

# DETERMINAZIONE DI PARAMETRI DI DEFORMAZIONE MEDIANTE INTERPOLAZIONE STOCASTICA SU STAZIONI PERMANENTI GPS

Ludovico Biagi(1), Athanasios Dermanis(2)

(1) Politecnico di Milano, DIAR, c/o Polo regionale di Como, via Valleggio 11, 22100 Como, ludovico.biagi@polimi.it, (2) Aristotle University of Thessaloniki, Department of Geodesy and Surveying

## Riassunto esteso

Il gradiente degli spostamenti è relativo a uno specifico intervallo fra due epoche e il suo calcolo presuppone la conoscenza analitica del campo continuo degli spostamenti; dal gradiente degli spostamenti vengono calcolati i cosiddetti parametri di deformazione, quali la direzione e il modulo delle elongazioni principali: al loro riguardo, si ricorda solo che rappresentano i primi invarianti rispetto alla scelta del sistema di riferimento. L'analisi di deformazione di un corpo può essere tridimensionale o bidimensionale: la prima riguarda la struttura interna del corpo e richiede la conoscenza del campo degli spostamenti all'interno del corpo; la seconda riguarda la sua superficie e richiede semplicemente la descrizione del campo degli spostamenti sulla superficie stessa.

Le reti di stazioni permanenti GPS forniscono serie di coordinate continue nel tempo ma discrete nello spazio: quindi, per effettuare analisi di deformazioni a partire dai loro risultati sono necessarie modellazioni sia nel tempo sia nello spazio. E' da un lato vero che le serie temporali sono sia planimetriche sia altimetriche; è però altrettanto vero che le stime planimetriche sono più accurate di quelle altimetriche; inoltre, le serie ottenute da reti regionali sono relative a una porzione molto limitata della superficie del pianeta, mal proiettabili in un'analisi di strutture profonde. In tal senso, al fine di investigare le deformazioni geodinamiche su scala regionale, è giustificato un approccio di pura analisi bidimensionale.

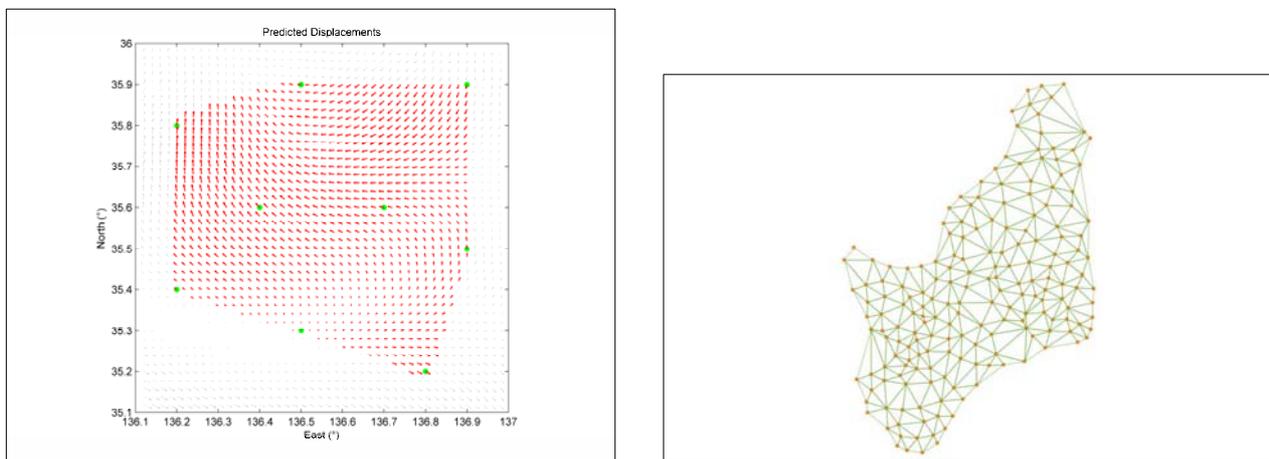
Il presente lavoro presenta un nuovo approccio formale e numerico per l'analisi di deformazione. I dati in ingresso sono rappresentati da serie temporali continue di coordinate geodetiche, fornite appunto da una rete di stazioni permanenti GPS. La modellazione nel tempo avviene mediante un semplice processo deterministico: le serie temporali vengono interpolate linearmente ai minimi quadrati per la stima degli spostamenti delle stazioni permanenti e delle loro covarianze; nell'interpolazione non vengono considerate le covarianze formali che normalmente accompagnano le soluzioni GPS, poiché le si ritiene tipicamente significativamente sottostimate: l'interpolazione lineare è accompagnata da una stima empirica di covarianza. Le stime puntuali degli spostamenti vengono quindi depurate di sistematismi comuni, ovvero traslazioni e rotazioni di rete: ciò viene fatto mediante riduzione dei dati a un sistema di riferimento che soddisfi il principio di Tisserand.

La modellazione degli spostamenti nello spazio avviene in alternativa mediante un approccio deterministico o stocastico: il primo approccio è sostanzialmente pensato per reti composte da un piccolo numero di stazioni; il secondo per reti numerose. Nel primo caso, alla rete viene applicata una triangolazione di Delaunay; il campo degli spostamenti viene quindi modellato separatamente in ogni triangolo: gli spostamenti nei tre vertici vengono interpolati mediante il metodo degli elementi finiti al fine di ricavare il loro gradiente. Per la modellazione stocastica nello spazio, viene adottata una semplice famiglia di funzioni di covarianza sulla sfera, i cui parametri di ampiezza e lunghezza di correlazione sono stimati empiricamente dagli spostamenti puntuali. La predizione del campo di spostamento e del suo gradiente è ottenuta mediante lo stimatore di collocazione applicato agli spostamenti puntuali. Infine, per entrambi i modelli, dal gradiente degli spostamenti vengono

ricavati i veri e propri parametri di deformazione: nel primo caso per ciascun triangolo, nel secondo per un qualunque punto sparso o, più classicamente, per un seminato regolare di punti.

Il processo proposto si distingue da quanto già presente in letteratura per due aspetti fondamentali: in ingresso viene data attenzione particolare al controllo di qualità dei dati e, come già detto, la covarianza della rete viene stimata in modo empirico; inoltre la covarianza viene rigorosamente propagata dalle serie di coordinate alla stima finale di tutti i parametri di deformazione.

L'interpolazione mediante elementi finiti e la sua applicazione alle coordinate piane cartografiche erano già stati descritti in un precedente lavoro. Il presente articolo innanzitutto descrive la metrica delle deformazioni nel caso di utilizzo di coordinate geodetiche: tale generalizzazione permette il trattamento di reti con estensione maggiore rispetto all'ambito locale cui si è limitati dalle coordinate piane; quindi viene descritta la predizione delle deformazioni mediante il metodo della collocazione. Infine vengono discussi i risultati forniti dai primi test: un primo esempio numerico su una semplice simulazione dimostra le potenzialità del metodo proposto; un test su un periodo di un anno di dati provenienti dalla rete permanente nazionale giapponese fornisce i primi risultati su dati reali.



**Figura 1.** A sinistra la simulazione; a destra la rete giapponese.

*Simulazione; in verde: l'ubicazione delle stazioni permanenti; in rosso: vettori di spostamento. Per la rete giapponese è rappresentata la triangolazione di Delaunay della sottorete analizzata.*

In particolare, la simulazione è stata effettuata generando un campo sintetico di spostamenti su un seminato regolare con estensione di 1 grado e passo di 0.02 gradi, in latitudine e longitudine; dal campo simulato sono state estratti gli spostamenti per 9 punti, a rappresentare le osservazioni di una rete di stazioni permanenti che sono quindi state utilizzate per predire spostamenti e parametri di deformazione per il medesimo seminato. I risultati sono decisamente buoni: gli spostamenti simulati erano caratterizzati da deviazioni standard di circa 2.5 cm e valori massimi di 7 cm per entrambe le componenti; gli errori di predizione hanno deviazioni standard di 4 mm, massimi di 1.5 cm.

La rete nazionale giapponese si compone di circa 1400 stazioni permanenti, a omogenea copertura della nazione. 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: la prima analisi si è concentrata su una singola area, la cui superficie interessa circa 190 stazioni permanenti, e sui dati relativi al 2005; si è innanzitutto effettuata la rimozione delle stazioni permanenti le cui serie presentavano discontinuità anomale o eccessive perdite di dati, estraendo quindi un campione di 188 serie, con spostamenti compresi fra 0 e 4 cm. A questi è stato applicato il metodo proposto, approfondendo il confronto fra risultati dell'interpolazione deterministica della predizione stocastica.

Il lavoro completo è in fase di redazione e verrà sottomesso per la pubblicazione sul *Geophysical Journal International*.