

## **Studio delle deformazioni da reti permanenti GNSS: una nuova metodologia e sua applicazione al caso europeo**

Ludovico Biagi (\*), Athanasios Dermanis (\*\*)

(\*) Politecnico di Milano, DIIAR, c/o Polo regionale di Como  
via Valleggio 11, 22100 Como, ludovico.biagi@polimi.it

(\*\*) Aristotle University of Thessaloniki, Department of Geodesy and Surveying

### **Riassunto esteso**

L'analisi di deformazione di un corpo fra due epoche assegnate presuppone la conoscenza del campo degli spostamenti dei punti del corpo stesso: dai gradienti degli spostamenti possono essere derivati i classici parametri di deformazione. Si noti che, in senso proprio, il calcolo delle deformazioni è un problema tridimensionale, esteso cioè all'intero volume del corpo. In ambito geodetico, le reti permanenti GNSS forniscono serie di coordinate quotidiane per le stazioni che le compongono: i risultati quindi possono essere considerati continui nel tempo ma discreti nello spazio: per ricostruire il campo degli spostamenti, e quindi le deformazioni, è necessaria una modellazione delle serie nel tempo e quindi un'interpolazione nello spazio. E' ben noto che le serie temporali GNSS sono sia planimetriche sia altimetriche, ma anche che le stime planimetriche sono più accurate di quelle altimetriche; inoltre, le serie sono relative alla superficie terrestre e, nel caso di reti regionali, a una porzione molto limitata di essa. In altri termini, tali informazioni possono essere agevolmente interpolate spazialmente su una superficie di riferimento, mentre è più complesso il problema di una loro estrapolazione per un'analisi tridimensionale di strutture profonde. In tal senso, al fine di investigare le deformazioni geodinamiche su scala regionale, si adotta il classico approccio geodetico di pura analisi bidimensionale.

Il presente lavoro espone un metodo per la stima delle deformazioni planimetriche a partire da serie di coordinate stimate da reti permanenti GNSS. I processi formalizzati e implementati sono i seguenti.

1. Modellazione temporale delle serie di coordinate. Non costituisce il punto nodale del metodo, ma solo la premessa necessaria, ed è basata su una semplice interpolazione lineare per le stime degli spostamenti fra due epoche assegnate; nel processo è stata formalizzato e implementato un metodo innovativo per la stima empirica della covarianza di rete.
2. Analisi di Tisserand. Viene effettuata per analizzare un'eventuale rototraslazione di rete, che viene quindi rimossa poiché non implica alcuna deformazione ma solo un moto comune; l'analisi di Tisserand permette anche di discriminare fra sottoreti che presentino moti internamente omogenei ma reciprocamente differenti.
3. Stima del gradiente degli spostamenti. Innanzitutto le stime di spostamento delle stazioni GNSS vengono interpolate per ricavare il gradiente degli spostamenti; ciò può essere effettuato mediante due metodi distinti.
  - 3a. Il calcolo viene effettuato mediante il classico metodo degli elementi finiti, applicato a una triangolazione di Delaunay della rete.
  - 3b. Il calcolo viene effettuato mediante modellazione empirica della covarianza degli spostamenti e quindi predizione stocastica del relativo campo e del suo gradiente mediante metodo di collocazione.

4. Stima del campo di deformazione. Una volta determinato il campo degli spostamenti è possibile calcolare i parametri di deformazione geodetica, ovvero autovettori e loro direzioni oppure dilatazioni, taglio e relativo angolo. Nel caso di interpolazione mediante elementi finiti ciò viene fatto convenzionalmente al centro di ogni triangolo di Delaunay, nel caso di predizione mediante collocazione ciò può essere effettuato per ogni punto di interesse all'interno della rete, tipicamente su un seminato regolare di punti.

Il metodo presenta numerose innovazioni rispetto a quanto già storicamente sviluppato nel settore; i più rilevanti aspetti sono i seguenti.

1. Superficie di riferimento. Tutte le stime vengono rigorosamente calcolate sulla superficie dell'ellissoide di rotazione: ciò libera dai limiti delle consuete approssimazioni pseudopiane, particolarmente significativi per reti alla scala nazionale o continentale.

2. Stima della covarianza. La covarianza di rete, stimata empiricamente al passo 1, viene propagata sino alla stima finale dei parametri di deformazione, sui quali è quindi possibile effettuare una rigorosa stima di significatività. In particolare si noti che le covarianze dei parametri interpolati mediante elementi finiti riflettono solo l'incertezza attribuita alle osservazioni in ingresso mentre le covarianze stimate dalla collocazione includono anche l'incertezza del modello di predizione stesso.

3. Predizione di collocazione. La covarianza degli spostamenti viene ora modellizzata analiticamente mediante combinazioni di Polinomi di Legendre; i coefficienti dei polinomi vengono determinati mediante minimi quadrati con vincoli di non negatività a partire dalla covarianza empirica: tale aspetto è particolarmente innovativo, e non solo nel ristretto calcolo delle deformazioni poiché è il suo primo caso di applicazione in ambito geodetico.

L'approccio era già stato presentato nel suo sviluppo preliminare in una precedente edizione di ASITA; rispetto ad allora diversi elementi di novità sono stati definitivamente sviscerati e implementati, con particolare riguardo alla stima e all'utilizzo dei Polinomi di Legendre; inoltre l'intero corpo di analisi è stato applicato a diversi casi di studio.

Si è completata l'analisi della rete nazionale giapponese, composta di circa 1400 stazioni permanenti. La complessa geodinamica che interessa il Giappone fa sì che possano essere identificate almeno 7 aree, internamente abbastanza coerenti, ma con comportamento reciproco completamente diverso: il nostro studio si è concentrato su una singola area, la cui superficie interessa circa 190 stazioni permanenti, e ai dati relativi al 2005. A questi è stato applicato il metodo proposto, approfondendo il confronto fra risultati forniti da interpolazione deterministica e predizione stocastica; nell'ambito di quest'ultima, vengono confrontati differenti metodi di modellazione della covarianza.

Quindi è stata condotta l'analisi della rete europea EPN, composta di 202 stazioni. In questo caso non si è effettuata alcuna modellazione spaziale di serie temporali, poiché si sono utilizzate le stime ufficiali di velocità fornite da EUREF. I parametri di deformazione predetti risultano non significativi, vista la scarsa densità della rete e quindi la grande incertezza nella modellizzazione della covarianza; per contro è di maggiore interesse l'analisi di Tisserand, che rivela sostanziale congruenza con il modello internazionalmente adottato per definire il campo di velocità medio europeo.

Il lavoro completo è in fase di sottomissione al *Geophysical Journal International*; la presentazione al convegno descriverà il metodo in generale, con particolare dettaglio alla nuova stima della covarianza modello. Verranno quindi presentati i due casi di studio; principale interesse, visto il contesto, verrà dato ai risultati ottenuti dall'applicazione alla rete europea.