

第3回マルチGNSSによる高精度測位技術の開発に関する委員会

マルチGNSS解析システムの 基本設計業務

平成24年2月17日

富士通株式会社

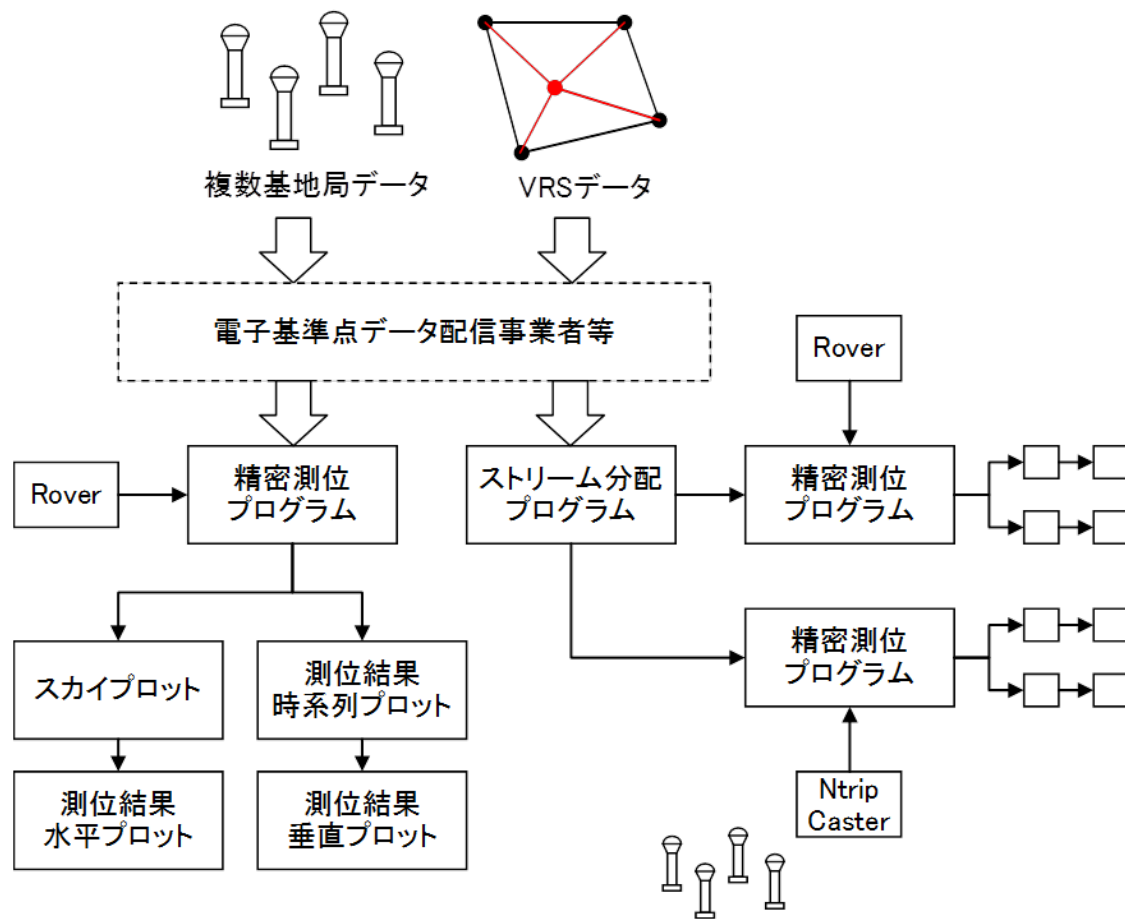
■ 本システムの特徴

- RTKLIBのライブラリ群を活用（測位計算、I/O）
- マルチGNSSを統合的に利用する測量機能
- スケジューラによる観測データ等の自動取得・蓄積
- 不足データの自動取得（リアル:補助情報のみ、後処理:観測データも）

■ 対象とするユーザ

- 公共測量（スタティック、キネマティック、RTK、VRS）
（標高計算、セミ・ダイナミック補正に対応）
- 国土地理院（GEONET解析の高速化）
- 測位関連の研究者

■ 公共測量（スタティック、キネマティック、RTK、VRS）



■ 単基線解析

- 基地局1-ローバー1
- VRSを含む
- RTKLIBで対応済

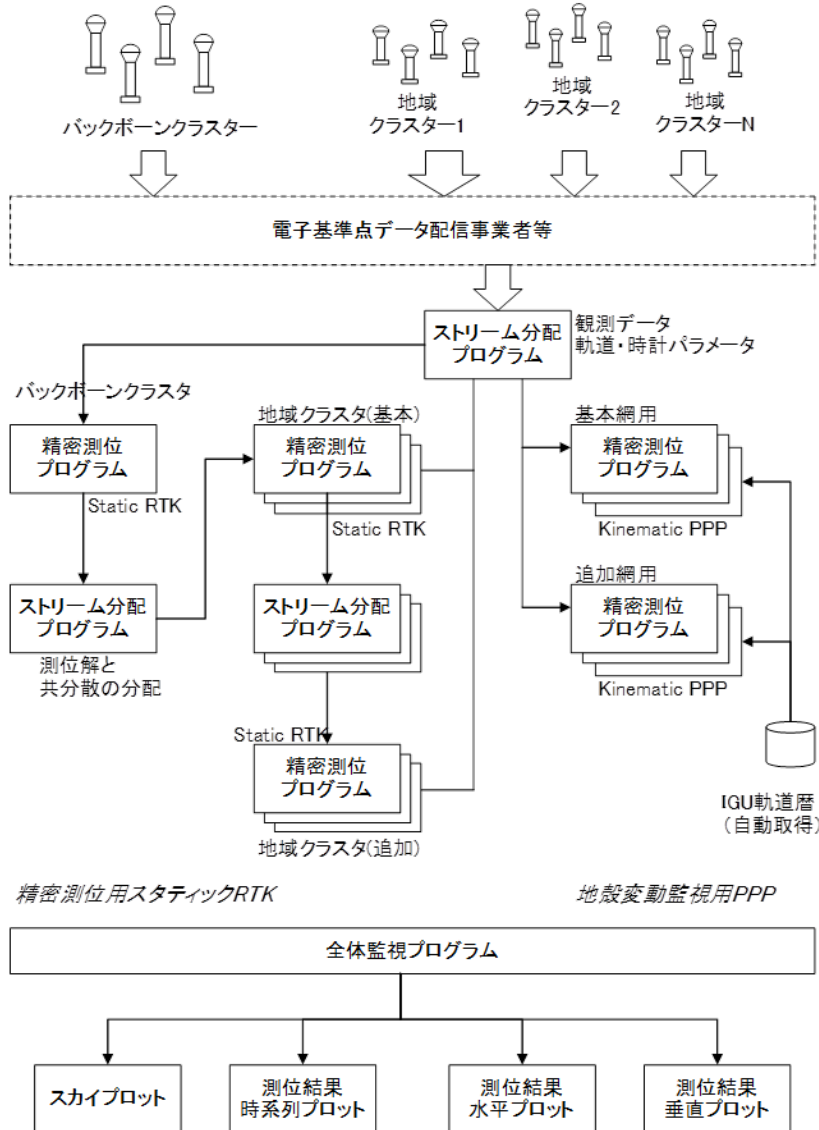
■ 複数基線解析

- 新規開発
- 網平均

■ 共通機能

- 標高計算
(ジオイド高補正)
- セミ・ダイナミック補正
(元期座標への変換)

■ 国土地理院（GEONET解析の高速化）



■ 従来

- 観測データ: 地殻変動±3H、処理2H
→5Hで提供

■ 高速化

- 準リアルタイム処理
→地殻変動+3Hの観測データ取得を解消
→2H強で提供
- 解析戦略第4版に準拠した多段処理
バックボーンクラスター
→地域クラスター(基本)
→地域クラスター(追加)
- 地域クラスター並列化

■ 地殻変動検出と対応（全体監視）

- 基線解析FIXモニター
- 常時PPP(non-AR想定)
- FIXモニターで、広域がFLOATに転じたら
PPPの解で基線解析の初期値更新

■ 研究者向け

- 単独測位 (L1, L2, L5, L1+L2, L1+L5)
- 単独DGPS (RTKLIB準拠→ローバー受信のSBAS補正データ使用)
- DGPS (RTKLIB準拠→GPSのみ対応)
- 単基線解析 (RTKLIB準拠→VRS含む)
- 複数基線解析 (公共測量／GEONET)
 - Bernese的推定パラメータ任意設定
 - 平方根情報フィルター w/z process noise
 - 後処理 (標高計算、セミ・ダイナミック補正)
- PPP(-AR) (RTKLIB準拠+)
 - CNES PPP-WIZARDのRTCM3.1 SSRを使用したFIX解
 - RTCM3.1 SSR生成 (Δ ACR、 Δ クロック、WL/NL SD-UPD推定)
 - GPS以外の精密暦は精度が悪いので、オフライン・GPS以外で精度向上するために必須
 - PPP-AR(オフライン／リアル)に必須

RTCM3.1 SSR生成機能
は研究ベース？

ACR: Along track、Cross track、Radial Δ ACRは軌道誤差の意
SD-UPD: Single Difference - Uncalibrated Phase Delays

■ 観測データ

Format/Version	格納内容	処理形態	備考
RINEX v2.10	GPS/GLONASS L1/L2 (L2C除く)	オフライン	
RINEX v2.11	2.10+Galileo、複数周波数	オフライン	
RINEX v2.12	2.11+Galileo BOC+Compass	オフライン	
RINEX v2 QZSS ext.	2.12+QZSS	オフライン	★新規
RINEX v3.00	RINEX v2.11 Compatible	オフライン	
RINEX v3.01	RINEX v2.12 Compatible	オフライン	
RINEX v3 QZSS ext.	3.01+QZSS	オフライン	★新規
RTCM v2.3	GPS/SBAS L1のみ Message type 18/19	リアル	
RTCM v3.1	GPS/SBAS/GLONASS L1/L2まで Message type 1002/1004/1010/1012	リアル	
RTCM v3.1 MSM	1071-1077 (GPS/SBAS) 1081-1087 (GLONASS) 1091-1097 (Galileo)	リアル	★新規
BINEX 0x7f-05	RINEX v3.01 Compatible (GPS/SBAS/GLONASS/Galileo/Compass/QZSS)	リアル	★新規
受信機バイナリ	RINEX v3.01 Compatible	リアル	

■ 軌道・時計(入力)

フォーマット /バージョン	格納内容	処理形態	備考
RINEX NAV v2/v3	GPS/Galileo/QZSS	オフライン	
RINEX GNAV v2/v3	GLONASS	オフライン	
RINEX HNAV v2/v3	SBAS	オフライン	
EMS v2.0	SBAS	オフライン	
SP3c	マルチGNSSの軌道(x,y,z)と 時計	オフライン	Rapid/FinalはPPP(-AR)(オフライン)に必須
RINEX Clock v2/v3	High rateクロック	オフライン	PPP(-AR)(オフライン)に必須
RTCM v2.3	GPS	リアル	
RTCM v3.1	GPS/GLONASS/Galileo	リアル	
RTCM v3.1 SSR	GPS/GLONASS/Galileoの 上記高精度補正值	リアル	★新規 リアルタイムPPP(-AR)に必須
BINEX 0x01	0x01-01 GPS 0x01-02 GLONASS 0x01-03 SBAS 0x01-04 Galileo 0x01-05 QZSS	リアル	★新規

■ 測位補助情報(入力)

フォーマット ／バージョン	格納内容	処理形態	備考
RINEX v2.x, v3.x	局位置、受信機識別、アンテナ識別	オフライン	
RTCM v2.3	局位置 MT 3/22	リアル	
RTCM v3.1	局位置 MT 1005/1006 アンテナ識別 MT 1007/1008	リアル	
ANTEX 1.3/1.4	マルチGNSS衛星の絶対PCV 受信機絶対PCV	オフライン／リアル	★v1.4は新規
NGS PCV	受信機相対PCV	オフライン／リアル	
CODE DCB	Differential Code Bias	オフライン／リアル	
IONEX	TECマップ	オフライン／リアル	
GSIGEO2000	日本のジオイド高データ	オフライン／リアル	公共測量で利用
地殻変動補正 パラメータ	セミ・ダイナミック補正に用いるデータ	オフライン／リアル	★新規 公共測量で利用

■ 出力データ

- 測位状態はNMEA0183を想定。他は、検討中。

■ 自動データ取得

■ 外部インタフェースの章で処理形態がオフラインのデータを定期的を取得。取得ファイルのタイムスタンプを保持。

蓄積ディレクトリ以下の構造は国際GNSSサービスのそれに従う。トップディレクトリは環境変数EXTに設定する。

- | | |
|--------------|-----------------|
| • <u>データ</u> | <u>蓄積ディレクトリ</u> |
| • 観測データ | \$EXT/data |
| • 軌道・時計 | \$EXT/products |
| • 測位補助情報 | \$EXT/others |

■ 取得スケジュールはスケジュール定義ファイルをエディタ又はGUIで編集して設定する。

■ ファイル更新確認

■ 解析セッションで使用するデータより、取得先データのタイムスタンプが新しい場合は、そのデータを再取得して解析に使用する。

■ 測位方式

■ 以降、本システムがサポートする測位モードのうち、新規開発分(下線付き)を説明する。

- 単独測位
- 単独DGPS
- DGPS
- 単基線解析
- 複数基線解析(公共測量／GEONET)
- PPP(-AR)
- GEONETモード(統合制御)

■ 複数基線解析におけるパラメータ推定手法のトレードオフ

要求	EKF	最小二乗法	SRIF
用途	リアル ～準リアル	オフライン	準リアル ～オフライン
30局程度のパラメータ推定	パラメータが多いのでチューニングが面倒？	問題なし	問題なし
安定した測位解	複数エポックをまとめて解くことで安定性向上	問題なし	問題なし
準リアルタイム処理	問題なし	不得意	問題なし
計算コスト	カルマンゲイン計算のM×Mサイズの逆行列計算が支配的。これがエポック数(K)分ある。	KN×KNサイズの逆行列計算	(M+N)×Nのハウスホルダ変換がエポック数(K)分

- GEONET解析の高速化要求からEKF又はSRIFが適切
- 複数エポック同時処理を前提にすると、 $M \gg N$ であり、SRIFの計算コストが少ない可能性がある(調査中)
 - 複数基線解析ではSRIFを採用(現時点想定)

■ 平方根情報フィルター (SRIF)

- 最小二乗法における共分散と状態が、平方根情報行列Rと情報ベクトルzに置き換わり、以下のように表現される。

$$\text{データ式: } \mathbf{x} = \hat{\mathbf{x}} + \hat{\mathbf{v}}, \quad E[\mathbf{v}\mathbf{v}^T] = \mathbf{P}, \quad \mathbf{P} = (\mathbf{R}^T \mathbf{R})^{-1}$$

$$\text{正規化: } \mathbf{R}\mathbf{x} = \mathbf{R}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{R}\hat{\mathbf{v}} = \mathbf{z} + \mathbf{v}_x$$

- 予測は以下のようにして行われる。

$$\text{予測: } \tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{F}\mathbf{x} + \mathbf{G}\mathbf{p}, \quad E[\mathbf{p}\mathbf{p}^T] = \mathbf{I}$$

$$\text{式変形: } \mathbf{x} = \mathbf{F}^{-1}\tilde{\mathbf{x}} - \mathbf{F}^{-1}\mathbf{G}\mathbf{p}, \quad \mathbf{R}\mathbf{x} = \mathbf{R}\mathbf{F}^{-1}\tilde{\mathbf{x}} - \mathbf{R}\mathbf{F}^{-1}\mathbf{G}\mathbf{p} = \mathbf{z} + \mathbf{v}'$$

$$\text{プロセスノイズのデータ式: } \mathbf{p} = \mathbf{0} + \mathbf{v}_p$$

$$\text{合成: } \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{R}\mathbf{F}^{-1}\mathbf{G} & \mathbf{R}\mathbf{F}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{p} \\ \mathbf{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{v}_p \\ \mathbf{v}_x \end{bmatrix}$$

$$\text{ハウスホルダ変換: } \begin{bmatrix} \mathbf{W} & \mathbf{V} \\ \mathbf{0} & \tilde{\mathbf{R}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{p} \\ \mathbf{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_p \\ \tilde{\mathbf{z}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{v}'_p \\ \mathbf{v}'_x \end{bmatrix}$$

最後の式の上半分はスムージング係数と呼ばれ、スムージングする際に用いられる。

■ 平方根情報フィルター(SRIF)(続き)

- 更新は以下のようにして行われる。

観測方程式： $Ax = L + v_o$

重量行列： S

正規化： $SAx = SL + Sv_o$

予測値と合成：
$$\begin{bmatrix} \tilde{R} \\ SA \end{bmatrix} x = \begin{bmatrix} \tilde{z} \\ SL \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v'_x \\ Sv_o \end{bmatrix}$$

ハウスホルダ変換：
$$\begin{bmatrix} \hat{R} \\ 0 \end{bmatrix} x = \begin{bmatrix} \hat{z} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{v}_x \\ 0 \end{bmatrix}$$

推定値と事後共分散： $\hat{x} = \hat{R}^{-1}\hat{z}, \quad \hat{P} = (\hat{R}^T\hat{R})^{-1}$

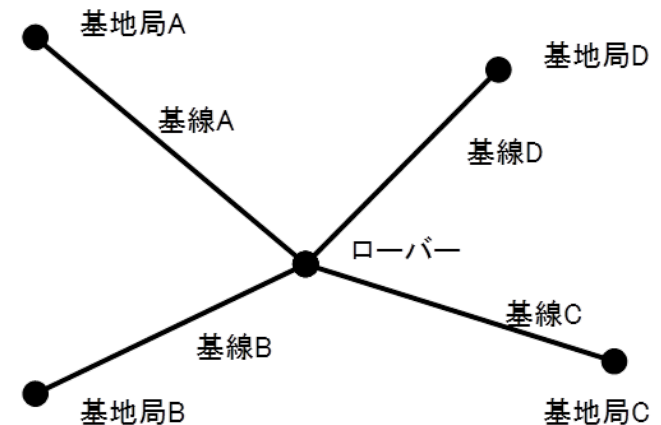
- 複数基地局に囲まれたローバー位置の網平均を求める(右下図)。ローバーは複数あっても構わない。
- 本システムでは、個々の基線解析で求めたローバー位置と共分散を網平均するのではなく、各基線の観測方程式をまとめて行列式を解き、基地局の誤差共分散を考慮したローバー位置と共分散を計算する。

■ 概略処理フロー

- JGD2000座標をセミ・ダイナミック補正
元期→今期
- 複数基線解析 ※次スライドより詳細説明
- セミ・ダイナミック補正(今期→元期)
- 回転楕円体高→標高変換

■ オフライン処理

- リアルタイム再現機能 RTCM又はBINEXを再生してリアルタイム処理
- オフライン処理 RTCM又はBINEXをRINEXへ変換してから処理



■ SRIFの利用法

- 考慮パラメータの導入(基地局の位置誤差をローバーに加味する)
(簡単のためにローバーは1台としている)

$$\begin{bmatrix} A_{ri} & A_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_r \\ X_i \end{bmatrix} = B_i$$

A_{ri} : 偏微係数行列(Rover)(正規化済み)

A_i : 偏微係数行列(基地局)(正規化済み)

X_r : 推定パラメータ(Rover)

X_i : 推定/考慮パラメータ(基地局 $i = 1 \sim n$)

B_i : (観測値-理論値)行列(正規化済み)

i : 基地局ID

- 複数局の観測方程式をまとめる。表現方法を変更する。

$$\begin{bmatrix} A_{r1} & A_1 & 0 & 0 & 0 \\ A_{r2} & 0 & A_2 & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ A_{rn} & 0 & 0 & 0 & A_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_r \\ X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} A_{re} & A_e & 0 \\ A_{rc} & 0 & A_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_r \\ X_e \\ X_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_e \\ B_c \end{bmatrix}$$

X_e : 基地局推定パラメータコレクション

X_c : 基地局考慮パラメータコレクション

■ SRIFの利用法

■ 初期値との合成、ハウスホルダ変換

$$\begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_e & 0 \\ 0 & 0 & R_c \\ A_{re} & A_e & 0 \\ A_{rc} & 0 & A_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_r \\ X_e \\ X_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ B_e \\ B_c \end{bmatrix} \longrightarrow \begin{bmatrix} \hat{R}_r & \hat{R}_{re} & \hat{R}_{rc} \\ 0 & \hat{R}_e & \hat{R}_{ec} \\ 0 & 0 & \hat{R}_{cc} \\ 0 & 0 & A_{rc} \\ 0 & 0 & A_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_r \\ X_e \\ X_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{B}_r \\ \hat{B}_e \\ \hat{B}_c \\ \hat{B}_{rc} \\ \hat{B}_{cc} \end{bmatrix}$$

- X_c は推定値と初期値との差であり、考慮パラメータの場合推定しないため=0とおける。すると、式はさらに以下のように変形されて、基地局の誤差を考慮したローバーの推定値が得られる。

$$\begin{bmatrix} \hat{R}_r & \hat{R}_{re} \\ 0 & \hat{R}_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_r \\ X_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{B}_r \\ \hat{B}_e \end{bmatrix}$$

■ パラメータセッティング

- ローバー局位置 スタティック、又はキネマティック(予測でプロセスノイズを考慮)
- ローバーの時計 予測でプロセスノイズを考慮
- ローバー/基地局の対流圏遅延・電離層遅延 予測でプロセスノイズを考慮

■ Wide-lane SD-UPD推定

■ ZD観測量

$$L_{mk}^i = \rho_k^i + c(\Delta t_k - \Delta t^i) + T_k^i - \frac{\kappa}{f_m^2} + \lambda_m b_{mk}^i$$

$$P_{mk}^i = \rho_k^i + c(\Delta t_k - \Delta t^i) + T_k^i + \frac{\kappa}{f_m^2}$$

i : 衛星、 k : 受信機、 m : 周波数、 κ : 電離層定数、
 Δt : クロックオフセット、 T : 対流圏遅延

■ WL搬送波位相、擬似距離線型結合

$$L_{wk}^i = \frac{f_1}{f_1 - f_2} L_{1k}^i - \frac{f_2}{f_1 - f_2} L_{2k}^i = \rho_k^i + c(\Delta t_k - \Delta t^i) + T_k^i + \frac{\kappa}{f_1 f_2} + \lambda_w b_{wk}^i$$

$$P_{wk}^i = \frac{f_1}{f_1 + f_2} P_{1k}^i + \frac{f_2}{f_1 + f_2} P_{2k}^i = \rho_k^i + c(\Delta t_k - \Delta t^i) + T_k^i + \frac{\kappa}{f_1 f_2}$$

■ Melbourne-Wübbena結合

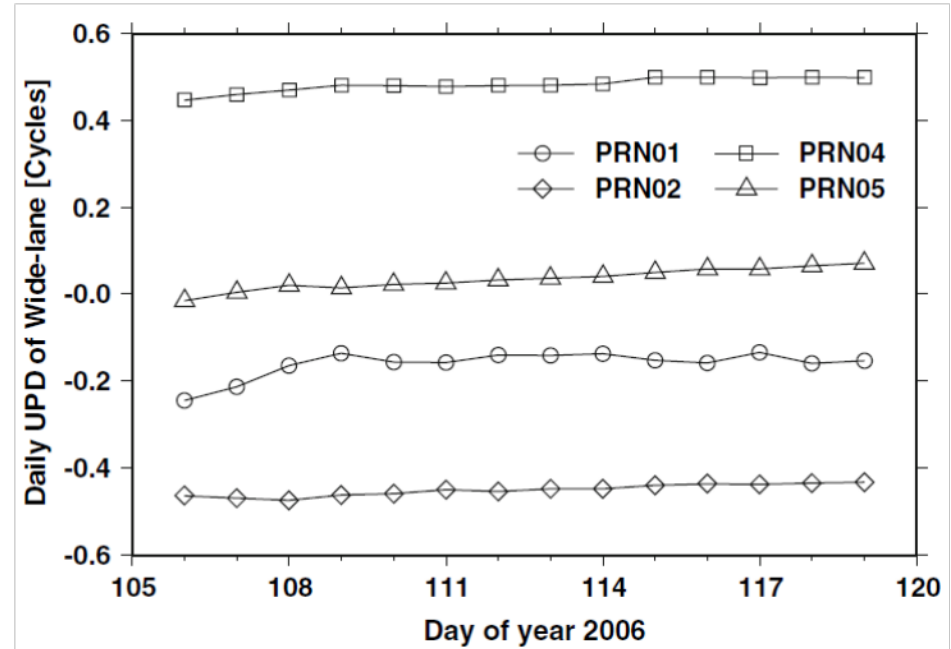
$$b_{wk}^i = \frac{L_{wk}^i - P_{wk}^i}{\lambda_w} = n_{wk}^i + \Delta\phi_w^i - \Delta\phi_{wk}$$

Wide-lane SD-UPD推定

Wide-lane SD

$$b_{wk}^{i,j} = n_{wk}^{i,j} + \Delta\phi_w^{i,j} = \tilde{n}_{wk}^{i,j} + \underbrace{\delta\phi_{wk}^{i,j}}_{\text{frac(WL SD-UPD)}}$$

右図に示すように比較的安定→推定可



frac(WL SD-UPD) PRN01, 02, 04, 05 wrt PRN30

Narrow-lane SD-UPD推定

電離層フリー線型結合、WL、NLの関係

$$b_{ck}^i = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} b_{1k}^i - \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} b_{2k}^i = \frac{f_1}{f_1 + f_2} b_{nk}^i + \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} b_{wk}^i$$

一重差

$$b_{ck}^{i,j} = \frac{f_1}{f_1 + f_2} (n_{nk}^{i,j} + \Delta\phi_n^{i,j}) + \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} (n_{wk}^{i,j} + \Delta\phi_w^{i,j})$$

■ Narrow-lane SD-UPD推定

■ Narrow-lane SD-UPD

$$\tilde{n}_{nk}^{i,j} + \frac{\delta\bar{\phi}_n^{i,j}}{f_1} = \frac{f_1 + f_2}{f_1} \hat{b}_{ck}^{i,j} - \frac{f_2}{f_1 - f_2} \hat{n}_{wk}^{i,j} = \frac{f_1 + f_2}{f_1} \hat{b}_{ck}^{i,j} - \frac{f_2}{f_1 - f_2} (b_{wk}^{i,j} - \delta\phi_w^{i,j})$$

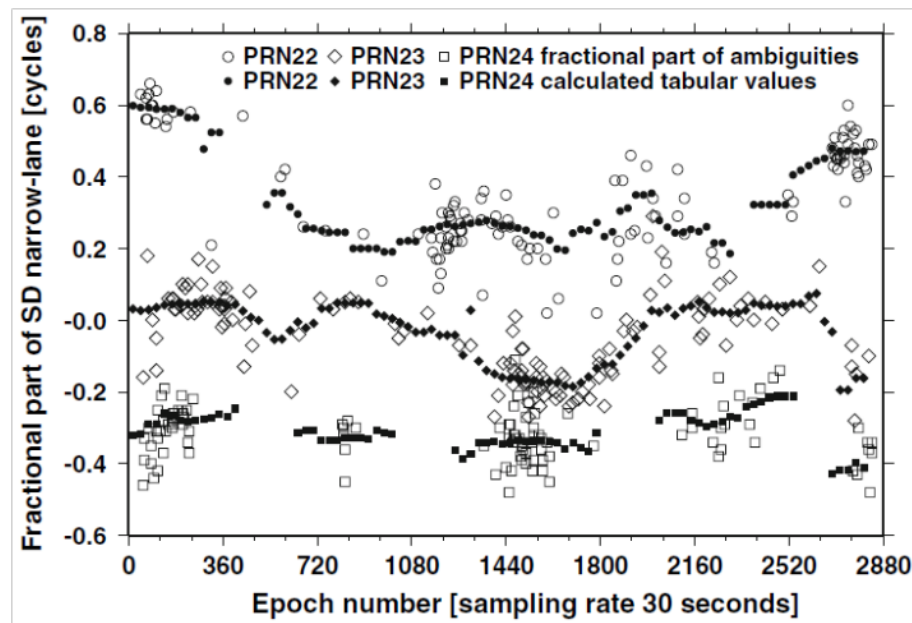
frac(NL SD-UPD) float解 integer

- WL SD-UPDは、Narrow-lane波長に比べると変動が大きいいため、NL SD-UPDはWL SD-UPDのバイアス分も含んで推定される。

- WL SD-UPDは1日1回入手

- NL SD-UPDは15分間隔くらいで必要

- WL SD-UPDのバイアス成分とNL SD-UPDのノイズ成分を軽減するためこれらの推定はグローバルネットワークで行うのが望ましい。



frac(NL SD-UPD) PRN22, 23, 24 wrt PRN01

■ PPP-ARのその他の手法

■ FCB (Fractional cycle bias) 方式

- M. Ge et al., (2008)
Wide-lane UPDとNarrow-lane UPDを算出する。

■ IRC (Integer recovery clock) 方式

- D. Laurichesse et al., (2008)
Wide-lane UPDを算出し、Narrow-lane UPDはクロックに含めて算出する。
- P. Collins et al., (2008)
Decoupled clock model (carrier phase clockを別出して推定)

■ PPP-ARの実現方法

■ オフラインGPS

- 精密暦、High rateクロック、CNES RTCM3.1 SSR(SD-UPD) or 自前？

■ リアル／オフラインGPS以外

- CNES RTCM3.1 SSR or 自前？

■ 自前の場合は、本システムに Δ ACR、 Δ clock、WL/NL SD-UPD推定機能が必要

- GEONETモードは、
 - 測位計算プログラムの測位モードの一つではなく、
 - 測位計算プログラム(複数基線解析)と
ストリーム分配プログラムの連携動作モード

- 大きな地殻変動に追従させるため、
 - PPP(non-AR)を平行して動作させ、
 - 全体監視プログラムで日本全域のFIXモニターを行い、
 - 広域でFLOATになったとき、基線解析の座標値をPPPの座標値で更新する。

■ 解析戦略第4版迅速解析との差異を示す。

比較項目	解析戦略第4版迅速解析	本システム
ソフトウェア	Bernese 5.0	本システム
観測網の構成	バックボーンクラスタ 基本網の地域クラスタ 追加網の地域クラスタ	←
クラスタ結合戦略	上位階層の座標解と大気遅延解を固定して下位の階層の解を算出	たぶん左記と同様 ※BB点間の共分散を引継ぐ
大気遅延推定	天頂遅延: 3時間毎、区分的線形関数 大気遅延勾配: セッション内で線形関数	SRIFなので、天頂遅延は3時間毎、大気遅延勾配は6時間毎の区分的線形関数。 マッピング関数はGMF。
電離層遅延の高次項	補正せず	←
座標系	IGS05	IGS08?
固定点座標値の扱い	IGS 点“TSKB”から取り付けた座標値と速度から求めた区分直線による座標値	←
地上局PCV	絶対検定により国土地理院が作成したモデル	←
衛星PCV	igs05.atx	igs08.atx?
潮汐	IERS2003 use FES2004	IERS2010? use FES2004
相対論	IERS2003	IERS2010?
局位置推定	最小二乗法	X時間毎にシステムノイズを付加。Xは解析によって最適値を定める。

■ 外部取得データ

- \$EXTディレクトリ配下に、IGSデータセンターと同じ構造で格納
- ファイル更新確認で更新を確認した場合は\$EXTを上書きする

■ 解析条件、結果

- \$ANAディレクトリ配下に、階層構造を持って格納する。
 - pcf 解析条件
 - products 解析結果のうち国際フォーマットがあるもの
 - others 解析結果のうち独自フォーマットのもの(共分散等)
- 解析の目的に応じて、自由に作成・削除できるものとする。