

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
Development and evaluation of GPS satellite orbit and clock near-realtime estimation algorithm

高須知二 笠井晶二

Tomoji Takasu¹ Shoji Kasai²

Abstract

For the realtime precise positioning by GPS, it is necessary to provide high precision satellite orbit and clock. We have developed a near-realtime algorithm to estimate high precision GPS satellite orbit and clock. In the algorithm, using zero-difference ionosphere-free carrier phase as the basic observable, satellite orbit and clock are estimated by Extended Kalman Filter (EKF). Tropospheric delay, receiver clock, ERP and phase bias are obtained as well. Measurement model contains precise corrections such as antenna phase center offsets, relativistic effects and site displacement by earth tides. The satellite orbit model incorporates geogravity, moon/sun gravity and various SRP models. For the test, using IGS 40 stations' observation data as input, GPS satellite orbit and clock were estimated. Compared with IGS final orbit/clock, satellite position 3D RMS errors were 9.3cm (1pass) and 6.0cm (3pass). Clock bias RMS errors were 0.16ns (1pass) and 0.15nsec (3pass).

1 はじめに

GPS を使ったりリアルタイム精密測位のためには即時利用可能な衛星軌道推定値の高精度化が重要である。また近年、PPP (高精度単独測位) の需要が高まっており、PPP を利用するためには衛星軌道と同等精度の衛星時計推定値が必要となる。

現在、一般に観測直後に利用できる高精度衛星軌道及び時計推定値としては IGS (International GNSS Service) ウルトラ速報暦 (Ultra-Rapid) (表 1 参照) があるが、決定値が使用可能になるまで最大 6H 程度の時間遅れがある。予報値は即時利用可能だが衛星時計推定値の精度が悪い。また精度の悪化した異常推定値が含まれる場合がありユーザ側でのスクリーニングが必要であり取り扱いが難しい。

以上の背景により GPS の衛星軌道及び時計を準リアルタイムで高精度に推定するアルゴリズムを開発し推定精度及び性能の評価を行った。

表 1 IGS ウルトラ速報暦概要

項目	内容	備考	
更新周期	4 回/日 (6H 毎)		
提供推定値	決定値 (24H)+予報値 (24H)		
時間分解能	15 分間隔		
精度	衛星軌道	決定値 : <5cm、予報値 : ~10cm	公称値
	衛星時計	決定値 : ~0.2ns、予報値 : ~5ns	

¹ 技術コンサルタント、ttaka@gpspp.sakura.ne.jp, <http://gpspp.sakura.ne.jp>

² (有) 笠井デザインオフィス、kasaido@tky.3web.ne.jp

2 推定アルゴリズム

2.1 推定手法

高精度の GPS 衛星軌道推定には搬送波位相観測値の二重差 (DD) が使われることが多いが、本アルゴリズムにおいてはゼロ差 (ZD、undifferenced) 搬送波位相を基本観測量として使用するものとした。これは衛星軌道と同時に衛星時計を推定する必要があること、PPP による推定機能を同時実装しなかった等の理由による。ゼロ差と二重差を使った推定の比較を表 2 に示す。

表 2 ゼロ差・二重差を使った推定の比較

項目	ゼロ差 (ZD)	二重差 (DD)
衛星・受信機時計	同時推定	別途推定が必要
対流圏遅延量	絶対値推定	バイアス補正が必要
搬送波位相バイアス	整数化困難 (float 解)	整数化可能 (fix 解)
観測モデル	精密観測補正モデルが必要	短基線では差分により誤差要因が軽減される
PPP	同時に実装が容易	別途実装が必要

衛星軌道・時計の推定手法としては一般的にリアルタイムの衛星軌道決定に使用される拡張カルマンフィルタ (EKF) を用いた。衛星運動モデルの数値積分により軌道の伝播を行い同時に得られる状態遷移行列を使って状態量の分散・共分散行列の時間更新を行う。また観測値ーモデル差 (O-C) 及び観測モデルの偏微分係数行列から推定状態量及び分散・共分散行列を更新する。

今回、推定値の高精度化のため forward フィルタに加え backward フィルタ及び iteration 機能を付加した。カルマンフィルタには同時に backward smoother を実装することが多いが backward smoother は推定過程の分散・共分散行列をすべて記憶する必要があり推定状態数が多い場合メモリ容量・実行時間等の点で制約が多い。その点 backward フィルタは forward フィルタを若干改良するだけで良く実装も容易である。図 1 にリアルタイム推定用の 1pass フィルタ及び高精度推定用の 3pass フィルタ (backward フィルタ及び iteration) の概念図を示す。

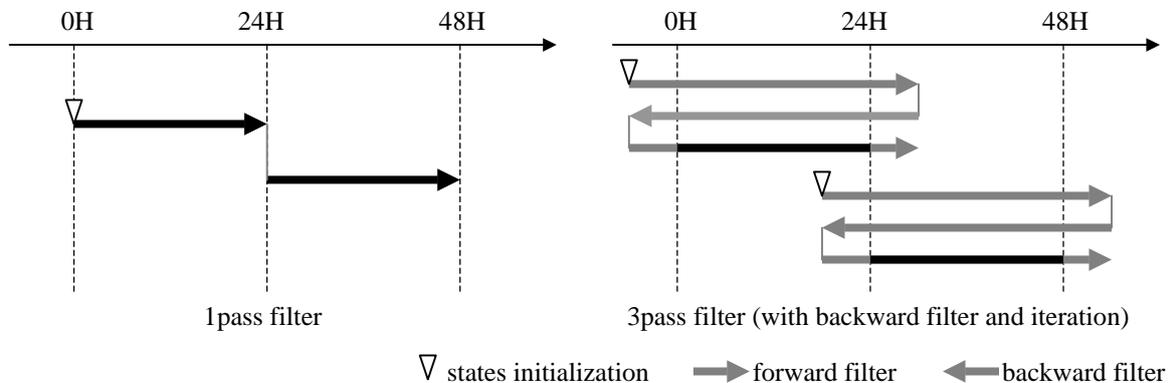


図 1 推定フィルタ概念図

2.2 観測データ前処理

搬送波位相観測値を推定に使う場合 Cycle-Slip の検出・除去が必須である。本アルゴリズムでは観測データの前処理としてゼロ差のまま Cycle-Slip 検出を行っている。Cycle-Slip 検出として Melbourne Wübbena Wide Lane 及び Geometry-Free 線形結合の飛びを検出する方式^[1]を使用した。Cycle-Slip の補修機能も評価したが必ずしも高精度化に結びつかないこと、管理された固定観測局では頻度がそれほど多くないことより最終的に補修は行っていない。Cycle-Slip が発生した場合、搬送波位相バイアスが連続にならないため、Slip 前後を別アーキとみなして別々の搬送波位相バイアス値を推定する。その他前処理では、一部受信機では P1-C1 バイアス^[2]と呼ばれる固定バイアスが時計推定値に乗るためその補正を行っている。

2.3 観測モデル

二重差と比べてゼロ差モデルの場合差分により観測誤差要因が除去されないため精密な観測補正モデルが必要となる。本アルゴリズムでは観測量に概ね 3mm 以上影響を与える誤差要因のうちモデル化可能なものを観測モデルに取り入れた。表 3 に本アルゴリズムで使用している観測補正モデルを示す。

表 3 観測補正モデル

項目		モデル
幾何距離	伝播遅延	重力を考慮した衛星運動二次近似及び Light Time Iteration
	受信機時計誤差	単独測位による受信機時計推定値を使った補正
衛星時計・受信機時計誤差		基準時計局相対で推定
電離層遅延		Ionosphere-Free 線形結合で一次項除去
対流圏遅延	全遅延モデル	天頂全遅延 ZTD 及び水平勾配 G_{north}, G_{east} 推定 $M_{dry}(El) T_{dry} + M_{wet}(El) (1 + (G_{north} \cos Az + G_{east} \sin Az) / \tan El) (ZTD - T_{dry})$ (M_{dry}, M_{wet} : mapping 関数, T_{dry} : a priori モデル dry)
	a priori モデル	Saastamoinen ^[3] または modified Hopfield ^[4]
	mapping 関数	COSZ または NMF (Niell Mapping Function) ^[5]
衛星アンテナ位相中心		BlockII/IIA: (0.279, 0, 1.023) m, BlockIIR: (0, 0, 0) m
受信アンテナ位相中心		IGS 標準アンテナ PCV パラメータ (IGS_01.PCV)
マルチパス		搬送波マルチパスプロファイルによる補正
phase-windup 効果		アンテナ相対位置回転に伴う位相進行補正 (Wu モデル) ^[6]
相対論効果		衛星時計 + Bending Effect
観測点位置変位	固体地球潮汐	IERS Conventions 1996 Ch.7 ^[7] Step1: in-phase degree2-3, out-of-phase, latitude dependence Step2: contribution from the diurnal band : K1 only
	海洋荷重	IERS Conventions 1996 Ch.7、11 分潮モデル (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, Mf, Mm, Ssa) 海洋潮汐 NAO.99b (GOTIC2) ^[8]
	極運動潮汐	IERS Conventions 1996 Ch.7
地球回転パラメータ変動		Sub-daily Variation by Ray Model
搬送波位相バイアス		擬似距離により除去、位相バイアス残差を推定 (float 解)

2.4 状態遷移モデル

衛星運動モデルには概ね 10^{-9}m/sec^2 以上の加速度を与える摂動要因を編入した。本アルゴリズムで使用している衛星運動モデルを表 4 に示す。GPS 衛星の高度では太陽輻射圧 (SRP) の影響が比較的大きく 10^{-7}m/sec^2 程度の摂動を与えるため SRP モデルの高精度化が重要である。本アルゴリズムでは一般に使用されている GPS 衛星の SRP モデルである ROCK4/42^{[9][10]} に加え、より精密化されたモデルである GSPM.04b^[11]、CODE^[12] を比較評価し、最も高精度のものを使用するものとした。

衛星時計の状態遷移モデルとしては 1 次 Gauss-Marcov 過程を採用した。衛星時計はまれにしか時計ジャンプが発生しないため White-Noise モデルを使用するより高精度となる。受信機時計の状態遷移は White-Noise モデル、対流圏遅延パラメータ、SRP モデルパラメータ及び地球回転パラメータは Random Walk 過程とした。これらの状態量のプロセスノイズについてはモデルから得られる概算値を基に推定結果を見てチューニングを行っている。

表 4 衛星運動モデル

項目	モデル	
地球重力	JGM-3 (最大 12 次) ^[13]	
他天体重力	月・太陽 (質点)、天体暦 : JPL DE/LE 405 ^[14]	
SRP モデル	ROCK4/42 (T10,T20,T30)+scale,ybias 推定 GSPM.04b+scale,ybias 推定 CODE+D0,Y0,B0,Z0,X10,X30 推定	
食モデル	円筒モデルまたは半影・本影モデル (地球及び月)	
潮汐効果	地球固体潮汐	IERS Conventions 1996 Ch.6 frequency independent: 2,3 次, frequency dependent: K1 only
	海洋潮汐	IERS Conventions 1996 Ch.6 8 分潮 2,3 次 (CSR2.0)
	極運動潮汐	IERS Conventions 1996 Ch.6 $\Delta C_{21}, \Delta S_{21}$
相対論効果	IERS Conventions 1996 Ch.11	

2.5 基準座標系

本アルゴリズムで使用している基準座標系及びその変換モデルを表 5 に示す。衛星に関しては地球中心慣性座標系 (ECI) で推定し、最終的に地球固定座標系に変換している。地球中心オフセットのため厳密には ECI と地球中心地球固定座標系 (ECEF) の原点は一致しないが IGS 精密暦の軌道は ECI 原点を原点とした地球固定座標系で表されている^[15] ため本アルゴリズムでは IGS に合わせている。なおグローバルに 1cm 以下の測位精度を得るためには地球中心オフセットの考慮が必要になるので注意が必要である。

表 5 基準座標系及びその変換モデル

項目	内容
地球中心地球固定座標 (ECEF)	ITRF2000 (IGS00, IGb00)
地球中心慣性座標 (ECI)	J2000.0 平均赤道座標 (ICRF)
歳差・章動モデル	IAU1976 歳差、IAU1980 章動+章動補正(<i>dpsi,deps</i>)
地球回転パラメータ	IERS Bulletin B、IGS ERP または推定 (<i>xp,yp,UTI-UTC</i>)
地球中心オフセット	0 固定または推定 (<i>dx,dy,dz</i> 及び <i>scale</i>)

2.6 推定パラメータ

本アルゴリズムで推定可能なパラメータを表 6 に示す。これらのパラメータは既知量に固定または強く拘束することもできる。

衛星軌道・時計推定時には、観測局位置を既知の値に固定し他のパラメータを推定する。また PPP モードでは衛星軌道及び衛星時計を IGS 精密暦等の値に固定し、観測局位置等のパラメータを推定する。

表 6 推定可能パラメータ

項目	内容
衛星軌道	衛星位置・速度 x,y,z,vx,vy,vz (ECI)
衛星時計	時計バイアス dt^s 、時計ドリフト ddt^s (基準時計局相対)
受信機時計	時計バイアス dt_r (基準時計局相対)
対流圏遅延	天頂全遅延 ZTD 、水平勾配 G_{north}, G_{east}
SRP パラメータ	太陽輻射圧モデルによる
観測局位置	観測局位置座標 x,y,z (ECEF)
地球回転パラメータ	$xp,yp,UTI-UTC$
地球中心オフセット	$dx,dy,dz,scale$
搬送波位相バイアス	衛星－観測局、アーク毎

2.7 品質管理

カルマンフィルタの場合、最小二乗法等に比較し異常データが推定結果に与える影響が大きい。また GPS 衛星の場合 **Repositioning** と呼ばれる軌道制御が事前通知されずに行われることがあり、この際衛星運動にモデル化されていない加速度が発生し軌道推定精度が極端に悪化する。何も対策を行わないと当該衛星だけでなく他の衛星に影響を与えて全推定値の精度が悪化する。従って異常データや **Repositioning** を検出しこれらのデータを除外、除去することが高精度化をはかるため重要である。本アルゴリズムではこの目的で以下の対策を行っている。

- ・ Prefit 残差チェック、アウトライアの除去
- ・ Postfit 残差チェック、アウトライアの除外・再フィルタ
- ・ 衛星毎、観測局毎統計情報 (アウトライア率、Prefit 残差 RMS、Postfit 残差 RMS、正常データ欠損時間等)のチェック、異常衛星・観測局の除外・再推定

3 実装

以上で述べた推定アルゴリズムを MATLAB プログラムとして実装した。座標変換、衛星運動方程式、観測モデル等の実行時間を支配する主要サブルーチンは高速化のため C 言語 (MEX) で実装した。また行列演算は実行 CPU に最適化した高速行列演算ライブラリ (Intel MKL) を使用している。

4 推定結果の評価

4.1 推定条件

実装したプログラムを使用し、公開されている IGS 観測局の観測データを入力に、2 種類の条件で GPS 衛星軌道・時計を推定した。主な推定条件を表 8 に示す。ここで 1pass 推定はリアルタイムでの推定、3pass 推定は時間的な制約を設けずに高精度を狙った推定条件である。なお観測局位置は地球中心オフセットの影響を避けるため、推定期間の前週の IGS 最終暦と観測データを使用して PPP モードで推定した座標値に固定した。

表 8 主な推定条件

項目		1pass 推定	3pass 推定
推定期間		GPS Week1291(2004/10/3~9)	←
推定衛星		GPS 29 衛星	←
観測局		IGS 観測局 40 局 (図 2)	←
推定パス		1pass (forward filter のみ)	3pass (backward+iteration)
推定時間単位		24H	24H+12H×2(オーバーラップ)
推定時間間隔		5 分	←
観測補正モデル		マルチパス以外全補正	←
最低仰角		10 度	←
衛星 運動 モデル	地球重力	8 次	←
	SRP モデル	CODE+D0,Y0,B0,Z0 推定	←
	潮汐効果	固体地球+海洋潮汐	←
推定量 初期値	衛星位置・速度	前日推定最終値	放送暦
	衛星時計	前日推定最終値	放送暦
	受信機時計	単独測位により推定	←
	SRP パラメータ	前日推定最終値	前月推定値平均
	対流圏遅延 ZTD,水平勾配	前日推定最終値	モデル+標準大気
	ERP	前日推定最終値	IERS Bulletin B
位相バイアス		疑似距離を使用し推定	←
観測局位置		前週 PPP 推定値に固定	←

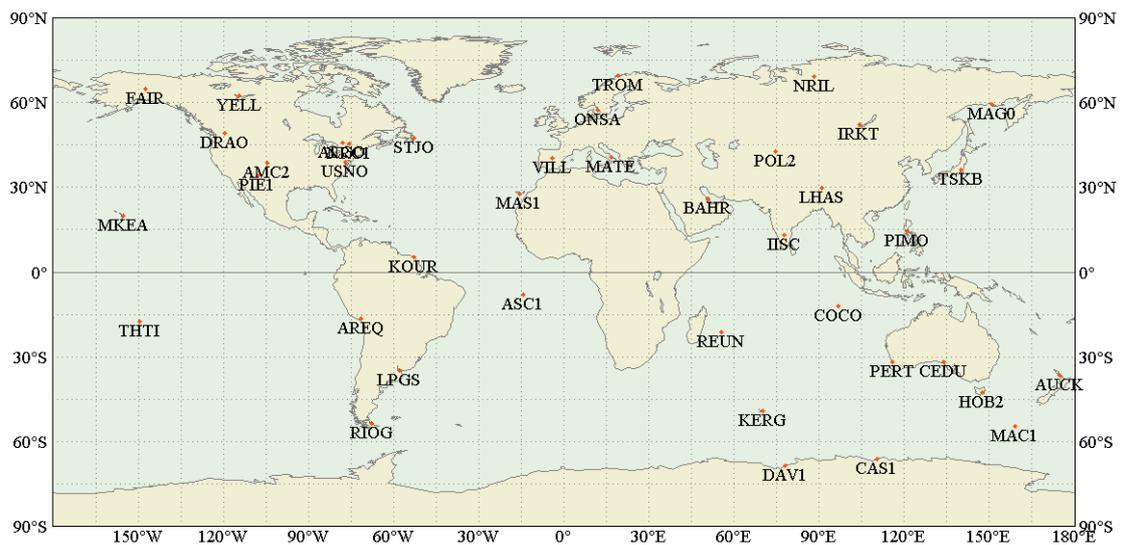


図 2 IGS 観測局の位置

4.2 衛星軌道・時計推定精度

前記条件を使って GPS 衛星軌道・時計を推定した結果を IGS 最終暦 (公称精度、衛星軌道：5cm 以下、衛星時計：0.1ns 以下)と比較した結果を表 9、10 及び図 3～6 に示す。なお軌道は衛星位置推定値の 3D RMS 誤差、時計は衛星時計のアンサンブル平均を基準とした推定誤差である。表中には比較のため IGS ウルトラ速報暦、速報暦、及び IGS 解析センタ最終暦の精度を記した。また推定に要した処理実行時間を表 11 に示す。

1pass 推定値に関しては IGS ウルトラ速報暦の決定値と概ね同程度であり即時利用可能な予報値よりかなり良い。3pass 推定値に関しては一部 IGS 解析センタ最終暦より若干悪いが、IGS 最終暦が IGS 解析センタ最終暦の加重平均で決定されていることを考慮すると IGS 解析センタ最終暦とほぼ同程度と考えられる。

表 9 リアルタイム・準リアルタイム推定値の精度

衛星軌道・時計		解析ソフトウェア	RMS 誤差 (全衛星平均)	
			衛星軌道	衛星時計
1pass 推定値		GpsTools ver.0.5.4	9.3cm	0.16ns
IGS ウルトラ 速報暦	予報値	—	14.9cm	1.98ns
	決定値	—	7.7cm	0.40ns

(GPS Week1291、IGS 最終暦との比較)

表 10 最終推定値の精度

衛星軌道・時計		解析ソフトウェア	RMS 誤差 (全衛星平均)	
			衛星軌道	衛星時計
3pass 推定値		GpsTools ver.0.5.4	6.0cm	0.15ns
IGS 速報暦		—	2.4cm	0.08ns
IGS 解析センタ 最終暦	CODE	Bernese ver.5.0	3.3cm	0.11ns
	NRCan	GIPSY/OASIS-II ver.2.6	3.8cm	0.10ns
	ESOC	BAHN,GPSOBS,BATUSI	14.2cm	0.13ns
	GFZ	EPOS.P.V2	3.1cm	0.09ns
	JPL	GIPSY/OASIS-II	5.5cm	0.15ns
	MIT	GAMIT ver.10.02,GLOBK ver.5.08	5.3cm	0.31ns
	NOAA	page5	9.9cm	—
	SOPAC	GAMIT ver.9.72,GLOBK ver.4.17	7.5cm	—

(GPS Week1291、IGS 最終暦との比較)

表 11 処理実行時間

推定条件	1pass 推定値	3pass 推定値
処理時間	1 時間 24 分	6 時間 33 分

(観測局 40 局 5 分間隔 7 日分、Pentium 4 3.2GHz、Windows XP SP2)

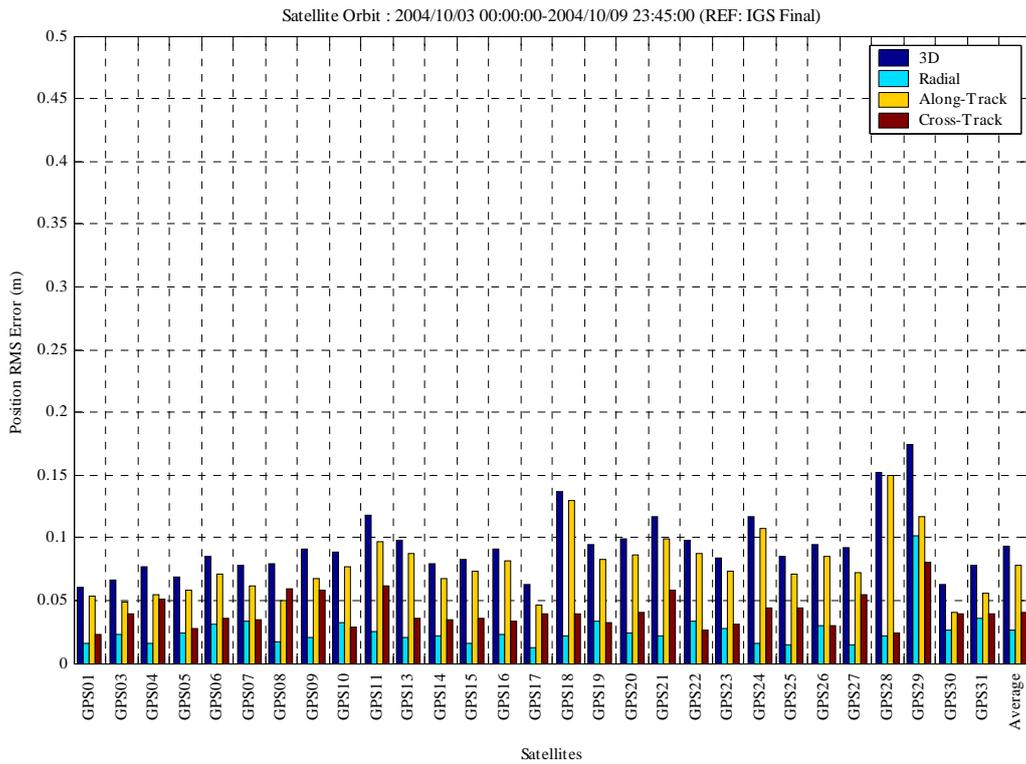


图3 卫星轨道推定误差 (卫星每、1pass 推定值)

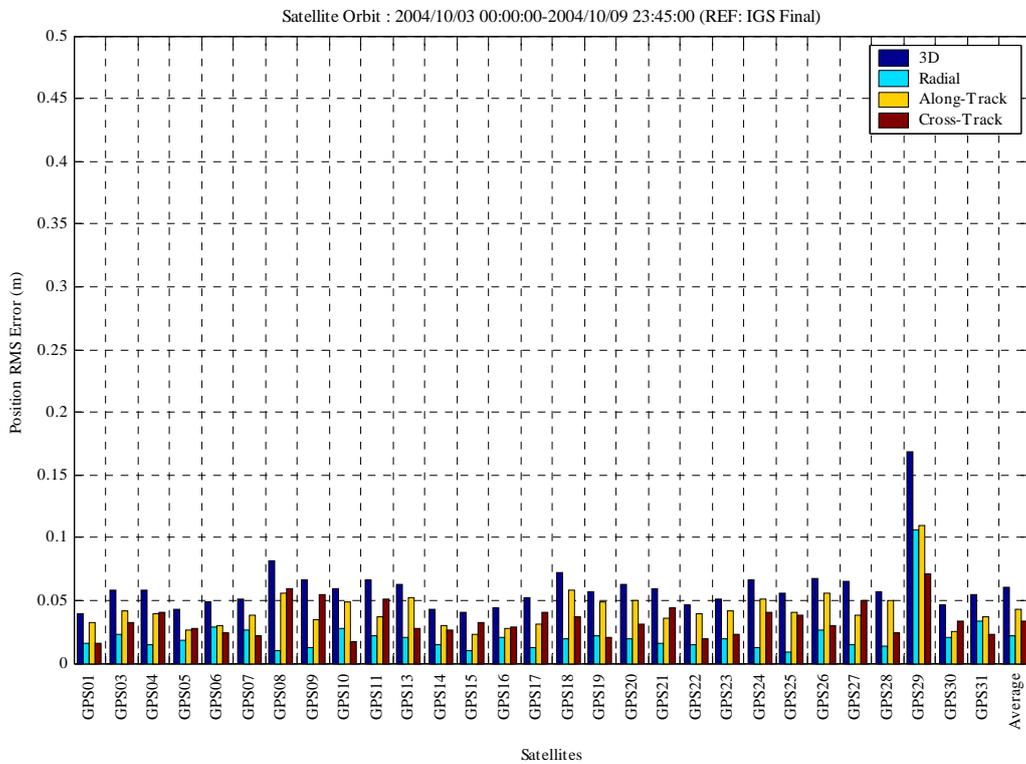


图4 卫星轨道推定误差 (卫星每、3pass 推定值)

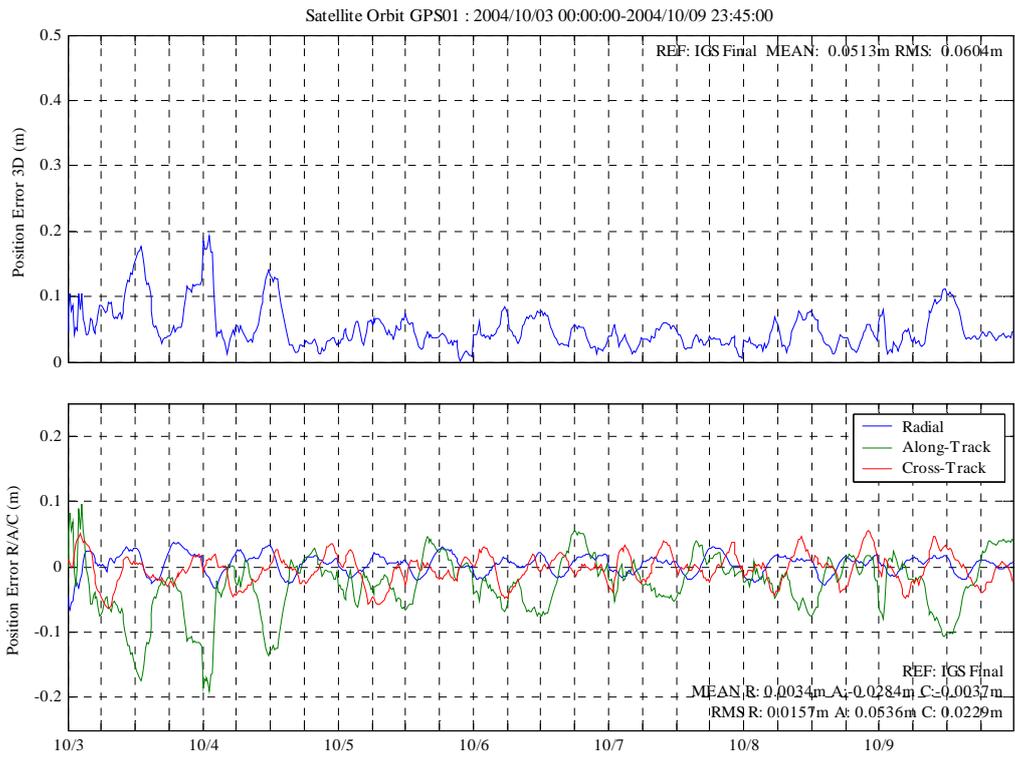


图 5 衛星軌道推定誤差 (例) (1pass 推定値、PRN01)

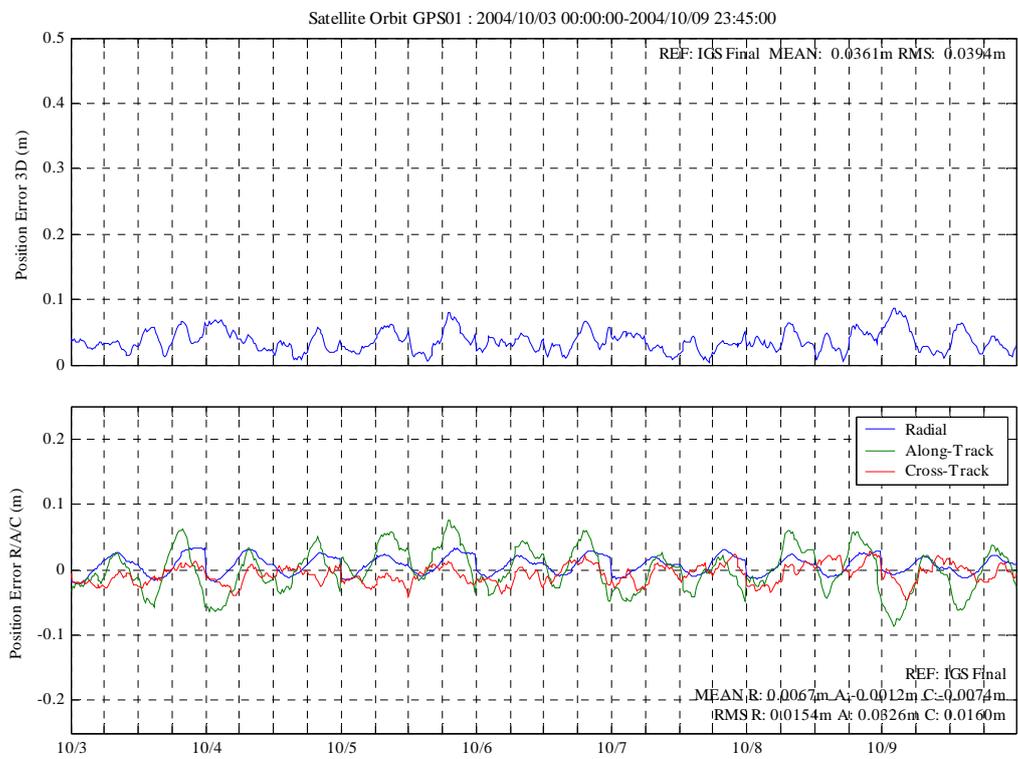


图 6 衛星軌道推定誤差 (例) (3pass 推定値、PRN01)

4.3 推定衛星軌道・時計による PPP 測位精度

次に前項で推定した衛星軌道・時計を使って、PPP により観測局位置推定を行い測位精度の評価を行った。

衛星軌道・時計推定に使用していない IGS 観測局 20 局の観測データを入力し PPP モードにより観測局位置の推定を行う。観測局位置は 24H 毎に初期値にリセットし推定 24H 後の値を推定値とする。初期値としては概算位置+誤差 100m とした。また同時に受信機時計、対流圏遅延(ZTD、水平勾配)を推定している。

表 12、13 及び図 7、8 に推定衛星軌道・時計を使った PPP 測位精度を示す。表には比較のため IGS ウルトラ速報暦、速報暦、最終暦を使用した PPP 測位精度も示した。

なお衛星軌道・時計推定値に含まれる地球中心オフセットの影響を排除するため、24H 毎に観測局推定位置から ITRF2000 系 (IGb00) への三次元 Helmert 変換係数を推定し座標変換補正を行っている。

表 12 に示すとおり 1pass 推定値を使った PPP 測位精度は IGS ウルトラ速報暦を使ったものより精度が良い。また 3pass 推定値を使った PPP 測位精度も IGS 速報暦、最終暦を使ったものに比較し遜色ない精度が達成できることが分かった。

表 12 リアルタイム・準リアルタイム衛星軌道・時計推定値を使った PPP 測位精度

衛星軌道・時計		RMS 誤差 (全局平均)			Repeatability (全局平均)		
		East	North	Up	East	North	Up
1pass 推定値		10.5mm	6.4mm	13.6mm	6.0mm	3.9mm	9.0mm
IGS ウルトラ 速報暦	予報値	204.8mm	146.6mm	321.9mm	180.5mm	133.0mm	277.9mm
	決定値	22.8mm	9.2mm	43.8mm	21.1mm	7.9mm	39.7mm

(GPS Week1291、IGS 最終座標との比較)

表 13 最終衛星軌道・時計推定値を使った PPP 測位精度

衛星軌道・時計		RMS 誤差 (全局平均)			Repeatability (全局平均)		
		East	North	Up	East	North	Up
3pass 推定値		3.8mm	3.0mm	7.5mm	2.8mm	1.5mm	4.7mm
IGS 速報暦		3.5mm	2.3mm	6.7mm	2.0mm	1.3mm	4.2mm
IGS 最終暦		3.2mm	2.2mm	6.1mm	1.8mm	1.2mm	3.6mm

(GPS Week1291、IGS 最終座標との比較)

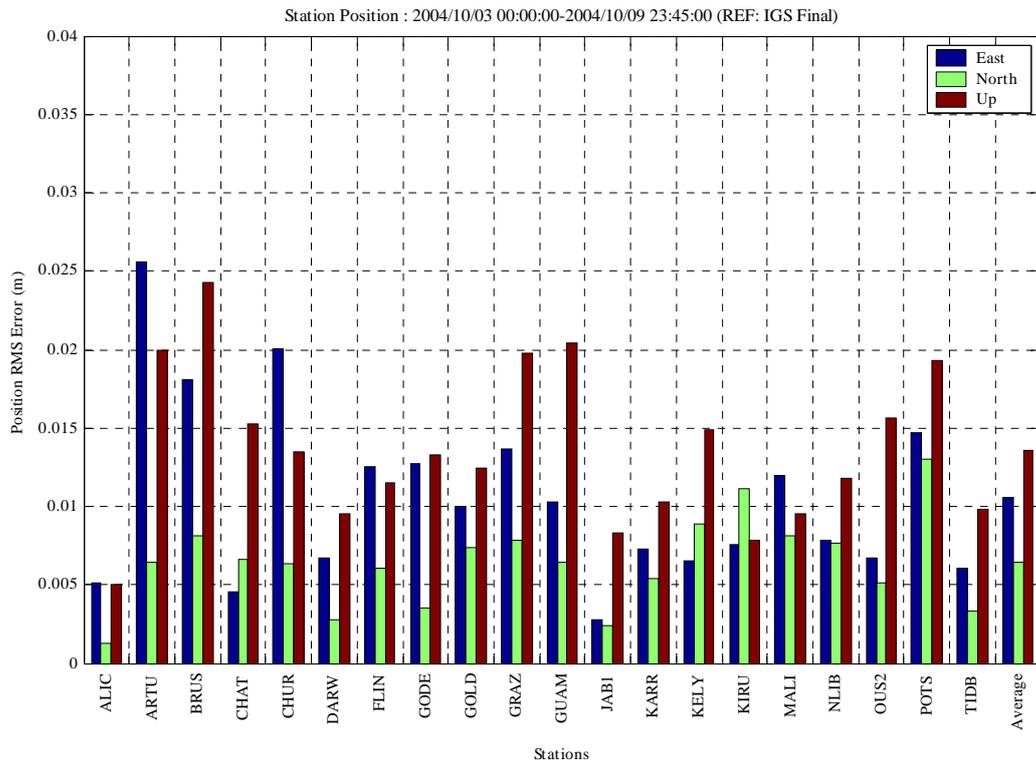


図7 観測局位置 PPP 推定誤差 (衛星軌道・時計 1pass 推定値)

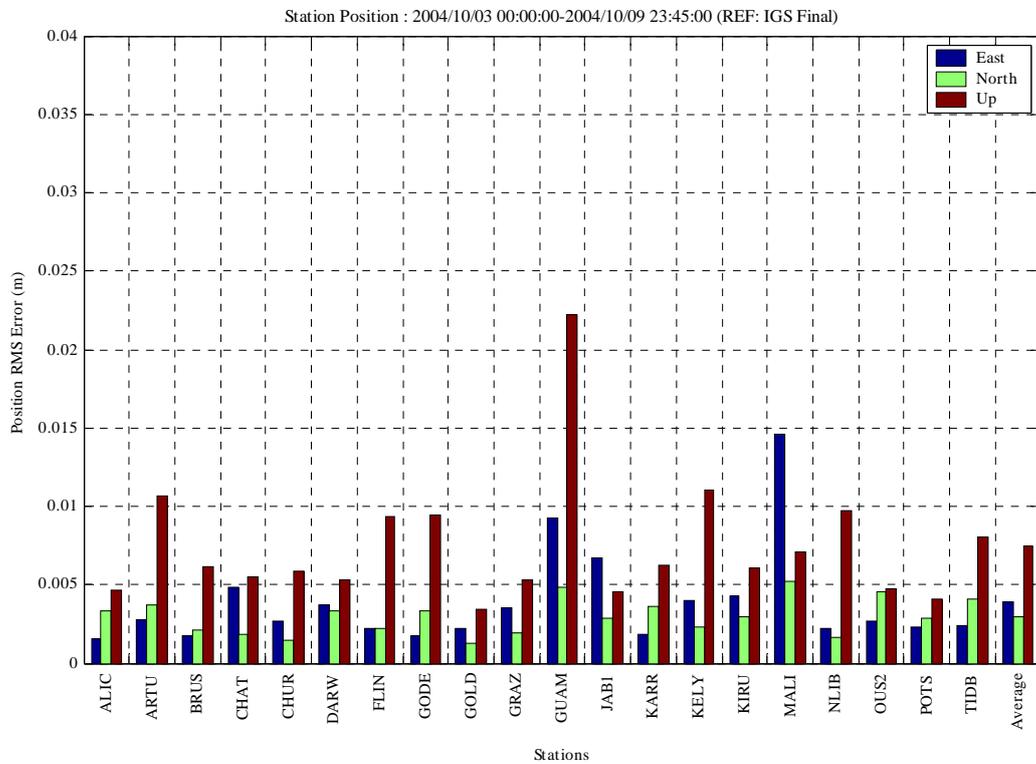


図8 観測局位置 PPP 推定誤差 (衛星軌道・時計 3pass 推定値)

5 おわりに

GPS 衛星軌道・時計を準リアルタイムで推定するアルゴリズムを開発し評価を行った。その結果、リアルタイム推定値は現在一般に即時利用できる衛星軌道・時計推定より高精度を達成できることが分かった。また高精度推定値についても他の精密解析ソフトウェアとほぼ同等の精度であり推定アルゴリズムの有効性を確認することができた。

<参考文献>

- [1] Sunil B. Bisnath, Efficient, Automated Cycle-Slip Correction Of Dual-Frequency Kinematic GPS Data.
- [2] Jim Ray, Handling mixed receiver types, IGSMail-2320, 24 Jun 1999
- [3] B.Hofmann-Wellenhof, H.Lichtenegger and J.Collins, GPS Theory and Practice, fifth, revised edition, SpringerWienNewYork
- [4] O.Montenbruck and E.Gill, Satellite Orbits, Models, Methods and Application, Springer
- [5] A.E.Niell, Global mapping Functions for the atmosphere delay at radio wavelengths, J.G.R.101, b2, 3227-3246, 1996
- [6] J. Kouba, A Guide To Using International GPS Service (IGS) Products, Feb 2003
- [7] D.D.McCarthy, IERS Technical Note 21, IERS Conventions (1996), July 1996
- [8] K.Matsumoto, T.Sato, T.Takanezawa and M.Ooe, GOTIC2: A Program for Computation of Oceanic Tidal Loading Effect, J. Geod. Soc. Japan, 47, 243-248, 2001
- [9] H.F.Fliegell, T.E.Gallini and E.R.Swift, Global Positioning System Radiation Force Model for Geodetic Applications, Journal of Geophysical Research, vol.97, 1992
- [10] H.F.Fliegell and T.E.Gallini, Solar Force Modeling of Block IIR Global Positioning System Satellites, Journal of Spacecraft and Rockets, vol.33, no.6, 1996
- [11] Y.Bar-Sever and D.Kuang, New Empirically Derived Solar Radiation Pressure Model for Global Positioning System Satellites, IPN Progress Report 42-159, Nov 15, 2004
- [12] T.A.Springer, G.Beutler, M.Rothacher, A new Solar Radiation Pressure Model for the GPS Satellites
- [13] B.D.Tapley, et. al., The Joint Gravity Model 3, Journal of Geophysical Research, 1996
- [14] E.M.Standish, JPL Planetary and Lunar Ephemerides, DE405/LE405, JPL interoffice memorandum, Aug 26, 1998
- [15] R.Fernand, G.Gendt and T.Schone, IGS Reference Frame Maintenance, Celebrating A Decade of The International GPS Service Workshop & Symposium 2004 Proceedings, March 1-5, 2004