

Un approccio al controllo di deformazioni di reti permanenti GPS.

*Original*

Un approccio al controllo di deformazioni di reti permanenti GPS / Cina, A., Manzino, A.. - STAMPA. - (2000), pp. 106-111. (Workshop nazionale "rete nazionale di stazioni GPS permanenti" Padova 15-17 febbraio 1999).

*Availability:*

This version is available at: 11583/1409284 since: 2015-12-15T12:04:23Z

*Publisher:*

*Published*

DOI:

*Terms of use:*

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

*Publisher copyright*

(Article begins on next page)

# RETE NAZIONALE DI STAZIONI GPS PERMANENTI

Alessandro CAPORALI  
Editore

Estratto da  
MEMORIE DI SCIENZE GEOLOGICHE  
Vol. 52/1



PADOVA 2000

# Rete Nazionale di Stazioni GPS Permanenti

## Presentazione del Volume

Il tema del Convegno 'Rete Nazionale di Stazioni GPS Permanenti' tenutosi a Padova dal 15 al 17 Febbraio 1999 è lo stato, le applicazioni e le prospettive delle stazioni GPS permanenti, dal punto di vista del territorio (Sistemi Informativi Territoriali, meteorologia), del rilevamento tecnico (cartografia geologica, catastale, tematica..) e del controllo di movimenti e deformazioni di superficie (zone sismiche, subsidenti, frane). Sono intervenuti, il Direttore Generale del Catasto e SSTTEE, il Direttore della Divisione Geodetica dell'Istituto Geografico Militare, Rappresentanti dell'Agenzia Spaziale Italiana, del Servizio Geologico, del Servizio Sismico, dell'Istituto Nazionale di Geofisica, della Regione Veneto, Friuli e VG e Emilia Romagna, ricercatori di Università, CNR e Istituti di Ricerca, e numerosi studenti delle Facoltà di Scienze e Ingegneria, per un totale di circa 150 persone. Gli spazi espositivi hanno fornito alle Ditte un'occasione per mostrare i prodotti più recenti, hardware e software. Il Convegno si è concluso con una tavola rotonda sul tema 'Gli orientamenti degli Ambienti Scientifici e Professionali sulla struttura e impiego delle stazioni permanenti GPS, coordinata dal Dr. Francesco Vespe, Agenzia Spaziale Italiana. Tra i ventuno lavori presentati, ne sono stati selezionati cinque che rappresentano in modo esauriente lo stato dell'arte delle conoscenze in questo campo.

Il primo lavoro, dal titolo 'Stazioni permanenti GPS in Italia e in Europa: esperienze consolidate, standardizzazione e prospettive di utilizzo', di A. Caporali è la relazione di apertura dei lavori. Viene analizzato il fenomeno della continua crescita del numero delle stazioni GPS in Italia, anche nel confronto con simili situazioni in atto nelle altre Nazioni Europee. Vengono riassunte le esperienze di Padova (la prima Università Italiana a realizzare e gestire una stazione GPS permanente). Ci si sofferma sui risultati della elaborazione sistematica dei dati (Padova e il Centro ASI/Telespazio di Matera sono gli unici due centri in Italia riconosciuti dal Consorzio Europeo EUREF per l'elaborazione di precisione dei dati dalle stazioni permanenti), in particolare le evidenze di variazioni di coordinate legati alla tettonica, alla stabilità di alcune stazioni particolarmente critiche (Venezia, per la quota; Perugia, in zona sismica)

Il secondo lavoro, dal titolo 'Un approccio al controllo di deformazioni di reti permanenti GPS', di A. Cina e A. Manzino, si sofferma sulla rete geodetica costituita dalle stazioni permanenti GPS. Le deformazioni della rete possono essere rilevate con grande precisione confrontando le coordinate dei vertici a epoche successive. Trattasi comunque di movimenti dell'ordine del mm/anno, e riveste grande interesse lo studio della significatività statistica delle stime dei movimenti. Il lavoro di Cina e Manzino analizza criticamente i metodi statistici finora usati nello studio delle deformazioni, e ne propone uno alternativo, con interessanti vantaggi, che viene dimostrato con una simulazione di deformazione di una rete geodetica che coinvolge stazioni permanenti GPS in Italia, Francia, Svizzera e Austria.

Il terzo lavoro, dal titolo 'Sulla stima dell'accuratezza delle coordinate di un vertice GPS collegato ad una rete di stazioni permanenti', di N. Crocetto, M. Gatti e F. Russo, si sofferma sull'uso delle stazioni permanenti GPS come punti fiduciali di appoggio per rilievi locali, ad es. nella sacca di Goro, sempre con la tecnica GPS. Viene discusso un metodo di elaborazione dei dati che pesa il contributo dei punti di appoggio in funzione della loro distanza dai punti rilevati. Nel lavoro si fa riferimento ad es. alle stazioni permanenti di Padova e Matera, che hanno pesi diversi se la zona rilevata si trova nel Ferrarese. Gli autori danno evidenza che la stima delle coordinate ottenute con il loro algoritmo ha un margine di incertezza inferiore di quella ottenuta con altri software, e pertanto meglio si presta a indagini di subsidenza e misura di deformazioni lente.

Il quarto lavoro si intitola 'Il contributo del GPS nell'interpretazione di eventi meteorici rilevanti: primi risultati', di M. Crespi, S. di Paola e R. Guercio. Questo lavoro si sofferma sulla interazione tra l'onda radio trasmessa dai satelliti GPS e l'atmosfera terrestre. È un tema di grande attualità, in quanto il vapor d'acqua negli strati bassi della troposfera può essere determinato con grande precisione e a bassi costi analizzando i dati GPS, laddove per ottenere le stesse informazioni si usano di solito costosi palloni sonda. Il vapore d'acqua nell'atmosfera è un parametro fondamentale nella formulazione delle previsioni meteo, e pertanto rilevante nella prevenzione di eventi meteorici che possono innescare movimenti franosi, piene ecc. Il lavoro di Crespi *et al.* analizza le leggi fisiche che rappresentano la dipendenza dei dati GPS dal vapore d'acqua troposferico, e presenta alcune in-

teressanti tabelle numeriche che raffrontano i dati meteo ottenuti dal GPS con quelli ottenuti con tecniche tradizionali. Viene dimostrato un notevole accordo tra le due tecniche, e viene prospettata la possibilità di un servizio in tempo reale fornito dalle stazioni GPS permanenti, con importanti ricadute nel settore della Protezione Civile.

Infine il quinto lavoro, dal titolo 'Utilizzo dei dati cartografici nella costruzione dell'archivio geometrico di un GIS', di R. Parente, R. Santamaria e S. Troisi, affronta il problema di integrazione di dati spaziali di origine diversa, ad esempio cartografia *raster* e vettoriale, e oggetti territoriali rilevati con il GPS. Il problema dell'armonizzazione dei diversi dati è innanzitutto un problema di georeferenziazione, talvolta di non facile soluzione. Gli autori espongono le loro esperienze pratiche, anche in relazione alla necessità di digitalizzare progressivamente le informazioni disponibili in formato *raster*.

Nel complesso il Convegno ha esaurito ampiamente le tematiche principali, e messo in evidenza le necessità più urgenti: ingrandire e densificare la rete di stazioni permanenti GPS, in armonia con gli standard europei, aumentare la capacità di calcolo da parte di un maggior numero di Istituzioni, aumentare l'integrazione tra gli ambienti della ricerca e le Istituzioni pubbliche e private operanti nel territorio, in considerazione delle molteplici applicazioni che la tecnica GPS propone nel settore cartografico e del monitoraggio ambientale.

Alessandro Caporali  
*Editore*

## Presentation of the Volume

The subject of the meeting 'National Network of Permanent GPS Stations', which took place in Padova on February 15-17, 1999, is the status, applications and perspectives of permanent GPS stations, from the point of view of the environment (GIS, Meteorology...), of the technical survey (geological, cadastral and thematic mapping) and of the control of movements and deformation of the surface (areas subject to seismicity, subsidence, landslides). Among the Guests, the Director of the Cadastre and Technical Services, the Director of the Geodesy Division of the Istituto Geografico Militare Italiano, representatives from the Italian Space Agency ASI, the Geological Survey, the Seismic Service, the National Institute of Geophysics, the Regions Veneto and Friuli Venezia Giulia, scientists, from Universities, National Research Council and Research Institutes, and several students of Scientific and Engineering Faculties, totalling about 150 participants. The exhibit has enabled Firms to present the most recent hardware and software products. The meeting ended with a round table on the theme 'How Professionals and Scientists would like the national network of permanent GPS stations to be', chaired by dr. Francesco Vespe of ASI. Among the 21 papers presented at the meeting, five have been selected for publication in these Proceedings, to summarise the state of the art in this field.

The first paper, titled 'Permanent GPS stations in Italy and Europe: experiences, standardization and perspectives of use', by A. Caporali, is the opening paper. It addresses the continuous growth in number of permanent GPS stations in Italy, even in comparison with other European Stations. The paper summarises the experiences in Padova (the first Italian University to build and manage a permanent GPS station), and discusses the results of the systematic data processing (Padova and the ASI / Telespazio Center in Matera are the only two centres in Italy recognised by the European Consortium EUREF for precision processing of the data of the Permanent GPS Network in Europe). Of considerable interest are the coordinate changes caused by tectonics, and the stability of critical stations, such as Venezia for the height and Perugia, for the seismic activity.

The second paper, titled 'An approach to the control of deformation of GPS networks', by A. Cina and A. Manzano, analyses the geodetic network of permanent GPS stations. The deformation of the network can be precisely measured by comparing at different epochs the coordinates of the vertexes. The motions are of the order of mm/year, and it is of great interest to assess the statistical significance of these movements. The paper by Cina and Manzano reviews critically the statistical methods used so far for the study of deformations, and proposes a new method, with interesting advantages, which is demonstrated using a simulated data from a real network with stations in France, Switzerland, Austria and Italy.

The third paper, titled 'On the estimated accuracy of the coordinates of a GPS vertex connected to a network of permanent stations', by N. Crocetto, M. Gatti and F. Russo, discusses the use of permanent GPS sta-

tions as fiducial points for local GPS surveys, e. g. in the 'Sacca di Goro' region. The authors discuss a method of data processing which weights the contribution of the reference points depending on their distance from the surveyed points. The paper makes reference to the permanent GPS stations in Padova and Matera, which have different weights if the surveyed area is near Ferrara. The coordinates estimated with this method have an uncertainty smaller than that obtained with other software packages, and therefore are more suited for studies of subsidence and slow deformation.

The fourth paper is titled 'The contribution of GPS to the interpretation of meteo events: first results', by M. Crespi, S. Di Paola and R. Guercio. The paper discusses the interaction between a radio wave broadcast by a GPS satellite and the atmosphere. Water vapour in the low layers of the troposphere can be determined with great precision and low costs by analysing the GPS data, instead of costly radiosondes. The water vapour in the atmosphere is a fundamental parameter for weather predictions, and therefore important for preventing meteo events which prelude to landslides, floods and similar calamities. The paper by Crespi *et al.* analyses the physical laws which represent the functional dependence of the GPS data from the tropospheric water vapour, and presents interesting numerical tables which compare meteo data inferred from GPS with the data obtained by traditional techniques. They report a good agreement between traditional and GPS techniques, and argue about a meteo service provided in real time by permanent GPS stations in support to the Civil Protection.

The fifth paper, 'Use of cartographic data to construct a geometric archive of a GIS', by R. Parente, R. Santamaria and S. Troisi, tackles the problem of integrating spatial data of different origins, for example raster and vector cartography, with objects surveyed with GPS. Of great importance is georeferencing the data, which is not always obvious. The Authors discuss their practical experiences, particularly in bringing raster maps to a vector form.

In summary, the meeting has fully exploited the main themes, and emphasised the need for a larger and denser GPS permanent network, in compliance with European standards, for an increase in computing power of several Institutions for data processing, and increase the cooperation between Research and Public Institutions active in environmental work, tacking into account the several advantages that the GPS technique offers in the fields of cartography and environmental protection.

Alessandro Caporali  
Guest Editor

Alessandro CAPORALI - Stazioni permanenti GPS in Italia e in Europa: esperienze consolidate, standardizzazione e prospettive d'utilizzo .....	pp. 101-106
Alberto CINA e Ambrogio M. MANZINO - Un approccio al controllo di deformazioni di reti permanenti GPS .....	pp. 106-111
Nicola CROCETTO, Marco GATTI e Paolo RUSSO - Sulla stima dell'accuratezza delle coordinate di un vertice GPS collegato ad una rete di stazioni permanenti .....	pp. 111-121
Mattia CRESPI, Silvia DI PAOLA e Roberto GUERCIO - Il contributo del GPS nell'interpretazione di Eventi Meteorici Rilevanti: Problemi, Analisi Preliminari e Prospettive di Ricerca .....	pp. 121-132
Claudio PARENTE, Raffaele SANTAMARIA e Salvatore TROISI - Utilizzo di dati cartografici nella costruzione dell'archivio geometrico di un GIS .....	pp. 133-137

Concludo esprimendo l'augurio, che può anche essere interpretato come un'ipotesi di lavoro da qui ai prossimi appuntamenti congressuali, che:

a) Là dove già esistono stazioni permanenti, si creino - possibilmente d'intesa con gli Uffici Provinciali del Catasto - delle *task forces* che sperimentino l'impiego delle stazioni permanenti;

b) Si approfondisca la possibilità di importare in Italia il concetto di rete EUREF, come linea guida sia per gli standard di stazione, sia per le procedure di verifica dell'integrità e della funzionalità della rete di stazioni

GPS permanenti.

## BIBLIOGRAFIA

CAPORALI A., 1995 - *Colombo and the Center for Space Geodesy in Matera*, in: Ideas for Space Research after the year 2000, on the 10. Anniversary of the Departure of Giuseppe Colombo, Padova, 18 -19 February 1994, F. ANGRILLI, P. L. BERNACCA and G. BIANCHINI (ed.), pp. 131-140.

SURACE L., 1998 - *La georeferenziazione delle informazioni territoriali*, Boll. Geod. Sc. Aff. n.2, pp.181-234.

## Un approccio al controllo di deformazioni di reti permanenti GPS

Alberto CINA e Ambrogio M. MANZINO\*

\* Politecnico di Torino Dipartimento di Georisorse e Territorio  
Corso Duca degli Abruzzi 24, I-10129 TORINO, Italy  
Cina@polito.it, Manzino@polito.it

**ABSTRACT** - Local and Global GPS Analysis Centers process a network of several permanent tracking stations and generate a combined solution of individual subnetwork weekly solutions. Almost all the Analysis Centers of the EUREF net use the Bernese package, and the ADDNEQ program, to estimate coordinates, speed, Helmert transformation parameters between subnetworks, and tropospheric parameters. The input data are the files in the NEQ format (Normal Equation) produced by the weekly adjustment of individual subnetworks. The approach presented here differs from the one based on ADDNEQ, and presents other advantages. It allows, in first place, to estimate jointly coordinates, velocity and transformation parameters and, in addition, to apply the usual test of the parametric statistics to verify the significance of the unknown parameters, and also the presence of possible outliers. The basic hypothesis is the use SINEX session solution files, and that the assumed deformation model has a constant velocity. The program has been tested with real data, using seven EUREF permanent GPS stations: Cagliari, Grasse, Matera, Medicina, Noto, Torino and Zimmerwald. Six sessions have been used, corresponding to the months from February to July of 1998. The BPE treatment causes solutions in fully-grown SINEX files that are the input of software named "plain". The software actually considers only for planar components. The results were compared with the ITRF96 velocity vectors. The vectors have first been projected onto the same plan used for the treatment. Then their averages have been subtracted. The first comparison (table 4) doesn't make justice to the proposed treatment: nevertheless the graphic comparison between these vectors shows a good agreement in the speed directions, with the exception of Zimmerwald. The probable reason is that to estimate velocity several years of measure are normally necessary. In lack of a period of observation so long, the estimates would result unreliable and that is in agreement with variances shown in tables 2 and 3. We are thinking about extending the technique to the search of "cluster of speed" for a possible help in the founding of micro-tectonic plates, through a non-parametric test hypothesis

*Key words* : Control Networks, Strain Field, Geostatistics.

**SOMMARIO** - Da alcuni anni i centri di ricerca e di trattamento dati dell' International GPS Service (IGS), sono soliti calcolare settimanalmente le posizioni dei vertici della rete di stazioni permanenti GPS e, con frequenza minore, i vettori velocità di spostamento. In Europa, quasi tutti i centri di controllo della rete EUREF utilizzano il pacchetto *Bernese* per entrambi gli scopi. Il programma ADDNEQ di questo software, dopo la lettura del sistema normale relativo ad elaborazioni giornaliere (settimanali o mensili) della rete europea (o di sotto reti), permette di stimare coordinate, velocità, parametri di trasformazione di Helmert tra varie sottoreti, parametri troposferici ed altro ancora, utilizzando in blocco le varie sessioni di misura già trattate singolarmente. I dati in ingresso sono i files nel formato NEQ (Normal Equation), prodotti dai singoli trattamenti *Bernese*. Nel calcolo delle deformazioni un altro gruppo di ricerca (Crespi M., 1996) si sta dirigendo verso l'utilizzo di metodi di Bayes. L'approccio che qui si vuole presentare è invece di tipo classico e in un certo senso non permette di ottenere molte informazioni, come ad esempio la stima della troposfera, o di prescindere dalla statistica parametrica, ma presenta altri vantaggi. Permette in primo luogo di stimare contemporaneamente coordinate, velocità e parametri di trasformazione ed in seguito di applicare i normali test della statistica parametrica per la verifica della significatività delle velocità e degli altri parametri incogniti, nonché la presenza di eventuali *outliers*. La procedura non consente di valutare velocità di spostamento se non a meno di un sistema di riferimento: ad esempio, una deformazione rotazionale di tutta la rete od uno spostamento di questa a velocità costante non è rivelato dai parametri incogniti. L'ipotesi di partenza è l'utilizzo dei files di soluzione SINEX delle varie sessioni di misura, con un modello di deformazione a velocità costante, nell'ipotesi che tra le coordinate delle reti, ottenute in più sessioni di misura, si possa applicare una trasformazione a quattro parametri (eseguendo una compensazione a rete libera o "baricentrica" non ha senso inserire nelle incognite i tre parametri traslazionali) od in numero minore dopo verifiche di significatività dei singoli parametri. Il modello proposto è stato programmato e verificato con una simulazione ed, in seguito è stato applicato, per le sole componenti planimetriche, su sei sessioni della rete di stazioni permanenti italiane, processate mensilmente al Politecnico di Torino.

*Parole chiave* : Reti di Controllo, Deformazioni, Geostatistica.

## APPROCCI STANDARD E DATI DI PARTENZA

L'approccio seguito dei centri europei EUREF AACs (Euref Associated Analysis Centers) (Springer T.A., Gurtner W. *et al.*, 1996) è quello di suddividere il calcolo della rete Europea in un numero indefinito di sottoreti (che sta crescendo in questi anni) compensate periodicamente.

Ogni sottorete viene elaborata in sessioni giornaliere ed ogni stazione permanente viene trattata da almeno due centri AAC. I sistemi normali relativi a queste soluzioni sono salvati in files opportuni (NEQ files nel caso di uso del software *Bernese*). Ciò permette di elaborare successivamente un insieme di questi files ottenendo soluzioni settimanali, mensili od annuali.

Grazie alla presenza di alcune stazioni comuni alle varie sottoreti è possibile anche combinare le diverse soluzioni, con cadenza mensile ad esempio, od annuale, per ottenere nello stesso tempo un'unica soluzione continentale e stimare parametri di trasformazione, altri parametri accessori ed un modello di deformazione a velocità costante.

Quasi tutti i centri di controllo della rete EUREF utilizzano allo scopo il programma ADDNEQ del pacchetto *Bernese* per entrambi gli scopi. Anche i centri che non utilizzano il pacchetto *Bernese* (Matera ad esempio) possono salvare le varie soluzioni in files di formato standard SINEX. Questi files sono di formato noto e stabilito e direttamente leggibili da tutti i software scientifici. È poi possibile, con un programma di utilità passare dal formato standard SINEX al formato NEQ leggibile dal software *Bernese*. (Il passaggio inverso non è sempre possibile: non è detto che il sistema normale sia sempre invertibile in senso stretto). Il programma ADDNEQ non permette tuttavia la stima congiunta dei parametri di posizione  $X$  e delle velocità  $\dot{X}$  della rete.

Questo approccio permette l'assemblaggio di numerose sottoreti, il calcolo di parecchi parametri e, quasi solo come conseguenza, il calcolo delle velocità di deformazione. Crespi (1996), ha proposto questo altra via nel calcolo delle deformazioni:

Chiamando con  $X^1, X^2, \dots, X^m$  le coordinate della rete, soluzioni alle epoche 1, 2 ed  $m$ , dopo una rotazione delle  $X^2, X^3, \dots, X^m$  sulle coordinate  $X^1$ , sono calcolate le differenze  $\delta^{1-i}$ , che hanno dispersione

$$C_{\delta\delta}^{1-i} = C_{xx}^1 + C_{xx}^i$$

Ciò avviene dopo una *S-transformation* delle  $C_{xx}^i$  per portarle tutte ad un unico datum (quello della prima sessione). Si valuta infine la significatività degli spostamenti attraverso un test di Fisher, ricavando il parametro sperimentale:

$$\frac{\delta\hat{x}^T Q_{\delta\delta}^{-1} \delta\hat{x}}{m \hat{\sigma}_m^2} = F_{sp}$$

## L'APPROCCIO PROPOSTO

I dati di partenza del metodo proposto sono reperibili completamente nei files SINEX delle soluzioni, giornaliere, settimanali o mensili dei trattamenti *Bernese* (o di altri trattamenti). In questi files sono contenute numerose informazioni, tra cui le coordinate e la matrice di varianza covarianza delle coordinate della rete. È possibile estrarre dunque da questi files, per ogni sessione di misura  $i$ , i valori:

$$\hat{X}^i, C_{\hat{x}\hat{x}}^i \quad (i = \text{epoca di misura})$$

(coordinate e matrice di varianza covarianza delle coordinate stimate all'epoca  $i$ ).

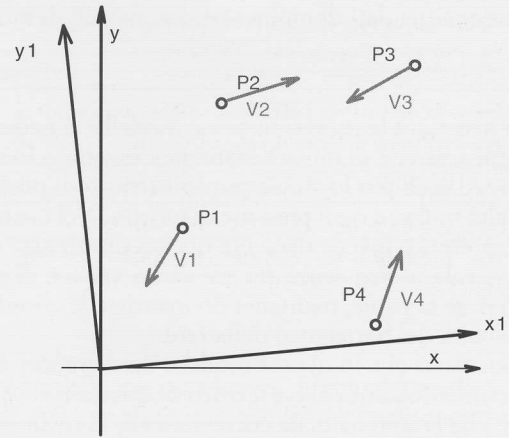


Fig. 1 - Descrizione del modello di deformazione.

Fig. 1 - Description of deformation model.

Il modello deterministico prevede queste tre ipotesi:

- una deformazione della rete a velocità costante;
- tra due sessioni di misura è applicabile una trasformazione di Helmert;
- le reti esaminate nelle varie sessioni sono costituite dallo stesso numero di vertici.

Quest'ultima ipotesi è tuttavia facilmente rimovibile. I vantaggi di questo approccio rispetto a quelli già visti consistono nel poter stimare assieme le coordinate  $\hat{X}^0$ , le velocità  $\hat{X}^0$  ed i parametri di trasformazione  $\hat{t}^i$ . L'apice zero sta ad indicare l'epoca di riferimento corrispondente in genere alla misura della prima sessione. Con questo approccio è possibile applicare i normali test della statistica parametrica per la ricerca di outliers e la verifica della significatività dei parametri.

I parametri  $\hat{X}^0$  e  $\hat{X}^0$ , non sono determinabili se non a meno di spostamenti comuni, ovvero rotazioni, traslazioni e velocità del baricentro della rete.

## ANALISI DEL MODELLO

La figura 1 descrive una rete planimetrica di quattro vertici, ciascuno dei quali si muove ad una velocità  $\dot{X}_i = (\dot{x}_i, \dot{y}_i)$  incognita; le coordinate dei vertici  $X_i = (x_i, y_i)$  sono anch'esse incognite. Le coordinate ricavate dal trattamento GPS dei dati della prima sessione rappresentano una stima di queste coordinate all'epoca "zero"  $\hat{X}^0$ . L'ipotesi aggiuntiva è che, a modello di velocità nullo, anche le coordinate ricavate alle varie epoche rappresentino, dopo una rotazione con variazione di scala, una stima delle coordinate dei vertici all'epoca zero.

Partiamo invece ora dalla considerazione opposta, ipotizzando cioè nulli i parametri di trasformazione e significative le velocità della rete. In questo caso il modello sarebbe:

$$\begin{aligned} X^0 &= \hat{X} \\ X^1 &= \hat{X} + \hat{X} \Delta t^1 \\ &\dots \\ X^m &= \hat{X} + \hat{X} \Delta t^m \end{aligned} \quad (1)$$

È possibile introdurre anche un modello più comples-

so ad accelerazione costante (ragionevole solo dopo l'elaborazione dei dati di molte sessioni mensili di misura)

$$X = \hat{X} + \hat{X}\Delta t + \frac{\hat{X}\Delta t^2}{2} \quad (2)$$

Per accettare le ipotesi fatte sul modello, è necessario che ogni sessione di misura mantenga invariato lo stesso datum, ad esempio lo stesso punto ritenuto di posizione e velocità nulle ad ogni sessione di misura. Nel nostro caso si è preferito invece risolvere questo problema "a rete libera", vale a dire senza fissare alcun vertice di riferimento o, se si vuole, mantenendo invariate le coordinate e le velocità del baricentro della rete.

I parametri che in questo modo si ricaveranno, faranno riferimento allora al baricentro di questa rete, in modo tale che la somma delle correzioni alle coordinate e la somma delle velocità dei vertici della rete così ricavate saranno identicamente nulle.

Rispetto a questo riferimento baricentrico spariscono, fra le incognite, eventuali parametri di traslazione tra due epoche di misura che, come si vede, non compaiono nelle (3).

Dovendo considerare una variazione di sistema di riferimento, chiamata  $R$  la matrice di rotazione,  $l$  il fattore di scala, il modello reale è:

$$\begin{aligned} X^0 &= \hat{X} & P^0 &= (C^0_{xx})^{-1} \\ X^1 &= \lambda^1 R^1 [\hat{X} + \hat{X}\Delta t^1] & P^1 &= (C^1_{xx})^{-1} \\ &\dots & & \\ X^m &= \lambda^m R^m [\hat{X} + \hat{X}\Delta t^m] & P^m &= (C^m_{xx})^{-1} \end{aligned} \quad (3)$$

Le matrici di varianza covarianza di ogni sessione di misura, opportunamente invertite, sono state utilizzate come matrici dei pesi per ogni sessione.

Si ritiene che la scelta compiuta, rispetto a quella che prevede di riferire coordinate e velocità ad un punto della rete fissato, non presenta particolari vantaggi, se non quello di poter visivamente comprendere meglio la storia deformativa intrinseca della rete. Si è pensato di scegliere allora questa strada perché apparivano più semplici le procedure da adottare in futuro nel caso di analisi deformative di sottoreti regionali.

Nell'ipotesi fatta, tuttavia, è necessario l'uso di algoritmi che, dopo una  $s$ -transformation, permettano anche di ricavare l'inversa generalizzata della matrice di varianza covarianza così proiettata.

Le matrici  $P$  dei pesi che compaiono nelle (3), sono quindi derivate dalle matrici lette dai files SINEX dei trattamenti di ogni sessione, dopo l'applicazione di queste procedure.

Se tutte le sessioni fossero compensate a minimi vincoli, con lo stesso punto  $F$  fisso, il sistema di riferimento potrebbe essere stabilito fissando i sei parametri:

$$X(F), X(F).$$

Nell'ipotesi che questo punto (o questi punti) siano gli stessi per ogni sessione, si può passare dal sistema a minimi vincoli (b negli apici) al sistema a rete libera (a):

con una traslazione rispetto ai parametri baricentrici per le coordinate e le velocità;

con una  $s$ -transformation per  $C^b_{xx}$ :

$$C^a_{xx} = S C^b_{xx} S^T \quad (4)$$

dove  $S$  è un opportuno proiettore.

La soluzione adottata è stata trasformare  $C_{xx}$  per tutte le sessioni di misura per renderle "a minima norma" o "rete libera":

$$C^L_{xx} = L C^b_{xx} L^T$$

dove  $L$  è il proiettore che permette di passare nello spazio complementare a quello delle traslazioni. Ciò equivale in pratica a definire invarianti le coordinate (e velocità) del baricentro della rete:

$$\sum \delta \hat{X}_i = 0 \quad \sum \delta \hat{Y}_i = 0$$

Per "pesare" le sessioni non esiste  $C^{-1}_{xx}$ , ma  $C_{xx}$ , verrà dunque utilizzata una matrice dei pesi calcolata a partire dalla pseudoinversa  $C_{xx}$  della matrice di varianza covarianza.

#### IL BILANCIO EQUAZIONI INCOGNITE E LA LINEARIZZAZIONE DEL MODELLO

Partiamo da un esempio concreto su un problema esclusivamente planimetrico: ipotizziamo di aver eseguito le misure su 6 stazioni durante 4 sessioni di misura. Le incognite sono 6x2 coordinate ed altrettante 6x2 velocità. Dobbiamo determinare anche due parametri di trasformazione: un fattore di scala ed una rotazione, per ogni sessione misurata dopo la prima sessione (l'epoca zero): ciò aggiunge ulteriori 6 incognite, per un totale di 30 incognite.

Le equazioni che si possono scrivere sono 2 per ogni punto  $p$  e per ogni sessione  $s$  ed assommano quindi a 48. La ridondanza apparente è allora 48-30=18. Si noti tuttavia che la deficienza di rango di ogni problema planimetrico di questo tipo è pari a 4. Non si possono infatti stimare posizione  $(x_0, y_0)$  e velocità  $(\dot{x}_0, \dot{y}_0)$  del baricentro della rete. In definitiva le incognite "u" e le equazioni "e" sono:

$$u = 4 * p + 2(s-1); \quad e = 2ps.$$

Linearizziamo ora il modello (3); per questo ci riferiremo al solo problema planimetrico:

- per esigenze dimostrative: è più agevole e normalmente sono più evidenti o più significativi (in base al rapporto spostamento / sqm dello spostamento:  $s/\sigma$ );

- per le diverse precisioni delle reti GPS in planimetria:  $(\phi, \lambda)$  che in altimetria:  $(h)$ , può essere utile separare i problemi per non "sporcare" con la minor precisione altimetrica anche la parte planimetrica della rete. Partiamo da una generica equazione (3) così riscritta:

$$X = \lambda R [\hat{X} + \hat{X}\Delta t] \quad (5)$$

e poniamo come al solito in questi problemi

$$\lambda = (1+m); \quad R\tilde{R}^{-1} = I + dR \quad (6)$$

Essendo  $m$  una quantità piccola rispetto l'unità ed  $\tilde{R}$  il valore approssimato, noto a priori, della matrice di rotazione che, alla prima iterazione, per questo specifico problema è ragionevole ammettere che poco si discosti dalla matrice identità. Si avrà:

$$R = I + dR$$

$$X = (1+m)(I + dR)[\hat{X} + \hat{X}\Delta t] \quad (7)$$

e sviluppando

$$X = (I + dR)[\hat{X} + \hat{X}\Delta t] + mI[\hat{X} + \hat{X}\Delta t] + mdR[\hat{X} + \hat{X}\Delta t]$$

In quest'ultima espressione si trascura l'ultimo termi-

ne. Raccogliendo poi i termini in  $X$  e  $\hat{X}$

$$X = (mI + I + dR)\hat{X} + (mI + I + dR)\Delta t\hat{X} = S(\hat{X} + \hat{X}\Delta t)$$

Nel caso planimetrico la matrice  $S$  ha la forma

$$S = \begin{Bmatrix} 1+m & \alpha \\ -\alpha & 1+m \end{Bmatrix} \quad (8)$$

Con queste ipotesi, la matrice disegno iniziale contiene i valori:

$$\frac{\partial f_x}{\partial \hat{x}}=1; \quad \frac{\partial f_x}{\partial \hat{y}}=0; \quad \frac{\partial f_x}{\partial \hat{x}}=\Delta t; \quad \frac{\partial f_x}{\partial \hat{y}}=0; \quad \frac{\partial f_x}{\partial m}=x^0; \quad \frac{\partial f_x}{\partial \alpha}=y^0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial f_y}{\partial \hat{x}}=0; \quad \frac{\partial f_y}{\partial \hat{y}}=1; \quad \frac{\partial f_y}{\partial \hat{x}}=0; \quad \frac{\partial f_y}{\partial \hat{y}}=\Delta t; \quad \frac{\partial f_y}{\partial m}=y^0; \quad \frac{\partial f_y}{\partial \alpha}=-x^0 \quad (10)$$

ed i termini noti ad ogni iterazione sono

$$\begin{aligned} X^0 - \hat{X} \\ X^1 - \lambda^1 R^1 [\hat{X} + \hat{X}\Delta t^1] \\ \dots \\ X^m - \lambda^m R^m [\hat{X} + \hat{X}\Delta t^m] \end{aligned} \quad (11)$$

## UNA SIMULAZIONE 2D

Per verificare il modello ed il programma di compensazione si è condotta una simulazione che è consistita nella generazione sintetica di quattro sessioni di misura di una piccola rete di quattro vertici, secondo un modello di deformazione (velocità, rotazioni e fattori di scala) imposte a priori.

Il risultato di questa prima fase del lavoro (la generazione di queste misure) ha permesso di costruire quattro files di coordinate e altrettanti files di matrici di varianza covarianza ottenute dopo la compensazione "a rete libera" delle misure, anch'esse generate appositamente.

In seguito si è applicato il programma di compensazione per ricostruire le deformazioni imposte, note a priori. I risultati ottenuti sono esposti in tabella 1. In sintesi le coordinate trovate sono identiche a quelle imposte, gli scarti sono nulli, a parte piccoli rumori numerici.

La tabella 1 mostra un buon ritorno delle rotazioni, un ritorno approssimato dei valori di scala e un ritorno solo parziale delle velocità. In realtà, nell'imporre le velocità al modello simulato, non si è tenuto conto che, quanto è possibile ricavare da questo, è un insieme di sposta-

Table 1 - Risultati della simulazione 2D

Table 1 - 2D simulation results

rotazioni imposte	2°.000	3°.000	4°.000	
rotazioni trovate	2°.003	3°.001	4°.003	
scale imposte: ppm	0.000	20.000	0.000	
scale trovate: ppm	0.555	21.119	1.681	
velocità date x (m/sessione)	0.010	-0.010	-0.005	0.000
velocità trovate x (m/sessione)	0.009	-0.011	0.004	-0.001
velocità date y (m/sessione)	0.004	0.010	-0.002	0.000
velocità trovate y (m/sessione)	0.001	0.007	-0.005	-0.003

Table 2 - Parametri di trasformazione sulla rete reale 2D

Table 2 - Real network (2D): Transformation parameters

Sessione	Scala (ppm)		Rotazione (dmgon)	
1:	0.0156	±0.0031	0.0655	±0.0019
2:	-0.0029	±0.0031	-0.0007	±0.0019
3:	-0.0007	±0.0031	-0.0000	±0.0019
4:	-0.0054	±0.0031	0.0025	±0.0019
5:	-0.0091	±0.0031	-0.0015	±0.0019

menti e velocità a media nulla.

Nel modello imposto invece, le velocità medie sono di +5 e di +12 mm a sessione per le due componenti x ed y. Se sommiamo alle velocità trovate i valori medi delle velocità imposte (i valori numerici +5/4 e +12/4) ritroviamo i valori imposti. Questa apparente distorsione ci ha confermato quindi la correttezza del modello e ci ha fatto comprendere meglio quali sono i risultati ottenibili.

## UNA VERIFICA CON DATI REALI

Allo scopo sono stati utilizzati sette stazioni permanenti GPS della rete EUREF che sono, in ordine alfabetico: Cagliari, Grasse, Matera, Medicina, Noto, Torino e Zimmerwald. Sono stati utilizzati i risultati ottenuti dal calcolo di sei sessioni con il modulo denominato BPE del software *Bernese* 4.0.

Questi calcoli sono eseguiti mensilmente a Torino utilizzando i dati della prima giornata di acquisizione di ogni mese di tutte le stazioni permanenti italiane, con l'aggiunta delle stazioni di Grasse (F) e Zimmerwald (CH). Si sono utilizzate le sessioni corrispondenti ai mesi che vanno da febbraio a luglio del 1998.

Per evitare tanto facili quanto fuorvianti conclusioni è bene premettere che, allo stato attuale, la precisione ottenibile con le misure GPS e con programmi anche sofisticati di trattamento dati, non è tale da far pensare che possano essere scoperti spostamenti dell'ordine di un centimetro all'anno con osservazioni che riguardano solo sei mesi di acquisizione: l'esempio proposto non vuole per nulla indicare che ciò è possibile: i risultati ottenuti semmai indicano il contrario. La prova che si è eseguita invece, è servita per verificare ogni parte della procedura predisposta anche su dati reali.

Questi dati, ricavati dal trattamento BPE, sono dei files contenenti le soluzioni in formato *sinex* che sono stati pre-elaborati per permetterne l'introduzione nel software di stima delle deformazioni descritto (denominato "PIANA").

La preelaborazione ha il compito di estrarre dai files *sinex* le soluzioni e la loro matrice di varianza covarianza ( $X, C_{xx}$ ), di ordinare entrambi gli insiemi per i soli vertici da trattare, di proiettare le coordinate e propagare le dispersioni su un piano cartesiano locale e baricentrico ed infine consente di proiettare ( $C_{xx}$ ) sullo spazio complementare alle traslazioni.

I risultati dei parametri di trasformazione tra le sessioni sono visibili in tabella 2. La tabella 3 riporta invece le coordinate (all'epoca zero, cioè a quella della prima sessione) e le velocità stimate. Queste sono da intendersi in mm per sessione, cioè, in questo caso, in mm al mese.

Le coordinate sono espresse in un sistema locale, piano e baricentrico. La figura 2 infine riporta l'andamento dei vettori velocità stimate. In questo grafico la dimen-

Table 3 - Coordinate e velocità sulla rete reale 2D

Table 3 - Real network (2D): coordinates and velocity

## Coordinate (m) e velocità dei punti della rete (m/mese)

NOME	X / $\sigma_x$	Y / $\sigma_y$	V <sub>x</sub> /mese	V <sub>y</sub> /mese
CAGL	-153098.7126	-368568.7781	0.00038	-0.00061
sqm±	0.0021	0.0021	0.00062	0.00062
GRAS	-307734.3469	149569.7505	-0.00157	0.00033
sqm±	0.0020	0.0020	0.00063	0.00063
MATE	503292.4020	-184634.8745	0.00005	0.00073
sqm±	0.0021	0.0021	0.00059	0.00059
MEDI	71796.9445	227979.7497	0.00077	0.00032
sqm±	0.0020	0.0020	0.00064	0.00064
NOTO	378226.2301	-610750.4868	-0.00041	-0.00010
sqm±	0.0023	0.0023	0.00054	0.00054
TORI	-242666.0937	292356.7125	-0.00043	0.00045
sqm±	0.0021	0.0021	0.00062	0.00062
ZIMM	-249816.4243	494047.9276	0.00121	-0.00113
sqm±	0.0021	0.0021	0.00059	0.00059

sione dei vettori, pur essendo internamente coerente, non ha scala convenzionale.

## IL CONFRONTO DEI RISULTATI OTTENUTI CON I VALORI ITRF

Dopo le elaborazioni descritte, ribadita ancora l'insufficienza dei dati per una stima significativa, si è ugualmente cercato di confrontare i risultati ottenuti, con i valori più recenti (risultati ITRF96) ricavati internazionalmente. Si sono utilizzate le velocità della rete ITRF96, note per tutti i vertici esaminati tranne che per Torino, di cui non è ancora stata possibile una stima. I vettori velocità ITRF sono stati prima proiettati sullo stesso piano utilizzato per il trattamento fin qui descritto ed, in seguito, sono stati resi a media nulla. La tabella 4 indica nelle prime due colonne numeriche i valori ITRF delle velocità e, nelle ultime due, i valori  $v_x$  e  $v_y$  ottenuti con il software qui descritto (trasformati da metri per mese in metri per anno).

Come sottolineato nelle premesse, il confronto visibile in tabella non rende giustizia al trattamento proposto: tranne che per Matera e Medicina le velocità ricavate so-

Table 4 - Confronto tra velocità ITRF e velocità ricavate dal trattamento proposto

Table 4 - Comparison between ITRF speed and speed obtained from the proposed solution

NOME	$v_x$ itrif (m/anno)	$v_y$ itrif (m/anno)	V <sub>x</sub> /mese (m/anno)	V <sub>y</sub> /mese (m/anno)
CAGL	-0.0007	-0.0023	0.0046	-0.0073
GRAS	-0.0014	-0.0019	-0.0189	0.0040
MATE	0.0001	0.0048	0.0007	0.0087
MEDI	0.0056	-0.0019	0.0092	0.0038
NOTO	-0.0019	0.0025	-0.0050	-0.0012
TORI	-	-	-0.0051	0.0054
ZIMM	-0.0017	-0.0011	0.0145	-0.0135

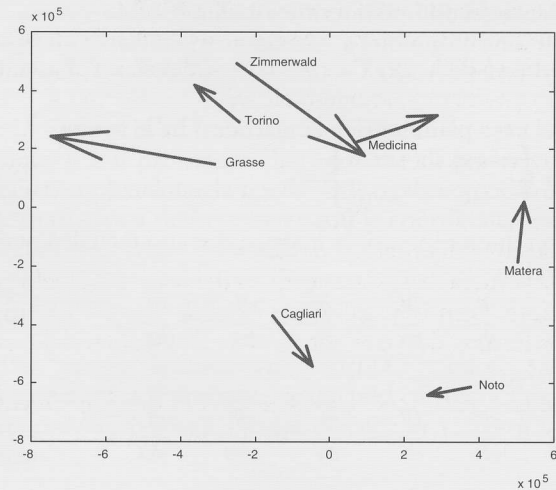


Fig. 2 - Descrizione del modello di velocità.

Fig. 2 - Description of velocity model.

no di un ordine di grandezza superiori a quelle ITRF.

Il confronto grafico tra questi vettori, mostra tuttavia una discreta coerenza nelle direzioni delle velocità, tranne che per la stazione di Zimmerwald.

La ragione principale dell'incongruenza delle velocità ricavate rispetto a quelle note internazionalmente, non sta nel metodo, verificato in simulazione, ma nell'esiguità dell'intervallo di misura che in questa prova si prende in considerazione.

La tabella 4 mostra l'assenza di Torino: nel modello ITRF che consiste in un elenco di coordinate e velocità della rete di stazioni permanenti mondiali, mancano di solito le velocità delle stazioni "più giovani". Per la stima di queste velocità sono necessari normalmente alcuni anni di misura. In mancanza di un periodo così lungo di osservazione, i dati ricavati risulterebbero poco attendibili a causa della precisione stessa della rete, i cui risultati sono serviti come pseudo osservazioni per ricavare le stime internazionali delle velocità.

Tale riguardo, vale ancor più per la stima delle velocità altimetriche di deformazione della rete: precisioni mino-

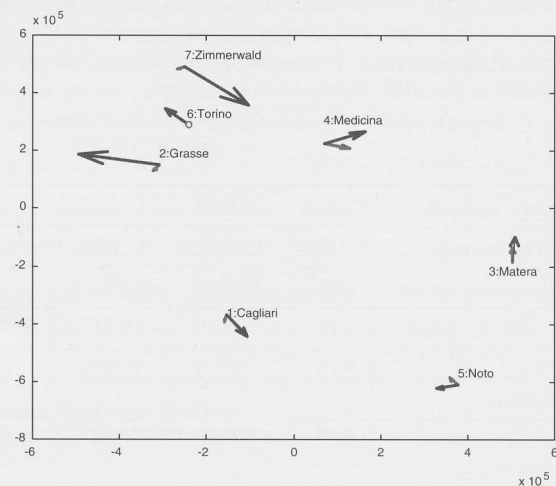


Fig. 3 - Confronto tra velocità ITRF e velocità ricavate dal trattamento proposto.

Fig. 3 - Comparison between ITRF speed and speed draw from the proposed solution.

ri richiedono più lunghi periodi di confronto.

Questa considerazione è suffragata anche da un esame più attento delle tabella 2 e 3 che evidenziano una scarsa significatività dei parametri ricavati.

Per proseguire quindi su questa strada occorre, da un lato avere a disposizione una serie storica meno limitata e dall'altro inserire nel software i classici test parametrici che permettano in ordine:

- la stima di eventuali *outliers*;
- la verifica della significatività dei parametri (velocità, rotazioni, fattori di scala);
- la ristima dei parametri in base ai risultati del passo precedente.

Queste modifiche sono ora in corso di implementazione.

## CONCLUSIONI

L'approccio che si è proposto permette di intravedere, a valle, due possibili applicazioni: la prima è la ricerca famiglie di equi-velocità attraverso metodi di cluster analysis, per un possibile aiuto alla individuazione di micro placche tettoniche. Ciò è possibile anche attraverso test non parametrici o per mezzo di statistiche di Bayes, affrontando dapprima la possibilità di definire, con i ri-

sultati ricavati in precedenza, una "varianza a priori".

La seconda applicazione è la ricerca di deformazioni incongruenti, rispetto al modello lineare, a causa della presenza di accelerazioni o fenomeni di rottura. Soprattutto in questo caso, aldilà dell'importanza dell'utilizzo di qualunque modello statistico, per quanto fine, si ribadisce l'importanza dell'utilizzo di dati di una serie storica molto ampia.

Si ricorda infine che i programmi, sviluppati in linguaggio MATLAB 5, sono liberamente a disposizione per l'uso o per graditi interventi di miglioramento.

## BIBLIOGRAFIA

- CRESPI M., 1996 - *A software package for the adjustment and the analysis of GPS control networks. Report on Surveying and Geodesy*. DISTART Edizioni Nautilus, Bologna.
- LEICK A., 1995 - *GPS satellite surveying*. J.Wiley & Sons, New York, 2<sup>nd</sup> edition.
- RIGUZZI F., ZANUTTA A., 1998 - *Displacement field of the Italian area from permanent GPS stations*. Ann. Geof., v. 41/2.
- Risultati ITRF96: indirizzo web: <http://lareg.ensg.ign.fr/-ITRF/ITRF96-rep.html#results>.
- SPRINGER T.A., GURTNER W., ROTHACHER M., SCHAER S., 1996 - *Euref Activities at CODE Analysis Center*. Paper of Astronomical Institute, University of Bern.

# Sulla stima dell'accuratezza delle coordinate di un vertice GPS collegato ad una rete di stazioni permanenti

Nicola CROCETTO\*, Marco GATTI\*\* e Paolo RUSSO\*\*\*

\* Seconda Università di Napoli, via Roma 29, I - 81031, AVERSA, Italy

\*\* Dipartimento di Ingegneria, Università di Ferrara, via Saragat 1, I - 44100, FERRARA, Italy

**ABSTRACT** - Permanent GPS stations can be exploited with great advantage also in common operations of topographical surveying, to position unknown isolated vertices with sufficient precision and with measurements obtained from "a single" receiver. To this purpose, we have developed a method of calculation which, after a suitable stochastic model has been fixed, provides the estimate of the components of variance of the model, of the coordinates of the unknown vertices and their accuracies. The method consists in performing the Best Invariant Quadratic Unbiased Estimate (BIQUE) of the components of variance associated with the stochastic model of a GPS base. For the calculation, the matrices of variance-covariance associated with the bases, obtained in post-processing with commercial or scientific software, are assumed as known matrices of cofactors. In the estimate, the components of the GPS base and the coordinates of the permanent stations (with or without their rms) must also be known. Subsequently the method uses the estimated components of variance to recalculate the matrices of variance-covariance associated with the GPS bases and finally to calculate the coordinates and rms of the unknown GPS vertex. The method of calculation has been applied to three real cases. The first two cases refer to the positioning of the vertices of emanation of two local GPS networks; the third case refers to the positioning of a single permanent station. The networks are situated near the Po Delta (Fig. 2) and the city of Ferrara (Fig. 4) and they were surveyed for medium- and large-scale cartography. The positioning was carried out by means of connection to the permanent stations of the ASI and IGS networks (Fig. 3, Fig. 5 and Fig. 6). To identify the numerical elements (base components and their matrices of variance-covariance) to be associated with the method of calculation, we performed the processing with two commercial software packages: Trimble GPSurvey release 2.0 and Ashtech GPPS release 5.0.

The stochastic model associated with the single base components is:

$$P = (\lambda^2 U)^{-1}$$

where  $\lambda$  is an adimensional "scale factor" and U is the matrix of variance-covariance considered as a known matrix of cofactors. For l, we have hypothesized the expression:

$$\lambda = [k^2 + (k^2 b)^2]^{1/2}$$