

平成24年度次世代運航システム公募型研究

研究課題名: マルチGNSS高精度測位およびその信頼性評価アルゴリズムに関する研究

研究代表者: 久保幸弘(立命館大学 理工学部電気電子工学科)

平成24年度次世代運航システム公募型研究中間報告会
2013年3月21日 於: JAXA調布航空宇宙センター

1/26



CONTENTS

- 研究の背景・目的・概要
- マルチGNSS精密単独測位
- 測位の信頼性評価アルゴリズムの開発
- GNSS/INS複合航法アルゴリズムの開発
- まとめ

2/26



研究の背景



GNSS衛星数予想

	2010年代 前半	2010年代 後半	2020年代 前半
GPS	32	32	32
GLONASS	24(+3)	24(+3)	24(+3)
GALILEO	4	18	27(+3)
COMPASS	12	30	32
QZS	1	4	7
合計	73	108	122

- 各国における測位衛星の開発が進められれば、多システム、多周波(マルチGNSS)の環境が利用可能
- 航空機における高精度衛星航法技術の研究開発においても、マルチGNSS環境を見据えた対応が不可欠

3/26

研究の概要と目的

- マルチGNSS環境下における
 - ① 高精度測位アルゴリズム
 - ② 測位(航法)の信頼性評価アルゴリズム
 - ③ GNSS/INS複合アルゴリズム

(テーマ①: 高精度測位アルゴリズム)

従来のコード擬似距離に加えて、搬送波位相観測量も積極的に利用した精密単独測位(PPP)を活用したマルチGNSS-PPPの開発

(テーマ②: 測位の信頼性評価アルゴリズム)

各システムの特徴(誤差やバイアスの統計的性質)を考慮できるフィルタ(推定器)を活用し、測位誤差の分散(共分散)を正確に見積もることの出来るアルゴリズム開発

(テーマ③: GNSS/INS複合アルゴリズム)

種々の非線形フィルタを比較検討し、航法の精度のみならず、信頼性評価の観点からも有利となる複合アルゴリズムの開発

- 次世代運航システムの高精度衛星航法技術開発における、マルチGNSS利用の技術確立に貢献することを目的とする

4/26

高精度測位アルゴリズムの開発

●精密単独測位について

・S. Sugimoto: GNSS Regressive Models and Precise Point Positioning, Proc. of the 36th ISCE Int. Symp. on Stochastic Systems Theory and Its Applications, pp. 159-164, 2004.

擬似距離に加えて、搬送波位相観測を利用することで、**RTK方式に匹敵する精度を実現可能**

↓
マルチGNSS化
・**GLONASSの活用**

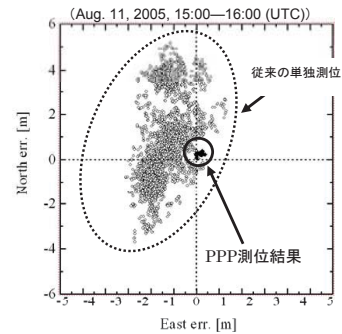


図: PPP測位のイメージ(立命館大学BKCW.W.7階屋上)

GPSとの相違点

- ・周波数
- ・時刻系
- ・座標系

詳細	GLONASS	GPS
衛星数	24	32
衛星軌道平面	3	6
軌道傾斜角 [degree]	63.8	55
軌道半径 [km]	26560	25510
信号分離方式	FDMA	CDMA
搬送波周波数 L1[MHz]	1598.06 ~1609.31	1575.42
搬送波周波数 L2[MHz]	1242.94 ~1251.69	1227.60
時間参照	UTC(SU)	UTC (USNO)
座標系	PZ-90.02	WGS-84

5/26

R RITSUMEIKAN

GPS/GLONASS複合観測方程式

$$\begin{aligned}
 \rho_{CA,u}^{\hat{p},G} &\cong g_u^{\hat{p},G} u(t) - g_u^{\hat{p},G} s^p + c[\delta t_u^G(t) - \delta t^{p,G}(t - \tau_u^p)] + \delta I_u^{p,G} + \delta T_u^{p,G} + e_{CA,u}^G \\
 \rho_{PY,u}^{\hat{p},G} &\cong g_u^{\hat{p},G} u(t) - g_u^{\hat{p},G} s^p + c[\delta t_u^G(t) - \delta t^{p,G}(t - \tau_u^p)] + \frac{f_1^2}{f_2^2} \delta I_u^{p,G} + \delta T_u^{p,G} + e_{PY,u}^G \\
 \rho_{CA,u}^{\hat{q},R} &\cong g_u^{\hat{q},R} u(t) - g_u^{\hat{q},R} s^q + c[\delta t_u^R(t) - \delta t^{q,R}(t - \tau_u^q)] + \delta I_u^{q,R} + \delta T_u^{q,R} + e_{CA,u}^R \\
 \rho_{PY,u}^{\hat{q},R} &\cong g_u^{\hat{q},R} u(t) - g_u^{\hat{q},R} s^q + c[\delta t_u^R(t) - \delta t^{q,R}(t - \tau_u^q)] + \frac{(f_1^{q,R})^2}{(f_2^{q,R})^2} \delta I_u^{q,R} + \delta T_u^{q,R} + e_{PY,u}^R \\
 \Phi_{L1,u}^{\hat{p},G} &\cong g_u^{\hat{p},G} u(t) - g_u^{\hat{p},G} s^p + c[\delta t_u^G(t) - \delta t^{p,G}(t - \tau_u^p)] - \delta I_u^{p,G} + \delta T_u^{p,G} + \lambda_1^G N_{L1,u}^G + \lambda_1^G \varepsilon_{L1,u}^G \\
 \Phi_{L2,u}^{\hat{p},G} &\cong g_u^{\hat{p},G} u(t) - g_u^{\hat{p},G} s^p + c[\delta t_u^G(t) - \delta t^{p,G}(t - \tau_u^p)] - \frac{f_1^2}{f_2^2} \delta I_u^{p,G} + \delta T_u^{p,G} + \lambda_2^G N_{L2,u}^G + \lambda_2^G \varepsilon_{L2,u}^G \\
 \Phi_{L1,u}^{\hat{q},R} &\cong g_u^{\hat{q},R} u(t) - g_u^{\hat{q},R} s^q + c[\delta t_u^R(t) - \delta t^{q,R}(t - \tau_u^q)] - \delta I_u^{q,R} + \delta T_u^{q,R} + \lambda_1^R N_{L1,u}^R + \lambda_1^R \varepsilon_{L1,u}^R \\
 \Phi_{L2,u}^{\hat{q},R} &\cong g_u^{\hat{q},R} u(t) - g_u^{\hat{q},R} s^q + c[\delta t_u^R(t) - \delta t^{q,R}(t - \tau_u^q)] - \frac{(f_1^{q,R})^2}{(f_2^{q,R})^2} \delta I_u^{q,R} + \delta T_u^{q,R} + \lambda_2^R N_{L2,u}^R + \lambda_2^R \varepsilon_{L2,u}^R
 \end{aligned}$$

G : GPS

R : GLONASS

6/26

R RITSUMEIKAN

GPS/GLONASS複合測位実験

<評価方法>

- GPS/GLONASS複合航法
- GPS 単独測位
- GLONASS単独測位

<観測・測位条件>

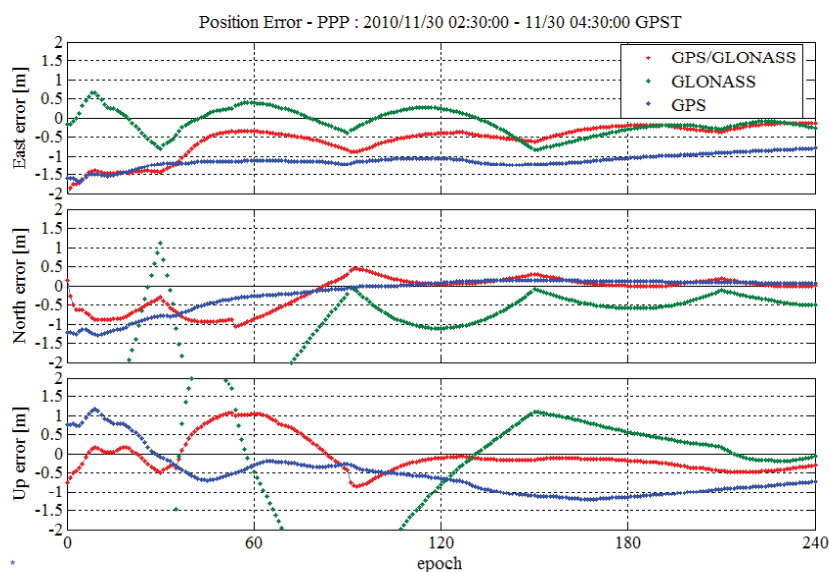
観測日時	2010/11/30 02:30'00 - 04:30'00 (GPST)
未知局	立命館大学 (BKC) ウェストウイング屋上
受信機	OEM5 (NovAtel Inc.)
真値	Relative Pos.
仰角マスク	10 [deg]
観測データ	コード (C/A,P(Y)), 搬送波位相 (L1,L2)
衛星軌道	放送暦
衛星時計	放送暦
電離層伝搬遅延	Klobuchar モデル
測位方法	単独測位 (PPP)
推定手法	拡張カルマンフィルタ



7/26

R RITSUMEIKAN

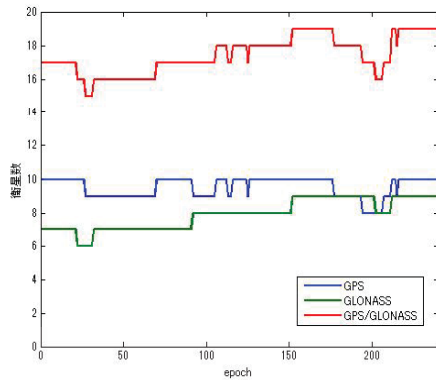
GPS/GLONASS複合測位結果の例



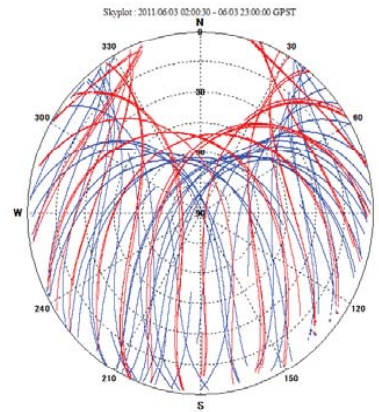
8/26

R RITSUMEIKAN

GPS/GLONASS複合測位の利点



可視衛星数の変化



可視衛星 (青: GPS 赤: GLONASS)



9/26

R RITSUMEIKAN

信頼性の補強システム

民間航空機の航法において信頼性を補強する方法

ABAS (Aircraft Based Augmentation System)

機上装置による補強

気圧高度計, INS・IRS, **RAIM受信機**

SBAS (Satellite Based Augmentation System)

静止衛星からの補強情報を提供

広域な補強情報

GBAS (Ground Based Augmentation System)

地上からの補強情報を提供

局地的な補強情報

10/26

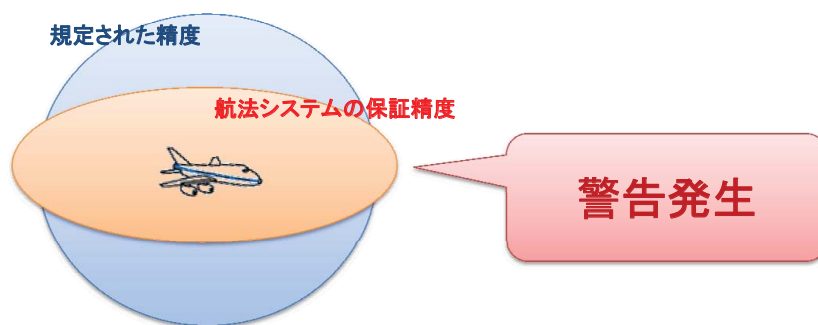
R RITSUMEIKAN

RAIM機能とインテグリティ

RAIM: Receiver Autonomous Integrity Monitoring

受信機による
自律的な**インテグリティ**監視

航法システムの保証精度が規定された精度に満たさない場合にシステム自身がその状況を検出しユーザに適時警告を発する能力



11/26

R RITSUMEIKAN

インテグリティを確保するために

アラートリミット (AL)

航法モードに応じて ICAO によってあらかじめ定められた値

$$P(|x - \hat{x}| > AL) < 10^{-7}$$

インテグリティ
確保の要件

測位誤差がAL値以下である確率が99.99999%以上ということを保証する

プロテクションレベル (PL)

信頼水準を $(1 - 10^{-7})$ とした場合の測位結果の信頼限界の指標
故障検出を行った上で、想定される最悪の測位誤差がPLを超える確率

$$P(|x - \hat{x}| > PL) < 10^{-7}$$

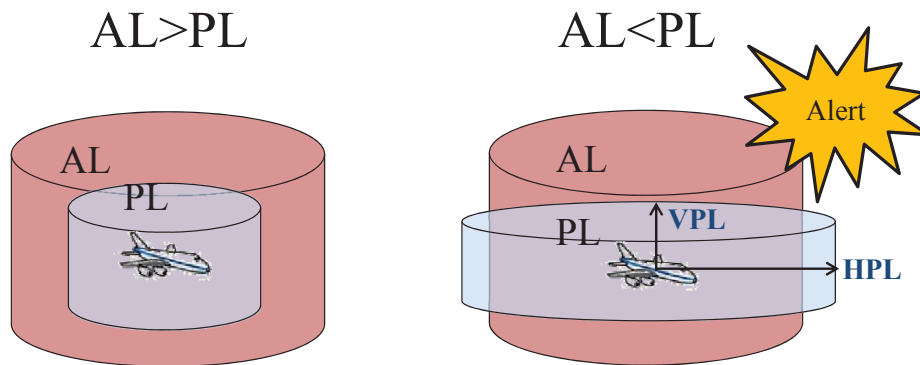
12/26

R RITSUMEIKAN

アラートリミットとプロテクションレベル

演算時には、プロテクションレベルを求めて

AL < PL の場合 警告発生

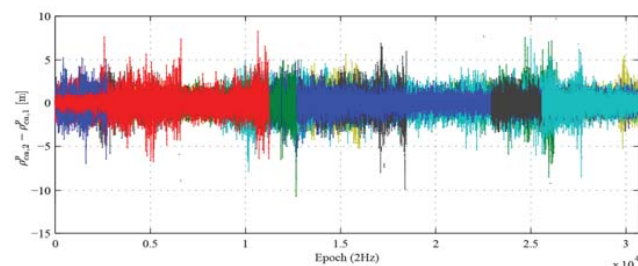


13/26

RITSUMEIKAN

観測雑音の分布

擬似距離観測雑音の一例



観測雑音の分布
ガウス分布を仮定

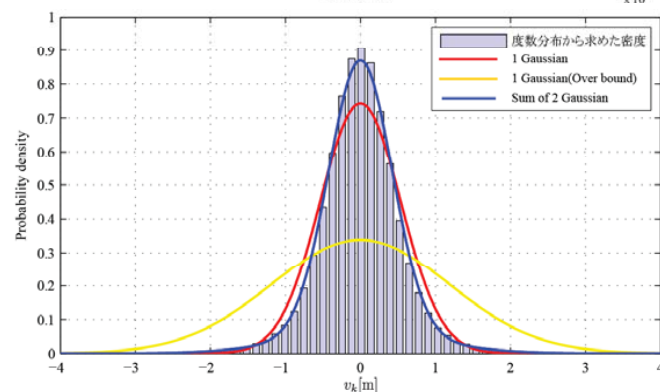
$$v_t \sim N(v_t : m_t, R_t)$$

➡ カルマンフィルタ

ガウス和分布を仮定

$$v_t \sim \sum_{i=1}^{q_t} \gamma_{i,t} N(v_t : m_{i,t}, R_{i,t})$$

➡ ガウスサムフィルタ



14/26

RITSUMEIKAN

ガウスサムフィルタ

カルマンフィルタ

濾波・予測推定値

$$\begin{aligned}\hat{x}_{t+1|t} &= F_t \hat{x}_{t|t} \\ \hat{x}_{t|t} &= \hat{x}_{t|t-1} + K_t [y_t - H_t \hat{x}_{t|t-1}]\end{aligned}$$

カルマンゲイン

$$K_t = \Sigma_{t|t-1} H_t^T [H_t \Sigma_{t|t-1} H_t^T + R_t]^{-1}$$

推定誤差共分散行列

$$\begin{aligned}P_{t+1|t} &= F P_{t|t} F^T + Q_t \\ P_{t|t} &= P_{t|t-1} - K_t H_t P_{t|t-1}\end{aligned}$$

ガウスサムフィルタ

$$\begin{aligned}\mu_{j,t|t-1} &= F_{t-1} \mu_{j,t-1|t-1} \\ \mu_{ij,t|t} &= (P_{j,t|t-1}^{-1} + H_t^T R_{i,t}^{-1} H_t)^{-1} \\ &\quad \times [P_{j,t|t-1}^{-1} \mu_{j,t|t-1} + H_t^T R_{i,t}^{-1} (y_t - m_{i,t})]\end{aligned}$$

$$\hat{x}_{t|t} = \sum_{j=1}^{r_t} \sum_{i=1}^{q_t} \alpha_{j,t|t-1} \gamma_{i,t} c_{ij,t} \mu_{ij,t|t}$$

$$P_{j,t|t-1} = F_{t-1} P_{j,t-1|t-1} F_{t-1}^T + Q_{t-1}$$

$$P_{ij,t|t} = (P_{j,t|t-1}^{-1} + H_t^T R_{i,t}^{-1} H_t)^{-1}$$

$$P_{t|t} = \sum_{j=1}^{r_t} \sum_{i=1}^{q_t} \alpha_{j,t|t-1} \gamma_{i,t} c_{ij,t} P_{ij,t|t}$$

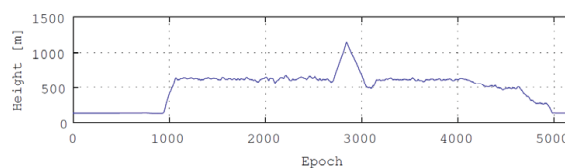
$$\begin{aligned}\alpha_{\nu,t|t} &= \kappa \alpha_{j_{\nu,t}|t-1} \gamma_{i_{\nu,t}} \tilde{c}_{i_{\nu,j_{\nu,t}}}; \quad \nu = 1, \dots, r \\ \sum_{\nu=1}^r \kappa \alpha_{j_{\nu,t}|t-1} \gamma_{i_{\nu,t}} \tilde{c}_{i_{\nu,j_{\nu,t}}} &= 1\end{aligned}$$

15/26

R RITSUMEIKAN

実験環境

観測場所	八丈島近辺
受信機 / アンテナ	ASHTECH G12 / S67-1575-96
観測開始時間	2008/2/7 0:40:50 (GPST)
観測終了時間	2008/2/7 2:08:14 (GPST)
使用データ	CAコード擬似距離, L1搬送波位相
測位方法	高精度単独測位(キネマティック)



16/26

R RITSUMEIKAN

実験環境

観測雑音設定

カルマンフィルタ

	観測雑音の分散
CA コード	0.54054
L1 搬送波位相	0.000054054

ガウス和フィルタ

	観測雑音の分散	
分布の重み	0.595730	0.404270
CA コード	0.2525	0.9650
L1 搬送波位相	0.00002525	0.00009650

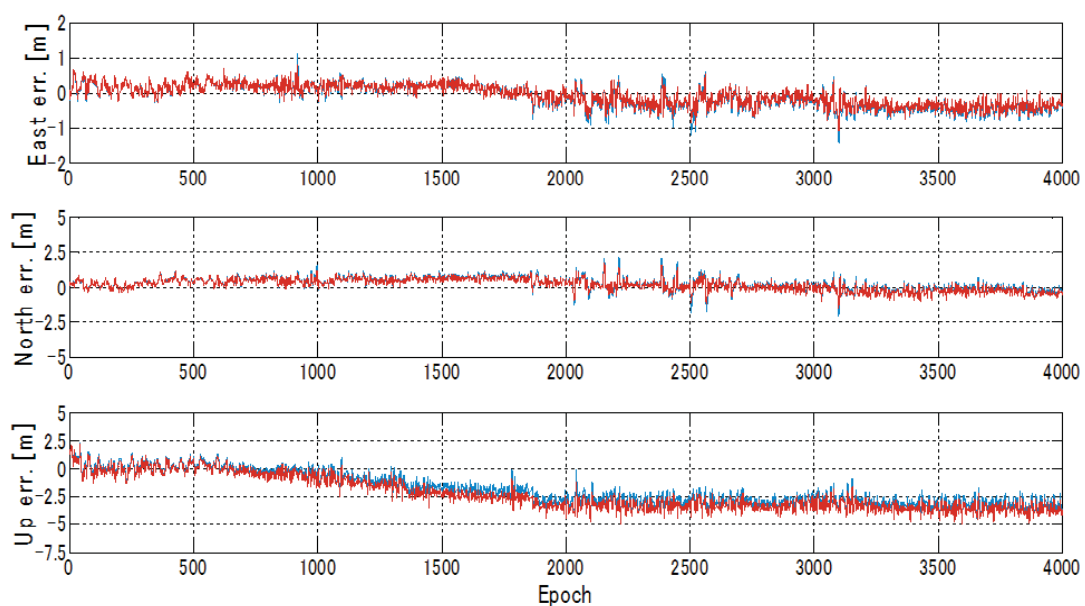
パラメータ設定

誤警報率 P_{FA}	3.3×10^{-7}
不検出率 P_{MD}	10^{-3}

17/26

R RITSUMEIKAN

実験結果(測位結果)

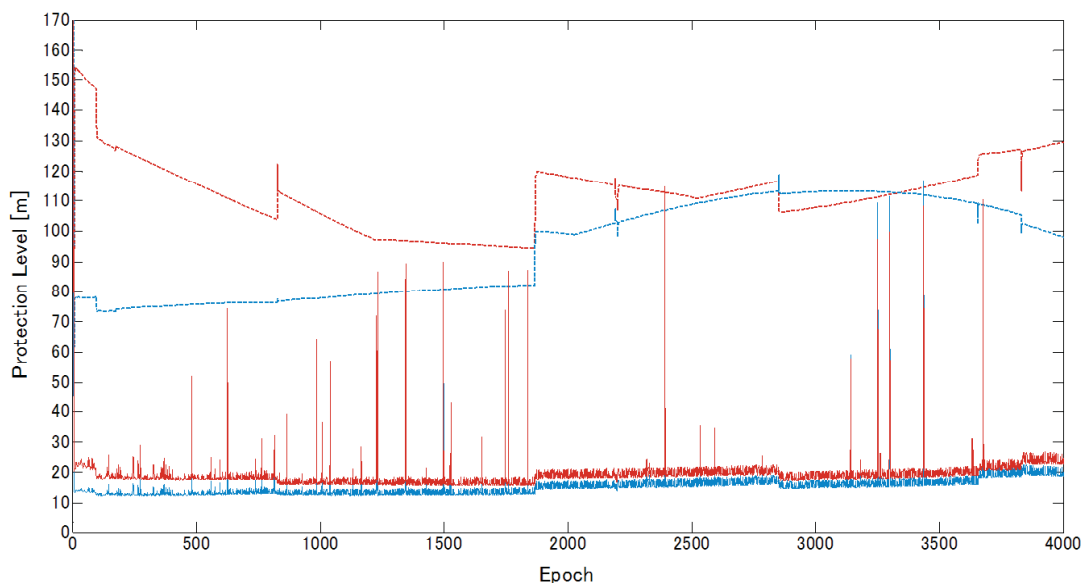


赤: ガウス和フィルタ 青: カルマンフィルタ

18/26

R RITSUMEIKAN

実験結果(プロテクションレベル)



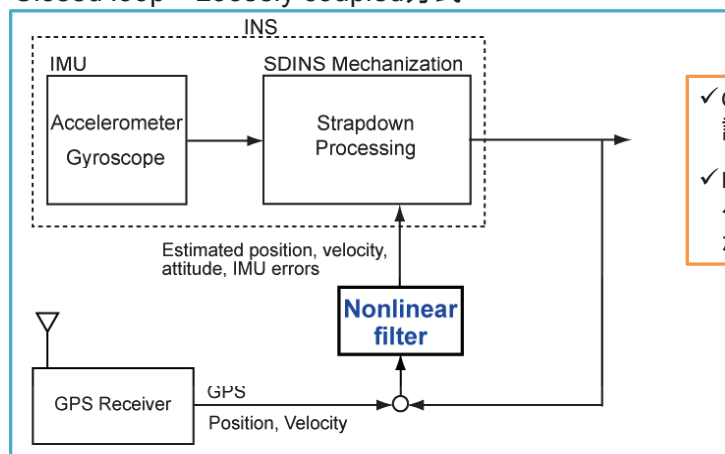
赤: 垂直方向のPL 青: 水平方向のPL
 実線: ガウス和フィルタ 破線: カルマンフィルタ

19/26

R RITSUMEIKAN

GPS/INS複合航法

Closed loop — Loosely coupled方式



- ✓ GPS情報を用いて, INSの航法誤差を推定, 補正する
- ✓ INS誤差は非線形なダイナミクスのため, 非線形フィルタが必要

- Extended Kalman Filter (EKF)
- Quasi Linear Filter (QLF)
- Gaussian Sum Filter (GSF)
- Gaussian sum-Quasi Linear Filter (GQLF)

20/26

R RITSUMEIKAN

各種非線形フィルタの特徴

・Extended Kalman Filter (EKF)

テラ展開による線形化. 2次以上は無視.

・Quasi Linear Filter (QLF)

線形化誤差の2乗ノルムの期待値が最小になるように線形化係数を決定(等価線形化法).

・Gaussian Sum Filter (GSF)

条件付き確率密度関数を正規分布の和と仮定する. 各々の分布に対してはEKFと同様の処理.

・Gaussian sum-Quasi Linear Filter (GQLF)

GSFで仮定する各分布において, 線形化の処理にQLFと同様の等価線形化法を適用.

21/26

R RITSUMEIKAN

実験環境

観測場所	八丈島近辺
受信機 / アンテナ	ASHTech G12 / S67-1575-96
観測開始時間	2008/2/7 0:40:50 (GPST)
観測終了時間	2008/2/7 2:08:14 (GPST)
使用データ	CA コード擬似距離, L1 搬送波位相
測位方法	高精度単独測位(キネマティック)



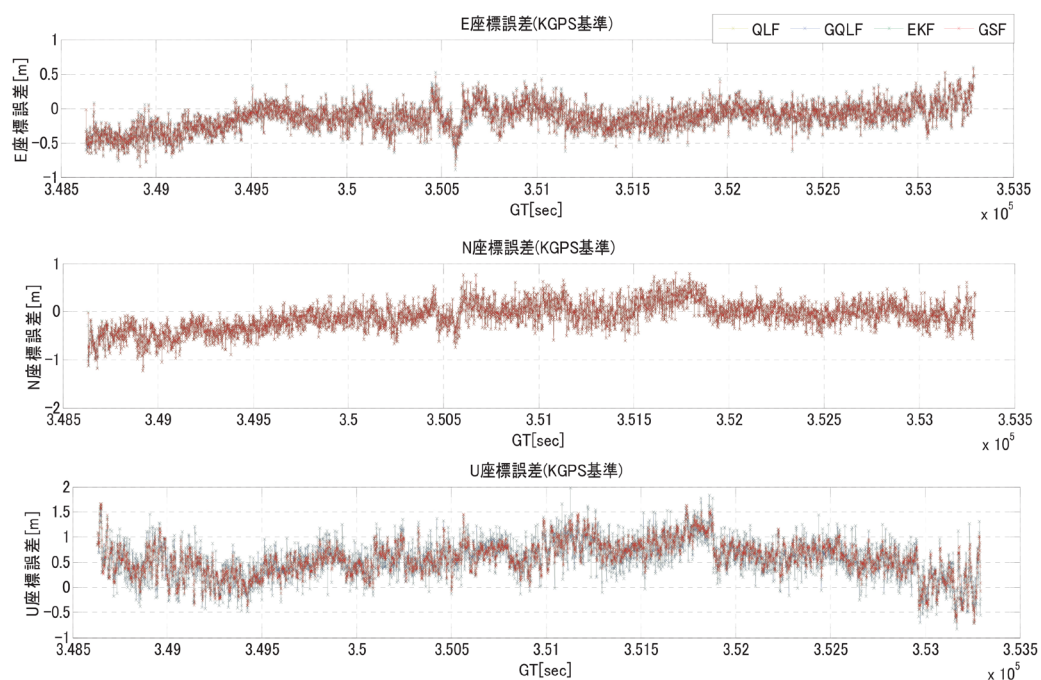
・INS: KI-4901 IMU (Kearfott 社, 50Hz)

	ジャイロ	加速度計
Random Walk	0.003 [deg/√h]	0.05 [m/s/√h]
Bias Repeatability	0.005 [deg/h]	400 [μg]
Scale Factor Repeatability	50 [PPM]	500 [PPM]
Axis Alignment	15 [arc-second]	20 [arc-second]
Bias Stability	0.003 [deg/h]	50 [μg]
Vibration Rectification	N/A	15 [μg/g ² typical]

22/26

R RITSUMEIKAN

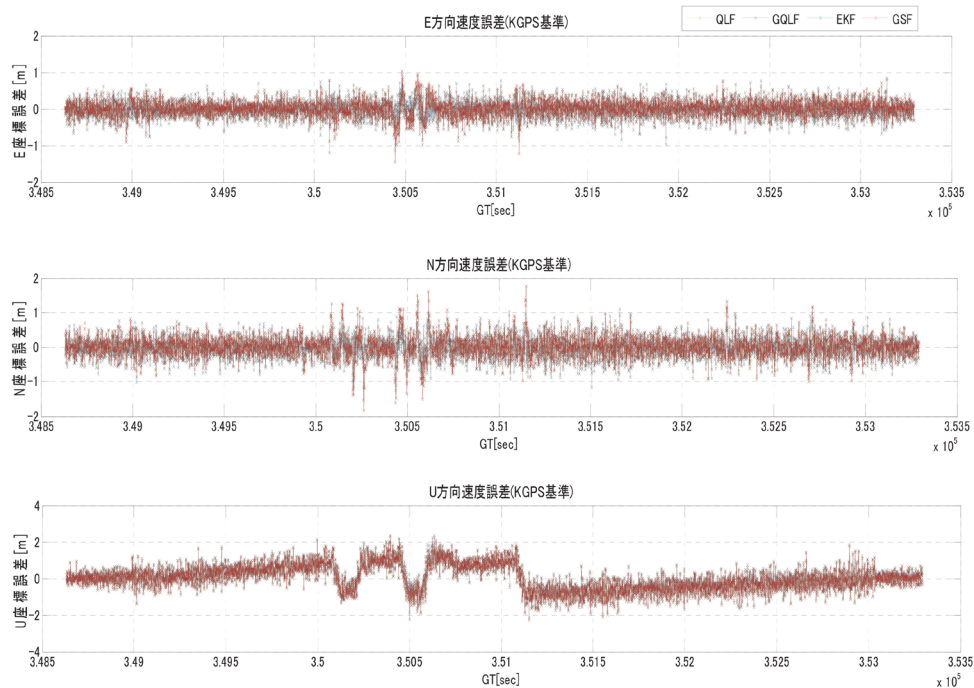
実験結果(位置誤差)



23/26

R RITSUMEIKAN

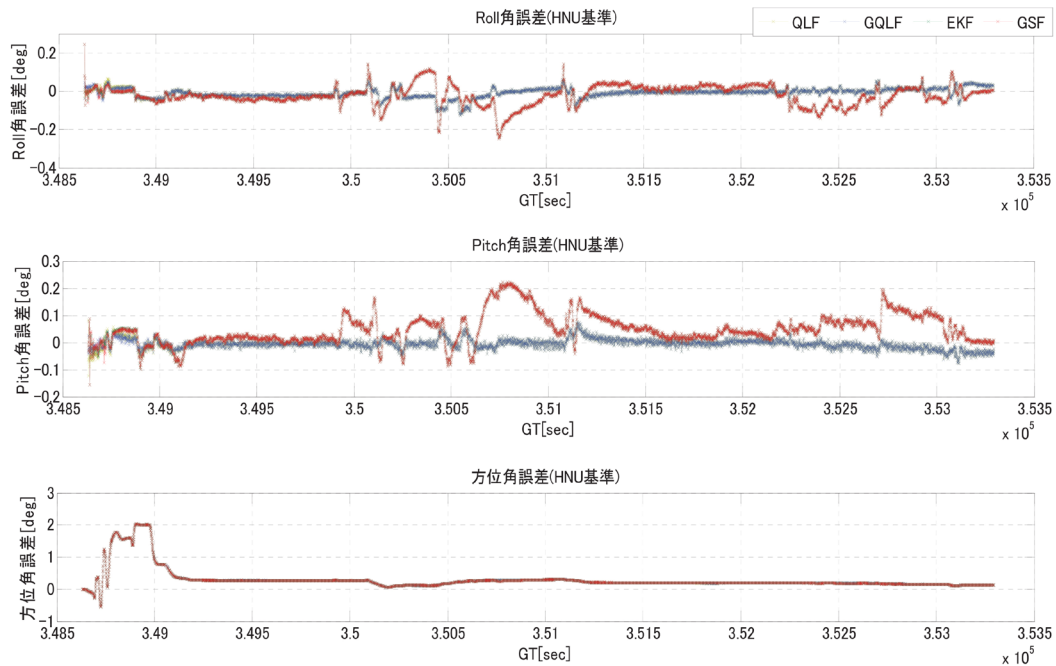
実験結果(速度誤差)



24/26

R RITSUMEIKAN

実験結果(姿勢角誤差)



25/26

R RITSUMEIKAN

まとめ

●2012年度の成果： マルチGNSS環境環境下における

- ① 高精度測位アルゴリズム
GPS/GLONASS複合測位
- ② 測位(航法)の信頼性評価アルゴリズム
GPS-PPP測位における, GSFによるPLの改善
- ③ GNSS/INS複合アルゴリズム
GPS/INS複合における, 4つの非線形フィルタを比較

●今後の課題

- ①について: GLONASS以外のGNSS併用アルゴリズムの考察
- ②について: GSFおよびPLの数値計算アルゴリズムの改良
- ③について: 信頼性評価を前提とした, 適切なフィルタの選定

①, ②, ③の成果に基づいて,
(精密単独測位) + (INS) + (信頼性確保)
のトータルシステムの提案

26/26

R RITSUMEIKAN