RICOMPOSIZIONE CARTOGRAFICA MEDIANTE INTEGRAZIONE DI RILIEVI PREGEO E DI CARTOGRAFIA NUMERICA ESISTENTE

Emiliano SOSSAI

Dipartimento di Georisorse e Territorio, Università di Udine, via Cotonificio 114 – 33100 Udine
tel. 0432 558702, fax 0432 558700, e-mail interreg.cart@uniud.it, http://geomatica.uniud.it

Riassunto
L'articolo presenta un metodo di ricomposizione cartografica che può offrire una valida soluzione ai ben noti problemi della cartografia numerica catastale. Il procedimento proposto prende avvio con la compensazione conforme di una rete di Punti Fiduciali (PF) e l'inserimento in essa, mediante trasformazioni di similitudine, dei rilievi PREGEO afferenti; una volta risolte le corrispondenze tra gli elementi geometrici catastali, tali entità (rete fiduciale ricomposta + rilievi georiferiti) fungeranno da vincolo nel successivo passo di mutuo adattamento dei fogli di mappa; la procedura si completa con l'aggiornamento del tessuto cartografico di base così determinato, da realizzarsi attraverso un processo di mosaicatura delle particelle catastali che vede coinvolti simultaneamente i nuovi rilievi PREGEO e le vecchie entità frutto di digitalizzazione. I presupposti teorici del metodo sono stati testati nella ricomposizione della cartografia della zona di Udine Nord e gli esiti della sperimentazione attestano le potenzialità della proposta di migliorare la qualità complessiva della carta numerica catastale.[*]

Abstract
The paper presents an analytical cartographic method that might be a valid solution to the well known problem of the cadastral digital mapping updating. The proposed procedure starts with the conformal adjustment of the fiducial points (PF) and the insertion by similarity transformation in the fiducial network, of the PREGEO surveyed parcels. Once the correspondences among the cadastral geometric elements are solved, these last are used as constraints in the next step where a mutual adaptation of the map sheets is carried out. The procedure is completed with the updating of the cartographic content through a matching process of the cadastral parcels by simultaneously considering the new PREGEO surveys and the digitized entities. The analytical background of the method has been tested to the cadastral mapping of the Udine Nord area and the obtained results confirm the potentiality of our proposal to generally improve the quality of the cadastral digital map.

Introduzione

L'attuale cartografia numerica catastale è in larga parte il risultato della digitalizzazione, eseguita con vari metodi, delle carte catastali d'origine, sia su poliestere sia su carta. L'operazione, di fatto, ha incrementato gli errori di graficismo di un supporto cartografico realizzato nella prima metà dello scorso secolo, con le tecniche e gli strumenti di allora, e variamente alterato, in maniera né isotropa né omogenea, in funzione alle vicende dovute alla sua stessa conservazione. Se a questo si

[*] La ricerca rientra nell'ambito delle attività previste dal progetto INTERREG IIIA Phare/CBC Italia-Slovenia "Ricomposizione della cartografia catastale e integrazione della cartografia tecnica regionale numerica per i sistemi informativi territoriali degli enti locali mediante sperimentazione di nuove tecnologie di rilevamento" svolto dall'Università di Udine in collaborazione con il Geodetski Inštitut Slovenije di Lubiana.

aggiungono processi di aggiornamento non sempre esenti da critiche, il tutto porta a contenuti geometrici che offrono affatto garanzie di precisione ed affidabilità.
Questa affermazione trova conferma in numerose esperienze: si pensi ad esempio alle incongruenze che si riscontrano nell'inserire un rilievo d'aggiornamento, magari realizzato con il GPS, all'interno della mappa, oppure alle difficoltà di far dialogare, sistemi di riferimento a parte, fogli di mappa catastale con altri prodotti cartografici quali ortofoto digitali, carte tecniche numeriche o elaborazioni di rilievi laser.
Per aggiustare la situazione, gli interventi più frequenti adottati da professionisti e pubbliche amministrazioni consistono nell'adattare la carta catastale ad altre nuove carte di origine fotogrammetrica, attraverso trasformazioni geometriche, normalmente affini a 6 parametri, calcolate in funzione di una serie di punti doppi le cui coordinate sono o estratte direttamente dalle rappresentazioni cartografiche (ad esempio: Brovelli e Zamboni, 2004) o appartenenti ad una rete di inquadramento determinata topograficamente (Bernabino, Caione, Di Iasio e Pirello, 2005).
In questo contesto, il gruppo di topografia dell'Università di Udine ha sviluppato un metodo di ricomposizione cartografica originale ed innovativo (Beinat e Crosilla, 2002; 2003) che, a differenza delle altre proposte, cerca la congruenza della carta catastale numerica mediante l'uso, quasi esclusivo, di dati geometrici ad essa omogenei, quali quelli presenti nel sistema informativo dell'Agenzia del Territorio costituitosi con l'entrata in vigore delle Circolari Ministeriali n. 2 del 15/01/87 e n. 2 del 26/02/1998, esigendo, nel contempo, un onere per i rilievi topografici in campagna estremamente ridotto.

Il metodo di ricomposizione generale conforme
L'idea fondamentale della proposta è considerare le varie entità catastali (siano esse particelle digitalizzate, rilievi PREGEO, poligoni fiduciali misurati in campagna) come tanti tasselli non deformabili di un più ampio mosaico, tessere da adattare nel modo migliore possibile ma senza tuttavia alterarne la forma, in modo da comporre un coerente tessuto cartografico.
Il supporto teorico dell'intera proposta è fornito da quello strumento matematico che prende il nome di analisi procustiana generalizzata (GPA). Dati due o più rilievi di uno stesso oggetto, la GPA permette di adattarli, secondo il principio dei minimi quadrati, attraverso un insieme opportuno di rotazioni, traslazioni e deformazioni isotrope calcolate in modo da soddisfare una definita funzione obiettivo: conseguentemente essa è in grado di stimare la forma più probabile dell'oggetto di partenza. Il classico problema dell'analisi procustiana generalizzata è stato risolto con soluzione diretta da Kent, nel caso bidimensionale, e da Gower (1975) e Ten Berge (1977), in modo iterativo in ambiente n-dimensionale. Altri lavori importanti da citare a riguardo sono quelli di Commandeur (1991), che ha risolto la GPA nel caso in cui i rilievi da adattare fossero rappresentazione solo parziale dell'oggetto di partenza, e di Goodall (1991), il quale ha introdotto la possibilità di dare una pesatura ai dati iniziali e, di conseguenza, di introdurre delle configurazioni di vincolo.
L'applicazione del modello GPA prima ai poligoni fiduciali ricostruiti dagli elaborati tecnici dei professionisti, successivamente ai fogli di mappa catastale, infine ai rilievi PREGEO e alle particelle digitalizzate, porta alla realizzazione del metodo e la conseguente ricomposizione della cartografia numerica catastale. Di seguito verranno esposte le varie fasi della procedura e nel contempo illustrati i risultati della sua applicazione nell'area di studio Udine Nord: 4 fogli di mappa comprensivi di 9 allegati, 3.8 Km^2 di estensione, 68 Punti Fiduciali, 369 rilievi PREGEO, sistema di riferimento Cassini-Soldner, origine delle coordinate "Santa Maria di Castello".

Compensazione della rete dei Punti Fiduciali
Come appena accennato, il primo passaggio dell'algoritmo serve a definire, attraverso la compensazione procustiana dei poligoni fiduciali, la forma e la posizione della rete di PF di inquadramento, esprimendone le coordinate nel sistema di riferimento definitivo (di solito Gauss-Boaga).

Il processo qui introdotto è già stato applicato nella ricomposizione di 3 reti fiduciali (oltre a Udine Nord, Gorizia e Tarcento) e gli esiti sono stati oggetto di precedenti interventi ASITA (Beinat, Crosilla e Clerici, 2002; Beinat, Crosilla, Furlan, 2004; Sossai, 2005) a cui si rimanda per i dettagli.
Riassumendo, la sperimentazione ha messo in luce che la procedura, una volta introdotto come vincolo un insieme limitato di punti fissi di coordinate note (10-15% del totale), recupera tutte le componenti di errore, mitigando quella accidentale, e riesce a stimare le restanti coordinate con errori decisamente inferiori alle tolleranze previste dal catasto. Inoltre, la compensazione procustiana, conservando le forme originali dei poligoni fiduciali, previene l'insorgenza di deformazioni anisotrope che generano smagliature nel tessuto cartografico. Infine si è evinta la superiorità dell'approccio conforme rispetto ad una compensazione classica ai minimi quadrati.

Inserimento dei rilievi PREGEO

Definito il datum cartografico come risultato della compensazione dei poligoni fiduciali e implicitamente indotto dalla scelta delle coordinate dei punti di vincolo, il passo successivo del metodo prevede l'inserimento, mediante trasformazione conforme ai minimi quadrati, dei rilievi PREGEO all'interno della rete fiduciale ricomposta.
Nel caso di studio Udine Nord, l'operazione ha coinvolto 369 rilievi PREGEO i quali, una volta georiferiti nel sistema cartografico Gauss-Boaga della rete ricomposta, hanno presentato valori di dispersione tra punti omologhi assai ridotti: per oltre il 40% dei casi, essi erano inferiori ai 5 cm e, alzando tale soglia a 20 cm, si andava a comprendere il 90% delle osservazioni. Inoltre si è riscontrato un accordo molto buono con i contenuti della carta tecnica del Friuli Venezia Giulia: punti corrispondenti di rilievi PREGEO e CTRN sono risultati distare, nella metà dei casi, meno di 20 cm e, per il 90% dello osservazioni, meno di 35 cm (Beinat, Crosilla, Sossai; 2005a).

Ricerca automatica di corrispondenze tra entità catastali

La ricomposizione della cartografia catastale esige una serie di dati coerentemente definiti e opportunamente strutturati: nel caso dei poligoni fiduciali, questa condizione è soddisfatta grazie ad un'univoca codifica degli identificativi dei PF. Trattando coi fogli mappa e i rilievi PREGEO, invece siamo di fronte ad un archivio numerico decisamente stratificato i cui comparti, chiusi quasi ermeticamente, interagiscono molto difficilmente gli uni rispetto agli altri, anche se la situazione è decisamente migliorata con l'introduzione della procedura informatica PREGEO 8.
Unica soluzione è risolvere le corrispondenze tra i vertici omologhi delle entità catastali: facendo ciò si va ad introdurre una topologia univocamente definita, la quale consente di realizzare una struttura dati di immediato trattamento informatico e di costruire un archivio numerico catastale intrinsecamente coerente ed omogeneo. A causa delle non uniformi condizioni di partenza dei dati geometrici catastali, la ricerca delle corrispondenze è stata impostata come un problema di allineamento di configurazioni con struttura topologica assente e prive di informazioni semantiche.
Per la risoluzione è stato implementato un metodo iterativo liberamente ispirato all'algoritmo EM (Luo, Hancock; 2002) con assegnamento flessibile. Particolarità dell'approccio è costruire una matrice delle corrispondenze **C** (Chui, Rangarajan; 2003) non da subito tipicamente booleana, ma dove a ciascun elemento c_{ij} è associata la probabilità di corrispondenza tra l'i-esimo vertice di una configurazione e il j-esimo dell'altra; tale probabilità è espressa come distanza gaussiana calcolata in funzione della mutua distanza euclidea tra i due vertici e di r, un raggio di ricerca opportunamente assegnato (passo E). I valori contenuti in **C** permettono di determinare i parametri della trasformazione di similitudine con la quale sovrapporre, nel migliore dei modi, una configurazione rispetto all'altra (passo M). I passi E ed M vengono iterati riducendo di volta in volta il valore di r in funzione del numero di vertici, della qualità delle corrispondenze suggerite e degli *outliers* e il metodo si arresta quando il raggio di ricerca assume valori inferiori a σ, scalare che riassume l'entità del rumore di fondo presente nelle due configurazioni. Se al termine del processo iterativo la matrice **C** non è ancora divenuta booleana in ogni sua riga e colonna, si procede all'introduzione dell'informazione topologica, comunque presente nei dati di partenza,

sebbene non univocamente definita, e ora parzialmente utilizzabile grazie alle corrispondenze certamente individuate, la quale permette di definire dei controlli logici sulle adiacenze e geometrici sugli angoli, consentendo di risolvere le ambiguità residue.

Ricomposizione dei fogli di mappa

La risoluzione delle corrispondenze porta all'individuazione di una serie di punti doppi attraverso i quali è possibile adattare la carta catastale all'intelaiatura costituita dalla rete fiduciale ricomposta e dai rilievi PREGEO georeferenziati.

Tuttavia, voler realizzare questa sovrapposizione operando per trasformazioni applicate al singolo foglio di mappa, trascurando il legame con gli altri fogli, è una via non praticabile. Agendo in questa maniera, si è venuta a determinare la situazione descritta in *figura 1b* dove è rappresentata la distribuzione delle dispersioni delle coordinate relative a vertici omologhi appartenenti a fogli di mappa diversi: ogni classe ha ampiezza di 25 cm, esclusa l'ultima che contiene le osservazioni con valore superiore ai 2.5 metri. Il risultato, estremamente dipendente dalla distribuzione dei rilievi PREGEO all'interno di ciascun foglio di mappa, è una condizione che, in termini di continuità tra foglio e foglio, è decisamente peggiore di quella riscontrabile nell'attuale carta catastale della zona di Udine Nord (*figura 1a*), situazione già di per sé deteriorata.

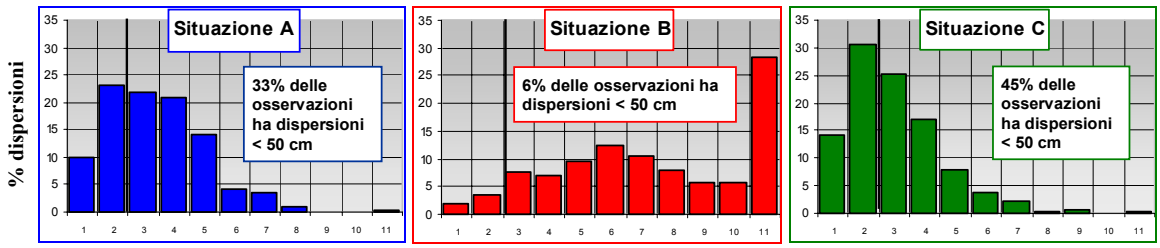

Figura 1- Distribuzione delle dispersioni di punti omologhi appartenenti a fogli di mappa diversi nel caso di: carta catastale originale (a), carta adattata con trasformazioni indipendenti (b), carta ricomposta mediante GPA (c).

Al fine di costruire un tessuto cartografico il più possibile coerente e preciso, è dunque necessario da una parte realizzare la sovrapposizione con le entità geometriche misurate direttamente in campagna ma nello stesso tempo è indispensabile collegare in maniera opportuna i vari fogli. Per centrare l'obiettivo, l'applicazione dell'algoritmo GPA si rivela fondamentale: in questo caso ciascun foglio di mappa viene ruotato, traslato e scalato, previo un grossolano inquadramento, in modo tale da adattarsi al meglio, secondo il principio dei minimi quadrati, sia agli altri fogli, sia ai vincoli rappresentati dalla rete fiduciale e dai rilievi PREGEO ivi inseriti. Il processo viene iterato sino a quando l'entità dei singoli parametri di trasformazione non assume valori trascurabili. Terminata la compensazione, la stima della posizione di un generico vertice della mappa verrà data dal baricentro delle coordinate dei suoi punti omologhi, ora disposti nella configurazione a dispersione minima. La bontà della proposta è testimoniata dalla *figura 1c*, la quale mette in luce come l'applicazione della GPA abbia prodotto una netta riduzione delle dispersioni rispetto all'originale carta catastale e conseguentemente alla cartografia ottenuta da trasformazioni indipendenti dei fogli. Un'ulteriore conferma della validità dell'algoritmo la possiamo apprezzare in *figura 2c*, dove è ben evidente la buona sovrapposizione, risultato della GPA, degli stessi elementi cartografici presenti simultaneamente in tre fogli di mappa diversi; analoga situazione non la riscontriamo nella mappa d'origine (*figura 2a*) ne tanto meno nella carta ottenuta dall'adattamento indipendente dei fogli (*figura 2b*).

Mosaicatura delle particelle catastali

Nel suo ultimo passo, il metodo prevede l'aggiornamento dei fogli di mappa, vale a dire l'inserimento diretto delle informazioni geometriche relative ai rilievi PREGEO all'interno di quel continuum cartografico di base che si è venuto a determinare con la ricomposizione dei fogli.

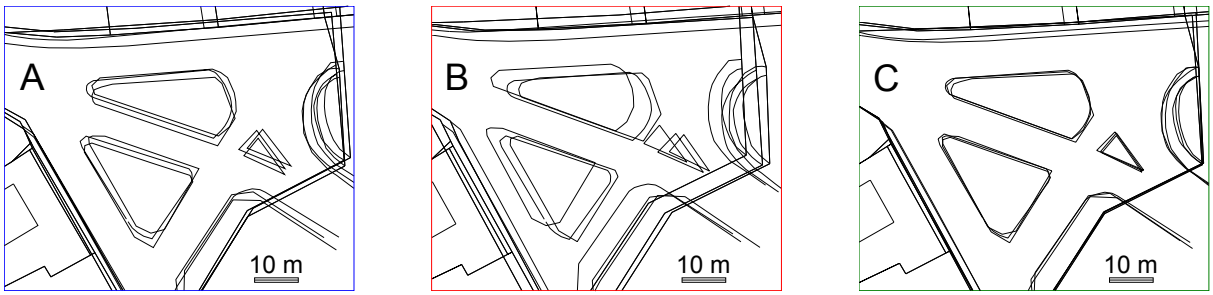

Figura 2- Medesimi elementi cartografici presenti simultaneamente in 3 fogli diversi della mappa catastale: originale (a); ottenuta per adattamento indipendente dei fogli di mappa (b) e risultato della ricomposizione conforme (c)

In luogo di una semplice sostituzione di coordinate tra vertici omologhi, questo è realizzato attraverso un processo di mosaicatura conforme delle particelle: il foglio di mappa viene disaggregato nei suoi elementi minuti (bordi e linee, nella codifica CXF); gli elementi digitalizzati sono sostituiti con la loro controparte misurata direttamente in campagna; il tutto viene infine riaggregato, ancora mediante algoritmo GPA, nel rispetto dei vincoli costituiti dai Punti Fiduciali ottenuti dalla compensazione conforme della rete, dai vertici dei rilievi PREGEO inseriti nella rete fiduciale e dai punti di bordo del foglio di mappa determinati dalla ricomposizione dei fogli. Questi ultimi vincoli si rivelano particolarmente importanti innanzi tutto perché permettono di conservare la continuità cartografica, che altrimenti andrebbe vanificata dalla disaggregazione del foglio di mappa, e permettono di ridurre sensibilmente l'effetto di accumulo di errori sul bordo manifestatosi nella sperimentazione in ambiente simulato (Lavarini; 2005).
La presenza di questa struttura a triplice ordine di vincolo, omogeneamente ripartita e capillarmente distribuita all'intero del foglio di mappa, è in grado di dirigere favorevolmente il processo di riaggregazione delle particelle catastali, com'è testimoniato dall'immagine in *figura 3*.

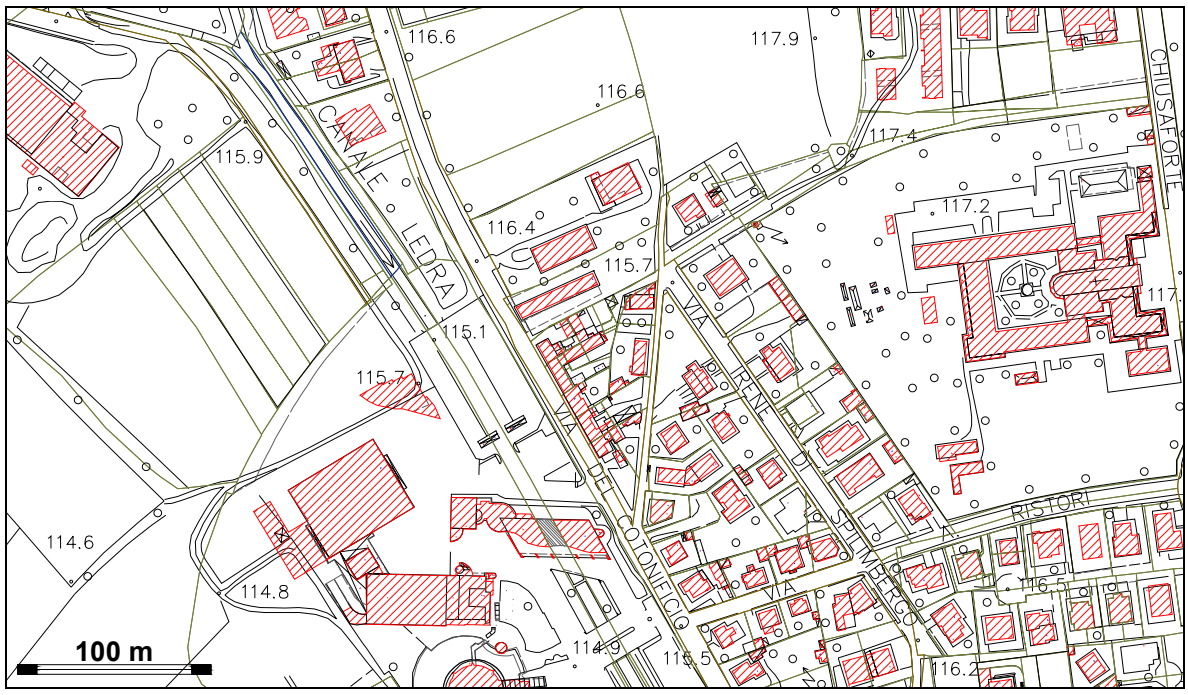

Figura 3- Particolare di carta catastale ricomposta (a colori) sovrapposta alla Carta Tecnica Regionale Numerica del Friuli Venezia Giulia (in nero)

La sovrapposizione della carta catastale ricomposta sulla CTRN del Friuli Venezia Giulia mette in evidenza la buona qualità metrica del prodotto finale della ricomposizione conforme e fa apprezzare l'accordo ottenuto tra i due supporti cartografici indipendenti.

Conclusioni

La proposta illustrata in quest'articolo, un metodo conforme che si sviluppa per fasi, dove ognuna delle quali offre un risultato cartografico immediatamente fruibile, riassume l'esperienza maturata dal progetto INTERREG IIIA Phare/CBC Italia-Slovenia nell'ambito della ricomposizione della cartografia numerica catastale. I risultati conseguiti all'interno del progetto hanno evidenziato che gli algoritmi provenienti dall'analisi procustiana, applicati alle misure dedotte dagli elaborati tecnici dei professionisti, consentono un evidente miglioramento nei contenuti geometrici dell'attuale mappa catastale, tanto da ricavare un risultato finale direttamente confrontabile con altri prodotti cartografici, quali carte tecniche regionali.

L'uso estensivo del metodo può produrre una carta catastale semplice da aggiornare, e ogni atto di aggiornamento, sempre nell'ottica della proposta, apporterà, a sua volta, un miglioramento della qualità della carta stessa. E il tutto può essere realizzato con un evidentissimo vantaggio di tipo economico: la compensazione di oltre 30 mila vertici di mappa ha richiesto la conoscenza delle coordinate "esatte" di soli 10 Punti Fiduciali.

Bibliografia

Beinat A., Crosilla F. (2002), "Una proposta innovativa per la ricomposizione cartografica del catasto", *Atti VI Conf. Nazionale ASITA,* Perugia, 5-8 novembre.

Beinat A., Clerici A., Crosilla F. (2002), "Prime sperimentazioni di una proposta innovativa per la ricomposizione cartografica del catasto", *Atti VI Conf. Nazionale ASITA,* Perugia, 5-8 novembre.

Beinat A., Crosilla F. (2003), "Generalised Procrustes Algorithms for Conformal Updating of a Cadastral Map", *ZfV-Zeitschrift für Geodäsie*, Geoinformation und Landmanagement, 5, 341-349.

Beinat A., Crosilla F., Furlan M., Sossai E. (2004), "Ricomposizione procustiana della rete fiduciale catastale mediante dati dell'archivio PREGEO: l'esperienza di Gorizia", *Atti VIII Conf. Nazionale ASITA,* Roma, 14-17 Dicembre.

Beinat A., Crosilla F., Sossai E. (2005), "Ricomposizione particellare conforme della cartografia catastale numerica", *Atti L Conv. Nazionale Sifet*, Palermo 29 giugno - 1 luglio.

Beinat A., Crosilla F., Sossai E. (2005), "Un metodo particellare per l'aggiornamento progressivo della cartografia catastale", *Atti IX Conf. Nazionale ASITA,* Catania 15-18 novembre.

Bernabino F., Caione S., Di Iasio A., Pirrello G. (2005), "L'integrazione tra la cartografia catastale e la carta tecnica della Città di Torino", *Atti IX Conf. Nazionale ASITA,* Catania 15-18 novembre.

Brovelli M. A., Zamboni G. (2004) "Integrazione di basi cartografiche su grandi aree" *Bollettino SIFET*, 4: 11-31.

Chui H., Rangarajan A. (2003), "A new point matching algorithm for non rigid registration", *Computer Vision and Image Understanding* 89, 114-141.

Commandeur J. J. F. (1991), "*Matching configurations*", DSWO Press, Leiden University, 13-61.

Dryden I., Mardia K. (1998) "*Statistical Shape Analysis"*, John Wiley & Sons, Chichester UK, 83-107.

Ferrante F., Di Filippo S., Gnesivo P. R., Tufillaro D. (2005) "Consolidamento delle coordinate dei punti fiduciali su aree di vasta estensione" *Atti IX Conf. Nazionale ASITA,* Catania 15-18 novembre.

Goodall C. (1991), Procrustes methods in the statistical analysis of shape, *Journal Royal Stat. Soc*., Series B-Methodological 53 (2), 285-339.

Gower J. C. (1975), "Generalized Procrustes Analysis", *Psychometrica* 40 (1), 33-51.

Lavarini L. (2005), "Un metodo evolutivo per l'aggiornamento della cartografia catastale numerica", *Tesi di laurea*, Università di Udine, A.A. 2004-2005.

Luo B., Hancock E. R. (2002), "Iterative Procrustes alignment with the EM algorithm" *Image and Vision Computing"* 20, 377-396.

Sossai E. (2005), "La ricomposizione di una rete fiduciale catastale di ampie dimensioni: l'esempio di Tarcento (UD), *Atti IX Conf. Nazionale ASITA,* Catania 15-18 novembre.

Ten Berge J. M. F. (1977), "Orthogonal Procrustes rotation for two or more matrices", *Psychometrica* 42 (2), 267-276.