittura delle equazioni d'osservazione è necessario considerare tutta una serie di fattori quali, ad esempio, la deviazione della verticale e l'ondulazione del geoide, assolutamente necessari per garantire una corretta integrazione tra i sistemi di riferimento.

Questa forma delle equazioni consente, inoltre, di considerare intrinsecamente la curvatura terrestre eliminando la necessità di correggere le osservazioni a monte della compensazione. Il modello risulta essere in questo modo formalmente più corretto ed adatto a reti di qualunque dimensione: dalla rete costruita all'interno di un cantiere, dove probabilmente non sarà apprezzabile la differenza nei risultati, a poligoni catastali, di inquadramento territoriale e di monitoraggio, dove sicuramente è presente una differenza notevole nei risultati rispetto ai metodi classici, soprattutto per quanto riguarda l'aspetto altimetrico.

Nel presente lavoro viene presentato il software GeoNet, sviluppato dal Laboratorio di Geomatica del Politecnico di Milano in collaborazione con il suo spin off GReD in grado di integrare correttamente osservazioni GNSS e osservazioni classiche in un'unica compensazione rigorosa tridimensionale ai minimi quadrati.

Il software è stato sviluppato sfruttando il linguaggio di programmazione offerto dall'applicativo di calcolo matriciale MatLab, con cui è stato possibile anche creare una semplice interfaccia grafica (figura 1) per importare e gestire le osservazioni, oltre che per poter visualizzare ed esportare i risultati ottenuti.

GeoNet è in grado di processare reti tridimensionali con osservazioni di angoli azimutali, zenitali, distanze, dislivelli e osservazioni GPS sia *single point* che *baseline*. Per i valori della deviazione della verticale e dell'ondulazione del geoide GeoNet può utilizzare modelli locali o globali del

campo gravitazionale; in particolare attualmente il *software* utilizza il modello globale EGM08 (Pavlis et al. 2008).

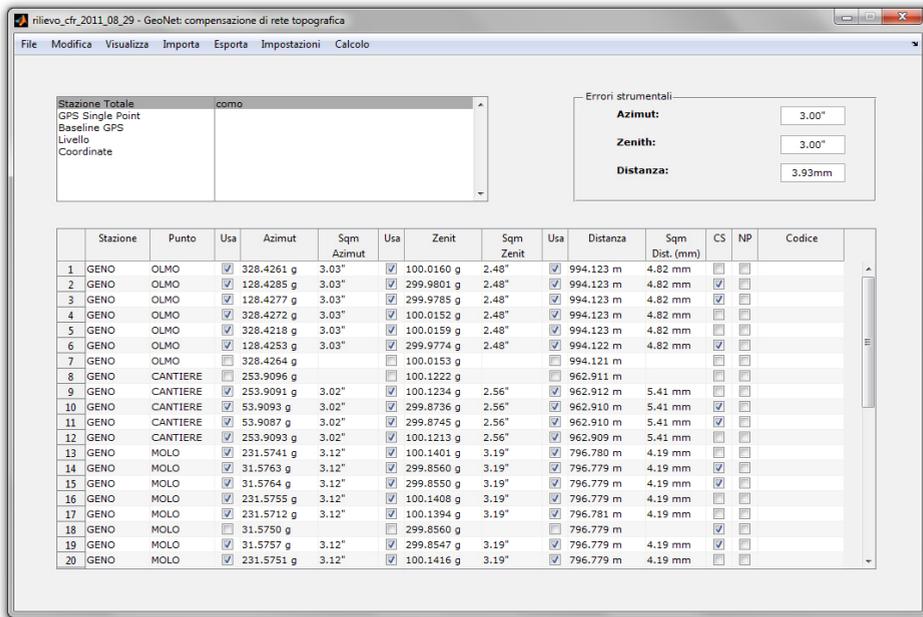


Figura 1. Schermata principale del software GeoNet.

Equazioni di osservazione

Per poter integrare le osservazioni GNSS con quelle della stazione totale è necessario esprimere tutte le equazioni di osservazione in forma vettoriale nello stesso sistema di riferimento. Nel software GeoNet si è scelto di utilizzare il sistema di riferimento WGS84, definendo la posizione dei punti tramite le coordinate ellissoidiche.

Le incognite del problema risultano quindi essere latitudine, longitudine ed altezza ellissoidica, d'ora in poi espresse rispettivamente con i simboli φ , λ , h .

Scelto il sistema di riferimento è possibile scrivere le equazioni d'osservazione per tutte le tipologie di strumentazione: in particolare si tratteranno nell'ordine le equazioni delle osservazioni di stazione totale, strumentazione satellitare ed, infine, livellazione.

Considerando due punti P_i (punto di stazione) e P_j (punto osservato) e facendo riferimento alla figura 2, è possibile definire le osservazioni della stazione totale (distanza D_{ij} , angolo zenitale ζ_{ij} e direzione azimutale A_{ij}) come:

$$D_{ij} = |r_j - r_i| \quad [1]$$

$$\zeta_{ij} = \arccos(\underline{n}_i \cdot r_{ij}) = \arccos[(\underline{v}_i + \underline{\delta}_i) \cdot r_{ij}] \quad [2]$$

$$A_{ij} = \arctan\left(\frac{r_{ij} \cdot \underline{b}}{r_{ij} \cdot \underline{a}}\right) = \arctan\left(\frac{r_{ij} \cdot \underline{e}_\lambda}{r_{ij} \cdot \underline{e}_\varphi}\right) - \eta_i \quad [3]$$

dove r_i , r_j sono i vettori di posizione dei punti P_i , P_j , $r_{ij} = r_j - r_i$, \underline{v}_i è la normale all'ellissoide in P_i , $\underline{\delta}_i$ è la deviazione della verticale in P_i ed infine \underline{a} e \underline{b} sono due versori ortogonali nel piano orizzontale

con $\underline{e}_{\lambda_i}$ rivolto allo 0 del cerchio azimutale. Si noti che la direzione di $\underline{e}_{\lambda_i}$ è definita tramite l'angolo η_i tra $\underline{e}_{\lambda_i}$ ed il versore rivolto ad est $\underline{e}_{\lambda_i}$ (si veda la figura 2).

Per quanto riguarda le osservazioni angolari della stazione totale il software GeoNet è in grado, nel pretrattamento dei dati, di eseguire le correzioni tra letture diritte e rovesce (regola di Bessel).

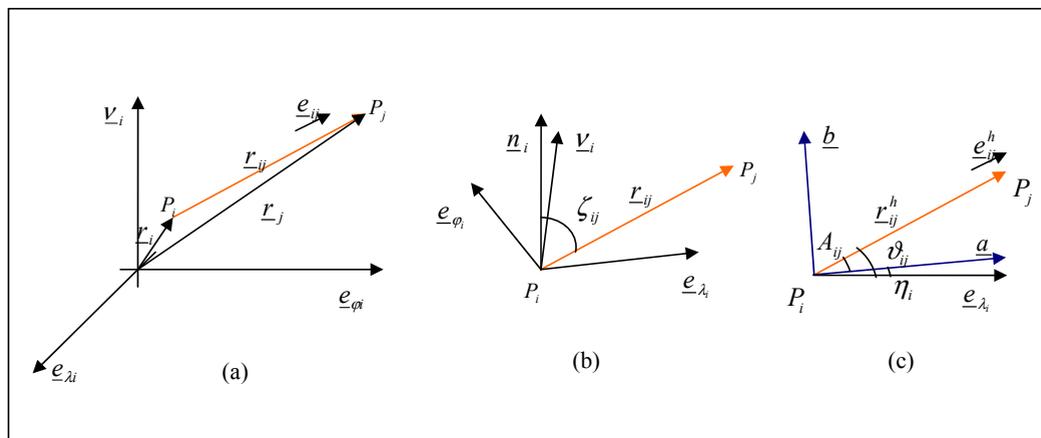


Figura 2. Simbologia utilizzata nella scrittura delle equazioni d'osservazione linearizzate, per la distanza (a), l'angolo zenitale (b) e la direzione azimutale (c). \underline{n}_i , \underline{v}_i in (b) indicano rispettivamente la direzione della verticale e della normale all'ellissoide; (c) è nel piano orizzontale passante per il punto i ; η_i è l'orientamento incognito della stazione, \underline{e}_{ij}^h , \underline{r}_{ij}^h sono la proiezione sul piano orizzontale di \underline{e}_{ij} , \underline{r}_{ij} .

Le osservazioni eseguite con strumentazione satellitare devono essere inserite nella procedura di calcolo previo pretrattamento: in particolare per motivi di semplicità si è scelto di fornire al software direttamente il valore delle coordinate di un singolo punto (modalità *single point*) oppure le differenze di coordinate tra due ricevitori (modalità *baseline*). Queste quantità possono essere comunque ricavate a partire da osservazioni GNSS grezze utilizzando software commerciali, e.g. LGO o Bernese (Dach et al. 2007), oppure *freeware* e.g. GoGPS (Realini et al., 2010). A entrambe le tipologie di osservazioni viene associata, e di conseguenza utilizzata nella compensazione, la relativa matrice di varianza/covarianza. In ogni caso l'osservazione viene espressa in coordinate cartesiane geocentriche per evitare problemi con le unità di misura delle matrici di covarianza in particolare le equazioni d'osservazione GNSS implementate sono:

$$SP_i = \underline{r}_i = \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} \quad [4]$$

$$BL_{ij} = \underline{r}_{ij} = \underline{r}_j - \underline{r}_i = \begin{bmatrix} X_j - X_i \\ Y_j - Y_i \\ Z_j - Z_i \end{bmatrix} \quad [5]$$

Per la livellazione è possibile scrivere l'equazione in termini di coordinate ellissoidiche: per far questo è necessario introdurre l'ondulazione del geode nelle equazioni di osservazione:

$$\Delta_{ij} = H_j - H_i = h_j + N_j - (h_i + N_i) = h_j - h_i + \Delta N_{ij} \quad [6]$$

Dove Δ_{ij} è il dislivello osservato tra il punto P_i (di quota ortometrica H_i) e il punto P_j (di quota ortometrica H_j), N è l'ondulazione del geode e h l'altezza ellissoidica.

È importante sottolineare che il termine di variazione dell'ondulazione del geoide ΔN_{ij} può essere trascurato solo se la distanza tra i due punti P_i e P_j è inferiore a un centinaio di metri. Ad esempio nella provincia di Como tale variazione è dell'ordine di 1 cm per 100 m (Sampietro e Garcia Pablos, 2010, Barzaghi et al., 2011). Dato che questa condizione non risulta sempre verificata si può calcolare la variazione di ondulazione a partire dalla deviazione della verticale, ottenendo come risultato la seguente equazione dove il termine δ è la deviazione della verticale media tra i due punti sempre calcolata a partire dal modello EGM08:

$$\Delta_{ij} = H_j - H_i = h_j - h_i + \Delta N_{ij} = h_j - h_i + r_{ij} \cdot \delta_{ij} \quad [7]$$

Essendo le equazioni 1, 2, 3, 4, 5 e 7 non lineari nelle incognite per poter effettuare una compensazione ai minimi quadrati è necessario linearizzarle nell'intorno di una soluzione approssimata. Per una trattazione dettagliata della linearizzazione di tali equazioni e la loro integrazione nel software si veda (Brovelli, Sansò, 1989; Sansò e Venuti, 2005 e Rossi, 2011)

Esempi e test effettuati

Di seguito verranno riportati due test di compensazione con GeoNet effettuati su dati reali. Gli scopi degli esempi scelti sono quelli di verificare l'importanza della correzione applicata per l'effetto della deviazione della verticale, attraverso il confronto del risultato con quello ottenuto usando metodologie di compensazione classiche, e di dimostrare la possibilità di utilizzo in casi reali di questo metodo.

Il primo test (figura 4-a) è stato effettuato su quattro punti appartenenti alla rete per il monitoraggio della subsidenza della città di Como (Barzaghi et al., 2011). In particolare le distanze reciproche tra i quattro vertici sono dell'ordine di 1 km.



Figura 4. Le due reti reali utilizzate per i test di compensazione con il software.

Su ogni punto è stata posizionata la stazione totale e sono state eseguite misure verso tutti gli altri punti visibili, mentre solo su due dei quattro vertici sono state eseguite osservazioni GPS statiche della durata di svariate ore (più di 20 ore per ogni punto osservato), assicurando un'accuratezza millimetrica nella determinazione della posizione globale di questi due vertici. Grazie a queste misure, quindi, è possibile compensare la rete in un sistema di riferimento globale, inoltre, considerando la dimensione dei lati sarà evidente l'effetto della deviazione della verticale. Per verificare la sua incidenza si può confrontare la compensazione eseguita in GeoNet con quella tradizionale, eseguita usando il *software* commerciale Sierrasoft Topko 2011 (vedi tabella 3).

Prima di analizzare i risultati è necessario eseguire un confronto tra le modalità di calcolo per capirne appieno le differenze. La prima e più importante è che con una compensazione tradizionale bisogna scegliere un sistema cartografico, in questo caso il tutto è stato proiettato in UTM (Hager et

al. 1989), per poter unire tutte le tipologie di misure. È importante sottolineare che, come ben noto in letteratura, ad esempio in (Richardus e Adler 1972), in generale le proiezioni cartografiche introducono deformazioni.

Data la diversa natura del risultato finale ottenuto, per poter confrontare i risultati si è scelto di trasformare l'output della compensazione ottenuto con il *software* commerciale in coordinate globali WGS84. Le differenze tra i risultati del *software* commerciale e la compensazione con GeoNet riguardano principalmente la coordinata altimetrica con discrepanze fino a 6 cm circa.

PUNTO	Differenza compensazioni			Dev. St. GeoNet			Dev. St. Topko	
	dφ (mm)	dλ (mm)	dh (mm)	φ (mm)	λ (mm)	h (mm)	Plan. (mm)	h (mm)
CANTIERE	1	-1	1	6	4	2	0	0
GENO	-11	-11	65	7	5	10	15	25
MOLO	0	4	-22	10	6	12	23	31
OLMO	-1	0	0	2	1	2	0	0

Tabella 3. Confronto compensazione tradizionale con GeoNet della rete in figura 4-a.

Per quanto riguarda le coordinate planimetriche le differenze sono dell'ordine di pochi millimetri paragonabili all'accuratezza finale dei risultati. Si può inoltre notare come la differenza in quota tra le due compensazioni sui punti dove sono presenti osservazioni GPS (CANTIERE e OLMO) sia praticamente nulla: questo è dovuto al fatto che la compensazione con Topko assume l'osservazione satellitare come assolutamente veritiera. Tuttavia questo comporta che tutto l'errore delle osservazioni classiche vada a distribuirsi sulle coordinate degli altri punti. Inoltre nella metodologia di compensazione tradizionale non viene in nessun modo considerato l'effetto dovuto alla differenza di direzione tra la normale al geoido e quella all'ellissoide in ciascun punto. È facile verificare come, essendo tale differenza dell'ordine di 20" nella zona di Como, questo effetto non sia trascurabile per lati di 1 km. Considerando i punti GENO e MOLO le due compensazioni presentano differenze in quota fino a 6 cm, compatibili appunto con l'effetto dovuto alla deviazione della verticale.

Il secondo esempio è mirato a verificare la possibilità di applicare il metodo di compensazione integrato di GeoNet su reti reali e complesse. L'esempio scelto è una rete per il rilievo di un complesso di fabbricati inquadrato nella maglia fiduciale catastale (figura 4-b). Utilizzando il rilievo integrato è stato possibile semplificare molto lo schema di rilievo (figura 5), in particolare i problemi legati a:

- presenza di molta vegetazione che rendeva impossibile il collegamento ad alcuni punti fiduciali, a meno di eseguire delle poligonali molto lunghe e complesse, riducendo così la qualità della soluzione;
- impossibilità di misurare tutti i punti del rilievo con ricevitori GPS (a causa della vegetazione e della necessità di misurare dei fabbricati).

I problemi sono stati risolti eseguendo osservazioni con stazione totale e GPS, in modo di sopperire con uno ai problemi dell'altra e viceversa. Le misure satellitari sono state eseguite in modalità RTK con correzione d'area fornita dal servizio di posizionamento ITALPOS, con una permanenza massima su ciascun punto di una decina di minuti e la possibilità di lavoro con un solo ricevitore *rover*, a patto di trovarsi in una zona coperta da segnale telefonico. Rispetto alla rete del primo esempio si dimostra anche la rapidità e la semplicità di osservazione di una rete complessa resa possibile appunto dall'integrazione di osservazioni classiche e GPS.

Nella compensazione le osservazioni satellitari sono state espresse sotto forma di *baseline* in modo da poter fissare il sistema di riferimento del rilievo sulla stazione base della rete ITALPOS. Questa operazione permette, in caso di necessità, di aggiungere osservazioni al rilievo anche in un secondo momento ed anche di conoscere la qualità di posizionamento della rete stessa nel sistema di riferimento globale usato. La compensazione con GeoNet ha permesso di ottenere risultati di elevata accuratezza, errori dell'ordine di 1 cm in planimetria e 2 cm in quota (standard deviation).

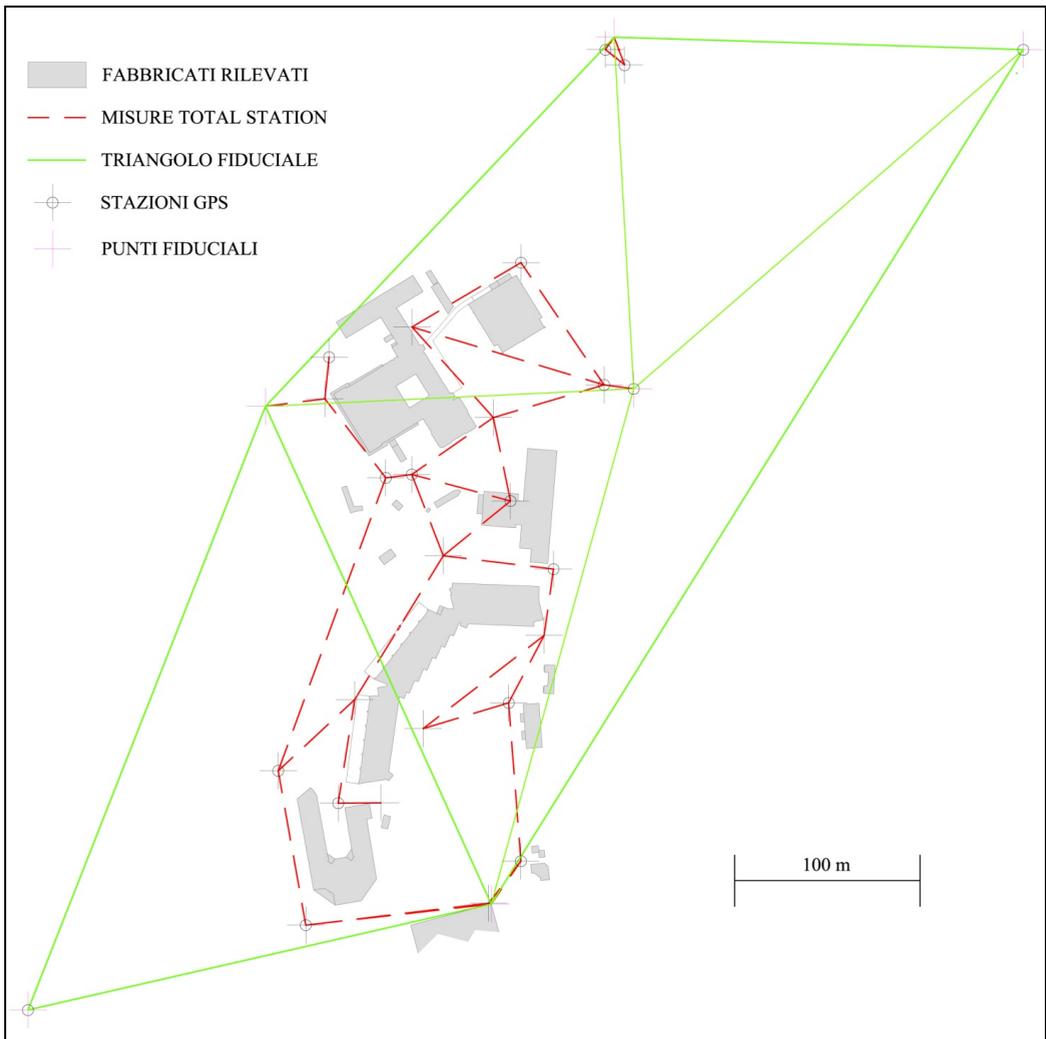


Figura 5. Risultati compensazione GeoNet della rete in figura 4-b.

Conclusioni e sviluppi futuri

La compensazione integrata con modello ellissoidico è su molti fronti la miglior soluzione al problema attualmente adottabile. Infatti, mentre con una compensazione eseguita secondo lo schema tradizionale non è possibile considerare contemporaneamente tutti gli effetti dovuti alla forma della terra ed ai sistemi di riferimento usati (ma ognuno deve essere trattato singolarmente), utilizzando le equazioni di osservazione nel sistema di coordinate globale le varie correzioni sono implicitamente definite nelle equazioni stesse.

L'uso di GeoNet per la compensazione, oltre che proporre una soluzione del problema più elegante dal punto di vista matematico, presenta anche i seguenti vantaggi:

- l'unica correzione che è necessario modellizzare a priori è la deviazione della verticale (stimata a partire dal modello di gravità EGM 08), mentre tutte le altre sono considerate direttamente nell'equazione (e.g. la curvatura terrestre), oppure sono eliminate (e.g. deformazione dovute alla proiezione cartografica).

- la semplicità di integrazione di misure di topografia classica e satellitare, potendo inglobare tutto in un solo modello senza necessità di introdurre proiezioni cartografiche, sfruttando direttamente le osservazioni GPS, che se espresse sotto forma di baseline servono anche a fissare il sistema di riferimento sulla stazione base, così da far risultare il S.R. veramente coincidente con quello globale fissato, ad esempio, per le stazioni permanenti dei servizi di posizionamento.

Nonostante gli ottimi risultati ottenuti rimangono ancora delle questioni da implementare. Infatti, è ben noto che per garantire una precisione sotto il centimetro è necessario correggere le osservazioni della strumentazione topografica classica anche per gli effetti di rifrazione atmosferica. Attualmente questo problema non è stato trattato nel *software* e quindi risulta necessario effettuare la correzione manualmente sulle singole osservazioni. Il *software* sviluppato è stato studiato per poter essere integrato da moduli aggiuntivi e quindi in futuro risulterà molto facile poter implementare anche questa operazione.

Riferimenti bibliografici

Barzaghi R., Passoni D., Pinto D., Sansò F. (2011), *Livellazione di alta precisione e misurazione di rete GNSS di controllo per l'analisi della subsidenza della sponda meridionale del lago di Como*, Relazione tecnica, Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale, Infrastrutture viarie, Rilevamento (DIAR) del Politecnico di Milano.

Brovelli M., Sansò F. (1989), "Equazioni d'osservazione della topografia in coordinate cartesiane locali: scrittura, linearizzazione e analisi dei relativi ambiti di validità", *Bollettino di Geodesia e Scienze Affini*, 5 (n°3): 255-274.

Dach R., Hugentobler U., Fridez P., Meindl M. (2007), *Bernese GPS Software Version 5.0*. Astronomical Institute, University of Bern.

Hager J.W., Behensky J.F., Drew B.W. (1989), *The Universal Grids: Universal Transverse Mercator (UTM) and Universal Polar Stereographic (UPS). Edition 1*, Washington, DC, Defense Mapping Agency Technical Report TM 8358.2.

Pavlis N. K., Holmes S. A., Kenyon S. C., Factor J. K. (2008), "An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008", *EGU General Assembly 2008, Vienna, Austria, April 13-18, 2008*

Realini E., Yoshida D., Patocchi L., Reguzzoni M., Raghavan V. (2010), "Porting goGPS from MATLAB to Java: performance analysis, tests and results". Atti del FOSS4G 2010, 6-9 Settembre 2010, Barcellona, Spagna.

Richardus P., Adler R. K. (1972), *Map Projections*, North-Holland, Amsterdam-London.

Rossi L. (2011), *GeoNet: un software per la compensazione di reti topografiche integrate tridimensionali*, Tesi di laurea, Politecnico di Milano, Como

Sampietro D., Garcia Pablos A. (2010), "Reti 3D miste gps/total station e deviazione della verticale", *atti 14a conferenza nazionale Asita, 9-12 novembre 2010, Brescia, Italy*, 1567-1572

Sansò F., Venuti G. (2005), "NETLAB: un laboratorio numerico per reti 3D classiche e GPS", *atti 9a conferenza nazionale Asita, 15-18 novembre 2005, Catania, Italy*, 1825-1830