

## **CAPITOLO 6**

### **CATASTO STRADALE, MOBILE MAPPING E NAVIGAZIONE GEODETICA NELLE RETI DI STAZIONI PERMANENTI**

*Stefano Gandolfi (1), Gianfranco Forlani (2)*

- (1) DISTART - Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, dei Trasporti, delle Acque, del Rilevamento, del Territorio, Università di Bologna, Viale Risorgimento 2 - 40136 Bologna
- (2) Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura, Università degli studi di Parma  
e-mail: gianfranco.forlani@unipr.it

#### **SOMMARIO**

*Vengono prese in esame tre tipologie di navigazione e rilevamento cinematico, analizzandone i benefici nel contesto di una rete di stazioni permanenti. Dopo aver introdotto i veicoli rilevatori ed il Mobile Mapping, si illustra sinteticamente il panorama dell'hardware e software relativi ai sistemi di posizionamento ed orientamento, descrivendone le problematiche. Ci si sofferma infine sull'impatto delle reti di stazioni permanenti sulla qualità, l'organizzazione ed i costi di queste tipologie di rilevamento in presenza di una rete di stazioni permanenti.*

*Il capitolo è completato da due appendici inerenti l'utilizzo di reti di stazioni permanenti in appoggio a rilievi di tipo cinematico, sia in tempo reale che post-processati: la prima applicazione riguarda il rilievo batimetrico di alvei fluviali, la seconda il controllo di accuratezza per modelli digitali di superficie.*

#### **1 INTRODUZIONE**

Il termine Mobile Mapping (MM) è nato per indicare le tecniche di rilevamento da veicoli in movimento, in cui i dati acquisiti dai sensori di bordo vengono direttamente georeferenziati, ovvero espressi nel sistema di riferimento desiderato, grazie ad un sistema di posizionamento e orientamento installato sul veicolo.

Storicamente, le prime applicazioni sono state quelle nel settore stradale, dove il rilievo interessa normalmente una fascia di circa 10-15 m (o maggiore) a cavallo dell'asse strada e viene effettuato a velocità tra 30 e 70 km/h. I settori primari di applicazione sono il catasto strade e la manutenzione stradale, nonché il rilievo di elementi delle infrastrutture, delle reti e dei servizi urbani ed extraurbani situati lungo gli assi viari. Nell'uso corrente il Mobile Mapping viene oggi esteso (Schwarz, El-Sheimy, 2004) a tutti i sistemi di posizionamento ed orientamento in movimento che hanno appunto la capacità di georeferenziare autonomamente la posizione e l'assetto di uno o più sensori installati a bordo: dal laser a scansione aereo, alla fotogrammetria diretta, ecc. Più correttamente si potrebbe parlare di sensor orientation attraverso un Position and Orientation Systems o POS, secondo la terminologia proposta dall'attuale leader del settore, la canadese Applanix; infatti l'obiettivo non è necessariamente il mapping (cioè il rilievo topografico) ma semplicemente la determinazione di posizione ed assetto di un qualsivoglia sensore, indipendentemente dall'impiego finale dei dati da esso acquisiti.

I sistemi di posizionamento e orientamento più evoluti sono oggi tipicamente costituiti da sistemi integrati GPS e INS (Inertial Navigation Systems), che consentono di determinare, in un sistema di riferimento *mapping* assegnato (ad esempio una realizzazione del sistema geodetico-cartografico UTM-WGS84), la traiettoria e l'assetto di un sistema di riferimento V solidale al veicolo nel corso di una missione, con una frequenza di campionamento anche molto elevata (dell'ordine di 100-200 Hz).

A bordo del veicolo sono installati uno o più sensori, ciascuno caratterizzato da un proprio sistema di riferimento S e da un proprio *rate* di acquisizione delle misure: nelle applicazioni stradali normalmente è sempre presente un sistema di ripresa, costituito da una o più telecamere, sia per documentazione sia per effettuare misure con tecniche fotogrammetriche; a seconda del profilo della missione vengono poi im-

piegati altri strumenti di rilievo (in particolare il laser a scansione) od altri strumenti specifici per l'acquisizione di caratteristiche della pavimentazione stradale (quali rugosità, fessurazione, ecc.).

I dati rilevati da ciascun sensore nel proprio riferimento vengono georeferenziati (riferiti al sistema mapping) a partire dai dati POS, tenendo conto dei bracci di leva e dei disallineamenti propri di ogni sistema di riferimento sensore rispetto al sistema di riferimento veicolo nonché dell'asincronia di acquisizione tra sistema di posizione e sensore. Perché il veicolo sia operativo è quindi necessario che un sistema di sincronizzazione riporti ad un'unica base temporale i dati acquisiti e che siano stati preliminarmente determinati i bracci di leva e i disallineamenti di cui sopra. La stabilità meccanica delle posizioni ed assetti relativi tra i diversi componenti, una volta accertata, consente allora di georeferenziare il dato di ogni sensore all'istante di acquisizione. Interpolata la posizione e l'assetto del sistema veicolo a quell'istante, si ottiene la posizione del sistema sensore sommando a quella di  $V$  il braccio di leva (espresso nel sistema mapping) e l'assetto del sensore moltiplicando la matrice di rotazione da sistema veicolo a sistema sensore per la matrice di rotazione da sistema mapping a sistema veicolo. Spesso si sceglie il sistema veicolo  $V$  coincidente con il sistema strumentale del sensore inerziale (Inertial Measurement Unit, IMU), detto anche sistema *body* ( $b$ ), curando di installare l'IMU con l'asse  $x$  approssimativamente allineato con l'asse longitudinale del veicolo e l'asse  $z$  approssimativamente perpendicolare al pianale: in tal modo gli angoli roll, pitch e yaw restituiti dall'IMU sono già molto prossimi agli angoli di navigazione "naturali" del veicolo.

Da un punto di vista sistemico e strutturale, componenti fondamentali di un veicolo per il MM sono quindi il sistema di posizionamento ed orientamento, i sensori di bordo, il sistema di sincronizzazione, coordinati da un sistema di gestione; sistemi ausiliari sono poi il sistema di archiviazione dati ed il sistema di alimentazione dei dispositivi ed elaboratori. Il sistema di controllo e gestione deve consentire la verifica nel corso delle operazioni dello stato di ogni sistema, per controllare l'andamento del rilievo. In particolare devono essere controllabili i parametri di qualità dei dati di navigazione (stato della costellazione GNSS, coi relativi parametri; stato della soluzione RTK, se disponibile; stato della soluzione di navigazione RealTime GNSS/INS, se disponibile); analogamente, occorre controllare o poter modificare lo stato ed i parametri di acquisizione dei sensori (frequenze di campionamento, regolazione dei parametri di luminosità e contrasto o del diaframma per le telecamere, ecc.); infine va prevista un'interfaccia di gestione dell'archiviazione, con possibilità di definire nuovi archivi/progetti e controllare la regolare memorizzazione dei dati, lo stato della memoria disponibile, ecc.

Un'analisi delle problematiche relative ai sistemi di posizionamento, con particolare riferimento alle reti di stazioni permanenti, è effettuata ai punti 3 e 4. Per definire le specifiche per un sistema di posizionamento e del suo interfacciamento ad un sensore o sistema di acquisizione dati, occorre ovviamente partire dai requisiti di precisione del rilievo e dall'equazione di georeferenziazione del dato. Conoscendo le caratteristiche di precisione intrinseca (cioè riferita al proprio sistema di riferimento) dei sensori impiegati, si valuta l'effetto sulla posizione del punto restituito delle precisioni dei diversi termini dell'equazione, attraverso la propagazione della varianza o semplicemente con simulazioni numeriche. Si riesce quindi a fare un bilancio di massima dei termini più rilevanti e dove quindi occorre cercare di migliorare le precisioni, per derivare infine la precisione (di posizione e angolare) del sistema di posizionamento, delle operazioni di calibrazione dei sistemi sensore rispetto al sistema veicolo, ecc.

### 1.1 I Veicoli Rilevatori per il Catasto Stradale

I veicoli rilevatori nel settore stradale nascono dalle ricerche del settore civile sulla navigazione terrestre inerziale, sviluppate prevalentemente presso l'Università di Calgary (Canada) a partire dalla seconda metà degli anni '80 (e proseguite nel corso degli anni '90 con l'integrazione del GPS) dando vita ad una serie di prototipi; anche la realizzazione commerciale più significativa nel settore stradale (veicolo ARAN di Roadware Inc.) è canadese, pur non mancando esempi di veicoli rilevatori negli USA e in Europa, prevalentemente di tipo prototipale, realizzati da enti di ricerca di grandi aziende o da università.

Mentre la tecnologia GPS è sostanzialmente libera, con produttori di ricevitori e di software di elaborazione dei dati diffusi in diversi paesi, quella dei sensori inerziali è tuttora in larga misura soggetta a vincoli e restrizioni per evitare un uso a scopo militare da parte di alcuni paesi terzi; in particolare i sensori per la navigazione di alta precisione (strategic-grade e navigation-grade) sono prevalentemente sviluppati

negli USA da Honeywell e Litton. Quando tali sistemi vengono commercializzati come componenti di sistemi integrati (ad esempio da Applanix) vi è un obbligo contrattuale a non divulgare il certificato di calibrazione dello strumento. Vi sono anche produttori di sistemi inerziali in Francia (Sagem), Germania (iMar), con prodotti di caratteristiche adatte all'impiego nel MM. Numerose sono poi le ditte europee (Regno Unito e Germania in particolare) ma anche canadesi, statunitensi e giapponesi che integrano i due sensori producendo sistemi di navigazione GPS/INS; in tal caso il valore aggiunto del prodotto è dato appunto dall'integrazione in termini di interfacciamento e sincronizzazione, elaborazione dei segnali, calcolo dei parametri di posizione, cinematici e di assetto con filtro di Kalman nelle sue diverse implementazioni (loosely coupled, tightly coupled ecc.).

In Italia, con l'emanazione del D.L. 30 aprile 1992, n. 285, si dava inizio ad un procedimento che, negli anni successivi e attraverso la pubblicazione di norme e decreti attuativi, doveva portare ad una più razionale organizzazione e gestione delle infrastrutture stradali, anche attraverso la formazione e l'aggiornamento di un Catasto Stradale. Con il D.M. 1° giugno 2001 si specificavano le caratteristiche del Catasto e si prescrivevano le tempistiche di formazione dello stesso per le diverse categorie di strade. Sono quindi stati redatti capitolati specifici per la fornitura dei dati (rilevati o post-processati) e avviati i relativi bandi dai gestori delle strade, sia pur con modifiche e rivisitazioni rispetto al testo originario. Al momento, oltre al settore autostradale, dove l'attenzione alla problematica della manutenzione e della regolarità di esercizio attraverso anche l'impiego di veicoli rilevatori si era già formata da tempo, l'ANAS e una serie di amministrazioni provinciali hanno dato vita ad appalti per la realizzazione del catasto. Anche numerosi comuni stanno procedendo in tal senso, specie laddove la gestione dei servizi è già attuata o si appoggia a sistemi informativi territoriali.

Per quanto riguarda il sistema di posizionamento e orientamento, come detto la combinazione GPS/INS è oggi quanto di più efficiente (in termini di produttività, affidabilità e precisione) la tecnologia possa offrire; vi sono poi importanti differenze nelle modalità con cui si effettua l'integrazione tra i due sistemi GPS e INS e altrettanto importanti sono le caratteristiche hardware, soprattutto per gli INS, in ordine alle prestazioni del sistema.

Anziché appoggiarsi al GPS, è possibile impiegare altri sistemi (ad esempio sono stati usati e vengono tuttora impiegati per la navigazione apparati di radiolocalizzazione da stazioni terrestri o da satellite). In pratica tuttavia il GPS od un sistema equivalente è oggi irrinunciabile per i vantaggi in termini di copertura e precisione. Esistono in effetti anche veicoli per il MM che si affidano al solo GPS, con sistemi mono, bi-, o tri-antenna (da Silva, Camargo, 2003; Varini et al, 2005). Nei sistemi monoantenna l'accuratezza è assai modesta e non consentirebbe il rispetto delle precisioni di capitolato italiane: non è possibile infatti determinare alcun parametro di assetto, se non integrando il sistema con inclinometri e bussole elettroniche. Nei sistemi a due antenne (presenti peraltro anche su sistemi dotati di INS) è possibile ricavare almeno azimuth e pitch (la disposizione tipica è infatti con le antenne distanziate sull'asse longitudinale); ovviamente vi è un errore legato all'angolo di roll, tanto più sensibile quanto maggiore è la pendenza trasversale della carreggiata. I sistemi a tre antenne, posizionate alla maggior distanza possibile sempre per migliorare la sensibilità nella determinazione degli angoli, permettono invece una soluzione completa dell'orientamento (posizione ed assetto).

Come verrà discusso al punto 2, le precisioni ottenibili dalla restituzione con veicoli rilevatori sono piuttosto asimmetriche: infatti in senso longitudinale l'accuratezza decresce rapidamente con la distanza, perché l'angolo di intersezione tra raggi omologhi è sempre molto piccolo ed il rapporto tra base e distanza di restituzione varia entro limiti piuttosto vasti (grossomodo da 4 a 15), assai maggiori di quelli della fotogrammetria aerea. Le esigenze di precisione angolare nell'orientamento delle prese non sono invece altrettanto severe, data la scala fotogramma normalmente assai inferiore e quindi il minor rapporto tra errore angolare sul fotogramma e corrispondente errore sul terreno. Errori di 0.1-0.2 gradi centesimali in roll, pitch e azimuth provocano errori di pochi cm, date le distanze di collimazione ridotte: anche sistemi pluriantenna basati sul solo GPS quindi sono sulla carta in grado di soddisfare le richieste di capitolato (Cazaniga et al., 2006). In ogni caso, per ottenere precisioni nel posizionamento relativo cinematico delle 2 o 3 antenne sufficienti ad ottenere i valori appena citati è molto importante la capacità di processare i dati cinematici GPS delle antenne nel modo più efficiente possibile, sfruttando i vincoli di posizione relativa tra le antenne (Manzino, Roggero, 2006), come accennato nel punto 2.

In pratica comunque, la dipendenza continua dalla disponibilità della soluzione GPS rende questi si-

stemi non proponibili per un impiego realmente operativo: nella gran parte delle situazioni reali di rilievo infatti vegetazione, sovra e sottopassi, edifici, ecc. portano a frequenti "loss of lock" completi, con pesanti ripercussioni sulla continuità e qualità della soluzione GPS.

## 1.2 Altre applicazioni del Mobile Mapping e della navigazione geodetica

Come detto, oltre al rilievo per il Catasto strade e la manutenzione stradale, nel Mobile Mapping sono compresi anche gli analoghi sistemi per la fotogrammetria aerea e per il laser a scansione, tra i più importanti nel settore del rilevamento. Rispetto a veicoli in movimento a terra, gli aeromobili sono, nella larghissima maggioranza dei casi (fanno eccezione le riprese a bassa quota in zone montane), meno condizionati da ostacoli nella ricezione dei satelliti e quindi il dato GPS ha normalmente una qualità migliore, salvo in condizioni di dinamica accentuata; nel corso delle virate (frequenti nel rilievo per strisciate di una porzione di territorio) si verificano tuttavia spesso cycle slip di una certa importanza. Sia nella fotogrammetria diretta sia (soprattutto) nel laser a scansione non viene tuttavia meno l'esigenza di sensori di assetto di elevata precisione e quindi dell'impiego di un sistema inerziale accanto al GPS; la qualità del dato GPS è comunque fondamentale e quindi la distanza dalle stazioni di riferimento deve essere contenuta in 30-50 km. La disponibilità di una rete di stazioni permanenti (essendo comunque la norma il post-processamento dei dati) aumenta l'affidabilità della soluzione; ancora più importante per le aziende del settore è la riduzione dei costi e dei problemi organizzativi, assai consistente specie per le riprese fotogrammetriche, in cui le condizioni meteorologiche sono fondamentali. Se la zona da rilevare è lontana dalla sede operativa della ditta ma compresa nel raggio d'azione del velivolo, può esser necessario mantenere a lungo sul posto una squadra di topografi al solo scopo di attivare le stazioni di terra in tempo utile per sfruttare la finestra meteo adatta: i tempi di trasferimento della squadra dalla sede potrebbero infatti essere troppo lunghi per consentire di sfruttare le buone condizioni meteo.

Un settore affine al Mobile Mapping, anche se piuttosto specifico, è quello dell'impiego del GPS cinematico nella verifica di DTM. Con l'importanza crescente assunta dai DTM nella protezione idraulica del territorio, nella progettazione e nella pianificazione stradale, e la diversificazione delle fonti (da immagini satellitari ad alta risoluzione, con precisioni di qualche metro, al laser a scansione, con precisioni di uno-due decimetri) occorre mettere a punto tecniche di verifica dei prodotti di grande produttività. Il GPS cinematico su autoveicolo si presenta in questo caso, almeno nelle zone aperte, come lo strumento più adatto: alcune delle unità operative hanno impiegato questa tecnica, nell'ambito delle Reti di Stazioni Permanenti (RSP), per la verifica sia di DTM da laser a scansione sia (Crespi et al 2003) da immagini satellitari ad alta risoluzione. Da un punto di vista operativo, la presenza della RSP facilita, analogamente al Mobile Mapping, l'esecuzione dei rilievi: cade la necessità di approntare e presidiare le stazioni di riferimento, i tempi e l'affidabilità delle inizializzazioni (inevitabili e frequenti anche nelle zone relativamente aperte).

Un altro settore di interesse del Mobile Mapping è quello delle rilevazioni batimetriche fluviali o sotto costa; effettuate con profilometri o scanner sonar, si sono appoggiate al GPS fin dall'introduzione del sistema satellitare; in alcuni casi, come quelli della delimitazione dei canali navigabili in alvei fluviali o lagune o in estuari soggetti a deposizione, la precisione di localizzazione dell'ordine del metro è in genere sufficiente. Normalmente questi tipi di applicazione si avvalgono per la trasmissione delle correzioni differenziali di sistemi tipo WAAS o EGNOS, che offrono precisioni adeguate. Una RSP necessariamente basata a terra, sarebbe altrettanto efficiente e più accurata per la navigazione fluviale, mentre non verrebbe sfruttata pienamente, essendo usufruibile solo entro poche miglia dal perimetro, nel caso della navigazione costiera.

Per la determinazione della rotta (dove si chiedono tolleranze inferiori al grado) sono stati e vengono tuttora impiegati sistemi multi-antenna, come ad esempio l'Ashtech 3-dimensional Direction Finding system (3DF), che sono in grado di ricostruire l'assetto del natante. In condizioni di mare mosso infatti l'effetto di roll e pitch sulle antenne (normalmente installate in posizioni elevate delle sovrastrutture) impedirebbe un calcolo accurato dell'azimut. Sistemi come il 3DF sono accreditati di precisioni da qualche decimo sino a qualche centesimo di grado, con sufficiente separazione tra le antenne, ovvero valori compatibili con l'impiego nel Mobile Mapping.

Nei sistemi di rilevazioni batimetriche con sonar a scansione, per la determinazione della direzione di

scansione dell'impulso emesso, il sistema di rilevazione dell'assetto è normalmente affidato ad un inerziale; in altre applicazioni, ad esempio quelle con l'impiego del georadar, dove l'assetto del sensore non deve essere monitorato con particolare precisione (Cina et al, 2006) può essere sufficiente l'informazione di azimut, ottenuta ad esempio con due antenne poste alla maggior distanza utile sull'asse longitudinale dell'imbarcazione; in altri casi invece si adoperano sistemi inerziali di basso costo con sensori magnetici (MRU) per la determinazione (alternativa alla coppia di antenne GPS) dell'azimut.

## 2 PRECISIONE DELLA GEOREFERENZIAZIONE NEL MOBILE MAPPING

Come esempio di georeferenziazione nel Mobile Mapping e stima della sua precisione si presenta ora la restituzione fotogrammetrica stereo sincrona, ovvero quella che si ottiene tipicamente dall'installazione di almeno una coppia delle telecamere del sistema di ripresa in posizione frontale, con inclinazione dell'asse ottico di  $5^{\circ}$ - $10^{\circ}$  sotto l'orizzonte (Figura 1).

La precisione teorica di restituzione del sistema dipende da quella degli orientamenti esterni, legati al GPS ed alla calibrazione geometrica dei sistemi di posizionamento e ripresa, dell'orientamento interno (parametri di calibrazione ottica), di collimazione e infine dalla geometria di presa. Supponiamo che la calibrazione ottica e geometrica sia ben fatta, per cui il suo contributo all'errore totale sia inferiore alle altre cause (fatto confermato dalle prove effettuate): restano quindi gli errori legati al GPS e quelli di restituzione stereo. Nelle immagini sincrone, dove appunto l'orientamento relativo è fissato dalla calibrazione geometrica, l'errore dipendente dal GPS può essere assimilato ad un errore di orientamento assoluto della coppia stereo. Assumendo errori tra 2 e 10 cm per le posizioni assolute ed errori di 1-3 cm per le posizioni relative delle antenne, l'errore in planimetria varia da 3 a 18 cm per distanze di restituzione tra 5 e 15 m; considerando un peggioramento del 50% per le precisioni in quota, i corrispondenti errori variano tra 4 e 25 cm.

Nelle immagini asincrone, essendo gli errori di posizione GPS diversi da immagine a immagine, possono esservi parallassi e quindi ci si può attendere che i valori di cui sopra aumentino in qualche misura.

Per immagini sincrone si può calcolare in prima approssimazione la precisione di restituzione stereo nel sistema veicolo assumendo il caso normale, cioè trascurando l'inclinazione delle camere verso il basso:

$$\sigma_{\text{longitudinale}} = \frac{Z}{c} \cdot \frac{Z}{B} \sigma_{x_2-x_1}$$

$$\sigma_{\text{trasversale}} = \sqrt{\left(\frac{Z}{c}\right)^2 \sigma_{x_1}^2 + \left(\frac{x_1}{c}\right)^2 \sigma_Z^2}$$

dove:

Z = distanza camera-oggetto lungo l'asse della camera;

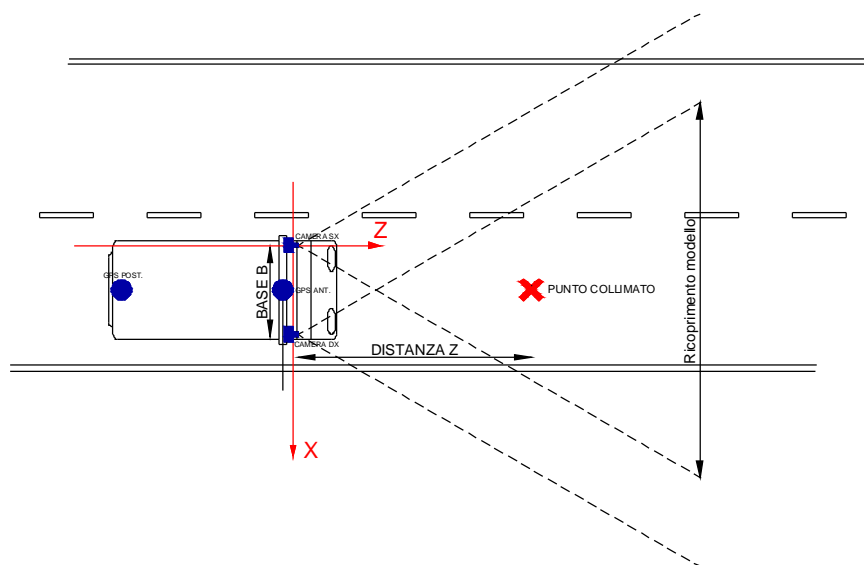
c = distanza principale;

B = base di presa;

$\sigma_{x_2-x_1}$ ,  $\sigma_{x_1}$  = precisione di misura della parallasse immagine e delle coordinate immagine;

$\sigma_{\text{trasversale}}$  = precisione di restituzione in direzione X (trasversale al moto);

$\sigma_{\text{longitudinale}}$  = precisione di restituzione in direzione Z (lungo la direzione di moto).



**Figura 1** - Geometria della restituzione stereo frontale da veicolo rilevatore.

## 2.1 Precisione teorica della restituzione stereo

Sulla base delle ipotesi fatte, con una distanza principale di circa 6 mm, pixel di 4.65  $\mu\text{m}$ , risoluzione 1024x768 pixel e base tra le camere di 1.25 m, per una precisione di collimazione di 1 pixel e trascurando l'inclinazione delle camere in senso longitudinale, si ottengono, per diverse distanze Z e collimazioni al centro o sul bordo immagine, i risultati riportati in Tabella 1.

distanza (m)	5	7	8	9	10	11	12	13	14	15	20	25
scala immagine 1:	833	1167	1333	1500	1667	1833	2000	2167	2333	2500	3333	4167
ricoprimento modello (m)	2.7	4.3	5.1	5.9	6.7	7.5	8.3	9.1	9.9	10.7	14.6	18.6
$\sigma$ longitudinale (m)	0.015	0.030	0.039	0.050	0.061	0.074	0.088	0.104	0.120	0.138	0.245	0.384
$\sigma$ trasv. (centro imm.) (m)	0.003	0.004	0.004	0.005	0.005	0.006	0.007	0.007	0.008	0.008	0.011	0.014
$\sigma$ trasv. (bordo imm.) (m)	0.007	0.013	0.016	0.020	0.025	0.030	0.036	0.042	0.048	0.055	0.098	0.153

**Tabella 1** - Precisione della restituzione per coppie sincrone.

I valori della tabella, che si discostano pochissimo da quelli calcolati tenendo conto dell'inclinazione delle camere, mostrano che per ottenere precisioni relative (nell'ambito cioè di un modello sincrono) accettabili (inferiori ai 10 cm) occorre collimare entro i 15 metri. Tenendo conto anche degli errori GPS, le precisioni assolute dovrebbero quindi essere comprese tra 5 e 30 cm, sempre nel medesimo intervallo di distanze.

## 2.2 Equazione di georeferenziazione dei dati rilevati da un sensore di bordo

Per esemplificare, si illustrerà l'equazione di georeferenziazione di un sensore di ripresa, ad esempio la telecamera, mostrata in Figura 2..

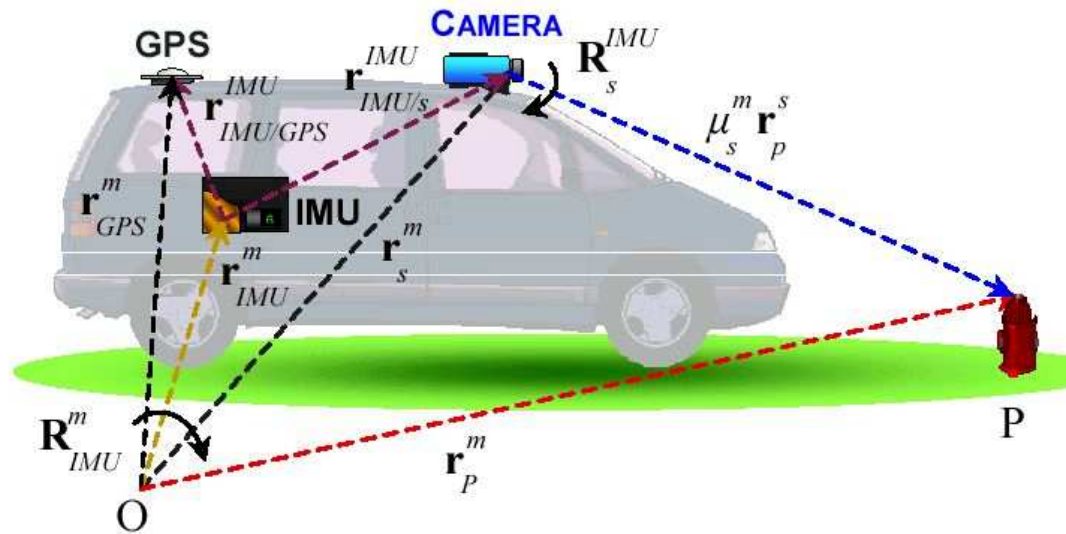


Figura 2. Illustrazione dell'equazione di georeferenziazione di un sensore di ripresa (El-Sheimy, 2003).

$$\mathbf{r}_P^m = \mathbf{r}_{IMU}^m + \mathbf{R}_b^m [s_P \mathbf{R}_s^b \mathbf{r}_P^s + \mathbf{r}_{IMU/s}^b]$$

dove:

- $\mathbf{r}_P^m$  è il vettore posizione del generico punto P espresso in un sistema di riferimento cartografico m (mapping), ad esempio UTM-WGS84;
- $\mathbf{r}_{IMU}^m$  posizione dell'origine del sistema sensore (centro di proiezione della camera) espresso in un sistema di riferimento cartografico;
- $\mathbf{R}_b^m$  è la matrice di rotazione dal sistema di riferimento dell'IMU al sistema di riferimento mapping, calcolata dall'integrazione INS/GPS e interpolata al tempo t di ripresa dell'immagine;
- $\mathbf{R}_s^b$  è la matrice di rotazione tra il sistema di riferimento della camera (s=sensor) e dell'INS (b), determinata in fase di calibrazione;
- $s_P$  è il rapporto tra la distanza camera - punto P e la lunghezza del vettore  $\mathbf{r}_P^s$  ;
- $\mathbf{r}_P^s$  è il vettore delle coordinate immagine (x,y,-c) del punto P, misurato su un'immagine ripresa al tempo t;
- $\mathbf{r}_{IMU/s}^b$  è il vettore tra origine del sistema IMU e la camera, espresso nel sistema body (b);

Il vettore  $\mathbf{r}_{IMU}^m$  si ottiene dalla posizione dell'antenna a seguito del processamento dei dati INS/GPS e tenendo conto del vettore posizione relativa tra antenna GPS e IMU  $\mathbf{r}_{IMU/GPS}^b$  (da misurare una volta per tutte in fase di calibrazione) e della rotazione da sistema body a sistema mapping tramite i dati di assetto dell'INS:

$$\mathbf{r}_{IMU}^m = \mathbf{r}_{GPS}^m - \mathbf{R}_b^m \mathbf{r}_{IMU/GPS}^b$$

Riassumendo i termini dell'equazione di georeferenziazione, si hanno:

- termini variabili nel tempo, legati ai dati di navigazione misurati:  $r_{IMU}^m$ ,  $R_b^m$
- termini costanti, determinati in fase di calibrazione del sistema di posizionamento:  $r_{IMU/GPS}^b$
- termini costanti, determinati in fase di calibrazione del sistema di ripresa rispetto al sistema di posizionamento:  $r_{IMU/s}^b$ ,  $R_s^b$
- misure nel sistema di riferimento del sensore:  $r_P^s$ ,  $S_P$  (NB: nel caso in esame, è necessario introdurre il rapporto di scala  $S_P$  in quanto una sola immagine non è sufficiente a determinare le coordinate di P; se il sensore fosse stato di tipo laser, le misure rilevate - angoli polari e distanza - sarebbero stati sufficienti).

### 2.3 Analisi delle precisioni richieste per i diversi sistemi e sensori

Per impostare l'analisi delle precisioni necessarie per i termini dell'equazione di georeferenziazione, occorre specificare a quale tipo di restituzione ci si riferisce e, in relazione alle caratteristiche del sensore, con quale modalità viene attuata.

Possiamo infatti distinguere, nelle entità rilevate, tra posizioni (legate ad entità puntuali) e grandezze geometriche (lunghezze, aree, distanze, angoli) associate ad entità diverse (lineari, areali, ecc). Per quanto riguarda le posizioni, le precisioni richieste sono normalmente superiori ad 1 m, mentre per le grandezze geometriche si va da 10 cm per la larghezza della sede stradale a qualche percento per le pendenze longitudinali e trasversali; per le aree (ad esempio nella misura della superficie di pannelli pubblicitari) si accettano errori di qualche percento.

Per quanto riguarda le modalità di restituzione, distinguiamo tra misure di grandezze geometriche determinate da misure sincrone o asincrone. Nel primo caso le grandezze (lunghezze, aree), in quanto indipendenti dal sistema di riferimento, risentono solo di errori legati al sensore impiegato e non di quelli introdotti dal sistema di posizionamento e dalla calibrazione tra i due; in tutti gli altri casi (misure di posizione da dati sincroni o asincroni e misure di grandezze da dati asincroni) le precisioni dipenderanno dagli errori di tutti i termini dell'equazione di georeferenziazione.

Sotto questo aspetto, la restituzione fotogrammetrica ammette acquisizioni (e restituzioni) sia sincrone sia asincrone; il laser a scansione è invece intrinsecamente asincrono (essendo caratterizzato da frequenza di acquisizione 10-100 volte maggiori dell'IMU, lo si potrebbe ritenere praticamente sincrono sul brevissimo periodo).

Un'analisi più approfondita delle precisioni per quanto riguarda i sistemi di ripresa, di posizionamento e le fasi di calibrazione è contenuta nei rispettivi punti. Di seguito si riportano i risultati di una simulazione d'insieme, sulla base di alcune assunzioni semplificative e degli ordini di grandezza dei vari termini, allo scopo di valutare con quale accuratezza ogni fase (calibrazione e restituzione in particolare) andrebbe effettuata in modo da ottenere una precisione operativa assegnata (le incertezze sono date come eqm, errore quadratico medio). Non vengono qui tenuti in conto gli errori di posizione ed angolari del sistema di posizionamento e orientamento, la cui natura dipende strettamente dalle caratteristiche HW della coppia GPS/INS, dal modello di integrazione e processamento dati, nonché dalla costellazione GPS.

#### Ipotesi:

- veicolo equipaggiato con coppia di telecamere: risoluzione 1024x768, pixel size di circa 5 micrometri, focale 6 mm;
- distanze utili di restituzione tra 9 e 14 m (scala immagine tra 1:1300 e 1:2300);
- base di presa = 130 cm; eqm della base = 1 cm; eqm degli angoli di Orientamento Relativo (OR) = 0.03 grd;
- precisione (eqm) di misura sul piano immagine = 3.2 micron = 0.7 pixel;
- distanza tra fotogrammi consecutivi (base di presa longitudinale) = 5 m;
- bracci di leva rispetto IMU (origine del sistema Veicolo): IMU-Camere = 4 m; IMU-GPS = 4 m;
- restituzione fotogrammetrica stereo sincrona.



**Errore sul calcolo della posizione (a distanze di 9 m e 14 m)**

- longitudinalmente: 5÷12 cm,
- trasversalmente: 2÷5 cm.

Errore di calibrazione della base di presa:

- longitudinalmente: 6÷12 cm,
- trasversalmente 1÷4 cm.

Errore di calibrazione degli angoli di OR:

- longitudinalmente: 1÷9 cm,
- trasversalmente: 1÷3 cm.

Errore angolare di calibrazione IMU/camera:

- longitudinalmente: 1÷9 cm,
- trasversalmente: 1÷3 cm.

**Errore sul calcolo della distanza (trasversalmente, a distanze di 9 m e 14 m)**

Restituzione fotogrammetrica sincrona, eqm 3÷7 cm.

Errore di calibrazione fotogrammetrico:

- base di presa: 3÷7 cm,
- angoli di OR: 4÷5 cm.

Gli errori di restituzione sono di tipo accidentale, mentre tutti gli errori di calibrazione hanno effetto sistematico; entrambi sono funzione della distanza del punto collimato; ovviamente la loro entità ed il loro segno si compongono algebricamente con gli altri errori e possono quindi aumentare o ridurre l'errore complessivo. Da questa analisi emerge quindi anzitutto la necessità di una determinazione accurata dei bracci di leva interni (ovvero dei vettori tra origine del sistema veicolo e gli altri sensori) e degli angoli di rotazione tra sensori e sistema di riferimento veicolo; in caso contrario, si possono avere errori prossimi a quelli propri della restituzione stereo.

### 3 LA STRUMENTAZIONE DEI SISTEMI PER IL POSIZIONAMENTO E L'ORIENTAMENTO GEODETICO (GPS, INS E ODOMETRO)

#### 3.1 Tecnologia GPS per i MMS

La tecnologia GPS nell'ambito del rilievo mediante mezzi in movimento è strumentazione di fondamentale importanza per molteplici aspetti. Di tutti i sensori è l'unico che consente un posizionamento direttamente in un sistema di riferimento geocentrico e dunque costituisce la base del posizionamento del mezzo mobile e dunque anche dei sensori per il rilievo delle grandezze caratterizzanti la sede stradale in senso lato.

Altri sensori quali piattaforme inerziali e odometri consentono invece di "integrare" il dato GPS e quindi fungono da supporto, mediante opportuni filtri, al calcolo delle traiettorie prodotte dal GPS laddove il posizionamento non risulti essere di sufficiente qualità.

Le precisioni raggiungibili da un sistema GPS utilizzato in modalità cinematica sono centimetriche ma tale parametro può essere variabile a seconda della strumentazione e della modalità operativa di rilievo adottata.

Dalla letteratura e da esperienze condotte dalle varie unità operative che si sono occupate del problema, il sistema GPS utilizzato nella modalità cinematica con l'ausilio di una stazione GPS di riferimento posta ad una distanza di qualche decina di chilometri, consente precisioni centimetriche a condizione di aver adottato una buona procedura di inizializzazione e a condizione di non perdere l'acquisizione dei satelliti. Tali condizioni all'atto pratico non sono garantibili per l'oscuramento da parte di ostacoli di un numero significativo di satelliti nel corso del moto.

Attualmente chi opera in tale ambito è equipaggiato con sistemi integrati IMU/GPS che prevedono l'utilizzo di due ricevitori GPS. Tale accorgimento consente da un lato una più rapida inizializzazione

dell'ambiguità iniziale di fase e dall'altro la determinazione accurata dell'orientamento (azimuth). Tale accorgimento infine consente anche un fissaggio dell'ambiguità iniziale di fase più rapido e sicuro anche a distanze dalla stazione di riferimento di circa 30km (fonte Applnanix).

Chi produce e commercializza tali sistemi prevede una acquisizione del dato di fase e una procedura di post elaborazione integrata con gli altri sensori disponibili di cui sopra.

Le esperienze condotte dalle unità operative in tale ambito hanno volto l'attenzione principalmente all'utilizzo di reti di stazioni permanenti (anche in tempo reale) come infrastruttura d'appoggio per i veicoli allestiti per il rilievo speditivo ed anche all'utilizzo di correzioni provenienti da satelliti geostazionari quali Omnistar o il futuro servizio EGNOS.

### 3.1.1 Caratteristiche hardware

La strumentazione GPS per tali apparati deve essere costituita da un antenna di buona qualità deve essere in grado di schermare o attenuare l'effetto di multipath, dovuto alla presenza di superfici riflettenti alle lunghezze d'onda tipiche del segnale GPS ed è bene dal punto di vista delle caratteristiche di qualità dei componenti in ogni caso orientarsi su strumentazione di tipo geodetico. I modelli più recenti di diverse case inoltre applicano un recupero di guadagno più elevato, per poter sfruttare anche un segnale debole (a causa per esempio dell'attraversamento di fogliame). Questa caratteristica, che in alcune circostanze pratiche è vantaggiosa, ha però un effetto negativo legato al contemporaneo aumento del livello di rumorosità del segnale.

Anche il ricevitore quindi deve essere di tipo geodetico possibilmente a doppia frequenza per la superiore qualità dell'elettronica e in generale per poter fornire una soluzione con precisione centimetrica.

In realtà tali apparati devono prevedere una parte hardware che consenta l'interfacciamento con altre apparecchiature e devono consentire la gestione di diverse tipologie di correzione (a partire dalle più tradizionali RTCM2.3 per arrivare alle più moderne come l'RTCM3.0 e le correzioni provenienti da sistemi di correzione differenziale derivate da satelliti Geostazionari quali le correzioni Omnistar ed EGNOS (come verrà approfondito più avanti, anche la capacità di ricevere il segnale in banda L Omnistar potrebbe risultare vantaggiosa).

Nel caso in cui vengano installate due antenne sul veicolo, uno dei due ricevitori (e conseguentemente anche l'antenna corrispondente) può essere singola frequenza perché è possibile effettuare una stima di tipo differenziale in relativo tra le due antenne e la base è estremamente corta.

Nel caso si ritenesse fondamentale la correzione di tipo Omnistar è importante sottolineare come tale correzione non sia usufruibile da tutte i ricevitori e attualmente (ma il panorama di offerta è in continua evoluzione), solo alcune tipologie di ricevitori Trimble, Topcon, Sokkia e Novatel consentono la corretta interpretazione di tali correzioni. Il segnale EGNOS invece sembra essere implementato in un maggior numero di ricevitori.

### 3.1.2 Caratteristiche software

Sono stati esaminati alcuni tra i più diffusi software commerciali di elaborazione dati, per verificare quali siano le opzioni di processamento e le informazioni a disposizione dell'utente nel valutare la qualità del singolo dato di posizione restituito. Questo è importante soprattutto per l'implementazione della soluzione "loosely coupled" col filtro di Kalman, come verrà chiarito più avanti.

I software in commercio si differenziano anche di molto a seconda dell'utenza a cui sono destinati. Infatti si va dal software che permette di impostare tutta una serie di parametri (ad es.: angolo di cut-off, scelta dei satelliti e del modello troposferico) destinato ad utenti con una certa esperienza, che permette di raffinare i risultati ottenuti coi parametri di default, al software che permette solo di fissare le coordinate delle stazioni di riferimento e poco altro. Praticamente tutti però permettono di visualizzare i satelliti disponibili durante il rilievo e la qualità del segnale raccolto, almeno in una modalità grafica. I software commerciali dedicati alla navigazione sono di solito del secondo tipo, essendo rivolti a un'utenza usualmente meno specializzata nella misurazione GPS.

Sostanzialmente tutti i programmi rilasciano in uscita, per ogni posizione determinata, una stima delle precisioni nelle tre coordinate (non le covarianze), il valore del PDOP e il tipo di soluzione (se ad ambiguità fissate o float). Purtroppo difficilmente si ha la possibilità di influire sui parametri di elaborazione o

comunque di analizzare quante volte e dove è stato necessario inizializzare con OTF e con quale affidabilità l'ambiguità è stata fissata (o come sono stati stimati i valori delle precisioni), specie per quanto riguarda il rilievo di tipo cinematico. Questo significa che occorre sviluppare metodi di valutazione empirica dell'affidabilità sulla base di questi dati.

### 3.1.3 Calcolo dell'ambiguità intera per sistemi lineari discreti

Uno degli aspetti studiati in modo particolare da una delle unità operative che hanno partecipato alla ricerca nel settore riguarda il calcolo e la stima delle ambiguità intere di fase mediante alcuni approcci alternativi al filtro di Kalman, basati sull'elaborazione in blocco di tutte le osservazioni disponibili. Nella post-elaborazione di dati di natura cinematica fu già mostrata dal coordinatore nazionale la sostanziale equivalenza tra l'approccio basato su filtro di Kalman e l'applicazione dei minimi quadrati ad un blocco di osservazioni. La ricerca condotta ha dunque focalizzato l'attenzione sull'approccio ai minimi quadrati dinamico considerando il caso di un sistema lineare discreto nel tempo con bias costanti. Tale sistema presenta alcune particolarità in quanto si formalizza con una matrice normale sparsa che necessita di essere trattata in modo efficiente da algoritmi adeguati.

### 3.1.4 Post processamento o Tempo reale

Ai fini del rilievo stradale conta la ricostruzione della traiettoria percorsa, che può ovviamente essere calcolata in una fase successiva al rilievo (post processamento); un navigatore satellitare a bordo dotato anche di cartografia risulta comunque essere utile anche da un punto di vista operativo, (anche se poi la traiettoria finale viene ricalcolata a posteriori) per svolgere i percorsi pianificati, specie in ambito urbano.

#### 3.1.4.1 Post Processamento del dato

Attualmente i produttori di sistemi di navigazione geodetica integrata impiegano algoritmi di calcolo distinti per la navigazione (soluzione in tempo reale) e per il calcolo delle traiettorie finali. Tale scelta risulta da due considerazioni fondamentali: maggiore robustezza nel calcolo delle traiettorie integrate con i diversi sensori a posteriori e attuale difficoltà nell'approccio *real time* soprattutto di veicoli che si muovono a velocità di diverse decine di chilometri orari.

Per quanto concerne la prima, la soluzione in post-processamento consente di individuare la migliore traiettoria utilizzando opportuni filtri per combinare i diversi sensori che "percorrono avanti e indietro" in senso temporale la traiettoria ed ottengono soluzioni più stabili. Tale approccio può essere utilizzato solo a posteriori.

In merito alla seconda ragione, occorre considerare come l'approccio RTK sia estremamente instabile a causa di numerose variabili quali, la dinamica del veicolo, i problemi di latenza e la distanza dalla stazione di riferimento e soprattutto la variabilità di costellazione dovuta principalmente a scenari che cambiano rapidamente dovuti essenzialmente al passaggio del veicolo sotto a ponti o gallerie o in zone a visibilità ridotta (percorsi cittadini). Dal punto di vista della precisione del rilievo, se i dati trasmessi dalla stazione di riferimento vengono memorizzati (o comunque resi disponibili) il post-processamento porta in generale ad un miglioramento della soluzione. Confrontando due soluzioni entrambe ottenute integrando sia dati inerziali sia dati GPS, il miglioramento viene stimato (fonte Applanix) in un fattore prossimo a 2 sia per la planimetria sia per le quote.

#### 3.1.4.2 Soluzioni in tempo reale

L'aspetto del rilievo in tempo reale è attualmente una delle frontiere che si sta studiando nell'ambito delle applicazioni per Mobile Mapping system. Disporre di una soluzione accurata in real time è comunque utile anche ai fini del rilievo, in quanto mette in evidenza tratte dove si hanno difficoltà a mantenere elevati parametri di qualità della soluzione; questo può consentire, se opportuno, di prendere provvedimenti già sul posto (ad esempio ripetendo il percorso con una costellazione satellitare diversa).

Il software di controllo dello stato del rilievo, installato sul veicolo, ha comunque una visualizzazione dello stato della configurazione satellitare e fornisce indicazioni anche in assenza di soluzione RTK; tuttavia un dato RTK è assai più significativo. Da questo punto di vista, il modello di organizzazione del la-

voro scelto dalla ditta ha rilevanza: se infatti il rilievo è fatto da personale poco esperto nel processamento, rinviato al rientro in sede o spedito elettronicamente al termine di ogni giornata, conviene una soluzione RTK perché così il personale addetto al rilievo è in grado immediatamente ed autonomamente di prendere provvedimenti nelle situazioni critiche.

Per permettere la stima in tempo reale della posizione con precisione migliore di 10-15 centimetri, il ricevitore deve essere connesso a un modem di tipo GSM (GPRS, UMTS) o ad una radio ricetrasmittente per ricevere le correzioni differenziali doppia frequenza da una stazione permanente o semi-permanente, situata in prossimità della zona del rilievo. Tenuto conto della diffusione prevista delle reti di stazioni permanenti sul territorio italiano, sarebbe auspicabile anche la possibilità di ricevere i parametri di correzione differenziale da una rete di stazioni permanenti GPS. In questo caso è possibile inizializzare le misure anche a distanze superiori.

#### 3.1.4.3 Affidabilità della soluzione RTK

Esperienze condotte dalle unità operative (Bernabini et al, 2006; Cazzaniga et al, 2006) hanno messo in evidenza che vi sono situazioni in cui la differenza tra le due soluzioni (RTK e post-processata) può diventare di parecchi decimetri o addirittura metri. Le ragioni di tali instabilità sono tuttora in fase di analisi anche se è possibile attribuire tale comportamento o a problemi di latenza nella trasmissione delle correzioni di fase o a problemi nella stima delle ambiguità in tempo reale o dei salti di ciclo.

Il metodo RTK, dovendo far confluire in tempo reale in un unico centro di calcolo (il ricevitore GPS) due flussi di dati, ha la necessità di appoggiarsi ad apparati di trasmissione secondari. Le correzioni differenziali vengono trasmesse dalla stazione permanente al ricevitore tramite dialogo tra modem GSM (o via internet nel caso del protocollo NTRIP, ma in definitiva sempre dipendendo dalla rete GSM). Questa dipendenza dalla connessione GSM introduce dei casi in cui il *Post-Processing* risulta essere valido strumento di controllo e correzione di posizionamento ottenuto in RTK. Qualora sia elevata la latenza di ricezione delle correzioni differenziali da parte del ricevitore GPS, dovuta a problemi con la copertura GSM, o brevi interruzioni della connessione stessa, portano ad una deriva della soluzione RTK.

Inoltre, un basso numero di satelliti visibili, o interruzioni nella ricezione dei segnali (*cycle-slips*), portano ad una diminuzione di precisione ottenibile nel posizionamento RTK. Questi problemi possono essere risolti mediante il controllo con il *Post-Processing*. Infatti, mentre da un lato il rilievo RTK, dovendo fornire una risposta in tempo reale, non permette una approfondita analisi della costellazione satellitare e dei singoli segnali tracciati, il *Post-Processing*, attraverso la possibilità di elaborare i dati in diverse modalità, cambiando progressivamente i modelli di calcolo o intervenendo sul singolo segnale disturbato escludendolo dall'elaborazione, permette di individuare le strategie di calcolo migliori per ogni condizione di rilievo (diverse combinazioni nell'uso delle fasi, diverse modellizzazioni degli errori ed altro).

Per queste ragioni, praticamente tutti i software di elaborazione dei dati di navigazione sono implementati sia in versione real-time sia post-processing; quest'ultima è la modalità di norma adottata per ottenere la miglior stima della traiettoria.

#### 3.1.4.4 Sistemi di correzione satellitare Omnistar ed EGNOS

Per quanto riguarda i sistemi di posizionamento in real time da satellite, in Europa sono attivi il sistema EGNOS ed il sistema OmniStar.

EGNOS è un servizio fornito dall'ESA con precisioni dichiarate di pochi metri (alcuni test indicano precisioni tra 1-1.5 m in planimetria), legato a 34 stazioni permanenti e 3 satelliti geostazionari. Attualmente è in fase di completamento dei collaudi ai vari livelli di servizio. Richiede un ricevitore capace di ricevere delle correzioni da satellite geostazionario.

Omnistar invece è un servizio fornito da privati e offre tre livelli di correzioni differenziali: VBS, HP e XP. VBS è dichiarato dalla compagnia con precisione submetrica, mentre i nuovi servizi HP e XP sono dichiarati rispettivamente il primo con un errore orizzontale (95% dei casi) di circa 10 cm e nel 99% dei casi di meno di 15 cm e il secondo con un'accuratezza decimetrica nel breve periodo e una ripetibilità sul lungo periodo migliore di 20 cm al 95%. XP è quindi leggermente meno affidabile di HP. VBS è utilizzabile con ricevitori singola frequenza, mentre XP e HP richiedono ricevitori doppia frequenza. Questo comporta che, se si vogliono utilizzare questi sistemi e si vuole acquistare comunque un ricevitore singola frequenza, sarà possibile effettuare il posizionamento single point solo per un'antenna, mentre la seconda

dovrà essere georeferenziata in modalità relativa rispetto alla prima. Omnistar opera in real time, con possibilità di frequenza di campionamento fino a 5Hz e permette di evitare l'uso di una stazione permanente. Il prezzo attuale per la sottoscrizione VBS per il Nord America è 800 \$ all'anno.

Per quel che riguarda le reali capacità del sistema Omnistar in Italia bisogna segnalare che non sono stati trovati in letteratura risultati di test in loco sull'utilizzo delle nuove versioni HP e XP, mentre test sull'utilizzo del sistema VBS successivi alla disattivazione della Selective Availability risalgono al 2000 e sembrano confermare le potenzialità submetriche.

Viceversa, la copertura da parte del segnale Omnistar non è garantita anche per il fatto che il satellite che invia tale correzione è relativamente basso all'orizzonte in direzione Sud e dunque la presenza di ostacoli in direzione sud costituisce una interruzione nella ricezione delle correzioni facendo degradare rapidamente la qualità della soluzione. Canyon Urbani o vallate particolarmente profonde possono divenire problematiche per il posizionamento. Infatti tali correzioni si affacciano molto di più su applicazioni agricole o di differente natura.

### 3.1.5 Sistemi Multi-antenna

Nei primi anni '90, come accennato nell'introduzione, non essendo ancora particolarmente sviluppata la tecnologia dei sensori inerziali a basso costo, sono state sviluppate procedure di elaborazione dei dati GPS che si appoggiavano a sistemi multi antenna su piattaforme rigide. Il loro impiego è stato particolarmente apprezzato nella navigazione marittima, dove il multipath è relativamente elevato e cycle slip sono molto frequenti a causa del rollio e beccheggio dei natanti. La riduzione del multipath e la risoluzione pressoché istantanea dell'ambiguità sono necessarie per la stabilità della rotta. Una delle realizzazioni più significative tra questi sistemi è il già citato Ashtech 3DF. L'idea dietro le piattaforme multi-antenna è quella di misurare con precisione la differenza di fase tra la rete di antenne, separate da alcune lunghezze d'onda soltanto (in relazione alle dimensioni della piattaforma). Dal momento che la spaziatura delle antenne supera una lunghezza d'onda, le ambiguità tra ogni coppia di antenne differiscono di interi. Questo fatto può essere sfruttato per eliminare combinazioni di ambiguità dei ricevitori incompatibili con le interdistanze (note perché ben misurabili) tra le rispettive antenne.

La differente lunghezza dei cablaggi aggiunge poi una piccola differenza costante, che può essere rimossa con le doppie differenze tra due misure indipendenti di fase. La parte intera dell'ambiguità resta e, mentre in casi statici può essere rimossa con le differenze terze, in applicazioni dinamiche sono necessarie tecniche più complesse di ricerca (van Grass e Braasch, 1991). Nell'ambito del progetto COFIN, sul problema della determinazione dell'ambiguità intera in sistemi di questo tipo è stata di recente proposta una tecnica alternativa (Roggero, 2006), che è stata applicata nel corso delle sperimentazioni citate al punto 1 sia su veicoli rilevatori sia su natanti. Per la riduzione dell'area di ricerca delle ambiguità intere, oltre all'introduzione di vincoli geometrici, si è irrobustita ulteriormente la rete tra le antenne sfruttando il fatto che i parametri del sistema (posizione e assetto) evolvono nel tempo con una dinamica i cui parametri stocastici possono essere a loro volta oggetto di vincolo. Per la sperimentazione sono stati trattati dati a singola frequenza: la lunghezza delle basi, infatti, difficilmente può superare i 30 m (ad esempio nel caso di applicazioni navali), pertanto il ritardo ionosferico è completamente cancellato nelle differenze prime.

## 3.2 Sistemi di navigazione inerziale

### 3.2.1 Caratteristiche hardware (IMU)

Un sensore inerziale contiene tre accelerometri e tre giroscopi montati ortogonalmente tra loro, così da essere teoricamente allineati secondo gli assi di una terna cartesiana. Gli accelerometri misurano forze specifiche, mentre i giroscopi misurano velocità angolari. Esistono due categorie principali di sensori inerziali, quelli cosiddetti "gimbaled" e quelli "strapdown". Nella prima categoria rientrano tutti quei sensori in cui le misure provenienti dai giroscopi servono per mantenere stabilizzata la piattaforma inerziale a cui sono vincolati i sensori, vale a dire che la terna cartesiana in cui sono coordinatizzate le misure si mantiene sempre parallela a se stessa. Invece, nel caso degli IMU strapdown, i sensori e la loro piattaforma sono rigidamente vincolati al veicolo. I sensori della prima categoria sono ovviamente molto più co-

stosi e quindi non vengono normalmente utilizzati in applicazioni civili. D'altra parte gli inerziali strapdown comportano un'elaborazione dei dati più complessa, poiché in questo caso la "stabilizzazione" viene effettuata in modo analitico e non più meccanico. Quindi, in questo secondo caso la stima della soluzione dipenderà non solo dalle caratteristiche dello strumento, ma anche dalla qualità dell'algoritmo utilizzato in fase di elaborazione del segnale.

Come noto, la presenza del rumore in particolare sistematico nelle misure inerziali comporta un rapido degrado della stima della posizione nel tempo a partire dalle sole misure provenienti dall'INS e quindi la necessità di integrare il sistema con il GPS, che provvede a tenere sotto controllo le derivate strumentali. Si noti che, per le applicazioni fotogrammetriche nel Mobile Mapping, la precisione richiesta per l'assetto delle camere (ricavata dai dati giroscopici) è inferiore a quella della fotogrammetria aerea: tenendo conto di distanze di collimazione di 15-20 m, in collimazioni stereo sincrone un errore di  $1^\circ$  sarebbe ancora accettabile (equivale a 30 cm a 20 m). È invece necessaria una elevata stabilità e precisione delle misure angolari per riportare correttamente le accelerazioni misurate in un sistema di riferimento noto. Questo problema quindi è maggiormente sentito nel momento in cui si perde completamente la possibilità di utilizzare il segnale GPS. La scelta di un particolare sensore inerziale dipenderà quindi dalle caratteristiche di rumorosità delle sue misure, in particolare dai seguenti due fattori: il "bias" e lo "scale factor". Il bias è la componente sistematica del rumore, che comporta la deriva strumentale nel momento in cui si procede all'integrazione del segnale, lo "scale factor" è invece un fattore di proporzionalità che va applicato alle misure grezze e che ha un effetto più rilevante tanto maggiore è il valore della grandezza misurata. In entrambi i casi è necessario minimizzare il loro valore almeno da renderlo compatibile con le precisioni volute e stabilire quindi l'autonomia dell'INS senza supporto del GPS. Per avere una soluzione inerziale di buona qualità, adatta al Mobile Mapping, le caratteristiche minimali sono le seguenti: è necessario avere un valore di bias dei giroscopi intorno a  $1-10^\circ/\text{h}$  e uno scale factor compreso tra 100 e 500 ppm, mentre nel caso degli accelerometri un bias  $0.3-3\text{ mg}$  e uno scale factor tra 300-5000 ppm. Questi valori comportano (con un buon algoritmo di integrazione) un errore della posizione inferiore al metro dopo 30 sec e questo può essere considerato un buon compromesso tra le prestazioni di un sensore inerziale ed il suo costo.

### 3.2.2 Elaborazione dei dati INS

I dati grezzi provenienti dal sensore inerziale devono innanzitutto essere depurati dal rumore, che è stimato tramite una procedura di calibrazione. Tale valor medio viene generalmente fornito dalla casa produttrice. Nelle applicazioni di precisione è utile in fase di elaborazione stimare ulteriormente questo valore di errore assieme alle grandezze classiche (posizione e assetto).

I valori provenienti dai giroscopi (velocità angolari) vengono integrati nel tempo così da ottenere gli angoli. L'operazione di integrazione, come noto, introduce e richiede la conoscenza delle costanti di integrazione, che sono in questo caso i valori angolari iniziali. È quindi necessario conoscere l'assetto iniziale dell'IMU per poter procedere nell'elaborazione. Per quanto riguarda roll e pitch è possibile sfruttare i valori di accelerazione misurati dall'IMU, mentre per l'azimuth è possibile sfruttare le velocità angolari, ma è necessario avere un sensore di qualità elevata (è consigliabile un bias al massimo di  $1^\circ/\text{h}$ ). In questo caso una prima fase di inizializzazione statica permette di valutare i valori iniziali. Se non si possiede un tale sensore è necessario ricorrere ad altre misure per poter inizializzare l'integrazione. Solitamente si sfruttano le misure GPS durante una fase di inizializzazione "cinematica".

Le misure provenienti dagli accelerometri (forze specifiche) devono invece essere riportate in un sistema noto, per mezzo di una rotazione calcolata a partire dall'assetto stimato tramite i giroscopi, e poi integrate due volte per ottenere prima le velocità e poi le posizioni. Nella fase di integrazione, oltre ai valori iniziali di posizione e velocità che sono le costanti di integrazione, è necessario prendere in considerazione anche l'accelerazione di gravità. Come noto, esistono diversi modelli del campo di gravità terrestre e a seconda del livello di accuratezza del modello utilizzato all'interno dell'algoritmo la soluzione finale avrà maggiore o minore affidabilità. Solitamente comunque, nei software commerciali e scientifici, viene ristimato anche il valore del campo di gravità.

### 3.3 Metodi e software per elaborazione dati INS/GPS

L'integrazione tra INS e GPS richiede in primo luogo una sincronizzazione di elevata precisione tra i due sensori. Questo normalmente viene effettuato utilizzando un unico sistema di raccolta dati per entrambi i tipi di sensori, che per questo motivo sono talvolta alloggiati nello stesso contenitore. Si tratta spesso di un ricevitore che memorizza in un unico file i dati provenienti dall'antenna GPS e dal sensore inerziale e che associa lo stesso time tag a tutte le misure. Normalmente le precisioni dell'orologio del ricevitore GPS sono sufficienti per le applicazioni civili.

L'integrazione tra le misure INS e quelle GPS per mezzo di un filtro di Kalman che attualmente è il metodo più utilizzato può essere effettuata in diversi modi. È possibile classificare gli algoritmi più diffusi in due categorie: la prima implementa la metodologia cosiddetta "loosely coupled", che richiede la presenza sempre di almeno quattro satelliti in vista per poter utilizzare le misure provenienti dal GPS, mentre la seconda la "tightly coupled" che invece può sfruttare anche le informazioni provenienti da un numero inferiore di satelliti GPS.

Nel primo caso è necessario processare preventivamente le misure grezze GPS e le posizioni così ottenute vengono inserite in un software di elaborazione integrata dei dati IMU e dei dati GPS. Le posizioni GPS permettono di evitare la deriva della stima della posizione e possono essere utilizzate anche per contenere la deriva degli angoli stimati in diversi modi. È possibile stimare gli angoli di assetto a partire dalle posizioni delle antenne GPS e conoscendo la rotazione tra il sistema definito dalle antenne e il sistema body del sensore inerziale. Questo può essere fatto, ovviamente con precisioni diverse, avendo a disposizione un numero qualsiasi di antenne (non necessariamente tre). Nella maggioranza dei casi viene utilizzata una sola antenna, ma nelle applicazioni di precisione è consigliabile avere almeno due antenne e in questo caso la disposizione ottimale è quella longitudinale sul veicolo. È inoltre possibile considerare direttamente la deriva della posizione stimata con l'IMU rispetto a quella stimata con il GPS e con un processo retroattivo correggere gli angoli.

Nel caso "tightly coupled" invece le osservazioni grezze GPS e IMU sono elaborate in un unico software. Questo comporta un algoritmo più complesso, ma permette di utilizzare misure anche di un numero molto limitato di satelliti, al limite anche di uno solo. Esistono diversi algoritmi di tipo tight, differenziati a seconda di quanto "strettamente" sono fusi i dati provenienti dai sensori. I software che implementano questa procedura sono molto spesso programmi di tipo scientifico.

Nel caso di misure effettuate su veicoli terrestri, è consigliabile la seconda metodologia poiché non è infrequente, soprattutto in zone urbanizzate, avere una costellazione di satelliti visibili assai ridotta.

Tra le numerose case produttrici di INS/GPS integrati, vengono presentate in questa sede Applanix e Novatel, che commercializzano prodotti HW e SW che consentono di raggiungere le precisioni richieste.

Applanix è attualmente riconosciuta come la ditta leader del settore. Il pacchetto commercializzato per rilevamenti terrestri è composto da:

- una coppia di antenne Trimble, con i relativi ricevitori, uno doppia frequenza, l'altro singola frequenza. Tali ricevitori sono in grado di ricevere le correzioni di una sola stazione di riferimento alla volta;
- un sensore inerziale di precisione analoga a quella richiesta dall'applicazione attuale. Solitamente si tratta di un Litton LN200 o di un Honeywell HG1700 (N.B.: esistono modelli diversi per entità dei bias e scale factor, raggruppati sotto la medesima sigla). La differenza tra questi due sensori è principalmente legata alla diversa precisione degli accelerometri e nell'aspettativa di vita, entrambe inferiori nel caso Honeywell. Quest'ultimo però ha anche un prezzo leggermente inferiore;
- un odometro, come supporto alla navigazione inerziale, in particolare per individuare i periodi di sosta e quindi effettuare degli ZUPT (Zero-velocity UPdaTes);
- un sistema di raccolta e sincronizzazione dei dati (PCS), che in tempo reale è in grado di processarli fornendo posizione e assetto (LV-POSView). Le misure di altri sensori possono essere sincronizzate con la soluzione della navigazione (si pensa in particolare alle telecamere per le riprese fotogrammetriche).

Inoltre è disponibile un software per il post-processamento dei dati, POSPac, che permette di ottenere una stima più accurata della soluzione rispetto al real-time, in quanto è possibile applicare l'algoritmo del filtro di Kalman anche "all'indietro", cioè a partire dall'ultimo istante di tempo, a condizione di aver iniziato con una sessione statica anche al termine del rilievo. La soluzione è di tipo "tightly coupled".

Novatel invece si presenta con una soluzione più versatile, soprattutto sul versante GPS, dove fornisce una vasta scelta all'utente che è libero di scegliere il/i ricevitori che si avvicinano alle sue esigenze, sia singola che doppia frequenza, con capacità o meno di ricevere correzioni differenziali, anche Omnistar. I sensori inerziali disponibili sono gli Honeywell HG1700 e vengono interfacciati direttamente con il ricevitore GPS che quindi sincronizza i dati e fornisce la soluzione integrata di tempo reale. Non è invece messo a disposizione un odometro.

Il software per il post-processamento dei dati IMU/GPS commercializzato è il "Waypoint Inertial Explorer", che permette l'elaborazione di dati provenienti da diversi sensori inerziali e GPS (non solo quelli commercializzati da Novatel) e che attualmente implementa una soluzione di tipo "loosely coupled". Anche in questo caso il filtro di Kalman implementato calcola anche la soluzione "reverse time".

I dati GPS devono essere stati precedentemente processati e il software messo a disposizione dalla ditta è il "Waypoint GrafNav", già integrato nell'Inertial Explorer. A differenza della soluzione Applanix, è possibile utilizzare fino a otto stazioni di riferimento durante l'elaborazione di un rilievo e l'utente riesce a impostare e a verificare un numero leggermente maggiore di parametri relativi all'elaborazione dei dati GPS.

### 3.4 Evoluzione dei sistemi di posizionamento

Come noto, è in corso nel sistema NAVSTAR-GPS una fase di modernizzazione che prevede tra le novità più significative l'introduzione di una terza frequenza portante ed una separazione tra capacità/disponibilità riservate ai militari ed agli utenti civili.

Il sistema GLONASS sembra, dopo qualche anno di lento declino, ritrovare una prospettiva di sviluppo col lancio di nuovi satelliti ma, dal momento che il supporto finanziario dovrebbe venire da più paesi, non è escluso che la congiuntura politico-economica si rifletta sul rispetto dei tempi previsti, anche se all'ultimo summit sulla navigazione satellitare tenutosi a Monaco nel marzo 2007 i dirigenti del sistema GLONASS hanno assicurato un completamento della costellazione entro qualche anno.

Infine, di nuovo con qualche incertezza sul rispetto dei tempi, sembra con un paio di anni di ritardo rispetto al previsto, è in via di realizzazione il sistema europeo Galileo.

La prospettiva è quindi quella di una disponibilità di satelliti molto più numerosa dell'attuale, (costituita da circa 72 satelliti contro gli attuali 25).

Pur non risolvendo il problema dei cycle slip e delle zone prive di ricezione (tunnel), la disponibilità di un maggior numero di satelliti ha, almeno in prospettiva, una importante ricaduta, soprattutto se viene onorato il concetto di interoperabilità tra i vari sistemi. La ridondanza nelle osservazioni consentirà per un approccio di posizionamento relativo da un lato di avere soluzioni più accurate e dall'altro di avere più osservazioni anche in caso di ridotta visibilità del cielo.

## 4 STAZIONI DI RIFERIMENTO E RETI DI STAZIONI PERMANENTI

Per fissare le ambiguità in modo affidabile è necessario che la distanza tra il punto di inizializzazione e la stazione di riferimento sia inferiore a 30 Km, meglio ancora a 15 km.

In virtù dell'unità inerziale, cycle slips importanti o brevi tratti (dell'ordine di 30"- 1' per INS di categoria tactical grade) con visibilità inferiore a 4 satelliti o con PDOP povero non richiedono necessariamente una nuova inizializzazione. Vi sono comunque casi (percorsi in vallate strette, gallerie di una certa lunghezza, ecc.) in cui il limite è superato e quindi l'inizializzazione è necessaria oppure è comunque consigliabile. In tal caso la distanza dalla stazione base diviene un fattore limitante la produttività.

Se lo sviluppo lineare dei percorsi da rilevare nel corso della missione è ragguardevole, si pone inoltre, indipendentemente dalle difficoltà di ricezione, il problema di impiegare più stazioni di riferimento.



A questo scopo si possono impiegare (in ordine crescente di convenienza operativa): punti temporanei rilevati ad hoc, punti IGM95 o vertici delle reti di raffittimento a 7 km regionali, stazioni permanenti e reti di stazioni permanenti.

#### 4.1 Rilievo da singola stazione di riferimento ad hoc o da stazione permanente singola

In zone in cui non è possibile appoggiarsi a una stazione permanente, è indispensabile installare una propria stazione di riferimento direttamente su un vertice IGM95 o su un caposaldo delle reti di raffittimento regionale (a 7 km) o ancora servirsi di un punto temporaneo, determinato appositamente rispetto a tali reti. La soluzione in questo caso consiste in un rilievo statico o statico rapido in posizionamento relativo rispetto ad un'antenna posizionata su un vertice noto ubicato nelle vicinanze (entro 15 km) o rispetto ad una stazione permanente preesistente. Questa fase può coincidere con il contemporaneo rilevamento con Mobile Mapping, poiché in questo caso gli stessi dati possono essere utilizzati per la georeferenziazione della stazione di riferimento e per il post-processamento cinematico; in tal caso tuttavia non si può avere la soluzione differenziale in tempo reale, non essendo ancora note con precisione sufficiente le coordinate della stazione di riferimento. Evidentemente rilevare ad hoc punti richiede almeno due ricevitori in campagna, entrambi da presidiare. Ha il vantaggio di poter situare i punti in zona baricentrica rispetto al rilievo, limitando quindi i punti da rilevare allo stretto necessario.

L'impiego diretto di punti IGM95 è in generale meno conveniente data la relativa sparsità degli stessi mentre le reti a 7 km, dove già realizzate, permettono in effetti di localizzare il ricevitore fisso in posizione baricentrica, rendendo superflua la determinazione di punti ausiliari.

La presenza sul territorio di stazioni permanenti singole, gestite da enti diversi e georeferenziate con procedure non sempre omogenee, consente comunque, previo accordo, un loro utilizzo, nell'ipotesi che il rate di campionamento sia adeguato (~1 Hz contro l'usuale 1/15 Hz per impieghi statici). In molti casi tuttavia, queste stazioni non sono predisposte per trasmettere le correzioni differenziali in tempo reale, per cui è necessario post-processare i dati della sessione di misura ovvero rinunciare ai vantaggi dell'RTK.

La loro densità sul territorio è poi assai variabile, per cui difficilmente possono costituire un supporto su cui contare per tutta una campagna, salvo che questa sia piuttosto circoscritta (es. in ambito comunale).

#### 4.2 Rilievo da rete di stazioni permanenti e vantaggi nel Mobile Mapping

La presenza di una rete di stazioni permanenti offre invece le migliori condizioni operative ad un rilievo cinematico, sotto tutti i punti di vista.

Essa costituisce indiscutibilmente una infrastruttura utile sia per chi opera in modalità di post-processamento sia per chi si muove con modalità real time.

Una rete di stazioni permanenti è da intendersi come unico "oggetto" costituito da elementi (i ricevitori) inquadrati nello stesso sistema di riferimento.

Con una rete di stazioni permanenti (RSP) è possibile utilizzare in post-processamento, i dati di ciascuna singola stazione (o da più stazioni contemporaneamente "approccio *multibase*") o utilizzare dati virtuali (VRS) di stazioni generate a partire dalle misure di stazioni reali nelle posizioni di interesse ed operare come se esistesse realmente una SP nella posizione generata. Quest'ultimo approccio non è ancora completamente consolidato e risulta essere ancora motivo di interesse e studio da chi si occupa di tali problematiche.

Se la rete consente la trasmissione di correzioni in tempo reale o di singole stazioni o d'area (VRS, FKP, MAX) allora le stesse proprietà sopracitate possono essere utilizzate dall'utente in tempo reale.

Come detto, la presenza di una rete di stazioni permanenti nell'area interessata da una campagna di rilievo per la formazione del Catasto Stradale ha una serie di vantaggi, principalmente sul piano della produttività e della organizzazione del rilievo, ma anche su quello della qualità dei risultati.

### 4.2.1 Qualità del rilievo

**Accuratezza:** anche se il panorama delle tecniche di elaborazione, sia dal punto di vista delle modalità di calcolo delle correzioni da inviare sia delle modalità di trasmissione del dato tra centro di controllo e ricevitore è tuttora in evoluzione, si può affermare che operando all'interno di una rete la lunghezza della "baseline equivalente" verso il ricevitore in movimento è sempre limitata; questo in linea di principio significa maggior omogeneità di precisione, almeno per quanto attiene agli errori sistematici. Tuttavia il vero fattore limitante è dato dalla geometria satellitare "vista" del ricevitore Rover, dal momento che, specie in aree con presenza di ostacoli (percorsi urbani, vegetazione d'alto fusto a margine carreggiata, ecc.) la configurazione in vista cambia molto rapidamente, con effetti sulla stabilità della soluzione puramente GPS.

**Inizializzazione:** come detto, la re-inizializzazione su veicolo dotato di inerziale dovrebbe essere relativamente rara; sotto questo aspetto la RSP per il posizionamento in tempo reale offre a livello teorico due vantaggi:

- *Indipendenza sulla accuratezza dalla distanza del veicolo dalla "stazione di riferimento".* Questo si traduce, sempre idealmente, in una maggior omogeneità nella qualità del fissaggio delle ambiguità, a parità delle altre condizioni (rapporto S/N, configurazione satellitare, ecc.).
- *Tempi più brevi.* Le esperienze in condizioni statiche effettuate nelle reti utilizzate dai gruppi di questo progetto indicano che circa l'80% delle inizializzazioni si conclude entro 2'. Il tempo necessario ad ottenere la stima finale non sembra dipendere significativamente dalla configurazione geometrica dei satelliti; non emerge neppure una chiarissima correlazione fra tempi di rilievo e accuratezza finale del risultato. Si osserva invece che al crescere del numero di satelliti diminuiscono i tempi medi di fissaggio e le relative deviazioni standard, anche se vi sono molte prove con pochi satelliti in vista e una stima finale entro i tre minuti: in tal senso è quindi difficile trarre delle conclusioni definitive. Se questi tempi sono comunque molto buoni in termini assoluti, occorre tuttavia tener presente che sono stati ottenuti in condizioni statiche e su punti che hanno generalmente un'ottima visibilità. Per le inizializzazioni in movimento, sono ancora poche le esperienze e dunque l'argomento deve essere ulteriormente approfondito. Da alcuni test però emerge una generale difficoltà di reinizializzazione in movimento (50 km/h) dello stesso ordine di grandezza di un RTK tradizionale da stazione singola molto prossima al sito di rilievo cinematico.

### 4.2.2 Organizzazione della campagna rilievo

Vi sono semplificazioni e risparmi di tempo assai significativi. Da un lato non occorre effettuare la scelta, la ricognizione preliminare per verificare lo stato di conservazione e ricerca sui punti delle reti IGM o delle reti regionali e neppure procedere alla scelta della localizzazione ed al rilievo di eventuali punti ausiliari; dall'altro, non occorre coordinare gli spostamenti del ricevitore GPS che funge da stazione di riferimento con quelli del veicolo (qualora siano necessari spostamenti per mantenersi nel raggio utile dal veicolo) e neppure ottimizzare i percorsi perché restino nel raggio d'azione utile della stazione; vengono meno le attività di manutenzione e programmazione degli apparati ausiliari – ricarica batterie, modem, ecc. – del ricevitore GPS.

#### Produttività del rilievo

Intendendo con questo termine i chilometri percorsi per giornata di rilievo (o per ora di rilievo), in linea di massima non vi sono grossi incrementi attesi di produttività; infatti in questa accezione la produttività dipende maggiormente dalla tipologia del rilievo (ovvero se in ambito urbano, dove l'organizzazione dei percorsi è più complessa, o extra-urbano), dagli eventuali tempi morti di trasferimento tra le strade da rilevare e, in qualche misura, dalle condizioni di traffico cioè comunque da condizioni sulle quali la disponibilità della rete SP ha poca influenza. Vi può essere un certo guadagno in presenza di condizioni di ricezione (ostacoli dati da edifici, vegetazione, presenza di numerose gallerie o lunghi filari di alberi, percorsi in montagna) particolarmente difficoltose e persistenti, legate quindi ai tempi di re-inizializzazione; casi di questo tipo tuttavia dovrebbero costituire più l'eccezione che la regola.

Vi è poi un aumento di produttività chilometrica oraria qualora si usi una stazione di riferimento su punto noto e il rilievo abbia sensibile sviluppo lineare. In questo caso, dovendo essere spostata la stazione di riferimento da un punto noto ad un altro, occorre arrestare il rilievo nelle ore del trasferimento. Anche in questo caso comunque una buona programmazione della giornata riduce il guadagno praticamente conseguibile.

#### **Economie**

Il risparmio maggiore in termini di capitale investito è quello relativo ai costi di acquisizione e mantenimento della stazione GSP di riferimento; si hanno poi sia minori costi di gestione (carburante, manutenzione e deprezzamento veicolo) del rilievo, non essendo necessario spostarsi sui punti noti; vi sono poi risparmi sul personale aggiuntivo necessario sia per la gestione sia per la sorveglianza del ricevitore sul punto noto. Un ulteriore – certamente modesto - risparmio è quello relativo all'acquisizione delle monografie di punti IGM o di altre reti eventualmente a titolo oneroso.

A fronte di questi risparmi occorre ovviamente porre i costi di utilizzo della rete e, se impiegata, quelli del collegamento telefonico per rendere possibile la soluzione RTK.

### **4.3 Svantaggi delle RSP nel Mobile Mapping**

Per quanto circoscritti, vi sono anche alcuni – modesti - svantaggi rispetto ad una ditta che effettui rilievi per il Catasto Strade in modo autosufficiente (ovvero che impieghi per la stazione di riferimento un ricevitore proprio opportunamente messo in stazione su punti noti)

- Dipendenza da dati GPS di terze parti: se la Ditta procede autonomamente, essa è la sola responsabile della qualità dei dati di posizionamento prodotti, per cui in caso di risultati non soddisfacenti deve farvi fronte in prima persona. Se invece si appoggia al servizio di una RSP occorre che sia chiarito il problema di una garanzia dell'integrità del dato e della continuità del servizio dall'altro.
- Dipendenza dagli orari del servizio rete: il servizio potrebbe non essere garantito per 24 ore al giorno e per 7 giorni su sette; questo potrebbe impedire di smaltire, ad esempio nel weekend, ritardi sul lavoro accumulatisi per condizioni meteo sfavorevoli.

### **4.4 Qualità del servizio delle RSP**

Questo aspetto riguarda primariamente il gestore del servizio in termini di standard che vengono garantiti e, in caso di inadempienza, apre il problema di una gestione del contenzioso. I due aspetti più rilevanti sono porabilmente la fruibilità del servizio e la certificazione del dato.

- *Fruibilità del servizio.* Dal momento che una RSP è una struttura complessa dal punto di vista tecnologico, che si appoggia pesantemente ad infrastrutture di telecomunicazione esterne, da un lato la RSP si attizzerà per ridurre al minimo eventuali problematiche di tipo tecnologico, ma dall'altro non si accolla le responsabilità della continuità di ricezione del dato, che dipende dalle caratteristiche della rete del gestore di telefonia mobile, certificazione dato SP. Per applicazioni RTK questo potrebbe essere un problema. Esiste sempre la possibilità di una soluzione post-processata per cui, al di fuori della navigazione, il problema indubbiamente si ridimensiona, tuttavia esso esiste.
- *Certificazione del dato.* Questo aspetto, va inquadrato nel rapporto tra le specifiche di qualità del servizio, le esigenze di precisione dell'utenza (spesso determinate da prescrizioni di terzi) e modalità di impiego del servizio, intendendo con ciò sia le caratteristiche di HW e SW della strumentazione dell'utente, sia la sua modalità di posizionamento.

### **4.5 Problemi aperti**

Seppure, come si evince dal contributo in oggetto, la rete di stazioni permanenti (sia per il post-processamento che per il posizionamento in tempo reale) costituisce una infrastruttura sicuramente utile ad applicazioni di Mobile Mapping, l'argomento a parere degli autori presenta ancora numerosi aspetti che richiedono un'approfondimento ulteriore in particolare in merito all'utilizzo di RSP per posizionamento in tempo reale. La ricerca infatti deve essere ulteriormente sviluppata in tal senso per consolidare

alcune problematiche tecnologiche quali:

- lo studio sul posizionamento in modalità real time (sia in termini di accuratezza che di utilizzabilità del servizio) utilizzando i differenti modi per trasferire le correzioni differenziali d'area (iMax, FKP, VRS);
- lo studio della accuratezza derivata da una stazione generata in modo virtuale (VRS), confrontata con soluzioni derivate da stazioni reali;
- lo studio del migliore approccio quando sono disponibili sia correzioni di rete che correzioni di singole stazioni permanenti.

## CONCLUSIONI

Le applicazioni di MMS potranno trarre indiscutibili benefici da reti di stazioni permanenti (sia per l'aspetto legato al post-processamento del dato sia per l'eventuale utilizzo in tempo reale). Tali benefici sono riscontrabili sia in termini di qualità nel modo di operare sul territorio sia di razionalizzazione delle operazioni con conseguente riduzione dei costi di acquisizione del dato.

La rete di stazioni permanenti costituisce un *elemento geodetico attivo* utilizzabile a differenti livelli, e se per applicazioni in post-processamento risulta evidente un'applicabilità immediata, per l'utilizzo corretto in tempo reale le ricerche devono ulteriormente chiarire in modo più completo alcuni aspetti sopra citati.

## BIBLIOGRAFIA

- M. Bernabini, A. Bosman, M. Ciccarini, M. Crespi, A. Mazzoni, G. Reina "Attività sperimentale di rilievo dei fondali del fiume Tevere con metodologia multibeam. Progetto "Studio batimorfologico e sismostratigrafico dell'alveo del fiume Tevere lungo il tratto compreso tra la foce e Ponte del Grillo"". Rapporto interno del Dipartimento di Idraulica Trasporti Strade, Sapienza Università di Roma, 2006.
- Biagi L., Sansò F., et al., "Il servizio di posizionamento in Regione Lombardia e la prima sperimentazione sui servizi di rete in tempo reale", Bollettino della SIFET n°3, 2006, pp. 71-90.
- A. Biasion, A. Lingua, M. Piras, C. Porporato, "Rilievo di alvei fluviali in RT mediante misure GPS in modalità Multi Reference Station", Atti della 8<sup>a</sup> Conferenza Nazionale ASITA, Roma, 14-17 dicembre 2004.
- N. Cazzaniga, G. Forlani, L. Pinto "Esperienze di navigazione geodetica in una rete di SP GPS per l'orientamento diretto di fotogrammi", Atti della 10<sup>a</sup> Conferenza Nazionale ASITA, Bolzano, 14-17 novembre 2006.
- A. Cina, M. Pesenti, C. Porporato, M. Roggero, L. Sambuelli "Geomatica e geofisica: i vantaggi dell'integrazione", Atti della 10<sup>a</sup> Conferenza Nazionale ASITA, Bolzano, 14-17 novembre 2006.
- M. Crespi, L. De Vendictis, R. Onori, F. Volpe "Valutazione dell'accuratezza di DSM estratti da immagini Quickbird basic e standard orthoready", Atti della 10<sup>a</sup> Conferenza Nazionale ASITA, Bolzano, 14-17 novembre 2006.
- A. Fornaia, A. M. Manzano, M. Roggero, "Un sistema GPS multiantenna per la determinazione dell'assetto di un veicolo rilevatore", Atti della 10<sup>a</sup> Conferenza Nazionale ASITA, Bolzano, 14-17 novembre 2006.
- F. van Grass, M. Braasch, "GPS Interferometric Attitude and Heading Determination: Initial Flight Test Results", Navigation. (1992) Vol. 38, No. 4, pp. 359- 388.
- M. Roggero, "Multi base kinematic GPS processing, a constrained batch solution applied to antenna array", Italy – Poland bilateral meeting on Geodesy, Wroclaw 2006, in pubblicazione.
- M. Roggero, "Kinematic GPS Batch Processing, improving ambiguity fixing performances", Italy – Poland bilateral meeting on Geodesy, Wroclaw 2006, in pubblicazione.
- K.P. Schwarz, N. El-Sheimy, "Mobile Mapping Systems – State of The Art and Future Trends", IAPRS, Vol. XXXV, part B5, (2004).
- J.F.C. da Silva, P.d.O. Camargo, "Development of a low-cost Mobile Mapping system: a South American experience", The Photogrammetric Record, Vol.18, N. 101, March 2003, pp. 5-26(22).
- A. Varini, G. Forlani, R. Roncella. "Test di precisione di un veicolo rilevatore". Bollettino della SIFET, n.1/2005, 83-99.