

Uso del software goGPS per la produzione della sentieristica di un parco con strumenti a basso costo

Lisa Pertusini (*), Eugenio Realini (**), Mirko Reguzzoni (***),
Daniele Sampietro (*), Luana Valentini (*)

(*) DIAR, Politecnico di Milano, Polo Regionale di Como, via Valleggio 11, 22100 Como, Italia
031-3327557, 031-3327520, lisa.pertusini@mail.polimi.it

(**) Graduate School for Creative Cities, Osaka City University, Osaka, Giappone

(***) Dipartimento di Geofisica della Litosfera, OGS, c/o Politecnico di Milano, Polo Regionale di Como, Italia

Riassunto

La disponibilità di strumenti GPS a basso costo può essere sfruttata per la realizzazione della sentieristica di parchi naturali. A tal fine è necessario ridurre il più possibile l'errore intrinseco dello strumento (che può arrivare anche a diversi metri) ed elaborare la sequenza di punti stimati in modo da ottenere una semplice topologia di rete (polilinea). Il primo obiettivo può essere raggiunto utilizzando una stazione *master* di riferimento. A tal fine il *software open source goGPS* implementa un filtro di Kalman sulle differenze doppie e riesce a stimare la traiettoria percorsa con accuratezza submetrica (30-50 cm in condizioni di buona visibilità dei satelliti). Per quanto riguarda la realizzazione della topologia di rete, i singoli punti della traiettoria stimata sono stati processati con una procedura automatica in grado dapprima di identificare un sottoinsieme approssimato di nodi e quindi di riadattare la rete in modo da interpolare al meglio le osservazioni GPS secondo un principio di minimi quadrati. L'inserimento della rete di sentieri in un *webGIS* offre all'utente del parco ulteriori servizi (interrogazioni sulla distanza, navigazione, etc.) oltre ad informazioni georeferenziate. In questo lavoro il procedimento appena descritto basato sul *software goGPS* è stato applicato, a titolo esemplificativo, per la realizzazione di alcuni sentieri del parco sovracomunale delle Sorgenti del Lura situato in provincia di Como.

Abstract

The availability of low-cost GPS receivers can be exploited to chart paths in natural areas. For this purpose the intrinsic error of the instrument, which can be of the order of some meters, has to be reduced as much as possible; furthermore the sequence of estimated points has to be processed to get a simple network topology (polyline). The first objective can be achieved by using a master reference station. To this aim the open-source software goGPS implements a Kalman filter on double differences to estimate the trajectory with a sub-meter accuracy (30-50 cm with good visibility of satellites). As for the realization of the network topology the single points of the estimated route are processed by an automatic procedure which first detects an approximated subset of nodes and then readjust the network to best interpolate the GPS observations according to a least-squares principle. The inclusion of the path network in a webGIS can provide the park user with further services and geo-referenced information. In this work the described procedure, based on the goGPS software, has been applied for realizing some paths in the park of Lura Springs located in the Como district.

goGPS: software open source per la navigazione GPS

I dispositivi GPS a basso costo tipicamente utilizzano antenne *patch* o *helix* di piccole dimensioni e ricevitori in singola frequenza (L1) in modalità *stand-alone*. Inoltre sono spesso caratterizzati da alta sensibilità a segnali anche degradati, in modo da poter garantire la ricezione in ambienti urbani

ed in presenza di copertura fogliare. Tuttavia l'accuratezza di posizionamento con questi strumenti risulta essere bassa non solo a causa dei classici errori dovuti all'atmosfera e agli offset d'orologio, non trascurabili in modalità *stand-alone*, ma anche per la scarsa qualità dei componenti *hardware* e il forte *multipath* indotto dall'alta sensibilità.

goGPS (<http://www.gogps-project.org>) (Pertusini et al., 2008) è un *software open-source* che permette di effettuare posizionamento relativo di codice e fase (RTK) con strumenti GPS a basso costo, se questi forniscono dati grezzi (osservazioni GPS): in questo modo gli errori atmosferici e d'orologio sono rimossi o resi trascurabili. In aggiunta, goGPS include un filtro di Kalman applicato alle osservazioni GPS che permette di ridurre l'errore di stima tenendo conto della dinamica del ricevitore, di pesare le osservazioni sulla base della qualità del segnale (*signal-to-noise ratio* ed elevazione del satellite), di integrare informazioni aggiuntive quali modelli digitali del terreno o reticoli stradali e di utilizzare al meglio l'informazione offerta dalla fase L1, gestendo le ambiguità di fase nei cambi di configurazione satellitare e i *cycle-slips*.

goGPS può funzionare sia in modalità RTK che in *stand-alone* e può essere utilizzato sia in tempo reale che in post-processamento. La modalità RTK richiede la disponibilità delle osservazioni di una stazione di riferimento, quindi se usato in tempo reale è necessaria una connessione Internet mobile, mentre in post-processamento è sufficiente ottenere i file RINEX della stazione.

Scelta preliminare della modalità di rilievo GPS

Il primo obiettivo è stato quello di definire quale sia la modalità più appropriata di rilievo GPS, che consenta di ottenere risultati sufficientemente precisi con il minor sforzo economico (e quindi sia adatto ad applicazioni per la Pubblica Amministrazione o per paesi in via di sviluppo). In particolare si è voluto verificare se sia possibile ottenere precisioni accettabili in un rilievo in modalità differenziale, utilizzando sia per il *rover* che per il *master* dei ricevitori u-blox a basso costo (modello AEK-4T).

Per quanto riguarda il ricevitore *master* un'antenna u-blox è stata posizionata sul tetto dell'università (nei pressi della stazione permanente di Como) per un lasso di tempo pari a circa 5 ore; mediante il *software* goGPS sono stati poi effettuati in *post-processing* posizionamenti statici in diverse modalità: *stand-alone* (a), differenze doppie (DD) con la stazione permanente di Como (b), di Milano (c), di Pavia (d) e di Mantova (e).

Le coordinate ottenute dai posizionamenti statici elencati sono state utilizzate come coordinate note del ricevitore *master* per effettuare un rilievo cinematico al campo di calibrazione presso il Polo Regionale di Como del Politecnico di Milano. I risultati sono stati confrontati con il percorso ottenuto unendo tra loro i vertici del campo di calibrazione, stimati mediante un posizionamento statico-rapido effettuato con un ricevitore geodetico in modalità differenziale rispetto alla stazione permanente di Como, situata a poche decine di metri di distanza (vedi un percorso d'esempio in Figura 1).

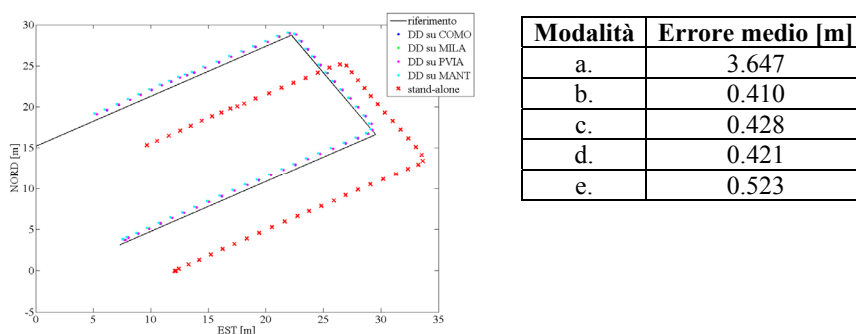


Figura 1 – traiettorie stimate ed errori medi del rilievo cinematico in diverse modalità.

Risulta evidente come il caso di posizionamento statico del *master* u-blox in modalità *stand-alone* porti ad una traslazione eccessiva nel rilievo cinematico, e sia perciò da escludere.

Per quanto riguarda le differenze doppie rispetto a stazioni permanenti poste a distanze diverse dal ricevitore u-blox, si noti come fino ad una distanza relativa pari a circa 70 km (stazione permanente di Pavia) i risultati siano considerabili equivalenti, mentre nel caso dell'utilizzo di Mantova come stazione permanente (posta a distanza di circa 150 km) questi degradino leggermente, pur mantenendosi entro un errore submetrico, considerato accettabile.

Il metodo ritenuto quindi più appropriato per il rilievo GPS con scopo finale la realizzazione di sentieristica a basso costo è quello di effettuare un rilievo cinematico utilizzando come *master* un ricevitore a basso costo le cui coordinate fisse sono definite mediante un unico posizionamento statico che deve essere effettuato alle differenze doppie rispetto ad una stazione permanente posta ad una distanza che si può spingere fino a 150 km. In tal modo il costo della connessione alla rete di stazioni permanenti (se si lavora in tempo reale) o del *download* dei suoi RINEX (se si lavora in *post-processing*) è da affrontare una volta sola, mentre il rilievo cinematico si effettua senza l'ausilio di tali informazioni a pagamento.

Rappresentazione del percorso tramite polilinea

La soluzione più banale (e probabilmente più usata) al problema di realizzare una sentieristica o in generale un reticolo stradale tramite ricevitori GPS è quella di riportare la traiettoria calcolata direttamente sulla carta di interesse. Occorre tuttavia chiarire che la traiettoria restituita dai ricevitori GPS (per esempio in formato NMEA) non è altro che una sequenza di punti, che può essere estremamente lunga se l'intervallo di campionamento delle osservazioni GPS risulta pari ad 1 secondo. Per esempio non vi è alcun tipo di semplificazione nel caso di un percorso rettilineo che potrebbe essere ugualmente descritto con un singolo arco delimitato da due soli nodi.

Una soluzione leggermente più sofisticata è quella di descrivere la traiettoria con una semplice topologia di rete (polilinea), basata su un numero limitato di archi e nodi. Si noti come la disponibilità di tale topologia di rete, opportunamente inserita all'interno di un *webGIS*, permetta di gestire più facilmente informazioni georeferenziate (per esempio fotografie associate ad archi o nodi) e servizi (interrogazioni sulla distanza o sui tempi di percorrenza, navigazione in tempo reale usando la rete come vincolo, eccetera).

Il principale problema da risolvere è quindi quello di ridurre il numero di nodi che definiscono la traiettoria stimata. A tal fine è stato sviluppato un algoritmo basato sui seguenti passi:

1. selezione automatica di nodi significativi, scelti tra i vari punti GPS (ovvero tra le posizioni stimate direttamente dal ricevitore ogni secondo);
2. attribuzione di ogni punto GPS ad un certo arco (segmento congiungente due nodi);
3. adattamento ai minimi quadrati della posizione dei nodi, così che gli archi risultanti interpolino correttamente i punti GPS.

I nodi stimati al passo 3 vengono forniti come input al passo 2, iterando più volte fino ad ottenere la polilinea finale. Descriviamo ora con maggior dettaglio i singoli passi.

Selezione automatica dei nodi

L'individuazione dei nodi significativi (e di conseguenza la determinazione del loro numero) viene effettuata utilizzando l'algoritmo di classificazione agglomerativo AGNES (Kaufman e Rousseuw, 1990). All'inizio si considerano tutti i punti GPS come nodi significativi e si definiscono i corrispondenti archi congiungendo ogni nodo con il suo precedente e con il suo successivo. Viene poi calcolato l'angolo tra ogni coppia di archi consecutivi; per la precisione, detti A , O e B tre generici nodi consecutivi di coordinate $\underline{x}_A = (x_A, y_A)$, $\underline{x}_O = (x_O, y_O)$ e $\underline{x}_B = (x_B, y_B)$, l'angolo in questione viene calcolato come:

$$A\hat{O}B = \arccos \left[\frac{(\underline{x}_A - \underline{x}_O) \cdot (\underline{x}_B - \underline{x}_O)}{|\underline{x}_A - \underline{x}_O| |\underline{x}_B - \underline{x}_O|} \right] \quad 0 \leq A\hat{O}B \leq 180^\circ \quad (1)$$

Tra tutti gli angoli calcolati viene individuato quello maggiore, cioè quello più prossimo a 180° ; in altri termini, vengono individuati i due archi consecutivi con la minor variazione di direzione.

Se questo angolo massimo risulta superiore a una certa soglia (il valore di default è 170°), allora il nodo comune O tra i due archi \overline{AO} e \overline{OB} viene eliminato, ottenendo un unico arco \overline{AB} . Dopo aver ricalcolato gli angoli rispetto a questo nuovo arco, l'algoritmo viene ripetuto iterativamente fino a quando l'angolo massimo risulta inferiore alla soglia (vedi Figura 2).

La procedura descritta viene applicata alla soluzione di goGPS basata sulle differenze doppie di codice e fase, pesando oltre il necessario il modello dinamico del filtro di Kalman. In questo modo la sequenza di punti GPS disegna una traiettoria abbastanza liscia, evitando così che l'algoritmo agglomerativo individui un numero troppo elevato di nodi.

Nonostante questa accortezza, quando il ricevitore viene mantenuto fermo durante il rilievo, il filtro di Kalman restituisce una nuvola di punti attorno alla posizione vera con repentini cambi di direzione tra due archi consecutivi. Questo provoca la selezione di un elevato numero di nodi in un'area molto ristretta. Per ovviare a questo inconveniente, a valle del metodo agglomerativo viene implementata un'ulteriore selezione, verificando che la distanza tra due nodi consecutivi sia maggiore di una certa soglia. Se questa condizione non è soddisfatta, allora viene selezionato solo il primo dei due nodi. Il test viene ripetuto iterativamente finché la condizione non sia verificata per tutte le coppie di nodi adiacenti.

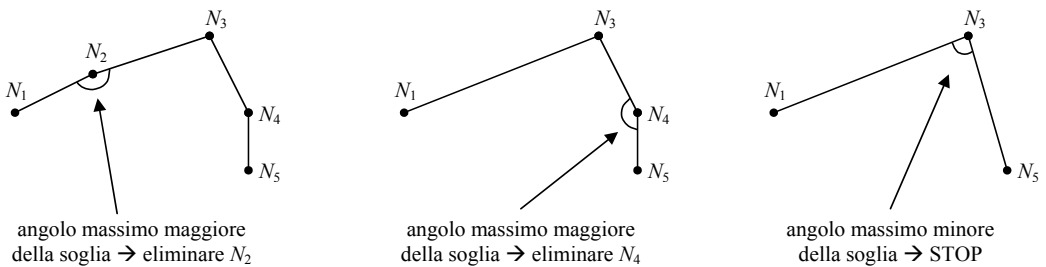


Figura 2 – schema esemplificativo dell'algoritmo agglomerativo per la selezione dei nodi.

Attribuzione dei punti GPS ai vari archi

Una volta selezionati i nodi, gli archi sono definiti implicitamente collegando i nodi consecutivi. Tuttavia, il fatto che i nodi selezionati siano un sottoinsieme dei punti GPS originali implica che i corrispondenti archi non interpolino necessariamente in maniera ottimale gli altri punti GPS non selezionati. Inoltre, come detto in precedenza, la procedura di selezione dei nodi viene fatta su una traiettoria lisciata, mentre la polilinea finale dovrebbe essere calcolata su una traiettoria il più possibile fedele alla realtà.

Per questi motivi, i punti GPS vengono ricalcolati utilizzando sempre goGPS, ma pesando in modo corretto il modello dinamico del filtro di Kalman rispetto agli errori di misura delle osservazioni di codice e fase. I punti GPS così ottenuti devono essere poi attribuiti ai vari archi, così da poter successivamente ottimizzare la polilinea interpolante. In altri termini ogni arco viene battezzato con una certa *label* (un numero da 1 a N , dove N è il numero di archi) e ad ogni punto GPS viene assegnata una e una sola *label* (incluso il valore 0 se il punto GPS non è assegnato ad alcun arco).

Al fine di effettuare questa classificazione, due nodi consecutivi vengono congiunti con una linea e intorno a questa linea viene costruito un *buffer* rettangolare di ampiezza Δ definita dall'utente. A questo punto vengono implementate le seguenti regole di classificazione:

- se un punto GPS non cade in nessun buffer, allora gli viene attribuita la *label* 0 e viene escluso dal successivo processo di interpolazione ai minimi quadrati;
- se un punto GPS cade in uno e un solo buffer, allora gli viene attribuita la *label* del relativo arco;

- se un punto GPS cade in più di un buffer (evento che si verifica frequentemente nei pressi dei nodi e se il valore di Δ è elevato), allora per ogni arco coinvolto viene calcolata la somma delle distanze tra il punto GPS e i suoi due nodi e viene attribuita al punto GPS la *label* dell'arco per cui tale somma risulta minima.

Infine può verificarsi il caso in cui nessun punto GPS oppure un solo punto GPS cada nel buffer di un arco. Questo non permette di ristimare l'arco con la successiva interpolazione ai minimi quadrati e quindi l'arco stesso viene eliminato, cancellando uno dei suoi due nodi.

Adattamento ai minimi quadrati dei nodi

L'idea è quella di interpolare i punti GPS con una retta, ovvero col seguente modello:

$$y - y_0 = m(x - x_0) \quad (2)$$

dove x_0 è un valore fissato a priori in maniera arbitraria (per esempio il punto medio delle coordinate x dei punti GPS), mentre il corrispondente valore y_0 e il coefficiente angolare m della retta sono le due incognite del problema. Occorre considerare che i punti GPS osservati presentano un errore in entrambe le coordinate, ovvero $x_{0i} = x_i + v_{xi}$ e $y_{0i} = y_i + v_{yi}$, dove le varianze degli errori σ_{xi}^2 e σ_{yi}^2 sono fornite direttamente dal filtro di Kalman implementato in goGPS, mentre la covarianza viene trascurata per semplicità. Assumendo che il coefficiente angolare m possa essere scritto come $m = \tilde{m} + \delta m$ e che valga l'approssimazione $m v_{xi} \approx \tilde{m} v_{xi}$, l'equazione di osservazione del problema ai minimi quadrati risulta:

$$y_{0i} - v_{yi} - y_0 - m(x_{0i} - x_0) + \tilde{m}v_{xi} = 0 \quad (3)$$

dove il valore approssimato del coefficiente angolare può essere stimato per esempio come:

$$\tilde{m} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{y_{0i} - \bar{y}}{x_{0i} - \bar{x}}, \quad \text{con } \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{0i}, \quad \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_{0i} \quad (4)$$

La funzione obiettivo dei minimi quadrati può essere scritta come:

$$\phi = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \left(\frac{v_{yi}^2}{\sigma_{yi}^2} + \frac{v_{xi}^2}{\sigma_{xi}^2} \right) \quad (5)$$

da minimizzare rispetto alla condizione (3) usando i moltiplicatori di Lagrange. Il sistema normale risultante da cui stimare y_0 e m può essere scritto in forma matriciale come:

$$\begin{bmatrix} \sum_i q_i & \sum_i q_i (x_{0i} - x_0) \\ \sum_i q_i (x_{0i} - x_0) & \sum_i q_i (x_{0i} - x_0)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_0 \\ m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_i q_i y_{0i} \\ \sum_i q_i y_{0i} (x_{0i} - x_0) \end{bmatrix} \quad (6)$$

dove $q_i = (\sigma_{yi}^2 + \tilde{m}^2 \sigma_{xi}^2)^{-1}$.

Poiché i valori y_0 e m sono stimati indipendentemente arco per arco, in generale occorre ricalcolare l'intersezione tra due rette consecutive e quindi determinare la nuova posizione del nodo intermedio, che varia quindi non solo rispetto alla coordinata y ma anche rispetto alla coordinata x . La sequenza di nodi e archi così ottenuta definisce la topologia di rete (polilinea) del percorso effettuato.

L'esempio del Parco delle Sorgenti del Lura

A titolo esemplificativo è stato realizzato un breve percorso all'interno del parco sovracomunale delle Sorgenti del Lura. Il parco si estende su un'area di circa 13 kmq, situata in provincia di Como, e costituisce un importante corridoio ecologico all'interno della rete dei parchi della regione Lombardia. Nel parco esistono molti sentieri, spesso ben individuabili, ma ancora non segnalati. A titolo dimostrativo, e come studio di fattibilità per la realizzazione della sentieristica del Parco Sorgenti del Lura, è stato rilevato un semplice sentiero, che si snoda all'interno di un bosco misto di

latifoglie e aghifoglie per circa 3 km (con un dislivello di 120 m) fino ad arrivare alla tomba del marchese Raimondi, un piccolo mausoleo costruito alla fine del 1800.

Il rilievo della durata di quasi 1 ora è stato effettuato in gennaio con un ricevitore u-blox AEK-4T. È interessante notare che a causa della presenza della vegetazione, specialmente dei pini presenti nella parte finale del percorso, il rilevamento del sentiero con un ricevitore geodetico non sarebbe stato possibile. Come *master* è stato utilizzato un altro ricevitore u-blox AEK-4T, la cui posizione è stata determinata in statico rispetto alla stazione permanente di Como (situata a circa 30 km).

Le circa 2000 osservazioni sono state acquisite e compensate con il *software* goGPS; è stato poi applicato l'algoritmo per la realizzazione della polilinea, riducendo il numero di nodi di un fattore 15 (vedi un dettaglio in Figura 3). Il percorso ottenuto è stato pubblicato all'interno di un *webGIS* utilizzando una proiezione cartografica UTM (vedi Figura 3).

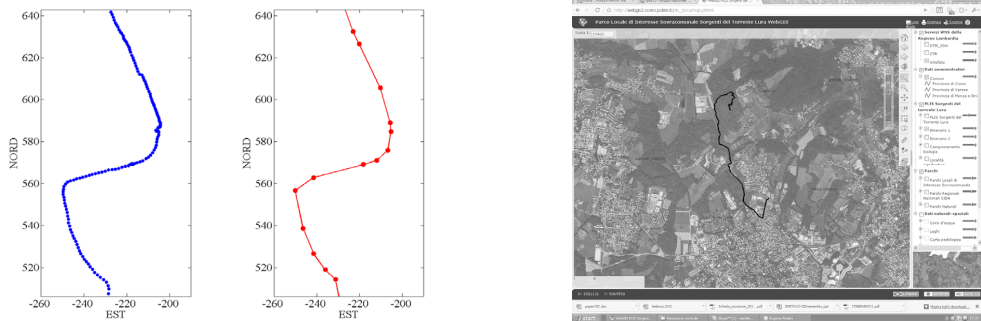


Figura 3 – a sinistra confronto della sequenza di osservazioni GPS con la polilinea stimata, a destra il percorso inserito nel webGIS (http://webgis2.como.polimi.it/plis_slura/map.phtml).

In accordo con la filosofia adottata per il processamento delle osservazioni GPS, anche per la pubblicazione dei risultati si è scelto di utilizzare *software* FOSS (*Free and Open Source Software*), rilasciati gratuitamente e di cui si può avere a disposizione il codice sorgente. Queste soluzioni, evitando costose licenze, sono adatte in caso di Pubbliche Amministrazioni o per la realizzazione della sentieristica nei paesi in via di sviluppo. In particolare per la nostra applicazione è stato utilizzato come *server* MapServer (<http://mapserver.org/>), mentre per quanto riguarda il lato *client* è stato implementato *p.mapper* (<http://www.pmapper.net/>), un'apposita applicazione di MapServer.

Oltre al percorso rilevato e ai dati memorizzati in locale, il *server* è in grado di gestire altre informazioni (ad esempio l'ortofoto realizzata nel 2003 per la Regione Lombardia, il modello digitale del terreno (DTM) a risoluzione 20 m e la Carta Tecnica Regionale (CTR) a scala 1:10.000) attraverso l'utilizzo di servizi WMS (*Web Map Service*).

L'utente finale può visualizzare il percorso creato nel contesto del Parco, calcolare distanze, aggiungere punti di interesse ed esportare mappe. Inoltre è possibile ottenere informazioni di dettaglio interrogando i diversi livelli presenti nella mappa.

Ringraziamenti

Si ringrazia per la collaborazione lo studente Befkadu Nigussie Alemu, che ha fatto di questa ricerca l'argomento della sua tesi di laurea.

Bibliografia

- Kaufman L., Rousseeuw P.J. (1990), *Finding groups in data. An introduction to cluster analysis*. John Wiley & Sons, New York
- Pertusini L., Realini E., Reguzzoni M. (2008), *goGPS: un software per navigare vincolati a linee e superfici*. Atti della XII conferenza nazionale ASITA, L'Aquila, Vol. II, pp. 1627-1632