



Dati laser aerotrasportato: ipotesi di verifica

Le misure laser rappresentano un potente strumento di rilievo del territorio. La loro precisione dipende da molti fattori in parte accidentali ed in parte sistematici. I sistematismi, più forti in planimetria che in altimetria, vengono in gran parte rimossi dalla Ditta su un campo di taratura. Può essere interessante ricercare all'interno dei dati la presenza di sistematismi residui non rimossi, sia a scopo di migliorare il risultato finale, sia per scopi di collaudo, non essendoci al presente nessuna normativa specifica. Il lavoro propone la ricerca di *bias* planimetrici per mezzo di correlazioni eseguite a tappeto sulle zone di sovrapposizione di strisciate laser.

Il presente studio nasce nel progetto di ricerca nazionale MURST COFIN98, coordinato dal Prof. R. Galetto; per questo scopo si sono eseguiti voli laser con due sensori diversi (TopoSys e Optech) sulla città di Pavia, sia in zone urbanizzate che su zone di campagna, sul fiume Ticino e sulla ferrovia.

Nella complessa macchina che porta al posizionamento laser vi possono essere anche errori sistematici, sia planimetrici (più marcati) che altimetrici, la gran parte dei quali vengono ridotti con una operazione di taratura eseguita dalle singole ditte in maniera diversa, e purtroppo spesso non trasparente all'utente finale, per mezzo di misure direttamente eseguite a terra, nei migliori dei casi, o con riferimento a cartografia preesistente. Una procedura, non si sa quanto sia diffusa, prevede una calibrazione fatta correlando punti di controllo appartenenti a strisciate adiacenti, per calcolare i parametri di rototraslazione di ogni strisciata. In un volo di calibrazione, questa operazione viene compiuta su tutte le strisciate, negli altri voli solo su due strisciate trasversali volate in senso opposto; le altre strisciate vengono "aggiustate" individuando punti di collegamento comuni alle strisciate trasversali.

Può essere interessante ricercare all'interno dei dati la presenza di sistematismi residui non rimossi. Questa ricerca può essere fatta "esternamente", confrontando i dati con misure a terra ricavate con metodi ancora più precisi. Può anche essere eseguita "internamente" nel caso si riesca almeno a ricostruire, per le zone di sovrapposizione, i dati di ogni strisciata. Non si parla di verifica attraverso il rilievo fotogrammetrico in quanto potrebbe non sempre essere eseguito e presenta precisioni altimetriche in genere inferiori. Una ragionevole ipotesi sulla genesi di questi *bias* potrebbe essere eseguita anche ricostruendo il tragitto compiuto dai dati grezzi (distanza R dell'oggetto dal sensore e angolo di scansione b nonché dei parametri di calibrazione che purtroppo, in questo caso non sono stati resi disponibili. In questo lavoro si parlerà del confronto intrinseco dei dati che ha il vantaggio di permettere una stima della precisione svincolata dalla misura di punti di appoggio a terra.

L'organizzazione dei dati e il confronto tra le strisciate

La quantità dei dati coinvolti, diversi milioni di coordinate tridimensionali, fa sì che sia necessario adeguare anche gli strumenti necessari alla gestione. La prima operazione eseguita è stata la costruzione di un archivio relazionale che permette l'accesso diretto ai dati grezzi, la seconda è stata la validazione dei dati e la costruzione di un modello digitale di superficie (DSM). Il passo di grigliatura di questo DSM è stato scelto in funzione della densità dei punti a terra, in modo tale che per ogni elemento vi siano in media almeno 6-8 punti, in misura minima sufficiente ad individuare fra questi gli errori grossolani od anche gli *outliers*. Così facendo si sono costruiti DSM di passo 0.5 m per il volo basso a 400m della TopoSys e di passo 1 m per gli altri voli. Questa operazione consente di gestire il DSM con gli stessi software commerciali nati per la gestione di immagini digitali di grandi dimensioni, con grandi vantaggi di tempi e di costi. Nel caso in esame si è utilizzato il programma ENVI della Research Systems che permette di gestire i dati di quota dei singoli "pixel" in quanto questi vengono solo visualizzati, ma non trasformati in livelli di grigio.

Confrontando due strisciate contigue, con sovrapposizione sufficiente, è possibile indagare la presenza di particolari tipi di sistematismi. L'idea che fosse possibile valutarne l'esistenza è nata calcolando le differenze di quota nella zona di sovrapposizione tra strisciate. Si nota che le differenze di quota sono quasi nulle su superfici pianeggianti, un poco più elevate (10÷15 cm) sulle superfici inclinate, ad esempio i tetti, e notevoli (anche qualche metro) in prossimità del perimetro degli edifici. Nella figura 1 vediamo la rappresentazione della differenza dei valori di quota di due strisciate contigue, le *cross track* del volo TopoSys a 400 m di altezza. È stata scelta come esempio questa zona per la presenza di un edificio di grandi dimensioni (il castello) circondato da ampie zone di terreno libero; questo perché nella parte di volo che riguarda il centro città, con edifici di volumetria a volte complessa e addossati tra loro, i risultati sono di più difficile lettura. Notiamo toni di grigio più scuri, che indicano differenze di quota maggiori, in corrispondenza degli elementi classificati come *outlier*, cioè vegetazione e bordi. Sul perimetro degli edifici la differenza di quota è circa uguale all'altezza dell'edificio stesso. Questo risultato, è stato interpretato come effetto di uno *shift* planimetrico tra le due strisciate; è anche noto, da considerazioni sulla geometria della scansione, che l'errore planimetrico è da due a sette volte l'errore altimetrico, e il rapporto aumenta linearmente in funzione dell'altezza di volo.

Abbiamo assunto quindi per ipotesi che lo *shift* altimetrico sia nullo, e misurato lo *shift* planimetrico, trattando i due ar-

segue ➔

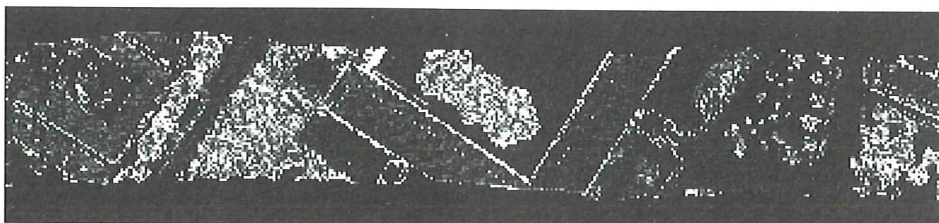


Fig. 1 - Differenza in quota tra due strisciate calcolata nella zona di sovrapposizione delle *cross track*. I toni di grigio più scuri indicano differenze maggiori, e si trovano in corrispondenza dei bordi.

chivi allo stesso modo di due immagini digitali per utilizzare gli stessi algoritmi di correlazione, implementati poi in un programma denominato *DSM_Laser*. Poniamo di lavorare su due strisciate **1** e **2**, e di cercare la posizione di un punto di **1** nella strisciata **2** a partire dalla posizione approssimata nota di un punto sull'immagine omologa.

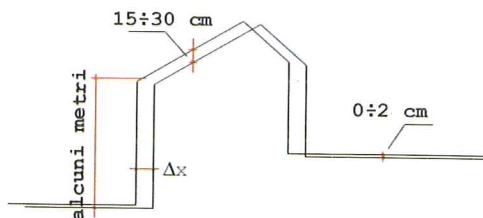


Fig. 2 - La sezione rappresenta un edificio che è stato rilevato in entrambe le strisciate, ma con un evidente shift planimetrico. Sono indicate le differenze di quota tra i due DSM.

Nel nostro algoritmo si è utilizzata una matrice di ricerca di 13x13 elementi ed una matrice sagoma, di 9x9 elementi. Una prima misura della correlazione, è stata condotta "a pixel intero", ricavando il coefficiente di correlazione r , calcolato ricavando gli scarti quadratici medi σ_1 e σ_2 delle quote q_1 e q_2 in entrambe le aree, e dalla covarianza σ_{12} fra le due quote stesse.



Fig. 3 - Valore del coefficiente di correlazione a pixel intero, rappresentato in scala di grigi; il coefficiente di correlazione è normalmente compreso tra 0,8 e 1, ma si trovano anche valori prossimi a 0 (pixel più scuri).

I valori del coefficiente di correlazione (rappresentati nella figura 3) sono normalmente compresi tra 0,8 e 1, ma ritrovano anche valori prossimi a zero. È evidente dall'immagine che i valori minori, indicati da toni di grigio più scuri, si trovano in prossimità dei bordi, perché è proprio nell'intorno di queste linee che, in immagini diverse della stessa area, si hanno le differenze maggiori. Il calcolo automatico della correlazione è reso difficile non solo dalla presenza di rumore, ma anche dal fatto che in prossimità dei bordi esistono pixel a quote intermedie.

Una volta determinata la posizione con l'approssimazione del pixel (si trovano valori limite di 2 m) si è esteso il calcolo alla correlazione sub pixel. La matrice sagoma deve ancora essere spostata di una quantità $x=(dx, dy)$ minore del pixel rispetto all'area di ricerca.

In fotogrammetria digitale le posizioni delle due serie di grigi q_1 e q_2 sono legate dalla relazione:

$$v + q_2(\xi) = b \cdot q_1(\xi + x) + c \quad [1]$$

Con questa ipotesi si ammette che l'area di sagoma e di ricerca differiscano non solo nella posizione, ma anche nei valori di quota. In realtà, per motivi fisici, non è ragionevole pensare che vi sia un fattore di scala tra le quote delle due strisciate, avrebbe più senso ammettere semmai una costante traslativa c ma, per le ipotesi di base (vogliamo trovare gli errori planimetrici) e per quelle di precisione (l'accuratezza planimetrica è inferiore a quella altimetrica) si è volutamente trascurata. L'equazione [2] si può riscrivere:

$$v = q_1'(\xi) \cdot x - [q_2(\xi) - q_1(\xi)] \quad [2]$$

dove compaiono le componenti accidentali n . La procedura seguita ai minimi quadrati, determina così le sole due incognite traslative x . In forma matriciale si scrive:

$$v = A\hat{x} - l \quad [3]$$

Dalla condizione di minimo si ricava la nota soluzione

$$\hat{x} = (A^T A)^{-1} A^T l \quad [4]$$

da cui:

$$\hat{x} = ((q_1')^T (q_1'))^{-1} (q_1')^T (q_1 - q_2) \quad [5]$$

dove $q_1(\xi)$ è la matrice sagoma; $q_2(\xi)$ è la sezione della matrice ricerca e $q_1'(\xi)$ è il gradiente della sagoma. La [5] si sdoppia in due parti e permette di ricavare separatamente e :

$$\delta x = ((q_{1x}')^T (q_{1x}'))^{-1} (q_{1x}')^T (q_1 - q_2) \quad [6]$$

$$\delta y = ((q_{1y}')^T (q_{1y}'))^{-1} (q_{1y}')^T (q_1 - q_2) \quad [7]$$

infine non è necessario invertire alcuna matrice, perché le [6] e [7] sono prodotti scalari.

Poiché le matrici sagoma e ricerca possono avere elementi vuoti, non sempre è possibile calcolare le differenze prime. Inoltre il numero di differenze prime (e quindi di equazioni) nella direzione dx , può non corrispondere al numero di differenze prime nella direzione dy .

La precisione di posizionamento aumenta con le discontinuità di quota, cioè sui bordi (fig. 4). Quest'aumento di precisione può essere stimato dalla matrice inversa del sistema normale. La precisione aumenta se aumenta la dimensione della matrice sagoma, purché subentrino altri bordi; in prossimità di bordi abbiamo trovato uno scarto quadratico medio di 2÷3 cm per valori dello shift di 30÷40 cm.

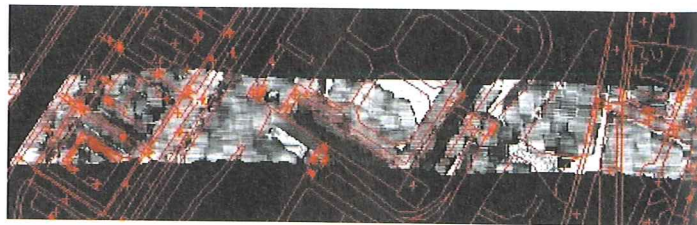


Fig. 4 - Valori dello scarto quadratico medio della misura dello shift delle coordinate in direzione E. I valori minori (toni di grigio più chiari), si riscontrano in prossimità dei bordi, mentre i valori maggiori, fino a 30 cm, sono sulle superfici pianeggianti (toni di grigio più scuri).

Dal calcolo della correlazione subpixel, otteniamo gli shift (Dx, Dy) nelle coordinate x, y , e i relativi scarti quadratici medi. Ci siamo chiesti se vi fossero eventuali sistematismi in questi valori di shift. La loro rappresentazione raster, non permette di trarre conclusioni, in quanto i risultati, affetti da errori accidentali indotti dal rumore presente nei DSM delle due strisciate, rendono l'immagine poco leggibile.

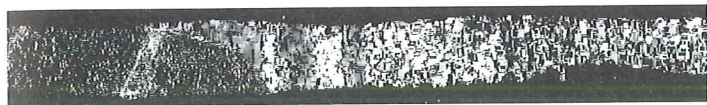


Fig. 5 - Raster dei valori di Δy . Si notano zone dove Δy è positivo (grigio chiaro) e dove è negativo (grigio scuro). Il nero indica gli elementi in cui non è stato possibile calcolare Δy .

Sulle strisciate oggetto di studio il volo ha seguito la direzione Nord - Sud. La prima grossolana indagine è stata la ricerca di un *bias* traslativo di tipo lineare lungo questa direzione per mezzo del calcolo della retta di regressione tra i valori di *shift* (Δx , Δy) e la coordinata N. Per entrambi si è ricavata una correlazione significativa. I valori interpolati mostrano le stime Δy variabili tra -20 e 5 cm, mentre variano molto meno: tra -15 e -30 cm, le stime Δx . Il modello lineare, eccessivamente semplificato, è stato la prima tappa nell'analisi di questi sistematismi.

Applicando alle immagini che rappresentano queste traslazioni l'operatore di media mobile e mediana, si è ottenuto un archivio depurato dalla componente di disturbo dovuta alla presenza di rumore nelle due strisciate.



Fig. 6 - Valori di Δy depurati dalla componente dovuta al rumore. I toni scuri indicano shift negativi, i valori chiari shift positivi.

Il risultato ottenuto non è ancora soddisfacente, perché in alcune zone dell'immagine i valori di shift calcolati presentano scarti quadratici medi elevati. Per escludere i Δy con sqm elevati, è stata applicata una maschera ai risultati di figura 6, ottenendo l'immagine di figura 7.



Fig. 7 - Scarti quadratici medi di Δy ; i valori maggiori si hanno nella zona di terreno libero alla sinistra dell'immagine.



Fig. 8 - Valori di Δy con scarto quadratico medio inferiore a 15 cm. L'immagine è stata ottenuta combinando le due precedenti.

Il risultato finale si presta ad alcune osservazioni:

- le zone edificate sono le aree campione più adatte a condurre misure di correlazione, perché la presenza di frequenti bordi minimizza gli scarti quadratici medi; i valori ottenuti su zone di terreno libero sono scarsamente significativi, e sono stati esclusi dall'analisi dei risultati;
- nell'area campione sono presenti shift positivi e negativi. In particolare nella zona centrale dell'immagine, si osserva una sequenza di "bande" di valori di segno opposto. Possiamo solo ipotizzare che siano state originate da errori sistematici nella misura dell'angolo di rollio da parte del sistema inerziale;

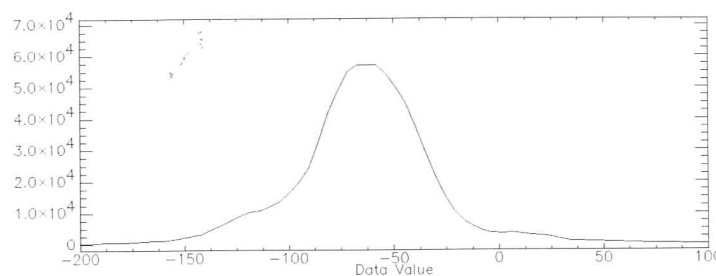


Fig. 9 - Istogramma dei valori di Δx relativi alla coppia di strisciate TopoSys dat31206 e dat31207; sull'asse delle ascisse sono riportati gli shift in cm, sull'asse delle ordinate il numero di punti.

Sono stati eseguiti ulteriori test su coppie di strisciate TopoSys acquisite da un'altezza di volo di 850 m. Gli istogrammi dei valori di Δx e Δy hanno un andamento a campana di Gauss e il loro valore medio si discosta sensibilmente dallo zero. In questo caso si trovano shift di modulo 40 ÷ 60 cm, comunque sempre inferiori alla dimensione del pixel (1 m). Questi errori sono paragonabili con quelli trovati studiando tutte le possibili sorgenti di errore e la loro influenza sul posizionamento 3D (Baltasvias) e rappresentati in figura 10.

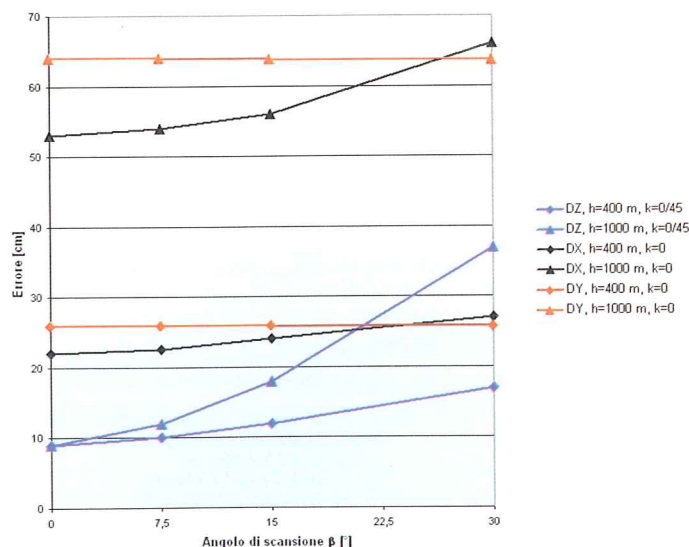


Fig. 10 - Errori nelle coordinate misurate in relazione ad altezza di volo, angolo di scansione e deriva (E. P. Baltasvias, 1999).

Conclusioni

Il calcolo della correlazione tra strisciate contigue, potrebbe essere impiegato nella fase di taratura e di collaudo dei voli laser. Il metodo proposto, oltre ad essere totalmente automatizzabile, ha il vantaggio di essere indipendente dalla misura di punti di appoggio a terra. Attualmente però non esistono standard qualitativi ufficialmente riconosciuti e norme di collaudo per i voli laser: ciò che si può proporre è di rispettare, in ogni caso, i valori di tolleranza planimetrica ed altimetrica relativi alla scala equivalente della cartografia o dell'ortofoto per la quale si esegue il volo.

BIBLIOGRAFIA

AA. VV. (1999) - *Airborne laser scanning*, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol. 54.

Baltsavias E. P. (1999) - Airborne laser scanning: basic relations and formulas, in ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol. 54, pagg. 199 - 214.

Casella V., Galetto R., Spalla A. (2000) - *Il progetto di ricerca Cofin98 sull'impiego del laser a scansione* in bollettino SIFET n° 2, pagg. 13-26.

Casella V., Spalla A. (2000) - *Dati laser a scansione da piattaforma aerea a supporto della pianificazione urbana* in bollettino SIFET n° 2, pagg. 43-51.

Manzino A. M., Roggero M. (2000) - *Dati laser aerotrasportato: ipotesi di verifica*, in Atti della 4ª Conferenza Nazionale ASI-TA.

Press W. H., Teukosky S. A., Vetterling W. T., Flanner B. P. (1992) - *Numerical recipes in Fortran. The art of scientific com-*

puting. Second Edition Cambridge University Press. Pag. 698: MEDFIT.

Roggero M. (2000) - *Scansione laser da piattaforma aerea, trattamento e analisi dei dati*, Tesi di Laurea: Politecnico di Torino II Facoltà di Ingegneria, Vercelli. Luglio 2000.

MARCO ROGGERO

nato a Vercelli il 30/6/74
risiede a Santhià (VC)
e si è laureato in Ing. Civile a Vercelli,
presso la II Facoltà del Politecnico
di Torino nel luglio 2000.



Ambrogio M. MANZINO - Marco ROGGERO

Politecnico di Torino

C.so Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino

Tel. 011-5647675 - fax: 011-5647699

Mail: manzino@polito.it

Mail: roggero@atlantic.polito.it

AGENDA

EVENTI ITALIANI GIÀ ANNUNCIATI

Urbana Citta e Ambiente
Salone Internazionale
delle Tecnologie e dei Servizi
dal 28 Febbraio al 3 Marzo
Fiera di Padova

Per informazioni:

www.padovafiore.it/ursep

Conferenza Utenti ESRI

Dal 4 al 5 Aprile a Roma

Info @ www.esriitalia.it

HydroGEO - Salone per il
Rilevamento e la Tutela
del Territorio
9-11 Maggio Fiera di Rimini

Per informazioni:

Fiera di Rimini

Tel.: 0541 711447

Fax: 0541 711475

Conferenza MondoGIS

Dal 23 al 25 Maggio a Roma

Info @ www.mondogis.net

EuroPA - Salone delle
Amministrazioni Locali
Dal 30 Maggio al 2 Giugno
Fiera di Rimini
Per informazioni:

Fiera di Rimini

Tel.: 0541 711447

Fax: 0541 711475

www.fierentlocali.com

50° SIFET

dal 21 al 22 Giugno - Roma

www.sifet.it

Marzo

GITA XXIV

San Diego Convention Center, San
Diego, CA, USA, dal 4 al 7 Marzo

Per informazioni:

GITA, 14456 East Evans Avenue, Au-
rora, CO 80014, USA

Tel.: 1 (303) 337 0513

Fax: 1 (303) 337 1001

E-mail: education@gita.org

www.gita.org

IAG Symposium

Zurigo, Svizzera, dal 12 al 16 Marzo

Per informazioni:

Professor Dr A. Carosio, Swiss Federal In-
stitute of Technology, ETH Hönggerberg-
HIL, CH-8093 Zurich, Svizzera

Tel.: 41 (1) 633 3055

Fax: 41 (1) 633 1101

E-mail: sek@geod.baug.ethz.ch

The ACSM Spring 2001 Conference
Riviera Hotel & Casino, Las Vegas,
NV, USA, dal 17 al 21 Marzo

Per informazioni:

American Congress on Surveying and
Mapping, 6 Montgomery Village Ave-
nue, Suite#403, Gaithersburg, MD
20879, USA

Tel.: 1 (301) 493 0200

Fax: 1 (301) 493 8245

E-mail: info@acsm.net

www.acsm.net

**Use of GIS in Climatology and Me-
teorology**

Nizza, Francia, dal 26 al 30 Maggio

Per informazioni:

Prof. Arakel Petrosyan

E-mail: apetrosy@iki.rssi.ru

Dr. Frans van der Wel

E-mail: frans.van.der.wel@knmi.nl

8° Mostra Convegno Internazionale
delle Tecnologie e dei Servizi
per L'ambiente
Dal 14 al 17 Marzo

Per informazioni:

PromoExpo S.r.l.

Tel. 024234258

Fax 024236919

E-mail: promoexpo@iol.it

Web: www.fieremostre.it/tauxpo

Aprile

FIG Commission 3 Annual Meeting
and Seminar - Austria, in aprile

Per informazioni:

Gerhard Muggenhuber

E-mail: geomugg@compuserve.com

Oceanology International Americas
Miami, FL, U.S.A., dal 3 al 5 Aprile

Per informazioni:

PGI Spearhead Exhibitions Ltd.,

Ocean House, 50 Kingston Road, New
Malden, Surrey KT3 3LZ, England

Tel.: 44 (20) 8949 9222

Fax: 44 (20) 8949 8186

E-mail: oiamericas@spearhead.co.uk

**Intergraph Utilities & Communi-
cation User Group**

Orlando, FL, U.S.A., dal 22 al 25

Aprile

Per informazioni:

Intergraph Corporation, Mailstop

IW17B2, Huntsville, AL 35894-0001,

U.S.A.,

Fax: 1 (256) 730 1263

ASPRS Conference
America's Center/Adam's Mark
Hotel, St. Louis, MO, U.S.A., dal
23 al 27 Aprile

Per informazioni:

ASPRS, 5410 Grosvenor Lane, Suite

210, Bethesda, MD 20814-2160, U.S.A.

Tel.: 1 (301) 493 0290

Fax: 1 (301) 493 0208

E-mail: meetings@asprs.org

Geo-Evenement 2001

Le Carrousel du Louvre, Paris,

France, dal 24 al 26 Aprile

Per informazioni:

Ortech, 11 rue bergère, F-75009

Paris, France

Tel.: 33 (1) 4523 0816

Fax: 33 (1) 4824 0181

E-mail: ortech@easynet.fr

Maggio

GNSS 2001

Seville, Spagna, dal 8 al 11 Maggio

Per informazioni:

Instituto de Navegación de España,

Edificio Aena-Dirección General de
Navegación Aérea, Juan Ignacio Luca
de Tena, 14-28027 Madrid, Spagna

Tel.: 34 (91) 321 2585

Fax: 34 (91) 321 3303

E-mail: gns.2001@aena.es

Centenary of Federation Surveying
and Mapping Conference
Canberra, Australia, dal 11 al 13
Maggio

Per informazioni:

Tel.: 61 (2) 6257 3299

Giugno

A/E/C Systems 2001

McCormick Place, Lakeside Cen-
ter, Chicago, IL, U.S.A., dal 18 al
21 Giugno

Per informazioni:

Melissa Zamulinsky, A/E/S Systems

International

Tel.: 1 (610) 458 7070

Fax: 1 (610) 458 7171

E-mail: mzamulinsky@penton.com

www.aecsystems.com

Geomatics 2001

Sheraton, Fredericton, NB, U.S.A.,
dal 24 al 28 Giugno

Per informazioni:

Tel.: 1 (506) 453 8855

Fax: 1 (506) 444 4310

E-mail: wayne@gov.nb.ca