

6. 精密単独測位 (PPP) に関する調査・検討・評価

6.1. GPSとGLONASSを併用したリアルタイム精密単独測位計算手法についての調査・検討・評価

6.1.1. 文献による調査

複数の衛星系を組み合わせる精密単独測位をリアルタイムで実施する場合、GLONASSの時刻系を補正する情報が入手できないため、GPSとの併用ができない。これらを解決し、測位解を安定的に得るために有効と考えられる計算手法について文献により調査した。以下に、調査結果をまとめる。

一般的な精密単独測位 (以下、PPP) では、受信機間または衛星間の差分を取らない、すなわちゼロ差を使用するので、観測モデルに衛星・受信機アンテナ位相中心補正、相対論効果、地球潮汐、位相の Wind-Up 効果、周波数バイアスなどを厳密に考慮する必要がある。パラメータ推定では、L1、L2の電離層フリー結合を用いて、衛星位置と衛星時計誤差を既知のものとし、受信機アンテナの座標位置、受信機時計誤差、対流圏遅延量、搬送波位相のフロートアンビギュイティを推定する [13]。

また、GPSとGLONASS混合のPPP測位では、さらにGPSとGLONASS時刻系の差と前述した擬似距離及び搬送波位相観測値に現れる衛星系間の受信機ハードウェアバイアス (ISB) を考慮する必要がある [14], [15], [16]。

GPSとGLONASSの基本観測方程式はそれぞれ次のように与えられる [14], [15], [17]。

$$p^{GPS} = \rho + I + T + c(\delta t^{GPS} - \delta T^{GPS}) + \varepsilon_p^{GPS} \quad 6-1$$

$$\phi^{GPS} = \rho - I + T + c(\delta t^{GPS} - \delta T^{GPS}) + \varepsilon_\phi^{GPS}$$

$$p^{GPS} = \rho + I + T + c(\delta t^{GPS} - \delta T^{GLO} + \delta t_p^{GPS-GLO}) + \varepsilon_p^{GLO} \quad 6-2$$

$$\phi^{GPS} = \rho - I + T + c(\delta t^{GPS} - \delta T^{GLO} + \delta t_\phi^{GPS-GLO}) + \varepsilon_\phi^{GLO}$$

ここで、 ρ は幾何学距離、 I は電離層遅延、 T は対流圏遅延、 c は光速、 δt^{GPS} はGPS時刻に対する受信機時計誤差、 δT は衛星時計誤差、 $\delta t_p^{GPS-GLO}$ は擬似距離バイアス、 $\delta t_\phi^{GPS-GLO}$ は搬送波位相バイアス、 ε_p は擬似距離の観測ノイズ、 ε_ϕ は搬送波位相の観測ノイズを表す。擬似距離バイアス $\delta t_p^{GPS-GLO}$ の中に、GPSとGLONASS間の時刻差と擬似距離ISBが含まれている。また、搬送波位相バイアス $\delta t_\phi^{GPS-GLO}$ の中に、GPSとGLONASS間の時刻差との搬送波位相ISBが含まれている。

航法メッセージに含まれているGPSとGLONASSの時刻オフセットパラメータGGTOとBIPMのCircular Tと比較した結果、両者は時間的な変動傾向はほぼ同じであるが、GGTOの方が数百ns小さい。また、航法メッセージから時刻系変換パラメータ

GGTO が得られないこともあるので、現時点では、リアルタイム PPP の処理に GPS と GLONASS 間の時刻系差と ISB を分離することは難しい。

以上の調査文献の結果と現時点で補正情報の提供状況を踏まえ、一般化した GPS と GLONASS 混合のリアルタイム PPP の解析手法を記述する。

PPP 測位に電離層フリー結合を用いる観測方程式は次のように表せる。

$$\begin{aligned} P_c^{sys} &= \rho^i + T + c(\delta t - \delta T^i + dT_p) + \varepsilon_{P,c}^{sys} \\ \Phi_c^{sys} &= \rho^i + T + c(\delta t - \delta T^i + dT_\phi) + C_1 \lambda_1 N_1^i - C_2 \lambda_2 N_2^i + \varepsilon_{\phi,c}^{sys} \end{aligned} \quad 6-3$$

ここで、

δt : GPS 時刻に対する受信機時計誤差

dT_p : 擬似距離バイアスであり、中に GPS と GLONASS 間の時刻差と擬似距離 ISB が含まれている。sys は GPS の場合、 $dT_p = 0$

dT_ϕ : 搬送波位相バイアスであり、中に GPS と GLONASS 間の時刻差と位相 ISB が含まれている。sys は GPS の場合、 $dT_\phi = 0$ 。

C_1 、 C_2 : 電離層フリー結合係数であり、次のように定義されている。

$$C_1 = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}, \quad C_2 = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}$$

未知パラメータ x は次式で与えられる。

$$x = (r_r^T, \delta t, dT_p, dT_\phi, Z_{W,r}, G_{N,r}, G_{E,r}, N_1^T, N_2^T)^T \quad 6-4$$

観測値 y は搬送波位相観測値および擬似距離観測値により次式で与えられる。

$$\begin{aligned} y &= (\Phi_c^T, P_c^T)^T \\ \Phi_c &= (\Phi_r^1, \Phi_r^2, \Phi_r^3, \dots, \Phi_r^s)^T \\ P_c &= (P_r^1, P_r^2, P_r^3, \dots, P_r^s)^T \end{aligned} \quad 6-5$$

式 6-5 により、観測モデル $h(x)$ と計画行列 $H(x)$ は次の式で与えられる。

$$h(\hat{x}) = (h_{\phi c}^T, h_{p c}^T)^T \quad 6-6$$

$$h_{\phi c} = \begin{pmatrix} \rho_{r\phi}^1 + c(\Delta t_r - \Delta T^1) + T_r^1 + C_1 \lambda_1 N_1^1 + C_2 \lambda_2 N_2^1 \\ \rho_{r\phi}^2 + c(\Delta t_r - \Delta T^2) + T_r^2 + C_1 \lambda_1 N_1^2 + C_2 \lambda_2 N_2^2 \\ \vdots \\ \rho_{r\phi}^m + c(\Delta t_r - \Delta T^m) + T_r^m + C_1 \lambda_1 N_1^m + C_2 \lambda_2 N_2^m \\ \rho_{r\phi}^{1R} + c(\Delta t_r - \Delta T^{1R} + dT_\phi) + T_r^{1R} + C_1 \lambda_{1,1R} N_1^{1R} + C_2 \lambda_{2,1R} N_2^{1R} \\ \rho_{r\phi}^{2R} + c(\Delta t_r - \Delta T^{2R} + dT_\phi) + T_r^{2R} + C_1 \lambda_{1,2R} N_1^{2R} + C_2 \lambda_{2,2R} N_2^{2R} \\ \vdots \\ \rho_{r\phi}^{nR} + c(\Delta t_r - \Delta T^{nR} + dT_\phi) + T_r^{nR} + C_1 \lambda_{1,nR} N_1^{nR} + C_2 \lambda_{2,nR} N_2^{nR} \end{pmatrix}$$

$$h_{pc} = \begin{pmatrix} \rho_{rP}^1 + c(\Delta t_r - \Delta T^1) + T_r^1 \\ \rho_{rP}^2 + c(\Delta t_r - \Delta T^2) + T_r^2 \\ \vdots \\ \rho_{rP}^m + c(\Delta t_r - \Delta T^m) + T_r^m \\ \rho_{rP}^{1R} + c(\Delta t_r - \Delta T^{1R} + dT_P) + T_r^{1R} \\ \rho_{rP}^{2R} + c(\Delta t_r - \Delta T^{2R} + dT_P) + T_r^{2R} \\ \vdots \\ \rho_{rP}^{nR} + c(\Delta t_r - \Delta T^{nR} + dT_P) + T_r^{nR} \end{pmatrix}$$

$$\rho_{r\phi}^i = \|r_r + \delta a_r + \delta r_{r,tide} - r^i - \delta a^i\| + \delta p^i + \delta p_r + \delta WIN^i$$

$$\rho_{rP}^i = \|r_r + \delta a_r + \delta r_{r,tide} - r^i - \delta a^i\| + \delta p^i + \delta p_r + \delta DCB^i + \delta DCB_r$$

$$T_r^i = m_{H,r}^i Z_{H,r} + m_{WG,r}^i (Z_{T,r} - Z_{H,r})$$

$$m_{WG,r}^i = m_{W,r}^i \{1 + \cot El_r^i (G_{N,r} \cos Az_r^i + G_{E,r} \sin Az_r^i)\}$$

$$H(\hat{x}) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} \Big|_{x=\hat{x}} = \begin{pmatrix} E & I & M_{T,r} & C_1 \lambda_1 & & & \\ E & I & M_{T,r} & & C_2 \lambda_2 & & \\ E & I & I & M_{T,r} & C_1 \lambda_1^T & & \\ E & I & I & M_{T,r} & & C_2 \lambda_2^T & \\ E & I & M_{T,r} & & & & \\ E & I & M_{T,r} & & & & \\ E & I & I & M_{T,r} & & & \\ E & I & I & M_{T,r} & & & \end{pmatrix} \quad 6-7$$

$$E = (e_r^1, e_r^2, \dots, e_r^s)^T$$

$$M_{T,r} = \begin{pmatrix} m_{WG,r}^1 & m_{W,r}^1 \cot El_r^1 \cos Az_r^1 & m_{W,r}^1 \cot El_r^1 \sin Az_r^1 \\ m_{WG,r}^2 & m_{W,r}^2 \cot El_r^2 \cos Az_r^2 & m_{W,r}^2 \cot El_r^2 \sin Az_r^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{WG,r}^s & m_{W,r}^s \cot El_r^s \cos Az_r^s & m_{W,r}^s \cot El_r^s \sin Az_r^s \end{pmatrix}$$

$$\lambda_1^T = (\lambda_{1R}, \lambda_{2R}, \dots, \lambda_{nR})^T \quad (n : \text{GLONASS 衛星のチャンネル番号})$$

ここで、

r^i : 衛星の重心位置 (m)

δa^i : 衛星アンテナ位相中心オフセット (m)

δp^i : 衛星アンテナ位相変動 (m)

r_r : 受信機アンテナ位置 (m)

δa_r : 受信機アンテナ位相中心オフセット (m)

$\delta r_{r,tide}$: 地球潮汐による受信機変動 (m)

δp_r : 衛星アンテナ位相変動 (m)

δWIN^i : Wind-Up 効果

$\delta DCB^i, \delta DCB_r$: 衛星、受信機のコードバイアス

e_r^i : 衛星の視線方向単位ベクトル

Az_r^i, El_r^i : 衛星の方位角および仰角 (rad)

$Z_{T,r}$: 対流圏天頂遅延量 (m)

$Z_{H,r}$: 対流圏静水圧天頂遅延量 (m)

$G_{E,r}$: 東方向対流圏遅延勾配

$G_{N,r}$: 北方向対流圏遅延勾配

$m_{H,r}^i, m_{W,r}^i$: 対流圏静水圧、湿潤遅延マッピング関数

観測誤差の共分散行列は次式で与えられる。

$$R = \begin{pmatrix} R_{\Phi_c} & \\ & R_{pc} \end{pmatrix} \quad 6-8$$

$$R_{\Phi_c} = \text{diag}(\sigma_{\Phi_c^1}^2, \sigma_{\Phi_c^2}^2, \dots, \sigma_{\Phi_c^s}^2)$$

$$R_{pc} = \text{diag}(\sigma_{pc^1}^2, \sigma_{pc^2}^2, \dots, \sigma_{pc^s}^2)$$

ここで、 $\sigma_{\Phi_c^i}, \sigma_{pc^i}$ はそれぞれ搬送波位相誤差と擬似距離誤差の標準偏差である。

拡張カルマンフィルタの時間更新則は次式で与えられる

$$F = I, \quad Q = \begin{pmatrix} 0_{3 \times 3} & & \\ & Q_T & \\ & & 0_{nsat \times nsat} \end{pmatrix} \quad 6-9$$

ここで、

$\tau_T = t_{k+1} - t_k$: 受信機サンプリング間隔 (秒)

Q_T : 対流圏項のプロセスノイズ共分散行列

$nsat$: 衛星数

式6-4から式6-9を用いた拡張カルマンフィルタの解により移動局アンテナの座標位置、受信機時計誤差、天頂方向湿潤対流圏遅延量、対流圏遅延勾配パラメータ、搬送波位相のフロートアンビギュイティが推定される。対流圏遅延の時間的変動はランダムウォークモデルが使用される。

6.1.2. リアルタイム精密暦を使用した解析による評価

現在、IGS リアルタイム精密暦が RTCM ver.3 SSR (State Space Representation) フォーマットですでに試験的に配信されており、この精密暦には GPS のみならず GLONASS の軌道や時計情報も含まれているため、この精密暦を使用し、GPS と GLONASS を組み合わせた精密単独測位解析を行い、解析結果を評価した。

解析には、このリアルタイム精密暦を使用し GPS と GLONASS を組み合わせた精密単独測位を行う機能が実装された RTKLIB v2.4.1 に含まれるリアルタイム解析プログラム RTKNAVI を使用した。解析は、以下の 2 種類の手法で行った。

- (a) GPS のみ
- (b) GPS+GLONASS

以下に解析結果について、解析ごとに測位精度を比較する。

リアルタイム精密暦は、独国 BKG の GDC (GNSS Data Center) から NTRIP 形式で配信されている表 6-1 の 2 つの精密暦を使用した。詳細を表 6-2 に示す。また、表 6-2 中の RTCM v3 SSR メッセージの内容を表 6-3 に示す。

表 6-1 リアルタイム精密暦

#	Caster IP:Port	Mountpoint & Input Streams	Analysis Center & SW
1	products.igs-ip.net:2101	IGS03	KF Combination BNC
2	products.igs-ip.net:2101	CLK11	BKG & CTU RTNet + BNS

「BKG GDC ウェブサイト (<http://igs.bkg.bund.de/ntrip/orbits>) より」

表 6-2 リアルタイム精密暦 詳細

#	Mountpoint & Input Streams	Ref. Point	GNSS	Messages	Orbits	Reference System
1	IGS03	APC	GPS	1057, 1058, 1059	CODE	ITRF2008
			GLO	1063, 1064, 1065	Ultra Rapid	
2	CLK11	APC	GPS	1059, 1060	CODE	ITRF2008
			GLO	1065, 1066	Ultra Rapid	

「BKG GDC ウェブサイト (<http://igs.bkg.bund.de/ntrip/orbits>) より」

表 6-3 RTCM v3 SSR メッセージ

Message	Contents
1057	GPS orbit corrections to Broadcast Ephemeris
1058	GPS clock corrections to Broadcast Ephemeris
1059	GPS code biases
1060	Combined orbit and clock corrections to GPS Broadcast Ephemeris
1063	GLONASS orbit corrections to Broadcast Ephemeris
1064	GLONASS clock corrections to Broadcast Ephemeris
1065	GLONASS code biases
1066	Combined orbit and clock corrections to GLONASS Broadcast Ephemeris

「BKG GDC ウェブサイト (<http://igs.bkg.bund.de/ntrip/orbits>) より」

ターゲット点は、国土地理院電子基準点の 93006 出島（受信機：Trimble NetR9、アンテナ：Trimble TRM59800.80）とし、日本 GPS データサービス株式会社からターゲット点のリアルタイムデータの配信を受けて、解析した。解析設定は表 6-4 の通り。

「Code/Carrier-Phase Error Ratio L1/L2」のデフォルト値 100.0 を 1000.0 に変更し、擬似距離の解への影響を小さくした。

また、RTKNAVI にはログファイルとして保存したリアルタイムデータを使用して、リアルタイム解析を再解析する機能を備えているため、その方法で再解析した。解析はリアルタイム精密暦 2 種類それぞれについて、GPS のみ使用した解析、GPS と GLONASS を組み合わせた解析の計 4 通りで比較した。

表 6-4 リアルタイム PPP 解析設定

設定項目	設定値
解析ソフトウェア	RTKLIB v2.4.1 RTKNAVI
測位方式	リアルタイム PPP キネマティック
観測データ時刻	2013 年 1 月 28 日 0 時<GPST>から 24 時間
ターゲット点	国土地理院電子基準点 93006 出島 受信機:Trimble NetR9 アンテナ:Trimble TRM59800.80
衛星系の組み合わせ	GPS、GPS+GLONASS
周波数	2 周波 (L1、L2)
衛星暦	リアルタイム精密暦
エポック間隔	1 秒

仰角マスク	10 度
電離層補正	電離層フリー線形結合
対流圏補正	天頂遅延量推定
Code/Carrier-Phase Error Ratio L1/L2	1000.0

PPP キネマティック解析では解の収束に時間がかかるため、解析開始から 2 時間を除去して、精度 (RMS) を計算した。

解析結果の精度を表 6-5 に、解析結果の座標の時系列プロットについて、IGS03 による GPS のみの結果を図 6-1 に、IGS03 による GPS と GLONASS を組み合わせた結果を図 6-2 に、CLK11 による GPS のみの結果を図 6-3 に、CLK11 による GPS と GLONASS を組み合わせた結果を図 6-4 に示す。また、解析使用衛星数の時系列プロットをそれぞれ IGS03 による結果を図 6-5 に、CLK11 による結果を図 6-6 に示す。

IGS03 による解析、CLK11 による解析とも、GLONASS を組み合わせることで精度の低下がみられた。CLK11 の方が IGS03 より GLONASS を組み合わせた場合に精度の低下が小さいが、衛星数をみると GPS のみの場合と、GLONASS を組み合わせた場合の衛星数の差が小さく、CLK11 の方が IGS03 より GLONASS 衛星を解析に使用していないためであり、残差が大きいため GLONASS が除去されているためである。これらは、リアルタイム精密暦の精度が十分でないのか、評価プログラムが GPS、GLONASS に含まれるバイアスを除去しきれていないものと考えられるが説明はできていない。測位の安定化、性能の向上については今後の課題である。

表 6-5 リアルタイム PPP 解析結果 精度

マウント ポイント	GPS			GPS+GLONASS		
	RMS (E)	RMS (N)	RMS (U)	RMS (E)	RMS (N)	RMS (U)
IGS03	0.0464	0.0464	0.1224	0.0862	0.1053	0.2040
CLK11	0.0363	0.0286	0.0684	0.0804	0.0653	0.0863

(単位 : m)

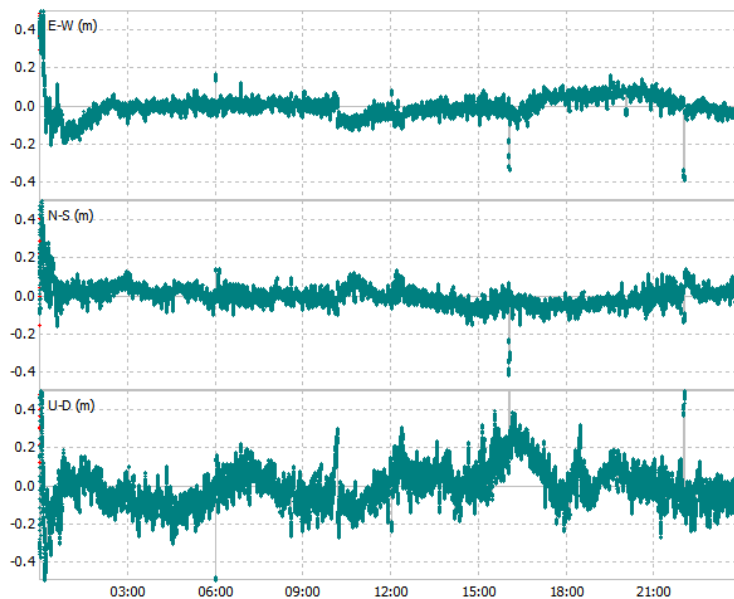


図 6-1 IGS03 による PPP 解析結果 時系列プロット【GPS】

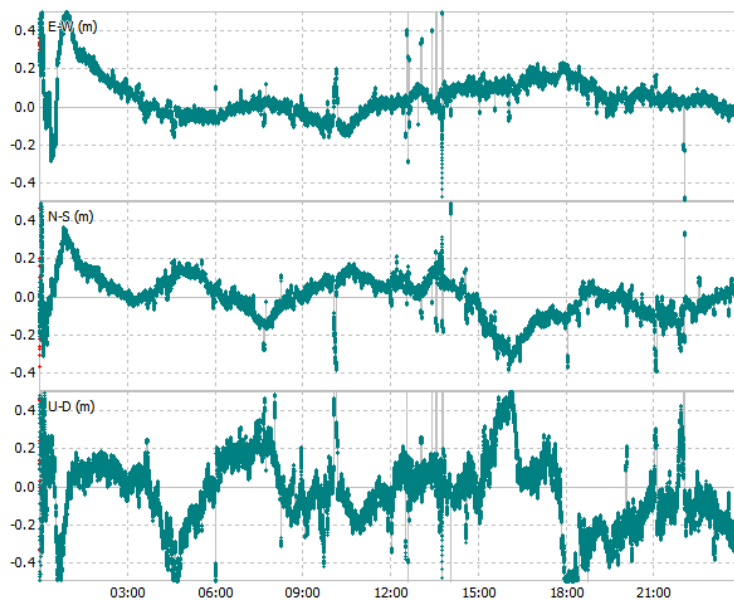


図 6-2 IGS03 による PPP 解析結果 時系列プロット【GPS+GLONASS】

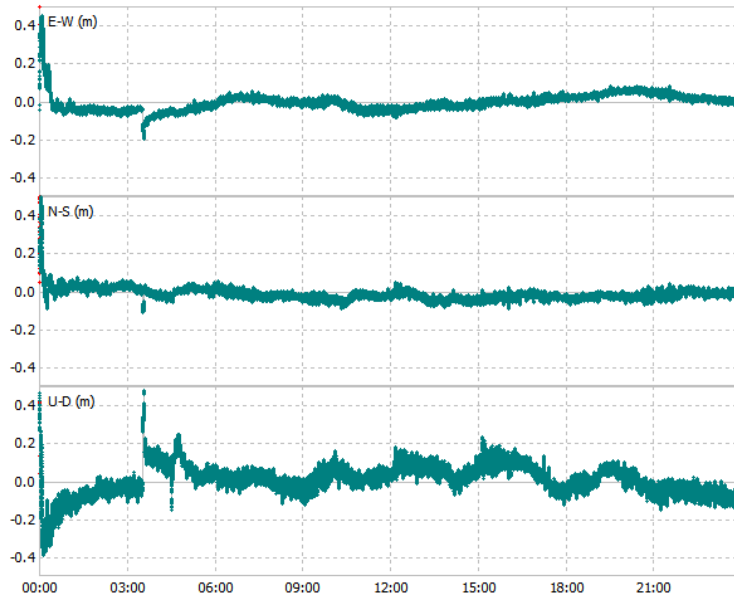


図 6-3 CLK11 による PPP 解析結果 時系列プロット【GPS】

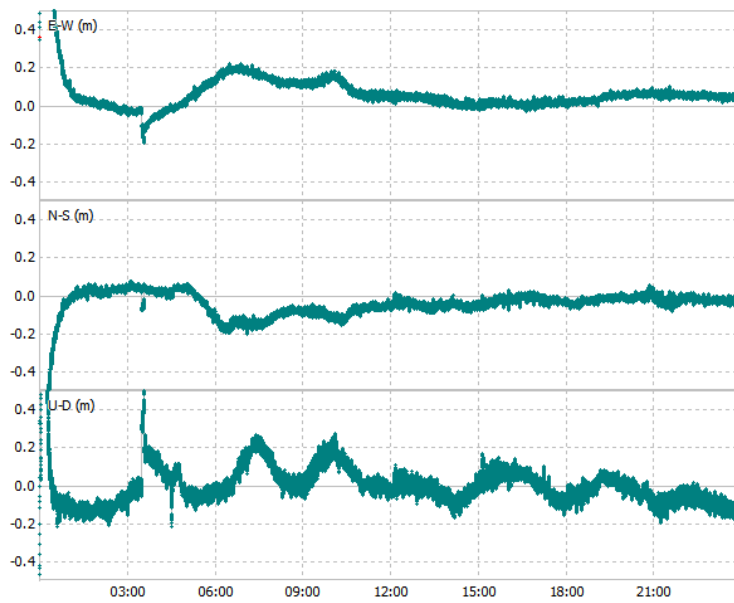


図 6-4 CLK11 による PPP 解析結果 時系列プロット【GPS+GLONASS】

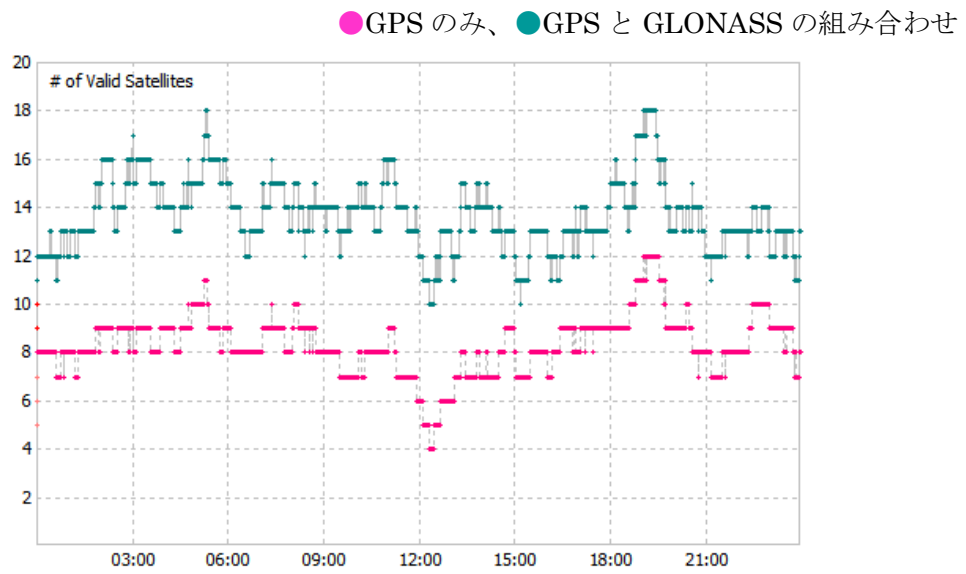


図 6-5 IGS03 による PPP 解析結果 衛星数

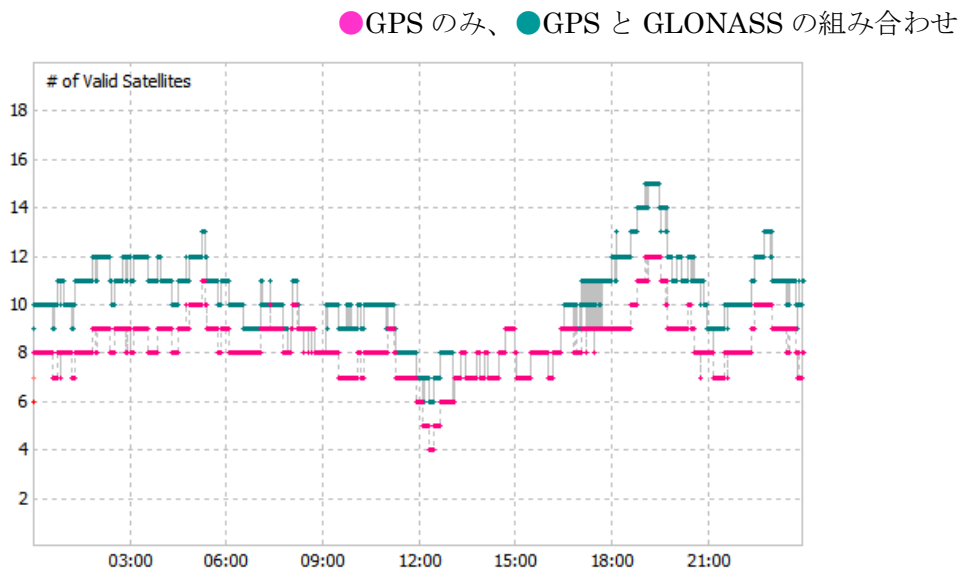


図 6-6 CLK11 による PPP 解析結果 衛星数

6.2. GPSを用いた精密単独測位でアンビギュイティ解決をする計算手法の調査

GPSを用いた精密単独測位でアンビギュイティ解決をする計算手法 (PPP-AR) について、測位原理、計算手法、解析における課題、測位解の精度及び安定性等について文献により調査した。

一般的に PPP では、衛星と受信機搬送波位相に存在する UPD (Uncalibrated phase delay) はキャンセルできず、搬送波位相のアンビギュイティを実数として推定する。近年の研究では、衛星の UPD が時間・空間的に安定しており [18]、事前に推定した衛星の UPD を高精度の軌道、時計とともに PPP に適用すれば、搬送波位相の整数アンビギュイティが求まり、基線解析に匹敵する測位精度を達成できることがわかってきた。このように PPP 測位過程で衛星の UPD を補正し、アンビギュイティを整数化する手法は PPP-AR といい、現在、主に IRC (Integer recovery clock) 方式と FCB (Fractional cycle bias) 方式が採用されている。以下、それぞれの概要を示す。

1) IRC 方式

IRC 方式は、擬似距離、搬送波位相観測の線形結合と電離層フリー結合から推定したそれぞれの衛星ワイドレーンバイアス、衛星ナローレーンバイアスが含まれた衛星時計 (アンビギュイティを整数に修復する衛星時計、以下、整数位相時計という) を PPP に適用し、フロートアンビギュイティを整数化する解析手法である。次に、D. Laurichess らの提案 [19], [20], [21]を示す。

D. Laurichess et al.(2007)では、基本観測方程式は次のように与えられる。

$$P_1 = D + \Delta\tau + e + \Delta h \quad 6-10$$

$$P_2 = D + \gamma\Delta\tau + \gamma e + \Delta h$$

$$\lambda_1 L_1 = D_w + \Delta\tau - e + \Delta h - \lambda_1 N_1$$

$$\lambda_2 L_2 = D_w + \gamma\Delta\tau - \gamma e + \Delta h - \lambda_2 N_2$$

ここで、

D : 対流圏遅延を含めた幾何学距離

D_w : D の中に、Wind_up 効果が加算されている

e : L1 の電離層遅延

$\Delta\tau$: 衛星(emi)と受信機(rec)の群遅延時間の差分 (Time Group Delay)、

$$\Delta\tau = \tau_{rec} - \tau_{emi}$$

Δh : 衛星と受信機時計誤差の差分、 $\Delta h = h_{rec} - h_{emi}$

N_1, N_2 : L1、L2 のアンビギュイティ

$\gamma = f_1^2 / f_2^2$: 周波数の二乗比

■ 衛星ワイドレーンバイアスの推定

まず、擬似距離観測値 (P_1, P_2) と搬送波位相観測値 (L_1, L_2) から N_1 と N_2 の測定値 \tilde{N}_1 と \tilde{N}_2 を次のように定義する。

$$eP = \frac{P_1 - P_2}{1 - \gamma} \quad 6-11$$

$$\tilde{N}_1 = \frac{P_1 - 2eP}{\lambda_1} - L_1 \quad 6-12$$

$$\tilde{N}_2 = \frac{P_2 - 2\gamma eP}{\lambda_2} - L_2 \quad 6-13$$

さらに、ワイドレーン測定値 \tilde{N}_w は \tilde{N}_1 と \tilde{N}_2 より次式で表せる。

$$\tilde{N}_w = \tilde{N}_2 - \tilde{N}_1 \quad 6-14$$

式 6-14 からすべてのエポックのワイドレーン測定値 \tilde{N}_w の平均を取り、それをフロートワイドレーンアンビギュイティ \hat{N}_w とする。 \hat{N}_w の推定精度は十分整数化できる精度とし、その整数部分と小数部分はそれぞれ整数ワイドレーンアンビギュイティとワイドレーンアンビギュイティの小数部分 μ_w として抽出する。

$$\hat{N}_w = \text{average}(\tilde{N}_w) = N_w + \mu_w$$

ここで、 μ_w には受信機と衛星のワイドレーンバイアスの小数部分が含まれており、次の式で表される。

$$\mu_w = \mu_{rec} - \mu_{emi}$$

時間的に安定している衛星バイアスに対して、受信機バイアスは通常安定しない [22]。 μ_w から衛星バイアスを分離するために、バイアスが安定しているひとつの外部受信機を使用し、その受信機バイアスを任意の値 (例 $\mu_{rec} = 0$) と仮定し、 μ_{emi} を推定する。

■ 整数位相時計の推定

次に、擬似距離と搬送波位相の観測から、次の電離層フリー結合を定義する。

$$P_c = \frac{\gamma P_1 - P_2}{\gamma - 1} \quad 6-15$$

$$\tilde{Q}_c = \frac{\gamma \lambda_1 (L_1 + \hat{N}_1) - \lambda_2 (L_2 + \hat{N}_1 + N_w)}{\gamma - 1}$$

ここで、 \hat{N}_1 は N_1 の推定値であり、測定値 \tilde{N}_1 の平均値に最も近い整数とする。

$$\tilde{N}_{1,ave} = \text{average}\left(\frac{P_1 - 2eP}{\lambda_1} - L_1\right) \quad 6-16$$

$$\tilde{N}_1 = \text{round}(\tilde{N}_{1,ave})$$

以上の処理で推定した \hat{N}_1 、 N_w を用いて、電離層フリー結合を式 6-10 と式 6-16 より次のように変形する。

$$P_c = D + \Delta h$$

$$\tilde{Q}_c = \frac{\gamma\lambda_1(L_1 + \hat{N}_1) - \lambda_2(L_2 + \hat{N}_1 + N_w)}{\gamma - 1} = D_w + \Delta h - \lambda_c \delta N_1 \quad 6-17$$

ここで

N_w : ナローレーン波長、 $\lambda_c = (\gamma\lambda_1 - \lambda_2)/(\gamma - 1)$

δN_1 : 整数アンビギュイティの補正、 $\delta N_1 = \hat{N}_1 - N_1$

式 6-17 を用いてカルマンフィルタ計算より受信機位置、時計パラメータ、整数アンビギュイティの補正 δN_1 、対流圏天頂遅延が推定される。そして、推定された受信機位置、対流圏天頂遅延を既知なものとして、式 6-17 をさらに次のように変形する。

$$\tilde{Q}_c - D_w = \lambda_c \delta N_1 + h_{rec} - h_{emi} \quad 6-18$$

アンビギュイティの補正 δN_1 を整数化するために、時間変動の大きい受信機時計 h_{rec} を基準受信機との間に式 6-18 の一重差によって消去し、さらに、基準受信機のアンビギュイティの補正 $\delta N_1 = 0$ 、受信機時計誤差 $h_{rec} = 0$ とし、各衛星の時計 h_{emi} とアンビギュイティ補正 δN_1 のフロート解を求めた後に、アンビギュイティ補正 δN_1 を整数化する。

以上、PPP-AR 測位に必要な補正データ（衛星ワイドレーンバイアス μ_{emi} と整数位相時計 h_{emi} ）をサーバ側のネットワーク解析から推定するアルゴリズムについて記述した。クライアント側では、これらの補正データを受けて、精密単独測位に適用し、ネットワーク解析と同じようにワイドレーンアンビギュイティ、ナローレーンアンビギュイティを整数化した後に、フィックス解が求められる。

文献 [19]では、IGS の精密暦と上記解析手法を用いた PPP-AR 解析を実行した結果、L1 アンビギュイティのフィックス率と決定誤差の RMS はそれぞれ 88.5%、9.7mm である。また、クライアント側で衛星時計の補正データを利用したスタティック PPP-AR 測位では、水平精度は 2cm 以下であった。

上記 D. Laurichess らの提案と同じ、アンビギュイティを整数化するために衛星の UPD を衛星時計に含めて、校正する研究 [23], [24], [25], [26], [27]もある。

2) FCB 方式

FCB 方式は、Melbourne-Wübbena 結合と電離層フリー結合から推定したそれぞれの衛星間のワイドレーンバイアスの小数部分と衛星間のナローレーンバイアスの小数部分を PPP に適用し、フロートアンビギュイティを整数化する解析手法である。推定される位相バイアスの小数部分は SD-UPD (single-difference uncalibrated phase delay) という。次に、M.Ge, et al. (2008) [18]の提案を示す。

まず、搬送波位相と擬似距離を以下のように定義する。

$$L_{mk}^i = \rho_k^i - \frac{\kappa}{f_m^2} + \lambda_m b_{mk}^i \quad 6-19$$

$$P_{mk}^i = \rho_k^i + \frac{\kappa}{f_m^2}$$

ここで、 k は受信機、 i は衛星、 κ は電離層遅延、 f_m 、 λ_m はそれぞれ周波数と波長を表す。 ρ_k^i は周波数に依存しない遅延であり、中に幾何学距離、対流圏遅延、時計誤差が含まれている。 b_{mk}^i は実数アンビギュイティであり、以下のように表現される。

$$b_{mk}^i = n_{mk}^i + \Delta\phi_m^i - \Delta\phi_{mk} \quad 6-20$$

ここで、 n_{mk}^i は整数アンビギュイティ、 $\Delta\phi_m^i$ は衛星の UPD、 $\Delta\phi_{mk}$ は受信機の UPD を示す。

■衛星間のワイドレーン SD-UPD の推定

Melbourne-Wübbena 結合 L_{mw} より、受信機時計誤差、衛星時計誤差、対流圏遅延、電離層遅延がキャンセルされ、実数ワイドレーンバイアスのみとなる。

$$L_{mw,k}^i = \frac{f_1}{f_1 - f_2} L_{1k}^i - \frac{f_2}{f_1 - f_2} L_{2k}^i - \left(\frac{f_1}{f_1 - f_2} P_{1k}^i + \frac{f_2}{f_1 - f_2} P_{2k}^i \right) = \lambda_w b_{wk}^i \quad 6-21$$

次に、衛星間のワイドレーン SD-UPD の推定手順を示す。

①エポックごとの実数ワイドレーンアンビギュイティ b_{wk}^i を求める。

$$b_{wk}^i = \frac{L_{mw,k}^i}{\lambda_w} \quad 6-22$$

②ワイドレーンアンビギュイティの推定値 \hat{b}_{wk}^i とその標準偏差を求める。

$$\hat{b}_{wk}^i = \text{average}(b_{wk}^i) \quad 6-23$$

$$\sigma_{b_{wk}^i} = \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{N_k^i} (b_{wk}^i - \hat{b}_{wk}^i)^2}{N_k^i}}$$

N_k^i : Melbourne-Wübbena 結合の全ての観測データ数

衛星 i, j 間の一重差を取ると、受信機の UPD がキャンセルされ、一重差の位相バイアスは次のようになる。

$$b_{wk}^{i,j} = b_{wk}^i - b_{wk}^j = n_{wk}^i - n_{wk}^j + \Delta\phi_w^i - \Delta\phi_w^j = n_{wk}^{i,j} + \Delta\phi_w^{i,j} \quad 6-24$$

また、 $\Delta\phi_w^{i,j}$ の小数部を $\delta\phi_w^{i,j}$ とおくと、上の式は次のように変形できる。

$$b_{wk}^{i,j} = \tilde{n}_{wk}^{i,j} + \delta\phi_w^{i,j} \quad 6-25$$

$\tilde{n}_{wk}^{i,j}$: 整数ワイドレーンアンビギュイティの近似

③一重差の実数ワイドレーンアンビギュイティ $\hat{b}_{wk}^{i,j}$ とその標準偏差を次式で求める。

$$\hat{b}_{wk}^{i,j} = \hat{b}_{wk}^i - \hat{b}_{wk}^j \quad 6-26$$

$$\sigma_{\hat{b}_{wk}^{i,j}} = \sqrt{\sigma_{\hat{b}_{wk}^i}^2 + \sigma_{\hat{b}_{wk}^j}^2}$$

④すべての観測点において、同じペア (i, j) の実数ワイドレーンアンビギュイティ推定値 $\hat{b}_{wk}^{i,j}$ の小数部分の平均を衛星 i, j 間のワイドレーン SD-UPD とし、次式で計算する。

$$\delta\hat{\phi}_w^{i,j} = \text{average}(\text{fraction}(\hat{b}_{wk}^{i,j})) \quad 6-27$$

$\delta\hat{\phi}_w^{i,j}$ の標準偏差は、次式となる。

$$\sigma_{\delta\hat{\phi}_w^{i,j}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{N^{i,j}} (\text{fraction}(\hat{b}_{wk}^{i,j}) - \delta\hat{\phi}_w^{i,j})^2}{N^{i,j}}} \quad 6-28$$

衛星間のワイドレーン SD-UPD を求めるときに、マルチパスの影響を無視できるレベルに抑えるために、観測データは 20 分程度に分けて実施する必要がある。また、アウトレイヤーなどの品質監視も重要であると提案された。

⑤整数ワイドレーンアンビギュイティの近似とその標準偏差を求める。

$$\tilde{n}_{wk}^{i,j} = \hat{b}_{wk}^{i,j} - \delta\hat{\phi}_w^{i,j} \quad 6-29$$

$$\sigma_{\tilde{n}_{wk}^{i,j}} = \sqrt{\sigma_{\hat{b}_{wk}^{i,j}}^2 + \sigma_{\delta\hat{\phi}_w^{i,j}}^2}$$

⑥アンビギュイティの整数化

$\tilde{n}_{wk}^{i,j}$ 近傍の整数がフィックス解となる確率 P_0 は以下の式を満足すればよい。

$$P_0 \geq 1 - \alpha \quad 6-30$$

$$P_0 = 1 - \sum_{i=0}^{\infty} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{i - |b - n|}{\sqrt{2}\sigma} \right) - \operatorname{erfc} \left(\frac{i + |b - n|}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right]$$

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt$$

ここで、 b は実数アンビギュイティ、 σ は実数アンビギュイティの標準偏差、 n は整数アンビギュイティとし、有意水準 α は通常 0.1%とされる。

本文献の研究では、180 箇所の IGS 観測点の 2006 年通日 106 から通日 119 間のデータを利用し、ワイドレーン SD-UPD の時間変動を確認した結果、0.05 サイクル以下である。

■衛星間のナローレーン SD-UPD の推定

衛星間のナローレーン SD-UPD は短い時間内に一定値と仮定し、推定したワイドレーンアンビギュイティを既知なものとし、電離層フリー結合より推定する。

電離層フリー観測方程式を次のように定義する。

$$L_{ck}^i = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} L_{1k}^i - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} L_{2k}^i = \rho_k^i \lambda_1 b_{ck}^i \quad 6-31$$

ここで、 b_{ck}^i は電離層フリーの位相バイアスであり、次の式で表せる。

$$b_{ck}^i = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} b_{1k}^i - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} b_{2k}^i = \frac{f_1}{f_1 + f_2} b_{nk}^i - \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} b_{wk}^i \quad 6-32$$

次に、衛星間のナローレーン SD-UPD の推定手順を示す。

①電離層フリー結合式 6-31 よりフロート解 \hat{b}_{ck}^i を求める。

②電離層フリーの位相バイアスの一重差を求める。

$$\hat{b}_{ck}^{i,j} = \hat{b}_{ck}^i - \hat{b}_{ck}^j \quad 6-33$$

③位相バイアス $\hat{b}_{ck}^{i,j}$ をワイドレーン、ナローレーンの整数部分と小数部分に分けて表示すると次のようになる。

$$\begin{aligned} \hat{b}_{ck}^{i,j} &= \frac{f_1}{f_1 + f_2} \hat{b}_{nk}^{i,j} - \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} \hat{b}_{wk}^{i,j} \\ &= \frac{f_1}{f_1 + f_2} (\tilde{n}_{nk}^{i,j} + \delta\phi_n^{i,j}) - \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} (\tilde{n}_{wk}^{i,j} + \delta\phi_w^{i,j}) \end{aligned} \quad 6-34$$

ここで、

$$\hat{b}_{nk}^{i,j} = \tilde{n}_{nk}^{i,j} + \delta\phi_n^{i,j}, \quad \hat{b}_{wk}^{i,j} = \tilde{n}_{wk}^{i,j} + \delta\phi_w^{i,j}$$

③で求めた電離層フリーの位相バイアス $\hat{b}_{ck}^{i,j}$ と求めた整数ワイドレーン、ナローレーンアンビギュイティ $\hat{n}_{wk}^{i,j}$ を式 6-34 に代入すると、一重差ナローレーンアンビギュイティ $\hat{b}_{nk}^{i,j}$ の最も良い近似値とその標準偏差は次式で求める。

$$\hat{b}_{nk}^{i,j} = \frac{f_1 + f_2}{f_1} \hat{b}_{ck}^{i,j} - \frac{f_2}{f_1 + f_2} \hat{n}_{wk}^{i,j} \quad 6-35$$

$$\sigma_{\hat{b}_{nk}^{i,j}} = \frac{f_1 + f_2}{f_1} \sigma_{\hat{b}_{ck}^{i,j}} \quad 6-36$$

④衛星間のナローレーンアンビギュイティの小数部分が安定しないので、短い時間内(例 15 分)に一定のものとして、上記衛星間のワイドレーンアンビギュイティの小数部分の推定と同じように求める。

⑤上記衛星間のワイドレーン SD-UPD の推定と同じ、整数ナローレーンアンビギュイティの近似とその標準偏差を求め、アンビギュイティを決定する。

⑥整数化したアンビギュイティを拘束し、受信機位置などのパラメータを最終解として推定する。

以上、サーバ側のネットワーク解析において、衛星間のワイドレーンとナローレーン SD-UPD の推定から PPP-AR 測位までのアルゴリズムを示した。クライアント側では、これらの衛星間の SD-UPD を受けて、PPP に適用すれば同じように PPP-AR を行える。

本論文では、IGS で基準点として使用されている 180 箇所の観測点を含め、全部 450 観測点を用いて実験が行われた。その中の 120 局のネットワーク解析から求めた衛星間ワイドレーンとナローレーン SD-UPD を 330 箇所の PPP-AR 測位に適用し、解析した結果は、フィックス率は約 80%以上で、測位精度は最大 30%改善された。

M.Ge, et al. (2008)の提案と同じ、衛星間の SD-UPD を補正データとして PPP に適用する PPP-AR の解析手法は、L. Mermart [28], J. Geng [29], [30]、J. Tegger [31]の研究にも採用されている。上記にまとめた PPP-AR の 2 つの解析手法の大きな違いは、ナローレーンアンビギュイティを整数化するために、補正データとして、衛星位相バイアスの小数部分を抽出し、補正するか、または、それを衛星時計誤差に含めて推定し、PPP に適用するかにある。2 つの方式を用いた解析の結果はわずかの差 (2mm 以内) であり、FCB 方式は IGS クロックも適用できるが、IRC 方式は、IRC から求めたクロックを利用する必要があると J. Geng の論文 [29]で指摘した。

7. まとめ

複数周波数信号及び衛星系の組合せに関する技術開発を実施するにあたり、現時点では3周波数の信号を出力できるGPS衛星は3機しか運用されていない、Galileoはまだ正式運用に至っていない等の制約があるため、シミュレータによる観測データの生成が不可欠となる。そのため、衛星測位シミュレータ（ソフトウェア）及びGNSSのL5信号の出力が可能な信号シミュレータ（ハードウェア）について、現実的な電離層、対流圏、マルチパス等の誤差モデルを与える方法を検討し、作成された観測データが本作業で使用するに妥当かを評価した。その結果、いずれのシミュレータも軌道情報に従って適切な信号情報を出力していることを確認した。但し、マルチパスについては、ソフトウェアシミュレータでは擬似距離と搬送波位相で別々に設定できないことやSNR情報が出力されないという課題が判明した。ハードウェアシミュレータについても、マルチパスを与えるために別途チャンネルを使用するため、現実的なマルチパスを設定するにはチャンネル数が不足するという課題も判明した。また、電離層遅延量、対流圏遅延量については、幾つかのモデルを選択して設定することはできるが、現実的な環境に近い遅延量を設定するのは非常に難しいという課題も判明した。ここでは、L5を利用した基線解析の計算手法について比較検証（相対比較）をする目的であれば利用できると判断し、これらのシミュレータデータを使用して観測データを生成することとした。

L5帯を含む複数周波数信号を組み合わせる基線解析においては、平成23年度の結果を踏まえ「TCAR」及び「電離層推定+ILS」による3周波解析と、従来手法でL5を含む1周波及び2周波解析の定量的な比較を行った。比較検証を行うため、L5を使用した1周波による「ILS」とL1、L5を使用した2周波による「WL+NL」「電離層推定+ILS」解析を行う検証用プログラムを開発し、あわせてプログラム実行時間を出力する機能を付加した。さまざまな解析条件、解析手法による基線解析の結果、長基線では「電離層推定+ILS」の方が初期化時間、フィックス率、精度（RMS）において良い結果が得られることを確認した。また、シミュレータで作成したマルチパス環境においても「電離層推定+ILS」の方が比較的安定してフィックス解が得られることを確認した。但し、計算時間（計算負荷）については、「電離層推定+ILS」の方が非常に長くかかる（負荷が高い）ことが分かった。「電離層推定+ILS」については、2周波解析に比べて3周波解析では、フィックス率、精度（RMS）において若干の性能向上は見られるが、それ程大きな差異は見られなかった。現時点では、計算負荷の観点から3周波解析を行うメリットはほとんどないと考えられる。なお、L1、L2の代わりにL5を利用することによる性能の差異はほとんど見られなかった。これは、L5がL1、L2に比べてマルチパスに強いとした平成23年度の結果を反映できていないが、L1、L2の受信機回路・信号処理に特別な工夫が施されているためか、シミュレーションデータが現実的なマルチパスを再現で

きていないためと想像するものの解明することはできなかつた。今後、L5 信号を出力する衛星の増加に合わせて、実観測データによる評価が重要であると考ええる。

次に、複数衛星系（GPS、QZSS、GLONASS 及び Galileo）の観測データを組み合わせる際に発生する誤差を軽減する方法に関して、平成 23 年度の結果を踏まえ、異なる衛星系間で発生する受信機ハードウェアバイアス（ISB）や GLONASS の FDMA 方式により発生する GLONASS チャンネル間バイアス（IFB）の補正値を適用することで、GPS と GLONASS 間で位相差を取ること（統合解析）を可能にする方法について調査・検討を行った。また、それぞれのバイアス（ISB、IFB）が、温度変化、アンテナ種類、受信機ファームウェアバージョン、受信機再起動、受信機個体差等により変化しないか、変化する場合はその変化量が測位解の精度及び安定性に与える影響について評価した。これら进行评估するため、IFB、擬似距離 ISB の推定する評価プログラムを開発した。また、搬送波位相 ISB については、座標を固定した基線解析による搬送波位相の残差から抽出することとした。IFB、擬似距離 ISB については受信機メーカー毎に値が異なり、温度変化等の観測条件の違いによりほとんど値は変化しないことが判明した。一方、搬送波位相 ISB については、日単位でも変化することが判明した。また、これらのバイアス補正値を適用し、「混合解析」「統合解析」を行う評価プログラムを開発し、異機種受信機間による GPS、GLONASS の観測データを用いた後処理キネマティックでの基線解析を行い評価した。この結果、混合解析であれば IFB のみの補正を適用することで安定した測位結果を得ることができたが、統合解析となるとアンビギュイティが解決できないことも多く、擬似距離 ISB、搬送波位相 ISB の補正も適用することで安定した測位結果が得られることが分かった。なお、今回の解析においては搬送波位相 ISB の補正値を日ごとに推定して与えており、観測条件の違いによる搬送波位相 ISB の変化については今後の調査課題となる。さらに、GPS、QZSS についても、擬似距離 ISB を推定・適用した上で、後処理キネマティックによる基線解析を行い評価した。GPS L2P(Y)と QZSS L2C、GPS L2C と QZSS L2C の間では、異なる擬似距離 ISB が存在することが確認できた。これは、GPS L2P(Y)と GPS L2C 間にも擬似距離 ISB が存在することを意味する。また、L2P(Y)と L2C 間の搬送波位相データに存在する 1/4 サイクルシフトについても、平成 23 年度の結果のとおり受信機メーカーにより出力方法が異なるため、補正方法が異なることが分かった。最終的には、これらのバイアス補正を適用することで、GPS L2P(Y)と L2C 及び QZSS L2C を組み合わせた統合解析において、安定した測位解が得られることを確認した。なお、GPS と Galileo 間のバイアスについての調査は実施できなかったが、GPS と GLONASS、GPS と QZSS のバイアスについての評価結果が得られたことにより、同様の補正手法で GPS と Galileo についても統合解析が実施できるものと考えられる。

観測誤差モデルについては、平成 23 年度の結果を踏まえ、衛星仰角に応じた重みづけ

による観測誤差モデルの適用手法が、周辺環境の違いによって測位解の精度及び安定性に与える影響について評価した。オープンスカイ環境、街の中の環境、森の中の環境を想定し、それぞれの環境で求めた観測誤差モデルをそれぞれの環境における基線解析に適用したが、オープンスカイ環境を除いて効果は認められなかった。オープンスカイ環境で求めた観測誤差モデルをそれぞれの環境における基線解析に生成したところ、若干初期化時間、精度等に効果は認められるもののそれ程大きなものではなかった。むしろ、SNR マスクを合わせて適用した方が大きな効果が得られることが判明した。

GPS と GLONASS を併用したリアルタイム精密単独測位手法 (PPP) については、測位解を安定的に得るために有効と考えられる計算手法について文献調査を行った。通常 GPS による精密単独測位では、衛星・受信機アンテナ位相中心補正、相対論効果、地球潮汐、位相の Wind-Up 効果、周波数バイアス等を考慮し、L1、L2 の電離層フリー結合を用いて、衛星位置と衛星時計誤差を既知のものとし、受信機アンテナの座標位置、受信機時計誤差、対流圏遅延量、搬送波位相のフロートアンビギュイティを推定する。GPS と GLONASS を併用する場合は、さらに GPS と GLONASS 時刻系の差と擬似距離及び搬送波位相観測値に現れる衛星系間のバイアスを考慮する必要がある。これらについての解析手法を文献調査し一般化した。あわせて、現在利用できる幾つかのリアルタイム精密暦を使用して精密単独測位を実施して、解析結果を評価した。その結果、GPS のみと比較して GPS と GLONASS を併用しても、測位精度、収束時間に対する効果は得られなかった。さらに、GPS を用いた精密単独測位でアンビギュイティを完結する計算手法 (PPP-AR) について文献により調査した。PPP では、衛星と受信機搬送波位相に存在する UPD (Uncalibrated phase delay) がキャンセルできないため、搬送波位相のアンビギュイティは実数のまま処理する。近年の研究では、衛星の UPD が時間・空間的に安定していることが分かり、事前に推定した衛星の UPD を高精度の軌道、時計とともに PPP に適用すれば、搬送波位相の整数アンビギュイティが求まり、基線解析に匹敵する測位精度を達成できることがわかってきた。ここでは、現在主に研究されている IRC (Integer recovery clock) 方式と FCB (Fractional cycle bias) 方式について調査し整理した。

8. 参考文献

1. L., **Wanninger** and S., **Wallstab-Freitag**. *Combined Processing of GPS, GLONASS, and SBAS Code Phase and Carrier Phase Measurements, Proceedings*. ION GNSS 2007.
2. L. **Wanninger**. Carrier-phase inter-frequency biases of GLONASS receivers. *Journal of Geodesy* 2012.
3. A. **Al-Shaery**, S. **Zhang** , et al. A Comparative Study of Mathematical Modelling for GPS/GLONASS Real-Time Kinematic (RTK). ION GNSS 2012.
4. 山田英輝 , et al. チャンネル間ハードウェアバイアス較正による RTK-GPS/GLONASS 測位の性能評価. ION GNSS 2010.
5. L. **Wanninger**. GLONASS Carrier-phase Inter-frequency Biases. IGS Workshop on GNSS Biases 2012, http://www.biasws2012.unibe.ch/index.html/bws12_2.2.3.pdf, 2012.
6. S. **Schaer**. Key issues, recommendations, action items. IGS Workshop on GNSS Biases, 2012.
7. -. Overview of GNSS biases. IGS Workshop on GNSS Biases, 2012.
8. R. **Dach** , et al. GPS/GLONASS Clock Solutions at CODE. IGS Workshop on GNSS Biases 2012.
9. M. **Uhlemann** , et al. GFZ-Current status and plans. IGS Workshop on GNSS Biases 2012.
10. R. **Dach** , et al. Comparison of GPS/GLONASS Clock Solutions. IGS Workshop on GNSS Biases 2012.
11. F. **Takac** , et al. GLONASS RTK Interoperability Issues Involving 3rd Party Receivers. IGS Workshop on GNSS Biases 2012.
12. R. **Dach** , et al. Combining the Observations from Different GNSS. In *Proceedings of EUREF 2010 Symposium*, 2010.
13. G. **Wubbena** , et al. PPP-RTK: Precise Point Positioning Using State-Space Representation in RTK Networks. ION GNSS 2005.
14. 安田明生 , 山田英輝. マルチ GNSS 時代における準天頂衛星システムの役割について. IEICE 2011.
15. R. **Dach** , et al. Combining the Observations from Different GNSS. In *Proceedings of EUREF 2010 Symposium*, 2010.
16. M. **Meindl**. Combined Analysis of Observations from Different Global Navigation Satellite Systems. <http://www.bernese.unibe.ch/publist2011/sgk-83.pdf>.
17. N.**Reussner** , L.**Wanninger**. GLONASS Inter-frequency Biases and Their Effects on RTK and PPP Carrier-phase Ambiguity Resolution. ION GNSS 2011.

18. **M. Ge , et al.** Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations. *Journal of Geodesy* 2008.
19. **D. Laurichesse , F. Mercier.** Integer ambiguity resolution on undifferenced GPS phase measurements and its application to PPP. *ION GNSS 2007*.
20. **D. Laurichesse , et al.** Real Time Zero-difference Ambiguities Fixing and Absolute RTK. *ION NTM 2008*.
21. -. Phase Biases Estimation for Undifferenced Ambiguity Resolution. *PPP-RTK & Open Standards Symposium, 2012*.
22. 馬 冠一、丸山 隆. GEONET データによる TEC 導出と衛星及び受信機バイアス決定. *通信総合研究所季報 Vol.48 No.4, 2002*.
23. **L. Mervart , et al.** Precise Point Positioning With Ambiguity Resolution In Real-Time. *ION GNSS 2008*.
24. -. Processing GNSS Data in Real-time: Algorithms, Issues, and Challenges. *PPP-RTK & Open Standards Symposium, 2012*.
25. **J. Geng , et al.** Integer ambiguity resolution in precise point positioning:method comparison. *Journal of Geodesy* 2010.
26. **P. Collins.** Isolating and Estimating Undifferenced GPS Integer Ambiguities. *ION NTM 2008*.
27. **S. Banville , et al.** Satellite and Receiver Phase Bias Calibration for Undifferenced Ambiguity Resolution. *ION NTM 2008*.
28. **J.Tegedor.** Estimation of uncalibration hardware delays of single-difference ambiguity resolution. *IGS Workshop on GNSS Biases 2012*.
29. **J. Geng , et al.** Un-calibrated Phase Biases for Precise Point Positioning Integer Ambiguity Resolution. *IGS Workshop on GNSS Biases 2012*.
30. -. Integer ambiguity resolution in precise point positioning:method comparison. *Journal of Geodesy* 2010.
31. -. Performance of Hourly Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution. *ION GNSS 2008*.