

3D01 測位衛星用高精度軌道・時計決定ソフトウェアの開発

○高須知二（技術コンサルタント）、笠井晶二（笠井デザインオフィス）

Development of Precise Orbit/Clock Determination Software for GPS/GNSS
Tomoji Takasu (Technical Consultant), and Shoji Kasai (Kasai Design Office)

Key Words: GPS, GNSS, Precise Orbit Determination

Abstract

This paper introduces the outline of the high-accurate and high-functional software package GpsTools (GT), that can process the GPS/GNSS observation data and determine various parameters, such as GPS/GNSS orbit/clock, station coordinates, receiver clock, tropospheric delay and Earth Rotation Parameters. GT uses the undifferenced dual-frequency carrier phases as the basic observables and estimates the parameters by EKF (Extended Kalman Filter). GT provides the POD (Precise Orbit Determination) of a satellite equipped with GPS/GNSS receivers. This paper also shows the evaluation of the GT estimation accuracy using actual GPS observation data.

1. はじめに

測位衛星の観測データを処理し、衛星軌道・時計をはじめとする各種パラメータの高精度推定を行うための高機能解析ソフトウェアパッケージの開発を行った。以下に開発した精密解析ソフトウェア GpsTools (以下"GT"と呼ぶ)^{[1][2][3]}の構成、機能及び仕様につき簡単に紹介を行った後、GPS の実観測データを使って実際に解析を実施し推定精度の評価を行った結果につき報告する。

2. 仕様

2-1 特徴

GT は測位衛星の観測データを処理し、衛星軌道・時計をはじめとする各種パラメータの高精度推定を行うための高機能解析ソフトウェアパッケージである。GT の特徴は以下の通りである。

- ・ゼロ差搬送波位相観測データを使った精密解析
- ・カルマンフィルタによるパラメータ推定
- ・精密観測補正、精密衛星運動・状態遷移モデル
- ・GUI によるパラメータ設定・解析実行
- ・各種ユーティリティの提供
- ・ユーザ利用可能な MATLAB ライブラリの提供

GT の解析実行画面例を図 1 に示す。GT で推定可能な主なパラメータを以下に示す。

- ・測位衛星軌道・時計誤差
- ・観測局・受信機位置座標
- ・受信機時計誤差
- ・対流圏遅延パラメータ

- ・地球回転パラメータ、地球中心オフセット

GT では設定によりこれらのパラメータを既知の値に固定し他パラメータを推定することもできる。

衛星軌道・時計決定時には、通常観測局座標を既知の値に固定して受信機時計誤差、対流圏遅延パラメータ等と共に衛星位置・時計誤差を未知パラメータとして推定する。衛星軌道・時計を IGS 精密暦等の高精度推定値に固定して観測局座標等のパラメータを推定する場合、精密単独測位 (PPP: Precise Point Positioning)^[4] と呼ばれる。GT による PPP には固定観測局の座標を求めるスタティック PPP の他に、移動体の位置を観測エポック毎に推定するキネマティック PPP があり、キネマティック PPP を使って GPS 受信機を搭載した低軌道(LEO) 衛星の精密軌道決定を行うことも可能である。

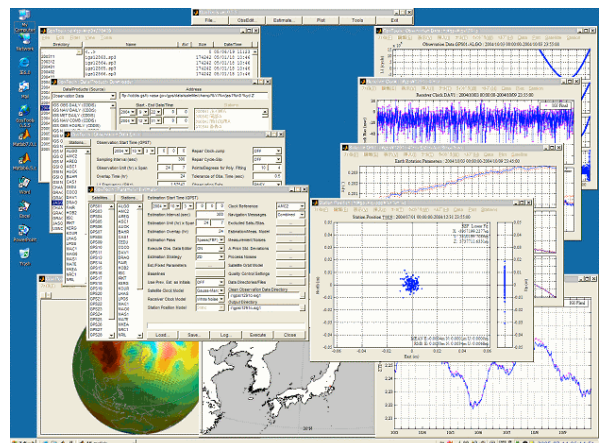


図 1 GpsTools (GT) 解析実行画面例

2-2 構成・機能

GT の機能ブロック構成図を図 1 に示す。以下に GT を構成する機能ブロックとその主な機能を示す。

(1) 観測データ編集

- ・サイクルスリップ検出・編集
- ・クロックジャンプ修復
- ・コードスムージング

(2) パラメータ推定

- ・衛星運動モデル計算
- ・状態遷移モデル計算
- ・観測モデル (O-C) 差、観測行列計算
- ・カルマンフィルタ・スムーザによる推定

(3) ユーティリティ

- ・精密暦補間
- ・マルチパス推定
- ・推定結果形式変換
- ・推定結果グラフ化・表示
- ・データ・プロダクトダウンローダ

(4) MATLAB ライブラリ

GT の最新バージョンである Ver.0.5.6 のの主な仕様を表 1 に示す。

表 1 GpsTools (ver.0.5.6) 主な仕様

項目	設定
ソフトウェア環境	MATLAB6.5.1, 7.0.1
観測データ形式	RINEX2.10
擬似距離	P1+P2 または C1+P2+C1-P1 補正
推定方式	EKF+Backward 推定・スムーザ
基本観測量	ゼロ差電離層フリー搬送波位相
受信機時計	単独測位による 1 次推定
衛星アンテナオフセット	IGS 標準オフセット+PCV
受信アンテナオフセット	IGS_01.PCV, NGS モデル等
対流圏遅延	Saastamoinen 他
マッピング関数	NMF または COSZ
電離層遅延	電離層フリー線形結合で除去
観測点位置変動	固体地球潮汐, 海洋荷重 他
相対論補正	衛星時計及び Bending Effect
Phase-Windup	Wu モデル
マルチパス	補正可能
搬送波位相ハイス	実数(FLOAT)推定
地球重力	JGM-3, 最大 12 次 固体地球潮汐, 海洋潮汐他
他天体重力	月・太陽, JPL DE405
太陽輻射圧	ROCK4/42, CODE RPR, GSPM 他
基準座標系	ITRF 及び ICRF
歳差・章動	IAU1976/1980, IERS1996
ERP 変動	Ray Model
地球回転パラメータ	IERS Bulletin B, C04, IGS ERP
観測局座標	ITRF97, ITRF2000, IGB00, GSI 他

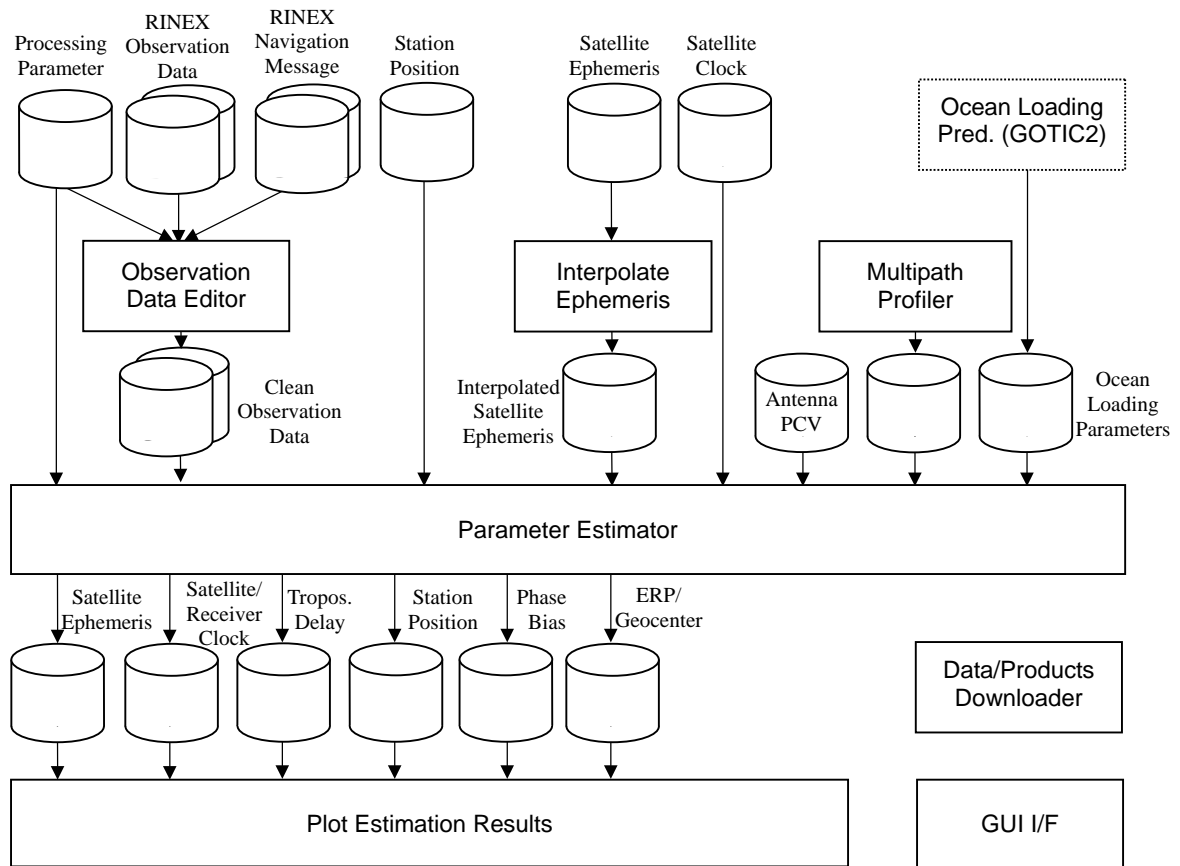


図 1 GpsTools ブロック構成図

3. 推定精度の評価

3-1 GPS 衛星軌道・時計

IGS (International GNSS Service) 観測局の GPS 観測データを使用し、GT による GPS 衛星軌道・時計決定精度の評価を行った。主な推定条件を表 2 に示す。

表 2 GPS 衛星・時計推定条件

項目	設定
測位衛星	GPS 29 衛星
観測局	IGS 40 観測局
推定期間	GPS Week 1291 (2004/10/3~9)
初期軌道・時計	放送暦
観測局座標	前週 PPP 結果に固定
フィルタパス	3パスフィルタ・スムーザ
推定時間・間隔	24H+オーバーラップ 24H, 5分間隔
対流圏遅延	Saastamoinen + NMF
地球回転パラメータ	推定
衛星運動モデル	
地球重力	JGM-3 最大 8 次+潮汐補正
3 体問題	月・太陽重力
太陽輻射圧	CODE RPR モデル
相対論	IERS Conventions 1996
同時推定パラメータ	対流圏遅延、受信機時計、ERP
最低仰角	10 度
基準時計局	AMC2

IGS 最終暦 (公称精度 5 cm 以下) と比較した GPS 衛星軌道推定精度を表 3 及び図 3 に示す。なお衛星位置推定値は慣性座標系で求まるため、同時推定した地球回転パラメータを使って地球固定座標に変換して IGS 最終暦と比較した。

同様に IGS 時計 (公称精度 0.1 nsec 以下) と比較した GPS 衛星時計バイアスの推定精度を表 4 及び図 4 に示す。推定値は基準時計局相対値として求まるため、比較に当たっては衛星時計バイアスの平均を 0 として相対的な時計誤差を評価している。

表 3 GPS 衛星軌道推定精度

	3D	Radial	Along-Track	Cross-Track
衛星位置 RMS 誤差	5.18 cm	1.97 cm	3.42 cm	3.12 cm

(IGS Final 比較, 全衛星平均)

表 4 GPS 衛星時計バイアス推定精度

	With BIAS	Without BIAS
時計バイアス RMS 誤差	0.135 nsec	0.099 nsec

(IGS Final 比較, 全衛星平均)

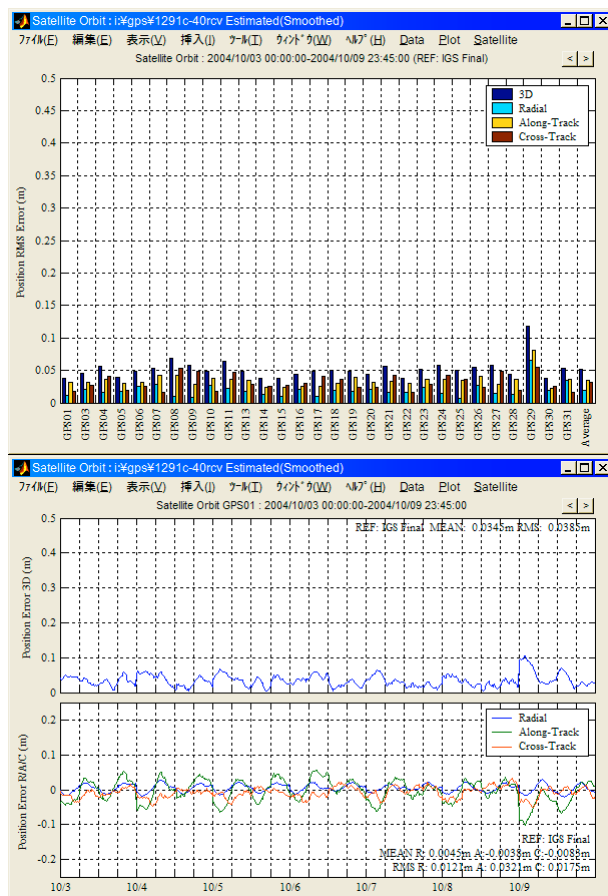


図 3 GPS 衛星軌道推定誤差 (上:衛星毎,下:PRN01, IGS Final 比較)

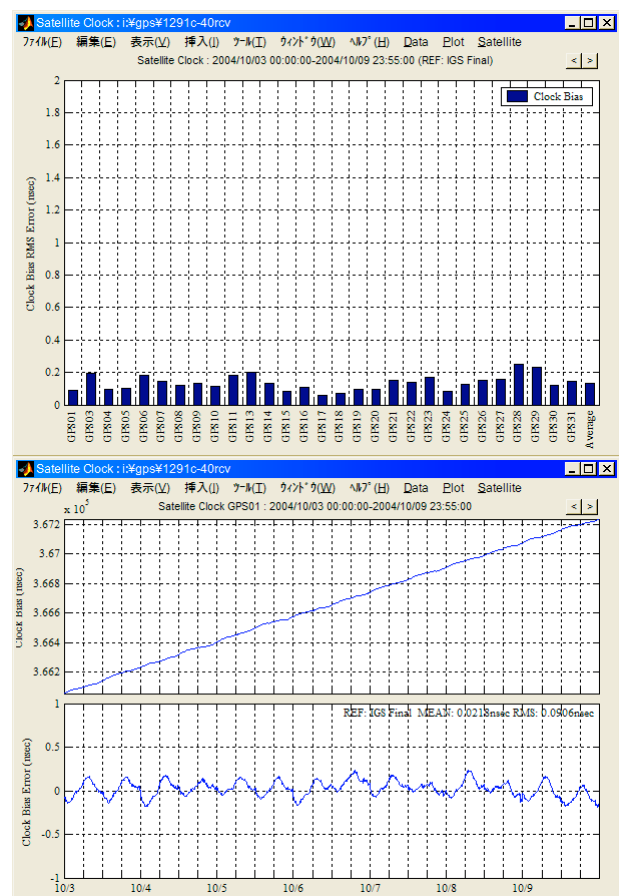


図 4 GPS 衛星時計推定誤差 (上:衛星毎,下:PRN01, IGS Final 比較)

3-2 観測局位置座標、対流圏遅延

次に GT によるスタティック PPP により IGS 基準座標局位置座標および対流圏遅延を推定し精度評価を行った。主な推定条件を表 5 に示す。

表 5 スタティック PPP 条件

項目	設定
測位衛星	GPS 29 衛星
観測局	IGS 79 基準座標局
推定期間	GPS Week 1291 (2004/10/3~9)
初期座標	単独測位+誤差 100m
衛星軌道・時計	IGS Final
フィルタパス	2 パスフィルタ・スムーザ
推定時間・間隔	24H+オーバーラップ 0H, 5 分間隔
対流圏遅延	Saastamoinen + NMF
地球回転パラメータ	IGS Final
測位モード	スタティック PPP
同時推定パラメータ	受信機時計
最低仰角	10 度

IGb00 (ITRF2000) 座標と比較した観測局位置座標推定精度を表 6 及び図 7~8 に示す。また天頂全遅延 (ZTD) 推定値を IGS 推定値 (公称誤差 4mm 以下) と比較した精度を表 7 及び図 9 に示す。

表 6 観測局位置座標推定精度

	水平(東西)	水平(南北)	垂直
RMS 誤差	3.6 mm	3.2 mm	7.6 mm
Repeatability	2.1 mm	1.4 mm	4.6 mm

全観測局平均, IGS00 座標比較

表 7 観測局対流圏遅延推定精度

	RMS 誤差
天頂全遅延	4.6 mm

全観測局平均, IGS ZPD 比較

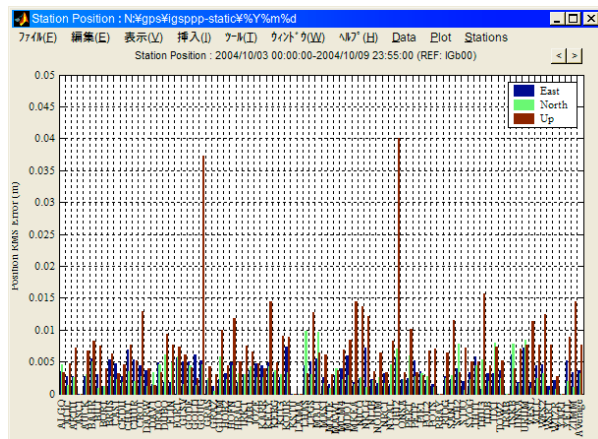


図 7 観測局毎推定位置座標 RMS 誤差

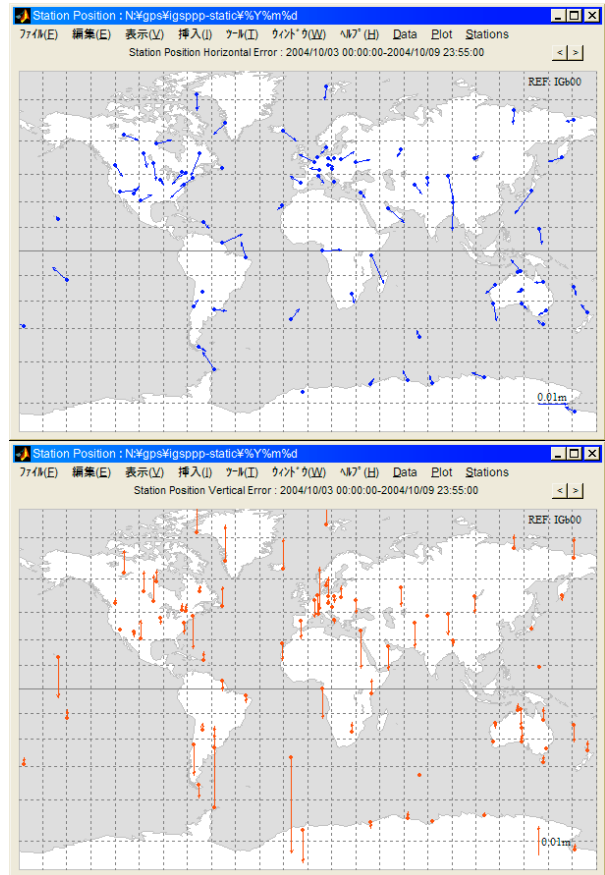


図 8 推定位置座標平均誤差 (上:水平, 下:垂直)

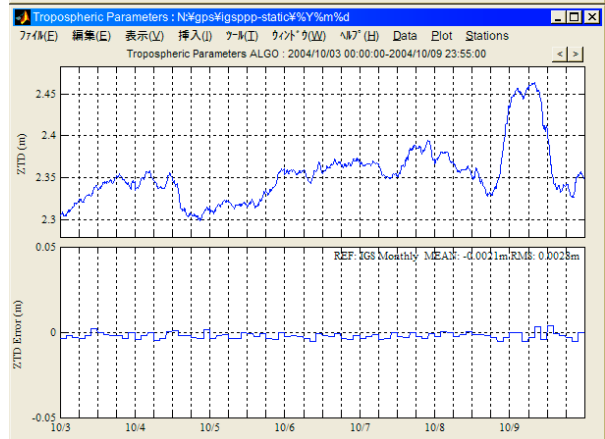
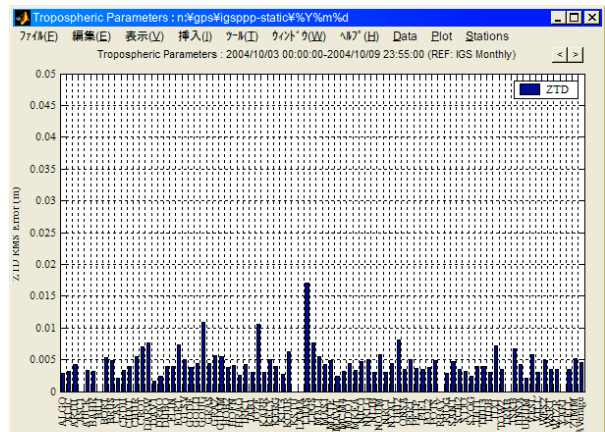


図 9 推定 ZTD/RMS 誤差 (上:観測局局毎, 下:ALGO)

3-3 低軌道 (LEO) 衛星軌道決定

最後に GT によるキネマティック PPP を使った低軌道 (LEO) 衛星の軌道決定精度の評価を行った。衛星としては GPS 観測データ及び精密軌道決定結果が公開されている GRACE 衛星を選んだ。なお GPS 観測データのみを使用し、衛星運動モデルは使用していない。主な推定条件を表 8 に示す。

表 8 低軌道 (LEO) 衛星軌道決定条件

項目	設定
測位衛星	GPS 29 衛星
LEO 衛星	GRACE A, GRACE B
推定期間	GPS Week 1277 (2004/7/18~24)
初期座標	単独測位+誤差 100m
衛星軌道・時計	IGS Final
フィルタパス	3パスフィルタ・スムーザ
推定時間・間隔	24H+オーバーラップ 0H, 5 分間隔
対流圏遅延	なし
地球回転パラメータ	IGS Final
測位モード	キネマティック PPP
同時推定パラメータ	受信機時計
最低仰角	0 度

LEO 衛星軌道推定値を GRACE Level 1B 軌道と比較した精度を表 9 及び図 10~11 に示す。GRACE Level 1B 軌道は NASA JPL が GIPSY/OASIS-II を使って Reduced Dynamic 法により決定したもので、SLR 観測値と比較した RMS 誤差で 5.3 cm (GRACE A), 6.4 cm (GRACE B) 程度の精度があるとされている。^[5]

表 9 低軌道 (LEO) 衛星軌道決定精度

	3D	Radial	Along-Track	Cross-Track
GRACE A	5.49 cm	3.91 cm	2.92 cm	2.53 cm
GRACE B	7.48 cm	5.58 cm	3.67 cm	3.38 cm

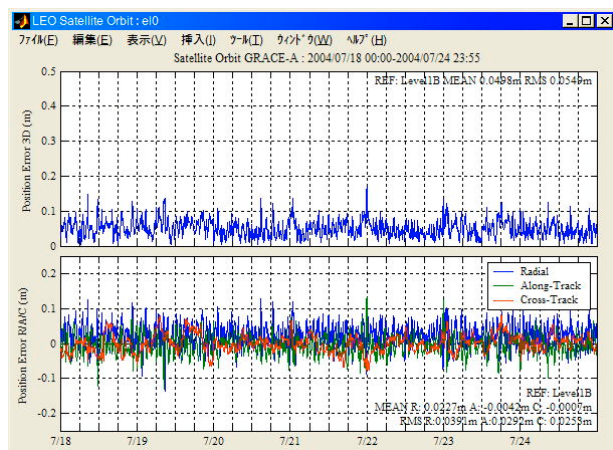


図 10 GRACE A 衛星軌道決定誤差

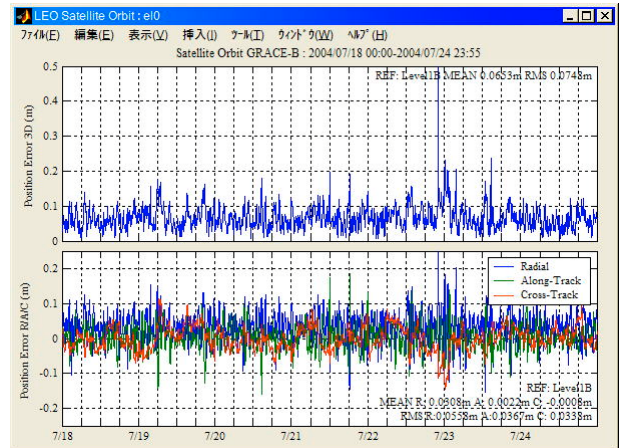


図 11 GRACE B 衛星軌道決定誤差

4. おわりに

測位衛星用高精度、高機能解析ソフトウェアパッケージ GpsTools (GT) を紹介し、推定精度の評価を行った結果について簡単に紹介した。

精度評価の結果、GT の推定精度は一般的に使用されている精密解析ソフトウェアと概ね同等レベルの水準を達成していると考えられる。

今後はより高精度化に向けてモデルや推定手法の改良を行うのと同時に、安定性や機能性向上、使い勝手の改善等ソフトウェアプロダクトとしての品質向上を進めていく予定である。

参考文献

- [1] T. Takasu et al., Precise Orbit Determination of GPS Satellites using Carrier Phase Measurements, The 15th Workshop on JAXA Astrodynamics and Flight Mechanics, 2005
- [2] 高須他, GPS 衛星軌道及び時計準リアルタイム推定アルゴリズムの開発及びその評価, 2005 年地球惑星科学関連学会合同大会
- [3] 高須他, GPS による精密単独測位 (PPP) 法の精度評価, 電子情報通信学会技術研究報告, SANE 2005-45, July 2005
- [4] J. F. Zumberge, Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, Journal of Geophysical Research, Vol. 102, No. B3, p.5005-5017, 1997
- [5] C. Dunn et al., Instrument of GRACE : GPS Augments Gravity Measurements, GPS World, 2003