

Utilizzo del software goGPS per la navigazione di precisione con ricevitori a basso costo

Lisa Pertusini (*), Eugenio Realini (**), Mirko Reguzzoni (***)

(*) Politecnico di Milano, Polo Regionale di Como, via Valleggio 11, 22100 Como, Italy
tel. +39-031-3327557, fax +39-031-3327519, e-mail lisa.pertusini@mail.polimi.it

(**) Osaka City University, Media Center 3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-8585 Japan

(***) Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale (OGS),
c/o Politecnico di Milano, Polo Regionale di Como, via Valleggio 11, 22100 Como, Italy

Riassunto

goGPS è un software di navigazione sviluppato presso il Laboratorio di Geomatica del Politecnico di Milano (Polo di Como). Si basa su un filtro di Kalman in grado di elaborare differenze doppie di codice e di fase rispetto ad una rete di stazioni permanenti, sia in post-processamento che in tempo reale. Inoltre si avvale del supporto di un modello digitale del terreno per migliorare l'accuratezza in quota e può essere vincolato ad un reticolo di percorsi noti a priori (per esempio reticoli stradali o ferroviari). La principale innovazione introdotta da goGPS consiste nella possibilità di applicare un posizionamento cinematico relativo RTK a ricevitori di basso costo in singola frequenza, migliorando la loro accuratezza dagli usuali 2-4 metri a qualche decimetro. goGPS è stato sviluppato e collaudato utilizzando il ricevitore u-blox AEK-4T, in grado di restituire osservazioni grezze di codice e fase sulla portante L1, necessarie per calcolare le doppie differenze rispetto alla stazione di riferimento. Al fine di ottenere un posizionamento di precisione con tale ricevitore, si è reso necessario processare anche il rapporto segnale/rumore delle osservazioni GPS, definendo delle funzioni peso che non dipendano esclusivamente dall'elevazione del satellite. In questo lavoro sono presentati i risultati di una serie di prove volte alla calibrazione del software per ottenere un posizionamento ottimale con un ricevitore a basso costo. goGPS si dimostra generalmente in grado di posizionarsi con errori al di sotto del metro; tale errore si riduce significativamente introducendo vincoli di percorso. goGPS è sviluppato in ambiente MATLAB ed il codice sorgente è distribuito sotto licenza *open source* per agevolarne la diffusione sia a scopi didattici che di ricerca.

Abstract

goGPS is a navigation software developed at the Geomatics Laboratory of Politecnico di Milano (Como Campus). It is based on a Kalman filter which can process double differences of code and phase with respect to a network of permanent stations, both in post-processing and in real time. It can exploit a digital terrain model (DTM) in order to enhance the height accuracy and it can be constrained to a road or railway network. The innovation introduced by goGPS is the chance to apply a real time kinematic (RTK) positioning to low cost receivers with single frequency, improving their accuracy up to some decimetres. Here some calibration test results are presented, using the low cost receiver u-blox AEK-4T which can provide raw observations of code and phase; goGPS can generally make a positioning with errors lower than a metre; this error considerably decreases when path constraints are introduced. goGPS is developed in MATLAB environment and the source code is distributed under open source licence for facilitating its circulation with both educational and research purposes.

Struttura di goGPS

Il software di navigazione goGPS è stato sviluppato in ambiente MATLAB ed attualmente richiede l'utilizzo di un *notebook* con MATLAB installato per poter essere usato (in futuro è prevista la traduzione di goGPS in ANSI C, in modo da aumentarne la portabilità). Pertanto il *testing* di goGPS richiede l'uso di vari dispositivi connessi sia via cavo che in modalità *wireless*, oltre all'utilizzo di diversi protocolli e formati. Il sistema si divide in tre parti: il segmento *rover* (ricevitore GPS), il segmento *core* (goGPS installato su di un *notebook*) ed il segmento *master* (la stazione permanente che trasmette dati in formato RTCM attraverso il protocollo NTRIP). I segmenti *rover* e *core* sono connessi tramite cavo con interfaccia USB, mentre i segmenti *core* e *master* comunicano tra loro tramite Internet (Figura 1), sfruttando le tecnologie 3G come GSM/GPRS e UMTS.

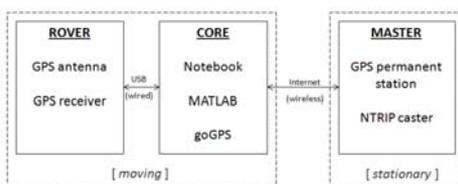


Figura 1. Schema del sistema di test di goGPS

Il ricevitore usato come *rover* è un u-blox AEK-4T. Il segmento *master* è costituito da una stazione permanente GNSS che appartiene alla rete GPS-Lombardia ed un *caster* NTRIP che trasmette le osservazioni grezze della stazione in formato RTCM 3.1. goGPS è progettato per poter funzionare sia in tempo reale che in *post-processing*.

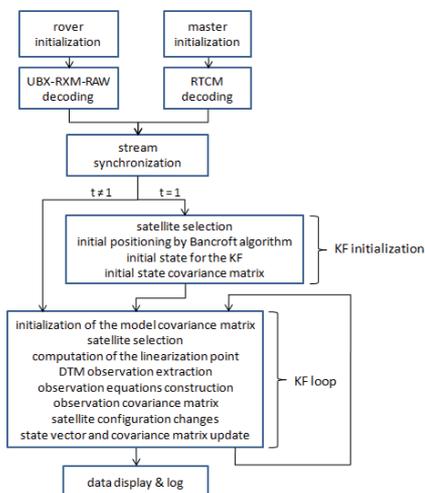


Figura 2. Diagramma del funzionamento di goGPS (modalità real-time)

Il filtro di Kalman implementato in goGPS include una fase di inizializzazione eseguita solo alla prima epoca e un algoritmo iterativo eseguito ad ogni epoca successiva (vedi Figura 2). I dati di input sono le osservazioni GPS del *master* e del *rover* e le osservazioni di altezza del DTM. In particolare l'estrazione delle altezze dal DTM è compiuta dopo aver suddiviso a priori il DTM in *tile* per evitare di caricare *dataset* troppo pesanti; il *tile* contenente il punto approssimato viene prima determinato, quindi caricato insieme ad un *buffer* di 8 *tile* adiacenti ed infine l'osservazione di altezza viene calcolata tramite un'interpolazione bilineare dei 4 nodi più vicini della griglia DTM. La matrice di covarianza delle osservazioni GPS è costruita combinando le varianze delle osservazioni ed

applicando pesi opportunamente scelti in funzione dell'elevazione e del rapporto segnale/rumore (C/N0) dei satelliti, come descritto in seguito; la varianza dell'osservazione di altezza è invece fissata ad un valore a priori. Una volta ottenuto il posizionamento del *rover*, il pannello principale di goGPS viene aggiornato con una visualizzazione della traiettoria percorsa nelle ultime N epoche, lo *skyplot* attuale ed un grafico coi valori di C/N0 (vedi Figura 3). Inoltre goGPS può visualizzare le posizioni stimate del *rover* su *Google Earth* epoca per epoca (Figura 4).

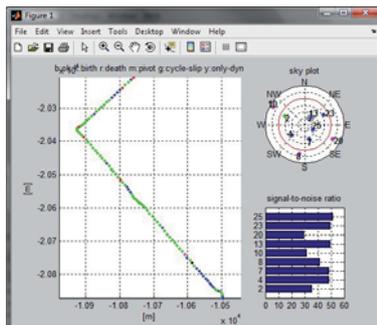


Figura 3. Pannello principale di goGPS

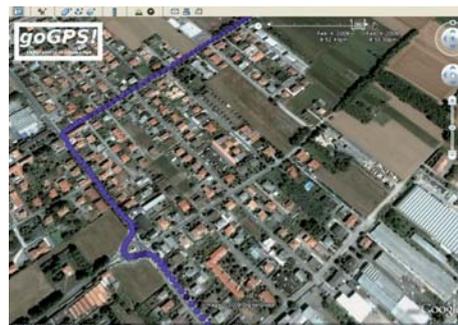


Figura 4. Il posizionamento di goGPS rappresentato su Google Earth

Test e risultati

Per valutare la qualità nel posizionamento con il ricevitore u-blox AEK-4T e per calibrare i parametri di goGPS sono stati condotti alcuni test in modalità statica a *baseline* corta utilizzando questo ricevitore con la sua antenna standard e la stazione permanente di Como. In questo modo è stato possibile studiare il comportamento e la qualità dei dati ricevuti dal AEK-4T senza le interferenze causate dal movimento del *rover* o dalla sua distanza dalla stazione permanente; in particolare l'antenna del AEK-4T è stata fissata su di un pilastro metallico per un periodo di circa 8h30m ad una distanza di 6.68 m dalla stazione permanente di Como sul tetto dell'edificio universitario. Le coordinate del pilastro metallico sono note con un'accuratezza di circa 0.5 cm (misurate con un ricevitore a doppia frequenza in posizionamento statico, post-processate con differenze doppie rispetto alla stazione permanente di Como). Le osservazioni di codice e fase provenienti dal ricevitore AEK-4T e dalla stazione permanente sono state processate alle doppie differenze (DD), ottenendo un totale di 28577 epoche sincronizzate, corrispondente ad un periodo temporale di 7h56m17s. Conoscendo a priori le posizioni dei ricevitori *master* e *rover*, è stato possibile derivare l'errore delle DD di codice e di fase per ogni epoca e per ogni satellite.

Qualità delle doppie differenze di codice col AEK-4T: La qualità delle differenze doppie di codice è stata valutata calcolando media e deviazione standard degli errori. Le statistiche sono state effettuate su tutti i dati, considerando un rapporto segnale/rumore (C/N0) minimo di 30 dBHz ed il valore di *cut-off* pari a 10°. I valori risultanti della media, della deviazione standard (STD) e dell'errore quadratico medio (RMSE) sono riportati in Figura 5.

Media [m]	STD [m]	RMSE [m]	N° campioni
0.565	2.982	3.035	795856

Figura 5. Statistiche dell'errore dell'AEK-4T nelle DD di codice

Gli errori nelle DD di codice mostrano un RMSE complessivo di circa 3 m. La distribuzione statistica dell'errore si presenta come una gaussiana a media non nulla, con un *bias* di circa 60 cm. Ciò può creare problemi nella stima della ambiguità di fase a partire dai dati di codice, essendo la lunghezza d'onda della portante pari a circa 20 cm.

Qualità delle doppie differenze di fase col AEK-4T: Le misure di fase tramite l'AEK-4T sono affette da ulteriori problemi rispetto alle misure di codice. In particolare gli errori nelle DD di fase presentano *trend* e discontinuità, probabilmente dovuti agli errori di *drift* di orologio del AEK-4T e/o a *cycle slip* (Odijk et al., 2007 descrive in dettaglio i salti discreti applicati da un ricevitore GPS basato su *chipset* ANTARIS per correggere i *drift* di orologio). Al fine di ottenere una stima grezza della deviazione standard dell'errore occorre rimuovere questi salti trasladando i valori dell'errore dopo ciascun salto di una quantità corrispondente al salto stesso. Fatto questo rimane solo una *trend*, che per alcuni satelliti risulta decrescente, per altri crescente. Tuttavia dall'equazione alle DD di fase ci si aspetterebbero serie temporali costanti su lunghi periodi dopo la rimozione dei *cycle slip*; il fenomeno fisico che produce questo comportamento non è tuttora chiarito e dovrà essere investigato ulteriormente in futuro. Questi *trend* sono stati rimossi interpolando i dati con un polinomio di terzo grado, sottratto poi ai dati stessi, con lo scopo di ottenere una media nulla. Le serie temporali così ottenute presentano ancora alcuni effetti sistematici; negli sviluppi futuri si pensa di usare un'interpolazione con *spline* per rimuovere questo tipo di *trend* e stimare in modo migliore la deviazione standard dell'errore. Una sua prima stima grezza è stata ottenuta escludendo a mano le epoche con un comportamento inusuale. I risultati sono riportati in Figura 6.

Media [m]	STD [m]	RMSE [m]	N° campioni
0.000	0.032	0.032	32668

Figura 6. Statistiche dell'errore dell'AEK-4T nelle DD di fase

Calibrazione dei pesi tramite valori di elevazione e C/N0: I pesi da assegnare alle misure GPS devono essere calibrati analizzando le variazioni dell'errore in funzione dell'elevazione e del C/N0 dei satelliti. Si devono considerare solo i valori di C/N0 acquisiti dal *rover*, poiché la qualità delle osservazioni acquisite dal ricevitore della stazione permanente è decisamente più alto. Le epoche disponibili sono state suddivise in classi diverse sulla base di intervalli di elevazione e C/N0. In particolare per ciascun satellite sono state considerate otto classi di elevazione (ciascuna di ampiezza pari a 10°, da un minimo di 10° allo *zenith*) e cinque classi di C/N0 (ciascuna di ampiezza pari a 5 dBHz, da un minimo di 30 dBHz a 55 dBHz). Come indice di qualità unico per ciascuna combinazione delle diverse classi di elevazione e C/N0 è stato calcolato l'RMSE.

Al fine di pesare propriamente le misure sulla base del loro C/N0, è stata concepita una funzione empirica che descriva, a meno di una costante, la varianza dell'errore di misura in funzione dei valori di C/N0:

$$W(CN0) = \begin{cases} 10^{-\frac{(CN0-s_1)}{\alpha}} \left(\frac{A}{10^{\frac{(s_0-s_1)}{\alpha}}} - 1 \right) \frac{CN0-s_1}{s_0-s_1} + 1 & CN0 < s_1 \\ 1 & CN0 \geq s_1 \end{cases} \quad [1]$$

Il parametro s_1 definisce la soglia oltre la quale il peso è impostato a 1 (cioè il valore di C/N0 oltre al quale le misure sono considerate "buone"); il parametro s_0 definisce il valore di C/N0 per cui la funzione è "forzata" ad avere un peso definito dal parametro A ; il parametro α definisce la curvatura della funzione peso.

La varianza dell'errore di misura nelle DD è sostanzialmente la somma delle varianze degli errori di ogni coppia satellite-ricevitore. Trascurando gli errori del ricevitore della stazione permanente rispetto a quelli dell'AEK-4T, la funzione peso per le DD può essere espressa in funzione del C/N0 dei due satelliti coinvolti:

$$W(CN0_1, CN0_2) = \frac{W(CN0_1) + W(CN0_2)}{2} \quad [2]$$

e risulta in una superficie usata per interpolare i valori empirici dell'RMSE (Figura 7).

Per quanto riguarda l'analisi dell'elevazione, i risultati mostrano una minore variabilità dell'RMSE rispetto al caso del C/N0 (Realini, 2009). In generale il valore di RMSE diminuisce all'aumentare

dell'elevazione fino a 50°, quindi torna a crescere. Questo aumento per alti valori di elevazione è probabilmente dovuto ad effetti di *multipath* nella direzione verticale, legati alla struttura metallica su cui era fissata l'antenna dell'AEK-4T. Dato che il C/N0 è chiaramente dominante sull'elevazione nell'analisi dell'RMSE e prendendo in considerazione il modo di pesare le osservazioni in funzione dell'elevazione descritto in Kirchner (2005), si è deciso di modificare la funzione peso moltiplicandola per una funzione inversamente proporzionale al seno al quadrato dell'elevazione.

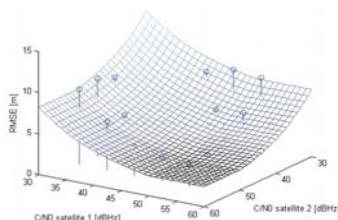


Figura 7. Funzione peso (superficie) e valori di RMSE (cerchi)

Test su strada

Infine sono stati compiuti dei test su strada per stimare le prestazioni di goGPS in situazioni meno controllate e più realistiche. Sono stati utilizzati quattro ricevitori GPS: un Leica GPS1200 come riferimento, un Leica GS20, un eBonTek eGPS 597 ed un AEK-4T usato per goGPS; le antenne dei ricevitori sono state montate sul tetto di un'auto. Una volta che i dati sono stati raccolti, scaricati e convertiti nello stesso formato, questi sono stati sincronizzati tra loro e sono state eliminate le epoche in cui uno o più strumenti hanno registrato interruzioni nella ricezione dei dati. Infine tutti i punti sono stati proiettati in UTM WGS84 al fine di averli su un piano (coordinate Est, Nord, h). L'assetto dell'auto ad ogni epoca t_0 è stato stimato interpolando le coordinate piane (Est, Nord) del GPS1200 da $t_0 - 2$ a $t_0 + 2$ con un polinomio di quarto grado e calcolando il versore tangente in t_0 . Una volta stimato l'assetto dell'auto, le posizioni degli altri strumenti sono state predette sulla base della loro distanza relativa rispetto al ricevitore GPS1200, usato come riferimento. L'errore di ciascuno strumento per ogni epoca è stato quindi stimato come distanza tra le posizioni predette e quelle restituite dallo strumento stesso (un esempio in Figura 8).

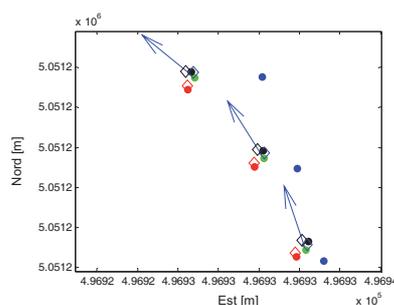


Figura 8. Posizioni osservate (cerchi pieni) di goGPS (nero), GS20 (rosso), eBonTek (blu) rispetto alle posizioni predette (quadrati vuoti)

Sono stati eseguiti vari test in diverse condizioni di visibilità del cielo, caratteristiche del percorso stradale (rettilinei, curve, ecc...), velocità dell'auto e morfologia del terreno. Si riporta ad esempio un test effettuato in condizioni di buona visibilità, muovendosi a velocità moderata su di un terreno pianeggiante. Dato che i dintorni di Como sono caratterizzati da aree collinari e/o densamente popolate, si è reso necessario allontanarsi dalla città, in cui si trova la stazione permanente, di circa 20 km. Per tale motivo occorre considerare che gli effetti atmosferici potrebbero non essere completamente rimossi dal metodo delle DD. I risultati del test sono riassunti in Figura 9.

Avendo notato che lo *skyplot* mostrava tre satelliti con un angolo di elevazione molto basso, l'efficacia della funzione peso in base all'elevazione è stata verificata aumentando il *cut-off* da 10° a 30°, in modo da escludere completamente i tre satelliti dalla stima. Il miglioramento ottenuto nelle prestazioni di goGPS (Figura 10) evidenzia come la funzione peso non sia ancora ottimale e richieda ulteriori correzioni.

	2D			3D		
	Media [m]	STD [m]	RMSE [m]	Media [m]	STD [m]	RMSE [m]
goGPS	1.13	0.67	1.31	2.45	1.57	2.91
eBonTek	4.03	1.70	4.37	6.18	1.94	6.47
GS20	0.30	0.15	0.34	0.70	0.43	0.82

Figura 9. Risultati del test su strada

	2D			3D		
	Media [m]	STD [m]	RMSE [m]	Media [m]	STD [m]	RMSE [m]
goGPS	0.78	0.47	0.91	1.26	0.93	1.56
eBonTek	4.03	1.70	4.37	6.18	1.94	6.47
GS20	0.30	0.15	0.34	0.70	0.43	0.82

Figura 10. Risultati del test su strada (con un *cut-off* maggiore)

Conclusioni

goGPS ha raggiunto una stabilità sufficiente per operare in tempo reale per ore senza interruzioni. Questa robustezza ci ha consentito di effettuare diversi test per ottenere informazioni utili sia sulla qualità del segnale acquisito dal AEK-4T che su come pesare le misure in base all'elevazione ed al rapporto segnale/rumore (C/N0) dei satelliti. L'analisi di questi dati ha di fatto consentito di impostare valori veritieri per le varianze di misura e di calibrare opportunamente i parametri del filtro di Kalman. Sono stati condotti test comparativi con altri strumenti a basso costo e ricevitori di alto livello, sia in ambiente controllato che in situazioni realistiche. goGPS è sempre riuscito ad ottenere prestazioni migliori degli altri strumenti *low cost* ed in certi casi ad ottenere accuratezze dello stesso ordine di grandezza del ricevitore professionale a singola frequenza (Leica GS20). Il principale risultato ottenuto da goGPS è di migliorare l'accuratezza dei ricevitori a basso costo dagli usuali 2-4 metri fino ad alcuni decimetri. goGPS è stato implementato con l'obiettivo di diventare un software completo e gratuito per la navigazione GPS, da utilizzare sia per scopi didattici che di ricerca: goGPS è un progetto *open source* disponibile a tutti (<http://sourceforge.net/projects/gogps/>).

Bibliografia

- Bancroft S., (1985) "An Algebraic Solution of the GPS Equations", *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-21(1), pp. 56-59
- Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J., (1992) "GPS Theory and Practice", *Springer*
- Kirchner M., Becker M., (2005) "The use of signal strength measurements for quality assessments of GPS observations", *Geodetic and Geodynamic Programs of the CEI Symposium G9, Reports on Geodesy*, vol. 2(73)
- Leick A., (1995) "GPS satellite surveying - Second edition", *John Wiley & Sons*
- Odijk D., Traugott J., Sachs G., Montenbruck O., Tiberius C., (2007) "Two Precision GPS Approaches Applied to Kinematic Raw Measurements of Miniaturized L1 Receivers", *Proceedings of ION GNSS 2007*, pp. 827-838
- Pertusini L., Realini E., Reguzzoni M., (2008) "GoGPS: un software per navigare vincolati a linee e superfici". *Atti della 12ª Conferenza Nazionale ASITA*, Vol. II, pp. 1627-1632
- Realini E., (2009) "goGPS free and constrained relative kinematic positioning with low cost receivers", *Ph.D. thesis*, Politecnico di Milano
- Sansò F., (2006) "Navigazione geodetica e rilevamento cinematico", *Polipress*
- Sorenson H. W., (1985) "Kalman Filtering: theory and application", *IEEE Press*