

2H13 MADOCA における PPP-AR 機能の拡張と評価

○高須知二 (ライトハウステクノロジー・アンド・コンサルティング(株)/東京海洋大学)
遠藤邦治 (ライトハウステクノロジー・アンド・コンサルティング(株))
中野将弥 (富士通(株))、三吉基之、河手香織、小暮聡 (宇宙航空研究開発機構)

PPP-AR Implementation and Evaluation for MADOCA

Tomoji Takasu (LHTC/Tokyo University of Marine Science and Technology),

Kuniharu Endo (LHTC), Masaya Nakano (Fujitsu Ltd.),

Motoyuki Miyoshi, Kaori Kawate, Satoshi Kogure (Japan Aerospace Exploration Agency)

Key Words: MADOCA, PPP-AR, FCB, integer ambiguity resolution

Abstract

MADOCA had been developed by JAXA in order to provide precise orbits and clocks of multiple-constellation GNSS satellites for PPP users. To improve the PPP accuracy and convergence time, we add FCB generation capability to MADOCA for integer ambiguity resolution in PPP. In the project, we also implement a PPP user client software supporting AR features with the MADOCA FCB products. To verify and evaluate the FCB products, we conduct some experiments of PPP-AR with precise orbits and clocks. This paper describes a little detail of the implementations and the evaluation results of the MADOCA PPP-AR functions.

1. はじめに

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) は、QZSS LEX 信号によるリアルタイム PPP (precise point positioning: 単独搬送波位相測位)^[1] 測位補強実験に供する目的で、複数 GNSS (global navigation satellite system) 対応高精度軌道時刻推定ツール MADOCA (multi-GNSS advanced demonstration tool for orbit and clock analysis)^[2] を開発した。現在、軌道時刻推定精度の維持改善および PPP 関連技術の高度化を目的とした研究開発プロジェクトの一環として MADOCA の評価改良と機能拡張を実施中である。

以上の研究開発プロジェクトのうち「PPP-AR 技術導入に向けた研究開発」では PPP-AR (PPP ambiguity resolution) を実現するため、MADOCA に衛星 FCB (fractional cycle bias) 推定機能を実装した^[3]。FCB 推定により推定された衛星 FCB 解は、同時推定した高精度軌道時刻解と共に PPP ユーザに配信され、PPP ユーザの PPP 測位処理において、GNSS 衛星信号の搬送波位相アンビギュイティを解くのに使われる。搬送波位相アンビギュイティを解くことにより、従来型 PPP 測位に比較して、測位精度を向上し、かつ初期収束時間を短縮することが期待されている。本プロジェクトでは、以上の MADOCA の拡張機能を検証し、その精度や初期収束時間を評価するため、

PPP クライアントソフトウェアとして PPP-AR 対応の「ユーザ測位ツール」も同時開発した。

本稿では、以上で開発中の MADOCA における PPP-AR 機能の拡張と評価結果を紹介する。

2. PPP-AR の原理

GNSS 信号の搬送波位相観測量には、搬送波位相アンビギュイティと呼ばれる、連続的に信号を追尾している場合には一定値となるバイアス項が含まれる。搬送波位相アンビギュイティは整数アンビギュイティ、衛星初期位相および受信機初期位相項から構成される。RTK (real-time kinematic) 等の相対測位においては、ユーザ受信機と基準局観測量の二重差を取ることにより、衛星および受信機初期位相項が消去され、整数アンビギュイティ項のみ残る。これら整数アンビギュイティを適切な整数値に拘束することにより、測位解の精度や初期収束時間を改良することが一般に行われる。これらプロセスは AR (ambiguity resolution) と呼ばれる。

PPP 測位においては、基準局が存在しないため、一般的な方法では従来 AR は困難であった。近年、PPP においても AR を実現する方式が多数研究・提案され、一部の手法は実用化されつつある。これらの手法では、衛星初期位相項を多数の地上基準局網の

観測データから推定し、PPP 測位において、推定した衛星初期位相項を使って観測量を補正することにより、相対測位と同様の方法で AR を実現する。ここで、衛星初期位相項は FCB または UPD (uncalibrated phase delay) と呼ばれる。AR 機能を追加した PPP 測位を PPP-AR と呼び、従来型 PPP 測位に比較して、測位精度と初期収束時間の両者において性能が改善されることが、過去多数の研究で実証されている。

3. MADOCA における PPP-AR の実装

3.1. 軌道時刻推定における AR 機能

MADOCA においては、後処理およびリアルタイムの両者において、GNSS 衛星の軌道時刻推定時に同時に基準局観測データに含まれる搬送波位相アンビギュイティを解く機能 (AR 機能) を初期バージョンから実装済みである。

AR の方式としては、Network Ambiguity Resolution^[4] を若干修正した方法を使用し、標準設定では基線長 6000 km 以下の基準局間の二重差搬送波位相アンビギュイティを整数化する。整数化した二重差アンビギュイティは、信頼度の検定後、逐次最小二乗 (後処理) または拡張カルマンフィルタ (リアルタイム) に対して拘束条件として導入される。運用中の軌道時刻推定の条件においては、平均的には 60~80% 前後の二重差アンビギュイティが整数化されている。

整数値拘束条件下で推定された搬送波位相アンビギュイティは衛星-基準局ペア毎、WL (wide-lane) および LC (ionosphere-free) 毎に外部に出力され、以下で示す FCB 推定に使用される。本プロジェクトでは、後で示す L5 FCB 推定のために、以上に加えて EWL (extra-wide-lane) 搬送波位相アンビギュイティの出力機能を追加した。

3.2. FCB 推定機能の実装

3.1 で出力された、EWL, WL, LC 毎の搬送波位相アンビギュイティを入力して、衛星 FCB を推定する機能を新規に開発した。現在のところ、この機能は、MADOCA の軌道時刻推定プログラム (mgest または mgrte) とは独立した FCB 推定プログラム (genfcb) として実装されている。

FCB 推定の処理フローを図 1 に示す。FCB 推定は大きくは、(1) アンビギュイティ推定値入力、(2) EWL FCB 推定、(3) WL-FCB 推定、(4) NL (narrow-lane) -FCB 推定、(5) FCB 推定値出力、のステップに分けられる。

EWL/WL/NL-FCB 推定では、最初に衛星ペア毎に、基準局の搬送波位相アンビギュイティ推定値差分の

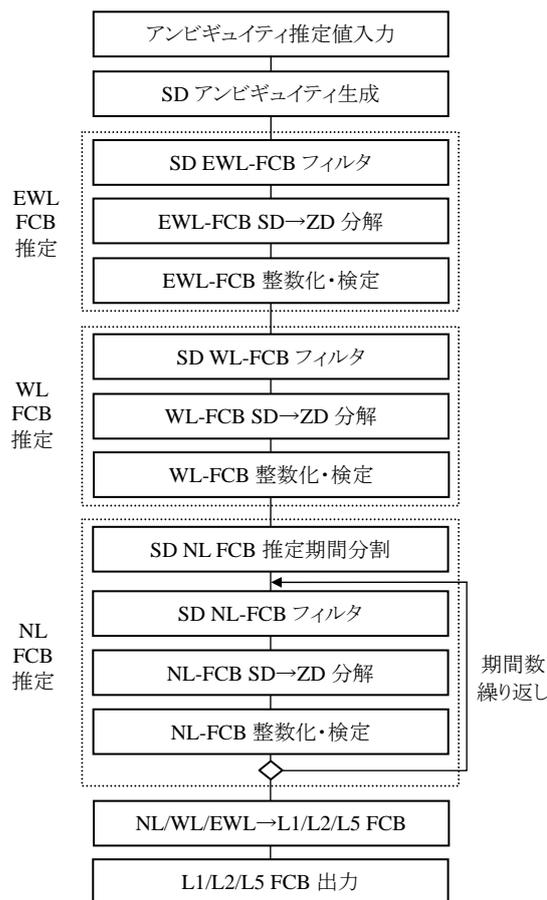


図 1 FCB 推定処理フロー

端数サイクルの平均を計算することにより SD-FCB (single difference FCB) を生成する。この平均化においては、整数値の繰り上がりまたは繰り下がりを考慮する必要がある。また、平均値から一定値以上はずれた異常値をアウトライアとして除去する。以上をアウトライアが無くなるまで繰り返す。

次に、以上で生成した衛星ペア毎の SD-FCB を、適当な拘束条件を加えた最小二乗法により、衛星毎の ZD-FCB (zero-difference FCB) に分解する。ここでも、整数値繰り上がり、繰り下がりの考慮と、残差検定による異常データ除去を行っている。

さらに、以上で生成した ZD-FCB を使って、衛星ペア毎の SD-FCB 推定値を補正して、四捨五入により整数化後、推定値標準偏差を使った信頼度検定により再度異常 SD-FCB 推定値を除去する。

最後に、以上で推定した EWL/WL/NL-FCB を L1/L2/L5-FCB に変換して外部に出力する。

過去研究によると、WL-FCB の変動の時定数は十分長いことが知られており、本 FCB 推定処理では EWL-FCB および WL-FCB は推定期間中は一定値であるとして扱っている。また NL-FCB は

WL/EWL-FCB 推定期間を分割して、その期間内では一定値 (piece-wise constant) であるとして扱う。推定期間はパラメータとして設定可能であるが、標準的には EWL および WL-FCB は 1 日、NL-FCB は 5 分である。

3.3. PPP-AR 対応ユーザ測位ツールの実装

以上で生成した FCB 推定値を利用した PPP-AR の実証と精度および初期収束時間評価のため、PPP-AR 対応の「ユーザ測位ツール」を開発した。ユーザ測位ツールのベースとなるソフトウェアとしては RTKLIB 2.4.2^[5] を利用した。RTKLIB 2.4.2 には既に CNES PPP-Wizard による WL-FCB + IRC (integer recovery clock)^[6] 方式の PPP-AR の試験的な実装が含まれているが、今回 MADOCA で推定した FCB 解を利用した PPP-AR のために、PPP に関連するコードをほぼ全部書き直している。PPP-AR 対応ユーザ測位ツールの主な仕様を表 1 に示す。

表 1 PPP-AR 対応ユーザ測位ツールの主な仕様

項目	仕様	
パラメータ推定方式	拡張カルマンフィルタ	
対象衛星	GPS, GLONASS, QZSS, Galileo, BeiDou	
PPP 測位モード	Static, Kinematic or Fixed	
電離層遅延補正	電離層フリー線形結合 または STEC 推定	
対流圏遅延補正	ZTD または ZTD+勾配推定 NMF (Niell Mapping Function)	
アンテナモデル	ANTEX (衛星+受信機)	
Phase-windup 補正	精密衛星姿勢モデル Wu et al., (1993)	
地球潮汐	固体地球潮汐	IERS Conventions 2003 (主要項)
	海洋潮汐荷重	IERS Conventions + FES2004
	極潮汐	IERS Conventions 2003
アンビギュイティ決定	EWL-WL-NL または ILS (LAMBDA) with PAR	

ユーザ測位ツールにおける PPP-AR アルゴリズムとしては、最初に搬送波位相観測値に対し周波数 (L1/L2/L5) 毎に FCB の補正を行った後、電離層フリー線形結合を生成して電離層項を消去して、通常の PPP 測位処理を行う。さらに、適当な衛星を基準にして、推定した搬送波位相アンビギュイティから衛星間差分 (SD) を生成する。ここで、エポック毎に最も仰角の高い衛星を基準衛星として選択している。生成した SD アンビギュイティを EWL→WL→NL と順次四捨五入により整数化する。以上の手順は、相対測位でも一般に使われる標準的な手法であるが、初期収束時間およびサイクルスリップ後の再収束に時間がかかるという欠点を持っている。

本プロジェクトでは、初期収束時間短縮のため、以上の標準的な手法に加えて、衛星毎の電離層項 (STEC) を明示的に未知パラメータとして推定し、周波数毎 (L1/L2/L5) に ILS (integer least square) 推定により SD 搬送波アンビギュイティを整数化する手法を実装した。ここで、ILS 推定アルゴリズムとしては RTKLIB に既に実装済みの LAMBDA/MLAMBDA をそのまま利用した。ILS 推定の単純な実装では一般に高い FIX 率 (FIX 解の割合) を達成するのが難しいため、さらに以上に加えて PAR (partial ambiguity resolution)^[7] を採用して、FIX 率向上をはかっている。

4. PPP-AR 性能の評価

4.1. FCB 解の評価

FCB 解の品質を評価するため、最初に FCB 推定プロセス中で生成した SD-FCB を FCB 最終解で補正して、その頻度分布を調べた。WL-FCB および NL-FCB の頻度分布を図 2 に示す。頻度分布は 0 を中心とした綺麗な正規分布を示しており、正常に SD-FCB が推定できていることが確認できる。

生成した WL-FCB (1 日毎、6 カ月) と NL-FCB (5 分毎、1 カ月) の例 (GPS Block IIR/IIRM 衛星) を図 3 に示す。WL-FCB については IGS GRG が精密暦時計の一部として推定値を公開しており、それとの比較を行い、誤差の範囲内で一致することを確認した。EWL-FCB および NL-FCB に関しては比較評価するための基準となる解がなく、実際に、これら FCB 解を使った PPP-AR 測位により、搬送波アンビギュイティが正常に解けて妥当な測位精度が得られることにより、推定値の正当性を検証している。

4.2. PPP-AR 測位精度

MADOCA により生成した衛星軌道・時刻と以上で推定した FCB 解を組合せて PPP-AR 測位精度の評価を行った。ここで使用した衛星軌道・時刻は、MADOCA の継続的な性能および品質評価用にプロジェクト開始 (2014 年 3 月) から毎日ルーチン生成している MADOCA 最終暦 (MGF 暦) である。MGF 暦の推定条件を表 2 に、使用した基準局を図 6 に示す。ここで、対象衛星は GPS、GLONASS および QZSS であるが、GLONASS については受信機 IFB (inter frequency bias) の問題により、一般には搬送波位相アンビギュイティを解くのは困難なため、搬送波位相アンビギュイティをフロート値として推定するのみで AR の対象とはしていない。

PPP-AR 解の例として、電子基準点 0627 (つくば 3)

2014/8/15-17 (3 日分) の東西、南北、上下誤差を図 4 に示す。図には、比較のため従来型 PPP 測位解も示した。この例では、キネマティックでかつ AR 手法としては ILS with PAR を使用しており、FIX 率は 99.2% となっている。ただし、日替わり時に測位精度が劣化する場合があります、衛星時計解の不連続が原因の可能性が高いが、詳細な対策は今後の課題である。

表 2 MADOCA 最終暦 (MGF) 推定条件

項目	条件
パラメータ推定方式	逐次重み付き最小二乗
対象衛星	GPS, GLONASS, QZSS
使用基準局	QZSS-MS, MGM-NET および IGS、全 153 局
生成プロダクト	軌道：300 秒間隔 衛星/受信機時計：30 秒間隔 EOP、対流圏、基準局座標
電離層遅延補正	L1-L2 電離層フリー線形結合
対流圏遅延補正	ZTD+勾配推定 (GPT+GMF)
アンテナモデル	IGS08.ATX (衛星+受信機)
Phase-windup 補正	精密衛星姿勢モデル Wu et al., (1993)
地球潮汐	IERS Conventions 2010
座標系	ITRF2008
地球重力	EGM2008 12 次
天体重力	月, 太陽, 木星, 金星 (DE421)
太陽輻射圧	EDBY モデル
経験的加速度	R, A, C 推定
アンビギュイティ決定	Network Ambiguity Resolution

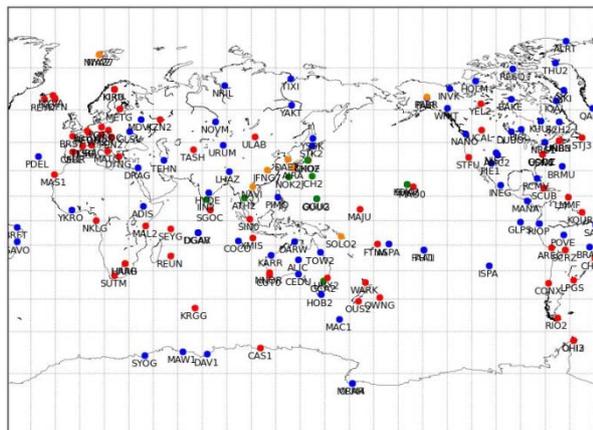


図 6 MADOCA 最終暦 (MGF) 使用基準局

4.3. 初期収束時間

従来型 PPP 測位の問題点として、初期収束時間が長いことがあげられることが多い。PPP-AR の導入により初期収束時間を短縮することが期待される。以上より今回実装した PPP-AR による初期収束時間の短縮についても評価した。PPP および PPP-AR の初期収束時間の例を図 6 に示す。図に示す様に、良い条件下では、PPP-AR により 10 分以内に最初の FIX 解が得られ、その精度は cm 級となっており、従来型

PPP 測位に比較して初期収束時間の短縮がはかられている。ただし、全ケースで安定して高速な初期収束時間が得られる訳ではなく、場合によっては従来型 PPP から改善がみられない場合もある。今後、継続して、性能評価、パラメータチューニングおよびアルゴリズム改良が必要である。

5. まとめ

以上、MADOCA における PPP-AR 機能の拡張と評価結果について述べた。以上の結果は、後処理におけるものであるが、PPP-AR 方式が測位精度および初期収束時間の改善に効果があることが確認できた。

現在、これらの機能をリアルタイム拡張する作業を実施中である。これらの評価後、リアルタイム FCB 補強情報の配信環境を整備し、リアルタイム PPP 用補強情報を使用したリアルタイム PPP-AR の評価実験を開始する予定である。さらに対象衛星として Galileo および BeiDou への拡張も予定している。

参考文献

- [1] J. F. Zumberge et al., Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, J. Geophys. Res., 102, No.B3, 5005-5018, 1997
- [2] 高須, 安田, 小暮, 中村, 三吉, 河手, 平原, 澤村, 複数 GNSS 対応高精度軌道時刻推定ツール MADOCA の開発, 第 57 回宇宙科学技術連合講演会, 2013/10/9-11, 米子コンベンションセンター「ビッグシップ」
- [3] 中野, 片桐, 梶原, 小暮, 三吉, 河手, 高須, FCB 方式による PPP-AR 性能検証, 第 58 回宇宙科学技術連合講演会, 2014/11/12-14, 長崎ブリックホール
- [4] M.Ge et al., Improving carrier-phase ambiguity resolution in global GPS network solutions, J. Geodesy, 79: 103-110, 2005
- [5] 高須, 久保, 安田, RTK-GPS 用プログラムライブラリ RTKLIB の開発・評価及び応用, GPS/GNSS シンポジウム 2007, 2007/11/20-22, 東京海洋大学
- [6] D. Laurichesse, The CNES Real-time PPP with undifferenced integer ambiguity resolution demonstrator, ION GNSS 2011, Portland, Oregon
- [7] S. Verhagen et al., GNSS ambiguity resolution: which subset to fix?, IONSS Symposium 2011, Nov 15-17, 2011, Sydney, Australia

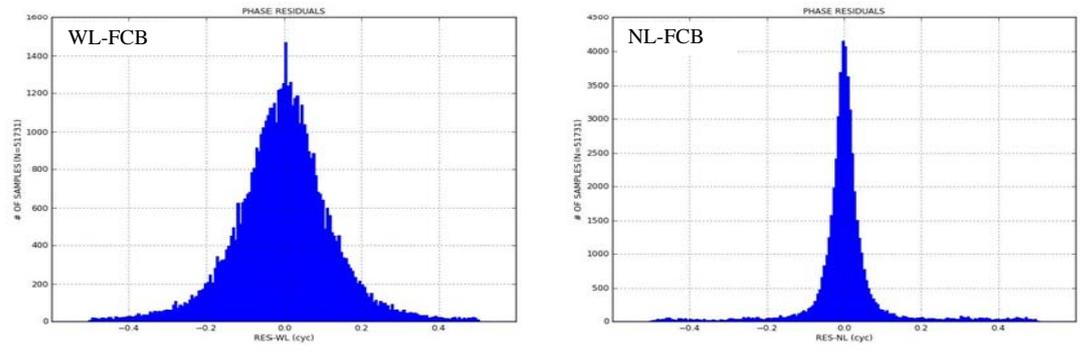


図2 FCB 補正後 SD-FCB 推定値頻度分布

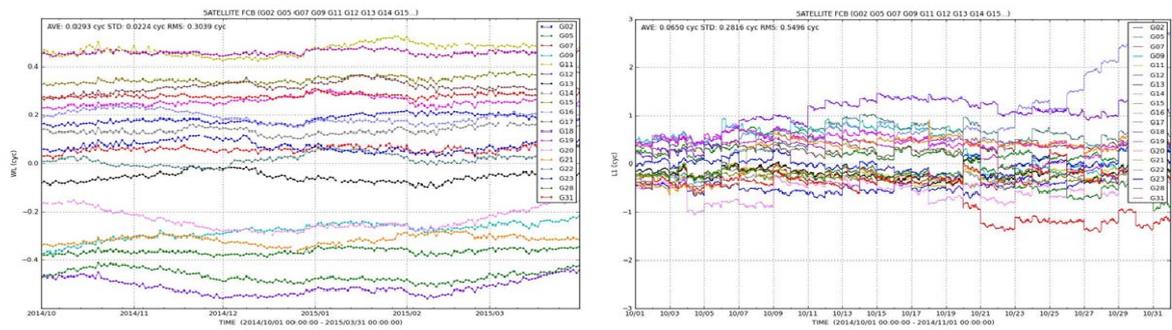
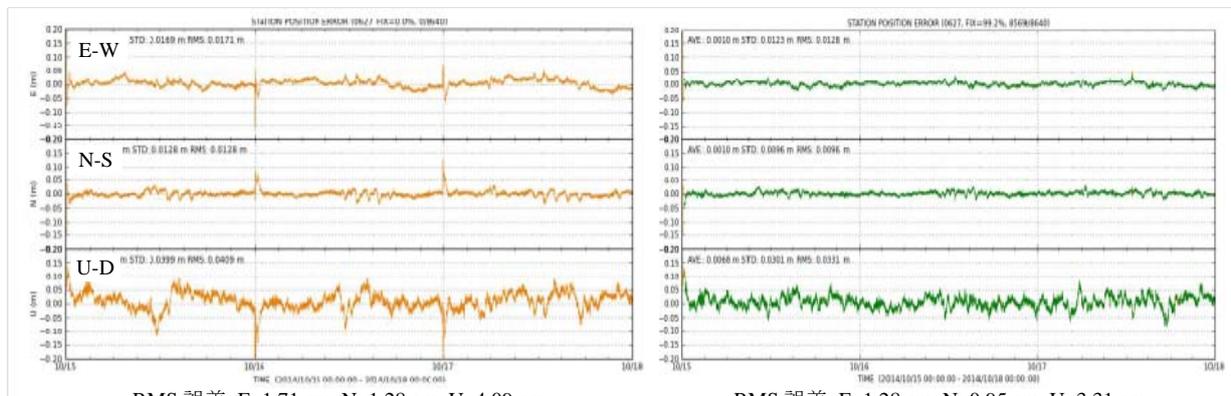


図3 FCB 推定値例 (GPS Block IIR/IIRM 衛星、左: WL-FCB/6 カ月、右: NL-FCB/1 カ月)

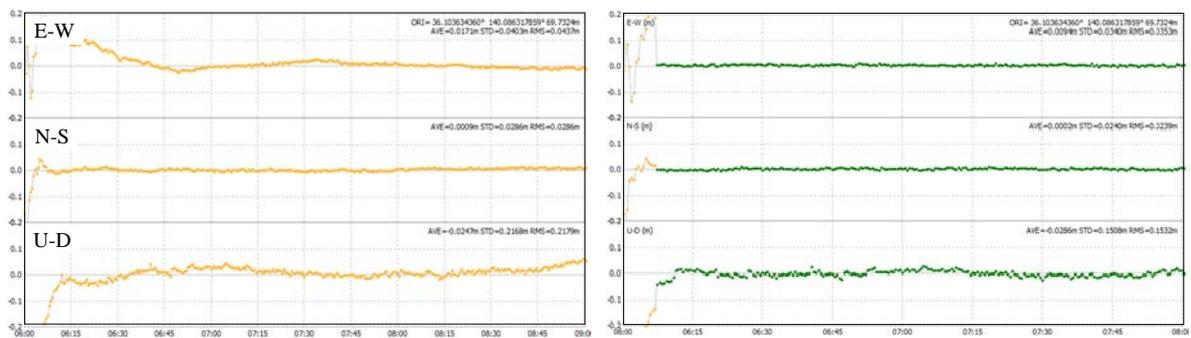


RMS 誤差: E: 1.71 cm, N: 1.28 cm, U: 4.09 cm

RMS 誤差: E: 1.28 cm, N: 0.95 cm, U: 3.31 cm

(2014/10/15-10/17, 電子基準点 0627, ●: FLOAT 解, ●: FIX 解)

図4 PPP および PPP-AR 誤差例 (左: PPP、右: PPP-AR)



(2014/10/16 6:00-9:00, 電子基準点 0627, ●: FLOAT 解, ●: FIX 解)

図5 PPP および PPP-AR 初期収束時間例 (左: PPP、右: PPP-AR)