

Confronto tra tecniche terrestri e satellitari per il controllo dei movimenti verticali del suolo in ambito urbano: un caso di studio

G. Bitelli, L. Vittuari

DISTART- Università di Bologna, Viale Risorgimento 2, 40136 Bologna
e-mail [gabriele.bitelli, luca.vittuari]@mail.ing.unibo.it

Riassunto

Le tecniche del rilevamento metrico applicate a strutture di interesse nel settore dei Beni Culturali sono orientate alla conoscenza descrittiva dei beni ed alla loro documentazione, nonché al supporto di procedure di restauro, diagnostica e monitoraggio strutturale. Quest'ultimo ambito riveste oggi notevole interesse, non solo perché essenziale in una prassi di salvaguardia e tutela dei beni, ma anche perché può giovare di una fase di profondo rinnovamento tecnico-scientifico, grazie allo sviluppo di nuove tecnologie, strumentazioni e procedure operative di grande potenzialità per questo campo applicativo.

Il presente lavoro si inserisce in questa direzione e mostra il confronto tra i risultati ottenuti nel monitoraggio di movimenti verticali del suolo (subsidenza) con la tecnica della livellazione geometrica di precisione e con una analisi interferometrica di immagini radar sviluppata con la metodologia PSInSAR di tipo avanzato. L'area di studio è stata una porzione del centro di Bologna, ricca di edifici storici di notevole interesse.

Abstract

A considerable improving in metrical survey techniques has been nowadays observed in the framework of Cultural Heritage. Surveying procedures adopt often multidisciplinary techniques that have to consider many aspects such as geometric description, documentation, representation, stability, restoration, monitoring. The integration of advanced instruments and methodologies today is of great interest for this application field.

The paper describes the comparison between the results obtained using the spirit leveling and a radar interferometric methodology (PSInSAR), for the detection of ground vertical movements. The test area is located within the historical centre of Bologna.

1. Il monitoraggio dei movimenti verticali nel centro storico bolognese

Il controllo geometrico delle strutture trova motivazione in numerosi fattori legati ai movimenti del suolo e alle deformazioni degli edifici che possono portare a lesioni di diverso grado e gravità.

Il presente lavoro è rivolto alle tecniche per il monitoraggio nel tempo dei movimenti verticali del suolo in aree soggette a fenomeni di subsidenza, soprattutto di origine antropica, con particolare interesse a centri storici.

Come noto, la tecnica topografica impiegata maggiormente nel campo del controllo dei movimenti verticali del suolo è la livellazione geometrica dal mezzo di alta precisione, spesso accoppiata ad ulteriori indagini effettuate con strumentazioni di carattere non topografico ad opera dei tecnici delle strutture per lo studio di singoli edifici. A questa tecnica si sta affiancando oggi una nuova metodologia basata sull'utilizzo di tecniche interferometriche su immagini satellitari radar; inizialmente adottate per studi a livello territoriale, esse sono affinate con successivi sviluppi nel trattamento dei dati fino ad aprire la strada ad applicazioni orientate al massimo dettaglio, fino alla scala degli edifici.

Si tratta di due metodi estremamente diversi per la loro natura, ma che potrebbero trovare interessanti forme di integrazione e complementarietà; una indagine in tal senso richiede però che siano effettuati dei confronti fra i risultati prodotti con questi due differenti approcci, e che si riescano a mettere in luce le relative caratteristiche con esempi applicativi concreti.

A questo proposito è stata effettuata una sperimentazione avente per oggetto un'area campione all'interno del centro storico della città di Bologna; di tale sperimentazione, che è ancora in corso, vengono esaminati nel seguito alcuni aspetti.

Il fenomeno di abbassamento del suolo si è reso manifesto nel passato a Bologna con lesioni nei fabbricati e danni al patrimonio artistico-monumentale, che hanno richiesto, in alcuni casi, interventi di consolidamento dei fabbricati. D'altra parte, la subsidenza nel territorio bolognese ed in generale nella pianura padana è soggetta ad attività di monitoraggio da oltre 50 anni; le sue cause sono in gran parte di carattere antropico e soprattutto attribuibili all'estrazione di acqua dal sottosuolo per scopi civili, industriali ed agricoli. In particolare, nel territorio bolognese enti diversi quali ad esempio il Comune di Bologna, la Provincia di Bologna, l'Autorità di Bacino del Fiume Reno e l'ARPA per conto della Regione Emilia-Romagna, oltre ovviamente all'IGMI per le reti nazionali, hanno realizzato o misurato, in epoche diverse, reti altimetriche di livellazione geometrica, in molti casi espressamente rivolte al controllo dei movimenti; alcune linee attraversano la città di Bologna. Il centro cittadino è stato anche dotato di una rete di livellazione ad alta densità (rete di raffittimento), realizzata dal Comune di Bologna nel 1992, con lo scopo di avere un'informazione di dettaglio, a livello dei singoli isolati ed edifici, sull'evoluzione locale della subsidenza.

I dati di livellazione analizzati nel presente lavoro si riferiscono principalmente a misure ripetute nel tempo ed effettuate da Comune di Bologna, Provincia di Bologna ed ARPA Emilia-Romagna, con la collaborazione scientifica del DISTART dell'Università di Bologna.

Va ricordato inoltre, per completezza, che l'area comunale e provinciale è stata oggetto anche di campagne di misura GPS, effettuate dallo stesso Dipartimento e finalizzate al monitoraggio della subsidenza.

Nella figura 1 viene mostrata l'area del centro storico; sono riportate le linee della rete generale che sono state rilevate dalla Provincia di Bologna nell'ambito della misura 1999 della rete regionale, gestita da ARPA; per una porzione del centro storico che è soggetta in modo significativo al fenomeno di subsidenza e che ospita la sede centrale dell'Ateneo bolognese, è evidenziata la posizione dei capisaldi della rete generale comunale e di quella di raffittimento.

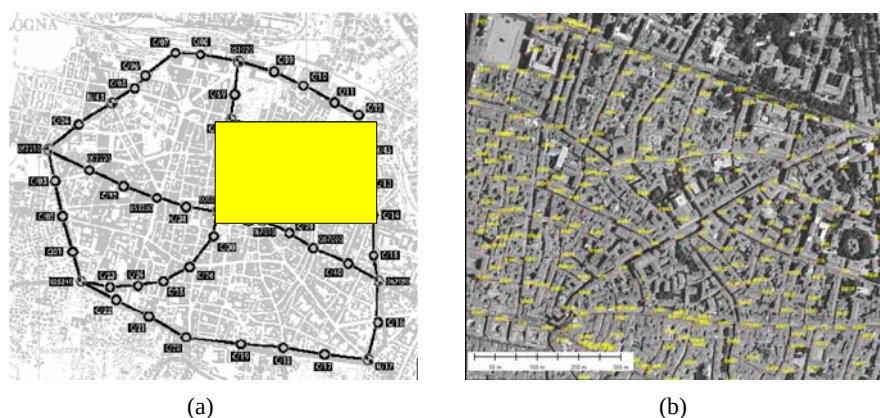


Fig. 1 – (a) estratto della rete generale del Comune di Bologna con i capisaldi rilevati nella campagna regionale, è evidenziata la porzione di territorio oggetto di uno studio particolareggiato; (b) per la stessa area del centro storico è riportata la posizione dei capisaldi della rete generale e della rete di raffittimento.

Per questa zona esistono quindi misure effettuate all'interno di campagne a scala comunale ed a scala più ampia dal 1983 al 1999; inoltre, sono stati effettuati dal Comune di Bologna rilievi locali specificatamente sull'area universitaria. Questo insieme di dati, in parte già omogenei in quanto a datum altimetrico ed in parte omogeneizzati successivamente, è stato utilizzato nell'ambito di questa ricerca.

2. Indagine interferometrica per il periodo 1992-2000 e confronto con i dati di livellazione

I recenti sviluppi permessi dalle tecniche satellitari hanno ampliato notevolmente i campi di intervento e l'analisi interferometrica differenziale da sensori radar ad apertura sintetica (SAR) orientata al monitoraggio delle deformazioni rappresenta un significativo esempio in tal senso; sono tuttavia ancora poco frequenti in letteratura confronti tra questa tecnica, applicata fino alla scala del singolo edificio, e le consolidate metodologie topografiche terrestri.

L'analisi in corso sul centro storico di Bologna è stata svolta avvalendosi di un dataset di 73 immagini radar acquisite dai sensori SAR montati a bordo dei satelliti ERS-1 ed ERS-2, su orbite ascendenti e discendenti, nel periodo compreso tra aprile 1992 e gennaio 2001. L'elaborazione delle immagini SAR è stata effettuata dalla società Tele Rilevamento Europa utilizzando l'approccio Permanent Scatterers (PS), brevettato dal Politecnico di Milano, nella cosiddetta modalità avanzata. Tale tecnica (PSInSAR) si basa sull'analisi di un insieme di immagini con l'individuazione di diffusori permanenti radar, bersagli aventi caratteristiche elettromagnetiche costanti nel tempo rispetto alla diffusione dei segnali radar e praticamente immuni da effetti di decorrelazione. Tali punti nell'indagine SAR assumono quindi una funzione simile a quella dei capisaldi per la livellazione, anche se nel caso dei PS l'individuazione al suolo dell'effettivo oggetto riflettente è ancora tema di approfondimenti e ricerche.

Un indubbio punto di forza della tecnica PSInSAR nelle aree abbondantemente edificate è l'alta densità spaziale di punti aventi caratteristiche idonee ad essere utilizzati quali diffusori permanenti. A titolo di esempio si riporta in figura 2 la distribuzione dei PS utilizzati nell'analisi in corso su un'area test posta nel centro storico bolognese. Per ciascun punto riportato in figura è stata calcolata una serie storica delle variazioni di "quota", ed è proprio l'elevato numero di osservazioni a permettere una realistica individuazione e rimozione degli artefatti indotti dall'attraversamento del segnale radar in atmosfera. Nel dataset utilizzato non sono disponibili le immagini relative all'anno 1994, in quanto il satellite ERS-1 è stato usato, in quel periodo, per altri scopi scientifici.

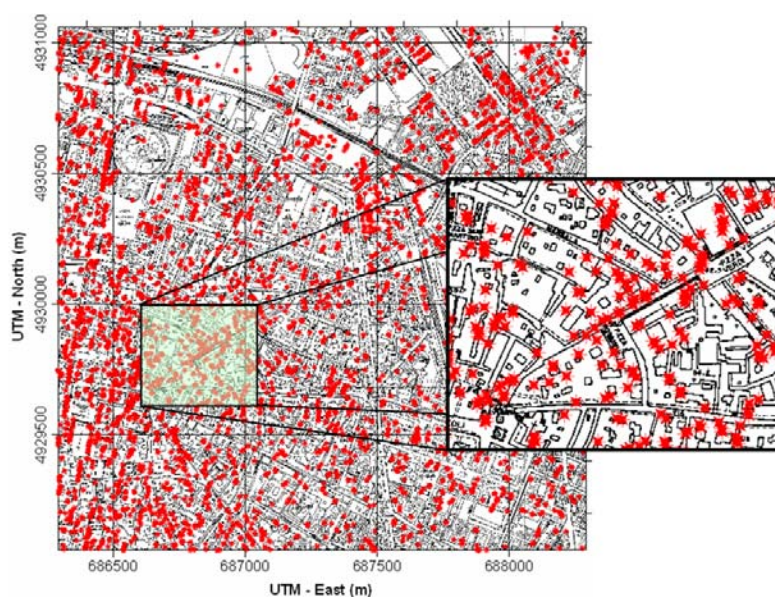


Fig. 2 – Distribuzione dei punti aventi le caratteristiche necessarie per essere utilizzati come Permanent Scatterers all'interno dell'area test posta nel centro storico di Bologna.

L'indagine PS viene offerta secondo due modalità: standard o advanced. L'analisi di tipo "standard" ricerca i soli fenomeni di deformazione con un'evoluzione prevalentemente lineare nel tempo, mentre il processamento di tipo advanced permette, su aree limitate, anche la stima di moti non lineari.

Viste le finalità della ricerca, è stata scelta quale area di test per una analisi PS di tipo advanced, una porzione limitata del centro storico bolognese che copre da Piazza Ravegnana, in direzione Via Zamboni, fino ad arrivare a Piazza di Porta San Donato; proprio in quest'area si trovano alcuni edifici storici che hanno richiesto negli anni investigati dalla presente analisi importanti interventi di consolidamento in seguito ad abbassamenti differenziali del complesso strutturale.

Pur avendo fissato in questa analisi soglie molto restrittive per l'individuazione dei PS più affidabili sono stati identificati oltre 3700 PS, tali da garantire una densità media superiore ai 400 PS/Km².

I dati della serie storica 1992 – 2000 forniscono le variazioni di quota rispetto ad una quota di riferimento intermedia al periodo analizzato (1997). È stato adottato per l'intera analisi SAR un PS di riferimento posto in zona pedecollinare; le serie temporali PS sono state poi successivamente ricondotte all'origine imposta quale emanazione delle quote per la livellazione geometrica, nei pressi di Sasso Marconi sull'Appennino bolognese.

Ad ogni PS è associato il trend medio di movimento nell'intervallo temporale considerato; viene inoltre attribuito ad esso un parametro di qualità o coerenza, con valore compreso tra 0 e 1. La coerenza globale per tutte le immagini è risultata superiore a 0.7; ciò corrisponde ad una accuratezza formale tra 0.1 e 1 mm/anno per ogni trend di velocità ricavato. Va osservato che i dati di movimento ottenuti dalle acquisizioni ERS-1 ed ERS-2 non sono immediatamente utilizzabili come indicazione di movimento puramente verticale. Gli spostamenti, infatti, si riferiscono a variazioni misurate lungo la linea di osservazione (Line Of Sight); per ottenere un dato fruibile per questa ricerca, tali valori sono stati preventivamente ricondotti alla verticale, in una ipotesi di assenza di movimento in planimetria.

In figura 3 è riportata una porzione dell'area investigata e la posizione di alcuni capisaldi di livellazione che sono stati scelti per un primo confronto, insieme con il codice del PS più prossimo di cui è disponibile la serie temporale.



Fig. 3 – Planimetria di una porzione dell'area investigata e posizione di alcuni capisaldi di livellazione e PS utilizzati per un primo confronto

Nella successiva figura 4 si riportano a titolo di esempio i grafici della variazione di quota determinati per due di essi con entrambe le tecniche (i valori sono calcolati rispetto a un valore origine convenzionale, eseguite le opportune operazioni di omogeneizzazione tra i vari rilievi di livellazione e rispetto al punto origine dell'interferometria); per ciascuno si nota una ottima aderenza tra le due serie storiche.

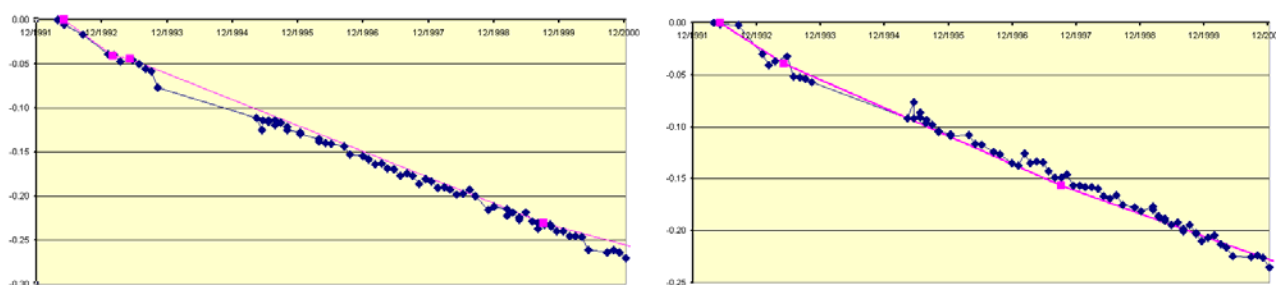


Fig. 4 - Confronto tra la serie delle variazioni di quota (in m, rispetto ad un valore convenzionale) desunte mediante livellazione geometrica (simbolo quadrato) e mediante interferometria al PS più prossimo (simbolo rombo) per i capisaldi C60 (sinistra) e R369 (destra).

L'analisi su molti altri capisaldi disponibili ha confermato l'andamento, anche se non è stata ancora terminata l'elaborazione sull'intero dataset; tra i motivi di interesse nell'indagine vi è il livello di correlazione nelle serie storiche per diffusori permanenti appartenenti alle stesse strutture o a corpi di fabbrica connessi, la eventuale identificazione delle cause di comportamenti non lineari sul breve periodo, gli effetti di stagionalità, le motivazioni delle anomalie esistenti su alcuni punti, ecc.

Tra le altre problematiche in corso di indagine vi è l'analisi in ambiente GIS della qualità della georeferenziazione dei punti PS e del grado di accuratezza nell'individuare il diffusore, o l'insieme dei diffusori, che sono effettivamente rappresentativi della struttura su cui è posto il caposaldo; a ciò viene ad aggiungersi la questione della caratterizzazione dei bersagli PS in termini di materiali e contesto, con le relative proprietà sia di comportamento stagionale/termico, sia di diffusione del segnale.

Interpolando i valori di velocità di abbassamento forniti dall'analisi interferometrica sui PS dell'area test sull'intero periodo studiato, è possibile infine ottenere anche una mappa del campo delle velocità di subsidenza (mm/anno), rappresentata in figura 5 con un diagramma tridimensionale.

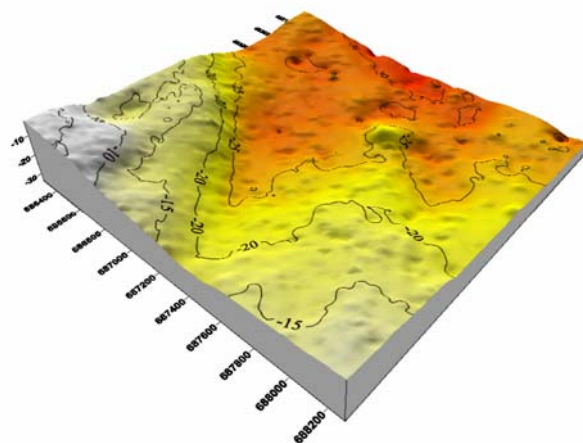


Fig. 5 – Rappresentazione tridimensionale del campo di velocità di subsidenza 1992-2000 nell'area in studio ottenuto con dati di interferometria.

Conclusioni

La sperimentazione in corso, di cui sono stati presentati i primi risultati, ha permesso di valutare alcune delle potenzialità e delle problematiche legate al sistema di monitoraggio basato su interferometria SAR per il controllo delle deformazioni, con un dettaglio che può permettere di studiare i singoli edifici o i singoli isolati in ambito urbano.

Tra le caratteristiche di grande interesse di tale tecnica va considerata, insieme al livello di precisione ed alla densità di informazioni fornite in un contesto urbanizzato, anche la possibilità di indagare su periodi temporali passati, a partire dal 1992 (ERS-1). Va osservato peraltro che, se la densità dei diffusori permanenti consente di indagare su singoli edifici ed al tempo stesso su aree ampie, per contro, allo stato attuale, non può essere preventivamente garantita l'acquisizione di PS su un edificio specifico; a questo fine è certamente importante l'approfondimento di metodologie integrate tra questa tecnica e le tecniche topografiche tradizionali.

Da un confronto diretto preliminare su un sottoinsieme di capisaldi di livellazione, la velocità di subsidenza dedotta da interferometria appare in ottimo accordo con quella desunta da livellazione geometrica, previa una operazione di omogeneizzazione dei dati allo stesso riferimento considerato stabile. Accanto al completamento dell'analisi per tutto il dataset, con la determinazione quindi di parametri statistici di maggiore significatività, la ricerca si propone di studiare alcune problematiche tipiche dell'interferometria differenziale, che sono state brevemente esposte nel lavoro, e di verificare la metodologia migliore per una efficace ed effettiva integrazione con le tecniche topografiche tradizionali di alta precisione, largamente utilizzate nel monitoraggio dei movimenti verticali per strutture semplici e complesse, in esterno ed in interno.

Ringraziamenti

Lavoro svolto con il finanziamento del progetto PRIN2004, "Integrazione di tecniche di rilevamento terrestre, fotogrammetriche e satellitari al fine del monitoraggio di strutture ed aree di interesse architettonico ed archeologico" (Responsabile Nazionale Prof. Carlo Monti).

I dati di livellazione geometrica per il territorio bolognese sono stati acquisiti nell'ambito di campagne condotte da Comune di Bologna, Provincia di Bologna, ARPA Regione Emilia-Romagna, IGMI.

Bibliografia

- Barbarella M., Pieri L., Russo P. (1990). Studio dell'abbassamento del suolo nel territorio bolognese mediante livellazioni ripetute: analisi dei movimenti e considerazioni statistiche, INARCOS, 506:1-19.
- Bitelli, G., Pieri, L., Radicioni, F. & Russo. P. (1996). Densification problems of a vertical control network. In Pelzer, H. & Heer, R. eds Proceedings of the 6th International FIG Symposium on Deformation Measurements, 24-28 February 1992, pp. 116-128, Hannover.
- Folloni G., Russo P., Radicioni F. (1996). La subsidenza del territorio bolognese dal 1983 al 1993, INARCOS 571:400-413.
- Strozzi T., Wegmuller U., Bitelli G.: "Differential SAR interferometry for land subsidence mapping in Bologna". Proceedings Sixth International Symposium on Land Subsidence (SISOL) - Ravenna, Vol. II, 187-192, Padova, 2000.
- Bitelli G., Bonsignore F., Unguendoli M. (2000). Levelling and GPS networks for ground subsidence monitoring in the Southern Po Valley. *Journal of Geodynamics*, 30 (3): 355-369.
- Ferretti A., Prati C. & Rocca F. (2001). Permanent Scatterers in SAR Interferometry, IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing, Vol. 39, Jan 2001, 8-20.
- Colesanti C., Ferretti A., Novali F., Prati C., Rocca F. (2003). SAR Monitoring of Progressive and Seasonal Ground Deformation Using the Permanent Scatterers Technique. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41, no. 7, 1685-1701.