

CLASとGRモデルに基づく 単一周波数GPS高精度測位

立命館大学 理工学研究科

○鈴木 健斗 久保 幸弘 杉本 末雄

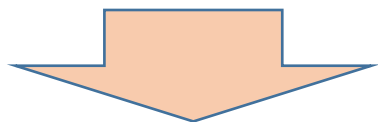
研究背景

GNSS 測位の活用事例

自動運転: 運転の自動化

IT 農業: 農機を高精度に操作して農地管理
を行う手法

情報化施工: 建設機械を高精度に操作して施工
する手法



センチメートル級の高精度な測位が必要



研究背景

精密単独測位

従来の精密単独測位は、一台の受信機を用いて
数 [cm] から十数 [cm] の精度で測位が可能

デメリット

- 都市部や山間部での安定した測位が難しい
- 自動運転や IT 農業などでの使用にはさらなる信頼性が必要

研究背景

QZSS (Quasi-Zenith Satellite System)

- 日本が開発している、準天頂衛星と呼ばれる測位衛星を使用した衛星測位システムのこと
- 都市部や山間部など障害物が多い場所でも安定した測位が可能となる

QZSS が提供するサービスの一つが
CLAS (Centimeter Level Augmentation Service)



CLAS

GPS, QZS, Galileo 等の測位衛星



測位信号

CLAS 補正情報

衛星軌道誤差
衛星時計誤差
衛星信号バイアス

測位衛星システムの
誤差要因

電離圏遅延量
対流圏遅延量

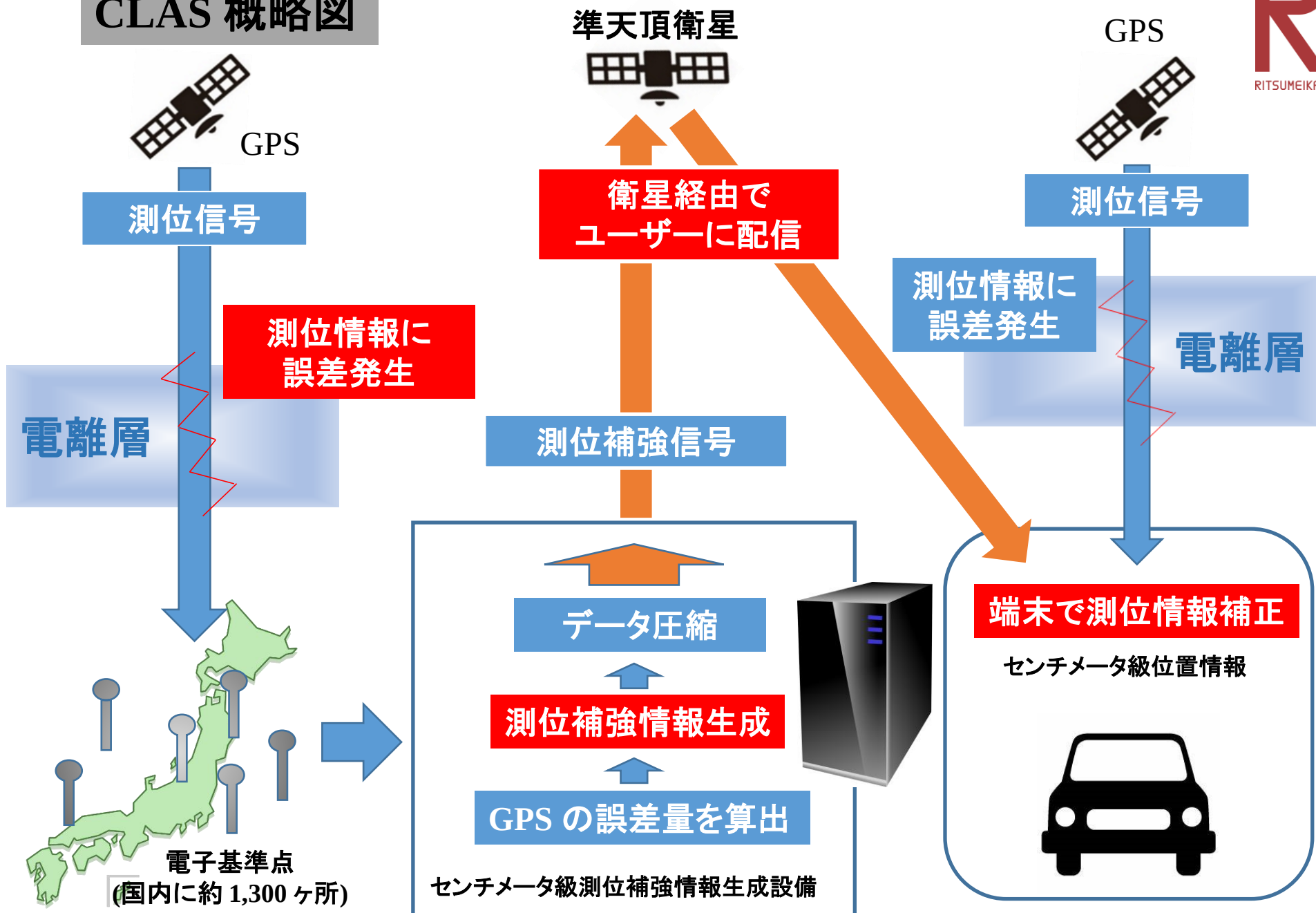
電波伝搬による
誤差要因

マルチパス誤差
受信機バイアス等

地上特有の
誤差要因



CLAS 概略図



研究背景

- IT農業や情報化施工、自動運転への活用にはさらなる信頼性が求められる
- 実際の測位環境(都市部)では、二周波分の情報が取得できない状況も考えられる



CLAS を利用した単一周波数高精度測位

先行研究にて、CLAS を利用したL1周波数での一周波測位
CLAS を利用したL2周波数での一周波測位
結果を比較

	L1	L2
周波数	1575.42[MHz]	1227.60[MHz]
波長	19[cm]	24.4[cm]

観測モデル

P(Y)コード擬似距離

$$\begin{aligned}\rho_{PY,u}^p(t) &= r_u^p(t, t - \tau_u^p) + c [\delta t_u(t) - \delta t^p(t - \tau_u^p)] \\ &\quad + \frac{f_1^2}{f_2^2} \delta I_u^p(t) + \delta T_u^p(t) + \delta b_{PY}^p + \Delta P_{ant} + d_{rel}^p + e_{PY,u}^p(t)\end{aligned}$$

搬送波位相積算値

$$\begin{aligned}\Phi_{L2,u}^p(t) &= r_u^p(t, t - \tau_u^p) + c [\delta t_u(t) - \delta t^p(t - \tau_u^p)] - \frac{f_1^2}{f_2^2} \delta I_u^p(t) \\ &\quad + \delta T_u^p(t) + \delta b_{L2}^p + \Delta P_{ant} + d_{rel}^p + \lambda_2 \Delta \phi_{L2,u}^p + \lambda_2 N_{L2,u}^p + \lambda_2 \varepsilon_{L2,u}^p(t)\end{aligned}$$

t : 受信時刻

τ_u^p : 伝搬時間

r_u^p : 幾何学的距離

c : 光速

δt^p : 衛星時計誤差

f_1, f_2 : 搬送波周波数

δI_u^p : 電離圏遅延量

δT_u^p : 対流圏遅延量

δt_u : 受信機時計誤差

$\delta b_{PY}^p, \delta b_{L2}^p$: 衛星信号バイアス

ΔP_{ant} : アンテナ PCO/PCV

d_{rel}^p : 相対論効果

$\Delta \phi_{L2,u}^p$: Phase wind up 効果

N : 整数値バイアス

e, ε : 雑音

GNSS 線形回帰モデル

幾何学的距離 r_u^p

$r_u^p(t, t - \tau_u^p)$: 衛星 p と受信機 u との幾何学的距離

$g_{\hat{u}}^{\hat{p}}$: u についての勾配ベクトルの転置

$$\begin{aligned} r_u^p(t) &\equiv r_u^p(t, t - \tau_u^p) \\ &= \sqrt{\{x_u(t) - x^p(t - \tau_u^p)\}^2 + \{y_u(t) - y^p(t - \tau_u^p)\}^2 + \{z_u(t) - z^p(t - \tau_u^p)\}^2} \end{aligned}$$



$\hat{u}, \hat{s}^p$ まわりでテーラー級数展開,
1 次の項までの線形近似

$$\begin{aligned} r_u^p &\cong r_{\hat{u}}^{\hat{p}} + g_{\hat{u}}^{\hat{p}}[u - s^p - (\hat{u} - \hat{s}^p)] \\ &= ||\hat{u} - \hat{s}^p|| + \frac{(\hat{u} - \hat{s}^p)^T}{||\hat{u} - \hat{s}^p||} [u - s^p - (\hat{u} - \hat{s}^p)] \\ &= \frac{(\hat{u} - \hat{s}^p)^T}{||\hat{u} - \hat{s}^p||} (u - s^p) \end{aligned}$$

$$g_{\hat{u}}^{\hat{p}} \equiv \left[\frac{\partial r_u^p}{\partial u} \right]_{u=\hat{u}, s^p=\hat{s}^p}^T = \frac{(\hat{u} - \hat{s}^p)^T}{||\hat{u} - \hat{s}^p||}$$

GNSS 線形回帰モデル

P(Y)コード疑似距離

$$\rho_{PY,u}^p \cong g_{\hat{u}}^{\hat{p}}(u - s^p) + c(\delta t_u - \delta t^p) + \boxed{PRC2^p} + e_{PY,u}^p$$

搬送波位相積算値

$$\Phi_{L2,u}^p \cong g_{\hat{u}}^{\hat{p}}(u - s^p) + c(\delta t_u - \delta t^p) + \boxed{CPC2^p} + \lambda_2 N_{L2,u}^p + \lambda_2 \varepsilon_{L2,u}^p$$

$$PRC2^p = \frac{f_1^2}{f_2^2} \delta I_u^p + \delta T_u^p + \delta b_{PY}^p + \Delta P_{ant} + d_{rel}^p$$

$$CPC2^p = -\frac{f_1^2}{f_2^2} \delta I_u^p + \delta T_u^p + \delta b_{L2}^p + \Delta P_{ant} + d_{rel}^p + \lambda_2 \Delta \phi_{L2,u}^p$$

GNSS 線形回帰モデル

$$\rho_{PY,u}^p \cong g_{\hat{u}}^{\hat{p}}(\underline{u - s^p}) + c(\underline{\delta t_u - \delta t^p}) + \text{PRC}2^p + e_{PY,u}^p$$

$$\Phi_{L2,u}^p \cong g_{\hat{u}}^{\hat{p}}(\underline{u - s^p}) + c(\underline{\delta t_u - \delta t^p}) + \text{CPC}2^p + \lambda_2 N_{L2,u}^p + \lambda_2 \varepsilon_{L2,u}^p$$

$$\text{PRC}2^p = \underline{\frac{f_1^2}{f_2^2} \delta I_u^p + \delta T_u^p + \delta b_{PY}^p} + \underline{\Delta P_{ant} + d_{rel}^p}$$

$$\text{CPC}2^p = \underline{-\frac{f_1^2}{f_2^2} \delta I_u^p + \delta T_u^p + \delta b_{L2}^p} + \underline{\Delta P_{ant} + d_{rel}^p + \lambda_2 \Delta \phi_{L2,u}^p}$$

CLAS 補正量

s^p	: 衛星軌道
δt^p	: 衛星時計誤差
δI_u^p	: 電離圏遅延量
δT_u^p	: 対流圏遅延量
$\delta b_{PY}^p, \delta b_{L2}^p$	: 衛星信号バイアス

モデル補正量

ΔP_{ant}	: アンテナPCO/PCV
d_{rel}^p	: 相対論効果
$\Delta \phi_{L1,u}^p, \Delta \phi_{L2,u}^p$	: Phase wind up効果

雑音

$$\begin{aligned} s^p &= s_{CL}^p - e_s \\ c\delta t^p &= c\delta t_{CL}^p - e_{\delta t^p} \\ \delta I_u^p &= \delta I_{uCL}^p - e_{\delta I_u^p} \\ \delta T_u^p &= \delta T_{uCL}^p - e_{\delta T_u^p} \end{aligned}$$

CLはCLAS補正值
eは誤差

$$\begin{aligned} \rho_{PY,u}^p &\cong g_{\hat{u}}^{\hat{p}}(u - s_{CL}^p) + c(\delta t_u - \delta t_{CL}^p) + PRC2^p + v_{PY} \\ \Phi_{L2,u}^p &\cong g_{\hat{u}}^{\hat{p}}(u - s_{CL}^p) + c(\delta t_u - \delta t_{CL}^p) + CPC2^p + \lambda_2 N_{L2,u}^p + v_{L2} \end{aligned}$$

$$v_{PY} = g_{\hat{u}}^{\hat{p}} e_{s^p} + e_{\delta t^p} - \frac{f_1^2}{f_2^2} e_{\delta I_u^p} - e_{\delta T_u^p} + e_{PY,u}^p$$

$$v_{L2} = g_{\hat{u}}^{\hat{p}} e_{s^p} + e_{\delta t^p} + \frac{f_1^2}{f_2^2} e_{\delta I_u^p} - e_{\delta T_u^p} + \lambda_2 \varepsilon_{L2,u}^p$$

カルマンフィルタ

静止体の場合,

観測方程式

$$y_t = H_t x_t + v_t$$

状態方程式

$$x_{t+1} = F_t x_t + w_t$$

$$y_t \equiv \begin{bmatrix} \tilde{\rho}_{PY,u}^p \\ \tilde{\Phi}_{L2,u}^p \end{bmatrix} \quad H_t \equiv \begin{bmatrix} G_{\hat{u}}^{\hat{p}} & 1 & O \\ G_{\hat{u}}^{\hat{p}} & 1 & \lambda_2 I \end{bmatrix} \quad x_t \equiv \begin{bmatrix} u \\ c\delta t_u \\ N_{L2,u} \end{bmatrix}$$

$$F_t \equiv \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & & \\ & F_{c\delta t} & \\ & & I_{n_s \times n_s} \end{bmatrix} \quad v_u \equiv \begin{bmatrix} v_{PY} \\ v_{L2} \end{bmatrix}$$

カルマンフィルタに適用

ただし $G_{\hat{u}}^{\hat{p}} \equiv \begin{bmatrix} g_{\hat{u}}^{\hat{1}} \\ g_{\hat{u}}^{\hat{2}} \\ \vdots \\ g_{\hat{u}}^{\hat{n}_s} \end{bmatrix}$

状態ベクトルの推定値と誤差共分散行列を推定

実験

実験条件

観測日	2019/2/5
受信局	つくば1 (電子基準点)
観測データ	GPS C/A コード擬似距離 GPS P(Y) コード擬似距離 GPS L1 帯搬送波位相積算値 GPS L2 帯搬送波位相積算値
アンテナ	TPSCR.G5 GSI
受信機	TRIMBLE NETR9
データ間隔	1 second / epoch
真値	GSI F3 解

Data Numbers

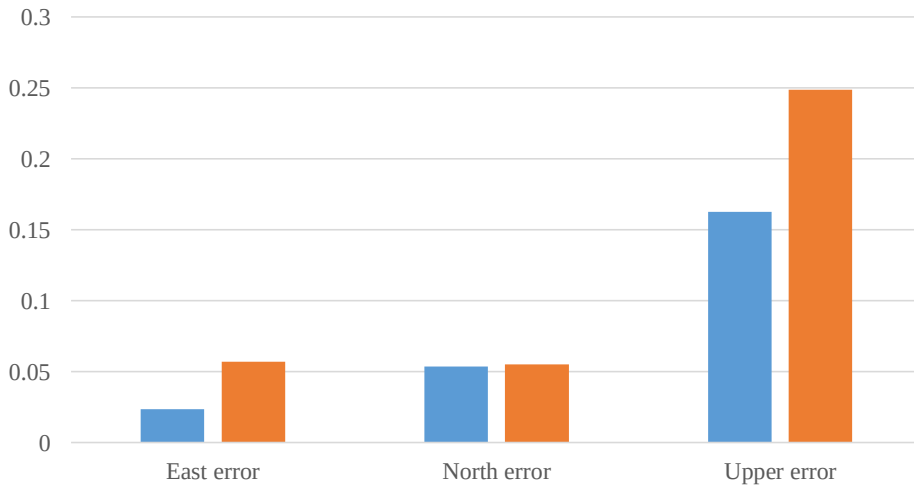
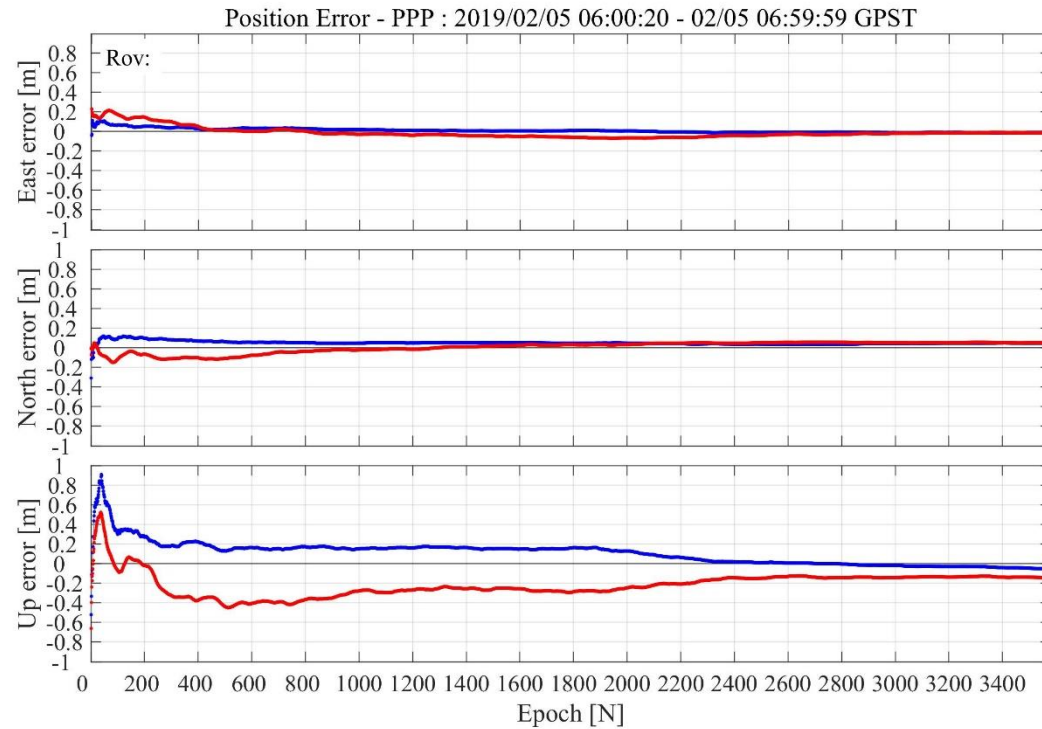
Data1	06:00:20～06:59:59
Data2	07:00:20～07:59:59
Data3	19:00:20～19:59:59

実験手法

L1周波数 のみを用いた PPP
(CLAS L1 PPP)

L2周波数 のみを用いた PPP
(CLAS L2 PPP)

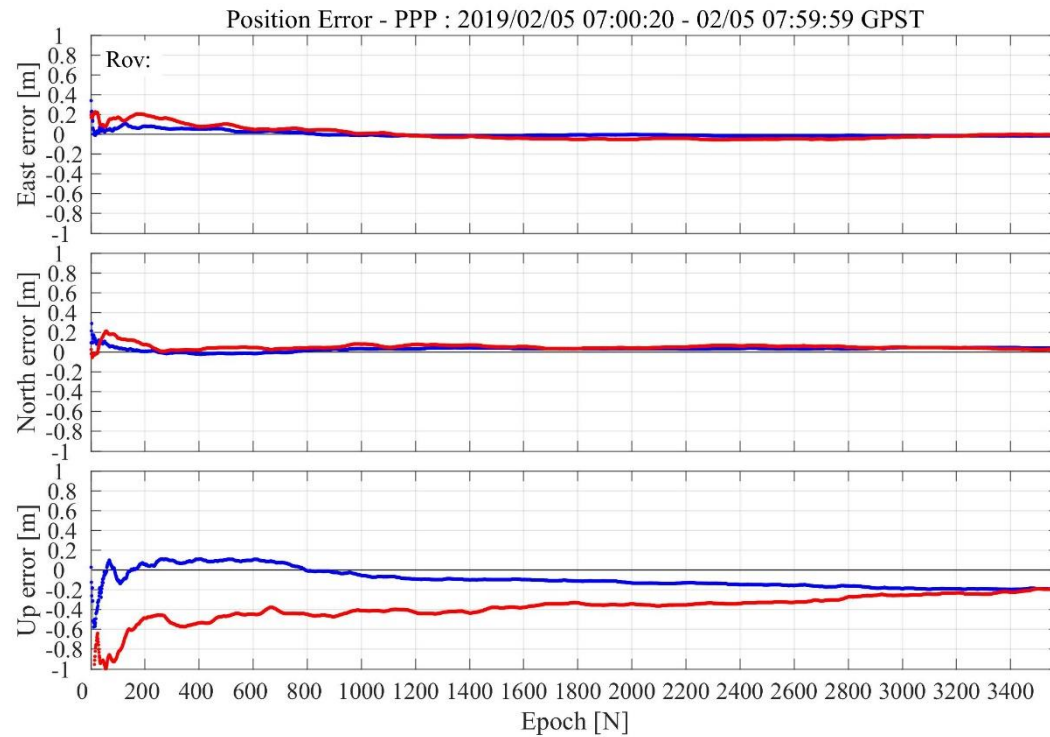
実験結果



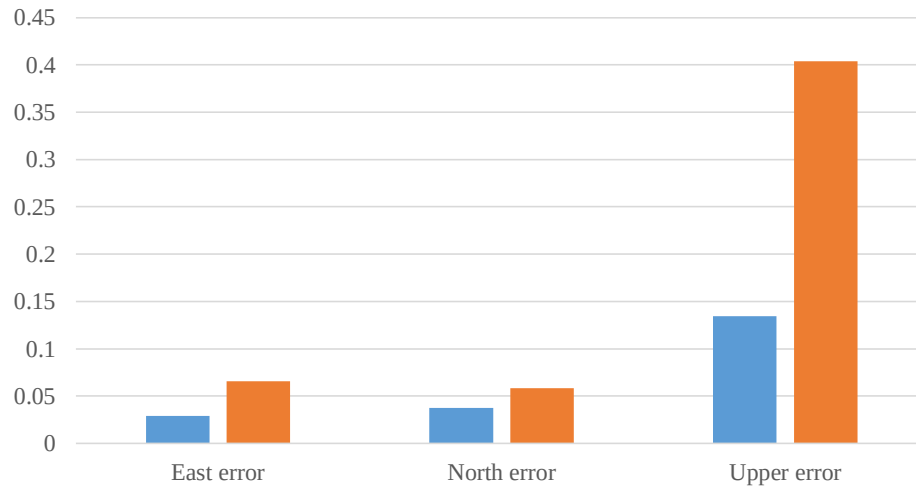
[m]	CLAS L1 PPP	CLAS L2 PPP
East error	0.0235	0.0571
North error	0.0536	0.0551
Upper error	0.1628	0.2487

Data1 ENU error

実験結果



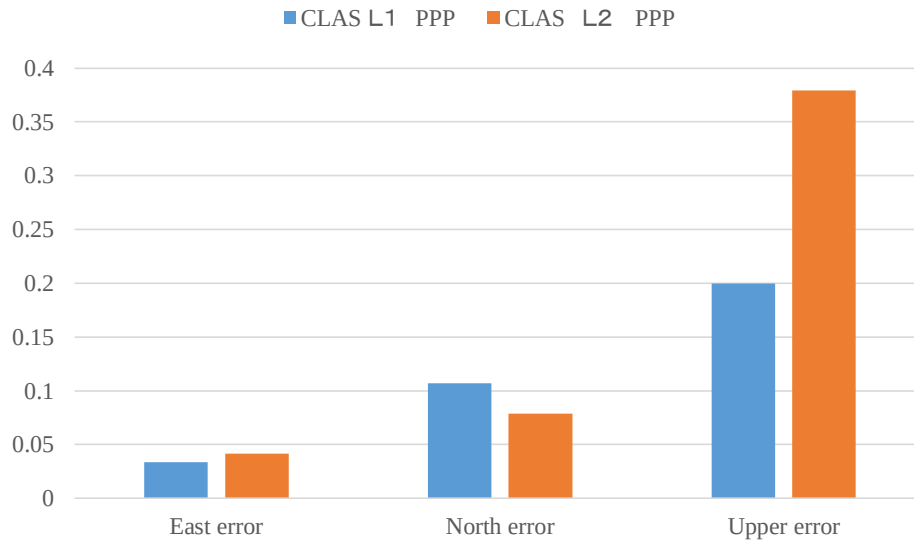
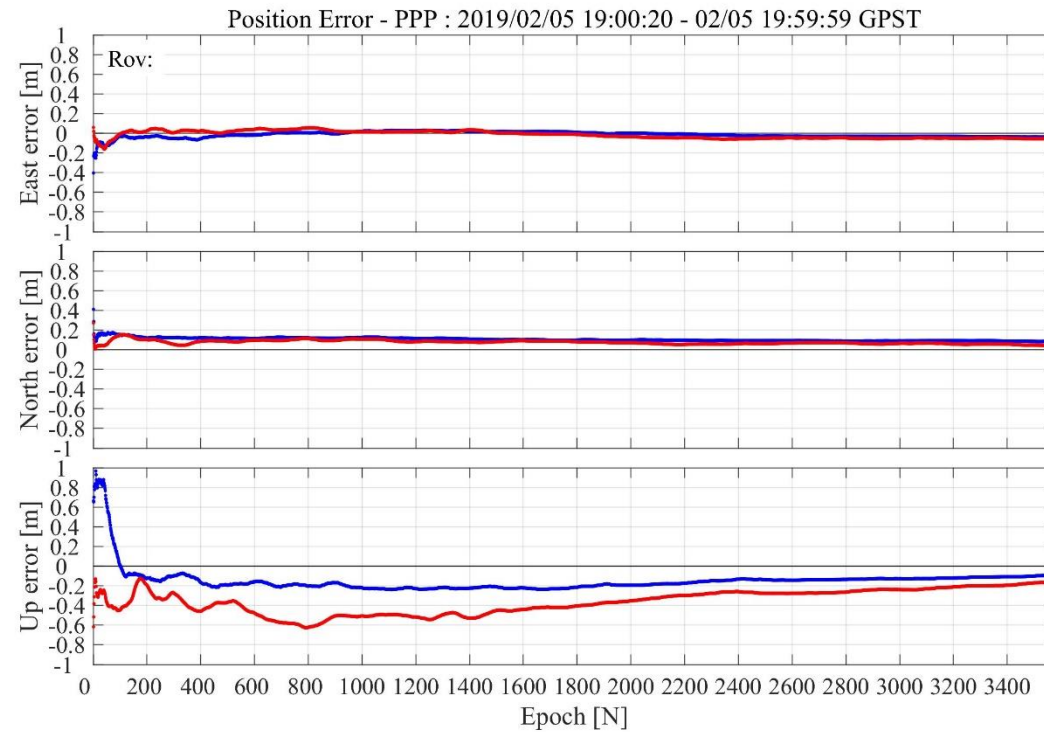
■ CLAS L1 PPP ■ CLAS L2 PPP



[m]	CLAS L1 PPP	CLAS L2 PPP
East error	0.0289	0.0655
North error	0.0373	0.0585
Upper error	0.1342	0.4037

Data2 ENU error

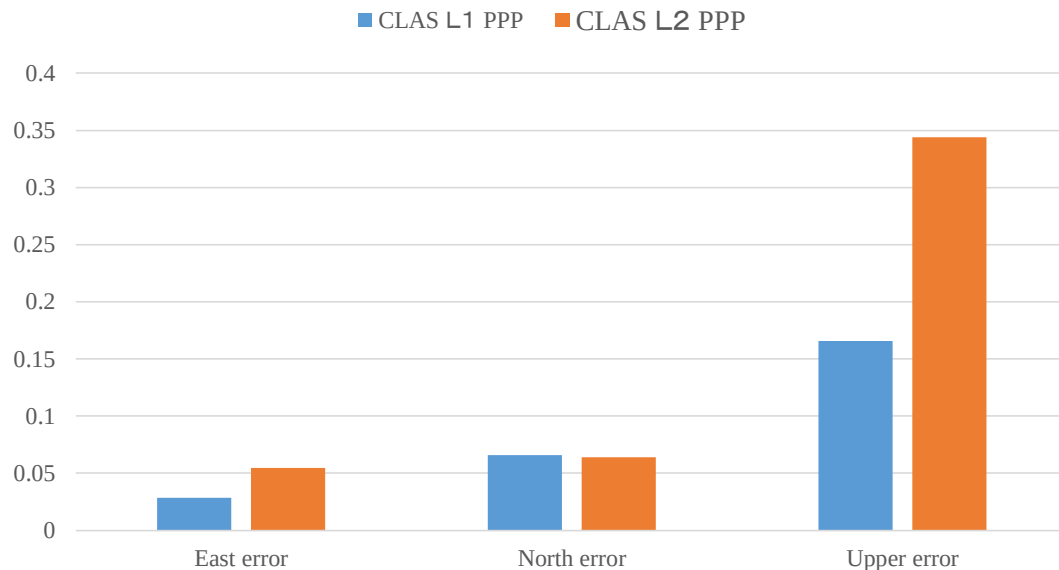
実験結果



[m]	CLAS L1 PPP	CLAS L2 PPP
East error	0.0337	0.0413
North error	0.1068	0.0787
Upper error	0.1996	0.3792

Data3 ENU error

実験結果



CLAS L1 PPPの精度

- 水平精度: 約 4.7 cm
- 垂直精度: 約 16.6 cm
- 3D : 約 8.7 cm

CLAS L2 PPPの精度

- 水平精度: 約 5.9 cm
- 垂直精度: 約 34.4 cm
- 3D : 約 15.4 cm

[m]	East error	North error	Upper error
CLAS L1 PPP	0.0287	0.0659	0.1655
CLAS L2 PPP	0.0546	0.0641	0.3439

- CLAS を利用した一周波測位での測位精度の評価を行った.
 - 一周波測位での CLAS の精度は,
 - L1 水平精度(RMS) : 約 4.7 [cm], 3DRMS : 約 8.7 [cm]
 - L2 水平精度(RMS) : 約 5.9 [cm], 3DRMS : 約 15.4 [cm]
-

【今後の課題】

1. カルマンフィルタの構造を変更し、CLAS を利用した二周波測位
2. 他のデータでの検証や測位精度の悪いデータの改善.