



Tokyo University of Marine Science and Technology

Laboratory of Satellite Navigation Engineering

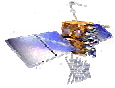


RTK-GPS測位における 基準局データ伝送遅延に関する研究



東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
海運ロジスティクス専攻
伊勢嶋 潤

Contents



1. RTK-GPS測位概要

2. 背景 & 目的

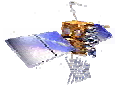
3. 測位のモード

4. 各種誤差の外挿手法

5. 実験 & 結果

6. まとめ

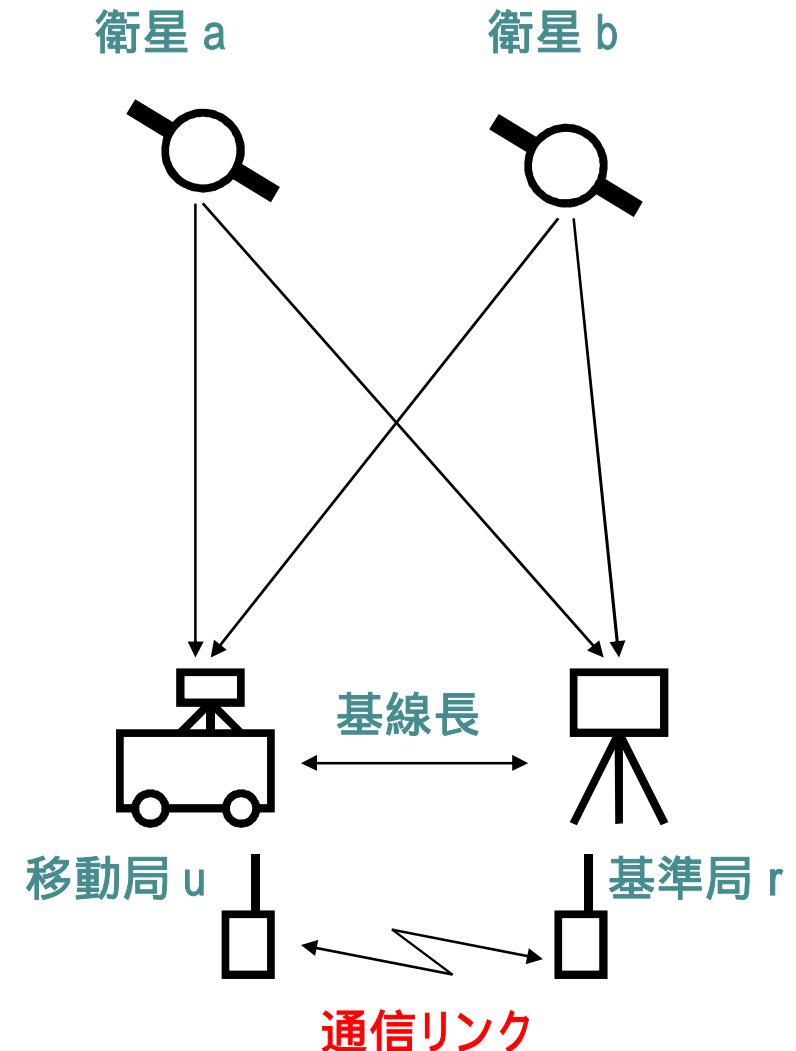
RTK-GPS測位



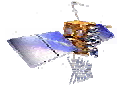
- RTK-GPS測位は、ほぼリアルタイムで、cmレベルの測位が可能
 - mmの精度を持つ搬送波位相を測定値として利用するため

RTK-GPS測位の特徴と問題点

- 移動局 + 基準局 2台の受信機が必要
- 基準局の正確な座標が必要
- 整数値バイアスの決定 (AR)
- **データ通信リンクの必要性 本研究のポイント**



搬送波位相観測値



- 搬送波位相観測値

$$\phi = \lambda\Phi = \rho + c(dt - dT) - I + T + \lambda N + \varepsilon$$

Where:

ϕ : 搬送波位相 (m) dt : 受信機時計誤差 (s)

Φ : 搬送波位相 (cycle) dT : 衛星時計誤差 (s)

λ : 波長 (m) I : 電離層遅延量 (m)

ρ : 衛星-受信機間

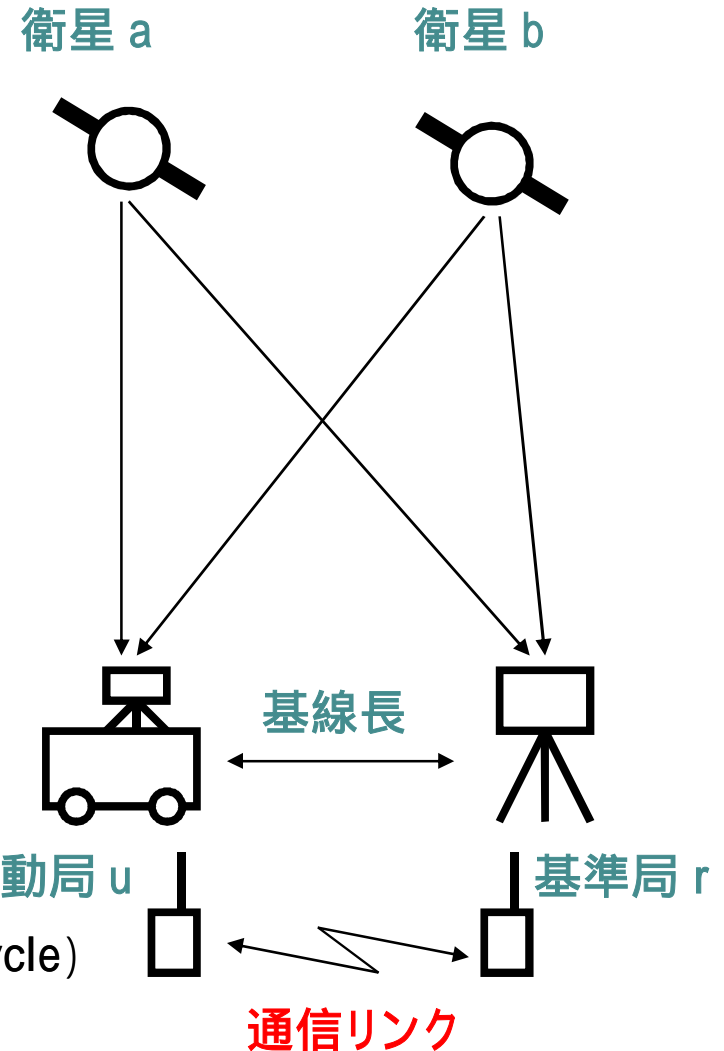
幾何学距離 (m)

T : 対流圏遅延量 (m)

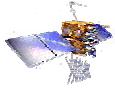
N : 搬送波位相バイアス (cycle)

c : 光速 (m/s)

ε : ノイズ (m)



二重位相差



- 二重位相差
 - 移動局 u 基準局 r において受信した衛星 a, b の観測値間で差をとること

搬送波位相の二重位相差

$$\phi_{ur}^{ab} = \rho_{ur}^{ab} + c(dt_{ur}^{ab} - dT_{ur}^{ab}) - I_{ur}^{ab} + T_{ur}^{ab} + \lambda N_{ur}^{ab} + \varepsilon$$

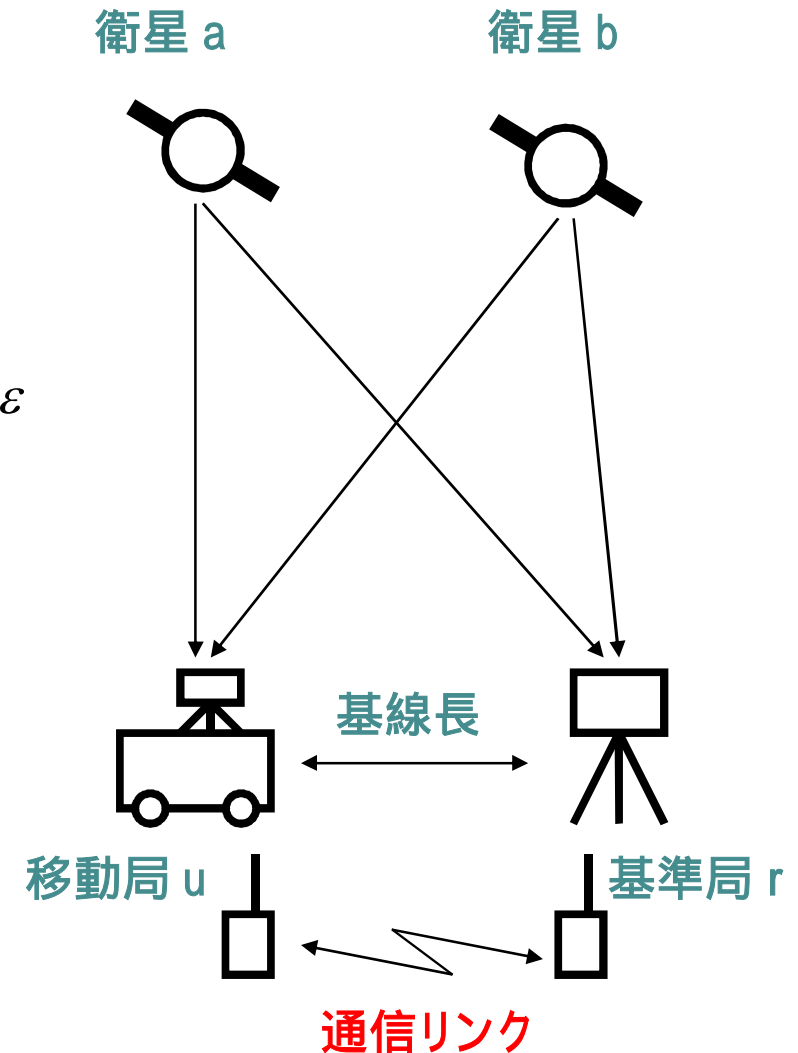
$$dt_{ur}^{ab} = (dt_u^a - dt_u^b) - (dt_r^a - dt_r^b) = 0$$

$$dT_{ur}^{ab} = (dT_u^a - dT_u^b) - (dT_r^a - dT_r^b) \approx 0$$

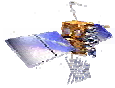
$$I_{ur}^{ab} = (I_u^a - I_u^b) - (I_r^a - I_r^b) \approx 0$$

$$T_{ur}^{ab} = (T_u^a - T_u^b) - (T_r^a - T_r^b) \approx 0$$

$$\phi_{ur}^{ab} = \rho_{ur}^{ab} + \lambda N_{ur}^{ab} + \varepsilon$$

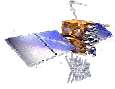


背景



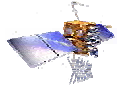
- RTK-GPS測位では、基準局で取得したデータを移動局に送る必要があるため、必ず伝送遅延時間が発生する **実際に携帯電話等を利用して送信した場合、1秒程度要する。**
- リアルタイム性を求める場合、伝送遅延は測位性能(FIX率、測位精度)の劣化原因となる
 - 測位には、**同期モード**と**非同期モード**がある
- RTK-GPS測位における伝送遅延に関する研究が非常に少ない(国内で4件程度:実際の遅れに対する影響を調べたものは1件)

本研究の目的

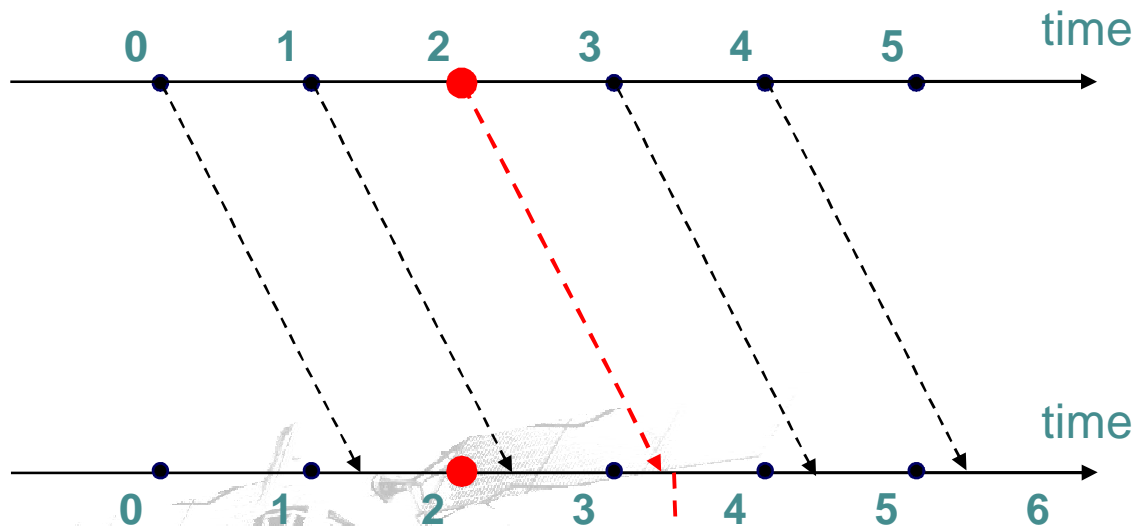


- データ伝送遅延時間に対する測位性能評価を行い、測位性能劣化の**改善手法を提案**することを目的とした。
- 具体的には、衛星時計と電離層の遅延時間分の補正式を提案し、**その性能 (FIX率及び測位精度) を評価した**。また、基線長を変更した場合の評価も行った。

同期モード



基準局

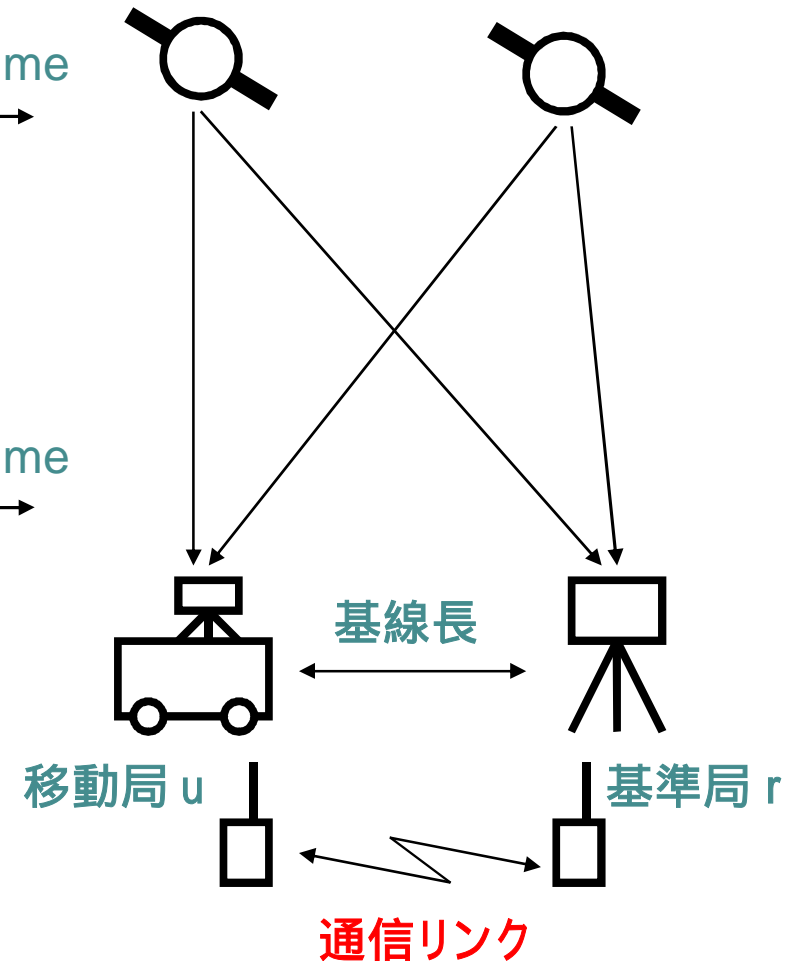


移動局

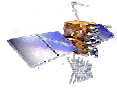
基準局から伝送された時刻2のデータと移動側の時刻2のデータを利用して、このタイミングで測位(時刻のずれはないが、1秒以上前の測位結果を計算)

衛星 a

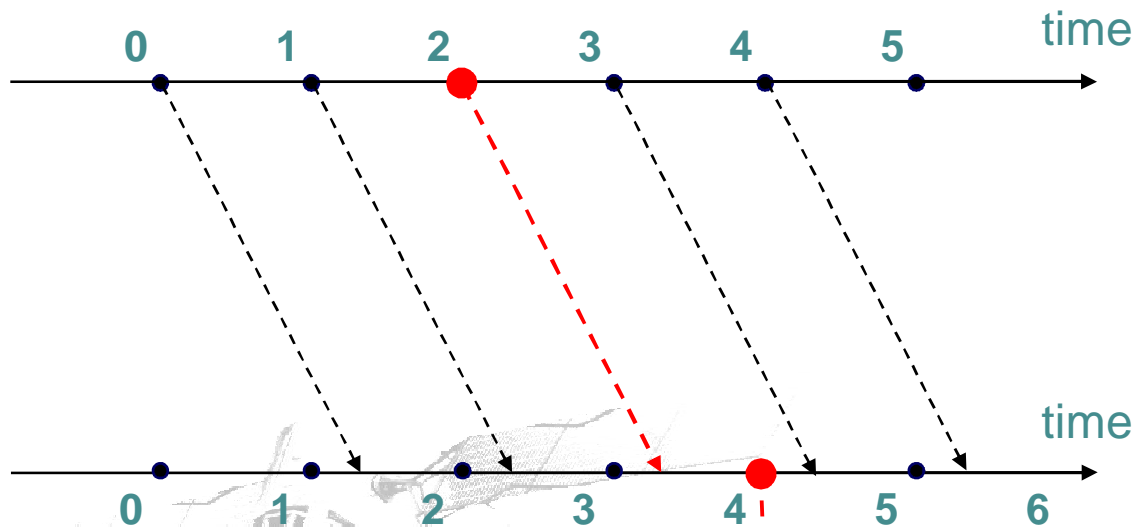
衛星 b



非同期モード



基準局

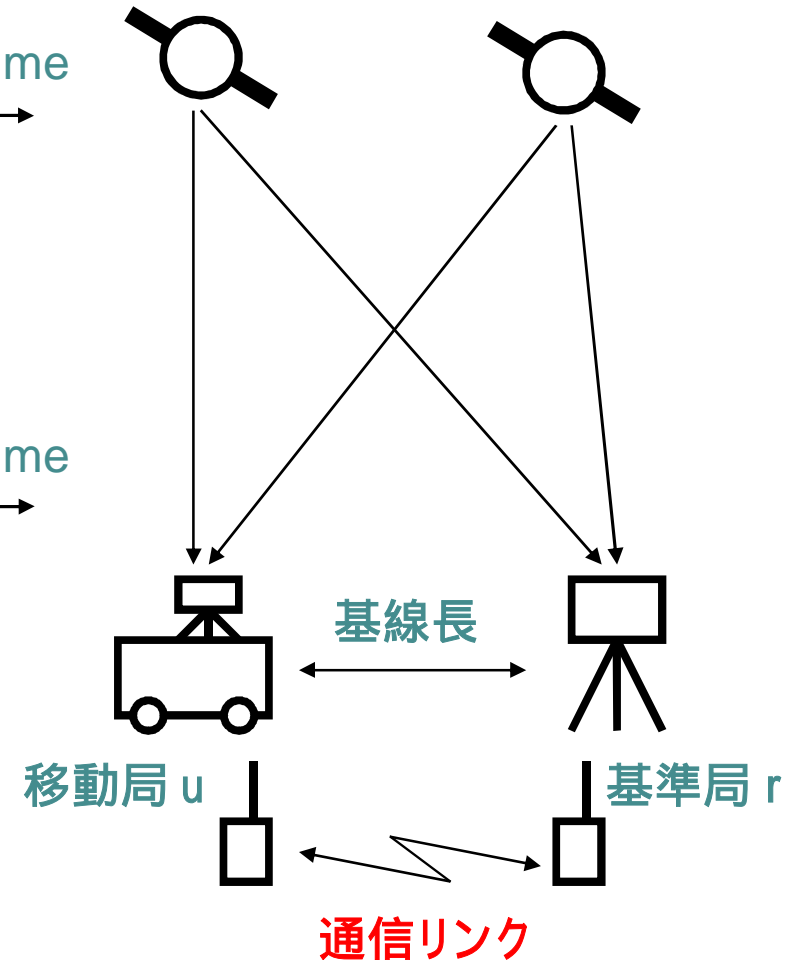


移動局

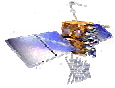
基準局から伝送された時刻2のデータと移動側の時刻4のデータを利用して、このタイミングで測位計算(2秒のずれがあるが、リアルタイム)

衛星 a

衛星 b



測位性能劣化要因



- RTK測位は、基線長が短い場合(通常10km程度まで)、同時刻では、**基準局と移動局で共通の誤差である**ことを前提にしている。
- しかしながら、伝送遅延が存在することにより、基準局と移動局で、時間軸に関して異なる誤差を持つことになる。
- 搬送波位相の二重位相差

$$\phi_{ur}^{ab} = \rho_{ur}^{ab} + c(dt_{ur}^{ab} - dT_{ur}^{ab}) - I_{ur}^{ab} + T_{ur}^{ab} + \lambda N_{ur}^{ab} + \varepsilon$$

$$dt_{ur}^{ab} = (dt_u^a - dt_u^b) - (dt_r^a - dt_r^b) = 0$$

$$dT_{ur}^{ab} = (dT_u^a - dT_u^b) - (dT_r^a - dT_r^b) \approx 0$$

$$I_{ur}^{ab} = (I_u^a - I_u^b) - (I_r^a - I_r^b) \approx 0$$

$$T_{ur}^{ab} = (T_u^a - T_u^b) - (T_r^a - T_r^b) \approx 0$$

主な測位性能劣化要因

衛星時計バイアス

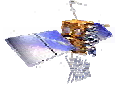
電離層遅延

対流圏遅延

+

衛星軌道誤差

衛星時計補正



- GPS衛星から送信される、自身の時計補正量を(2次式の係数)ユーザが補正する。

$$\bar{\phi}_r^a(t) = \phi_r^a(t - \Delta t) - ca_{f1}^a \Delta t$$

$$\bar{P}_r^a(t) = P_r^a(t - \Delta t) - ca_{f1}^a \Delta t$$

Where:

$\bar{\phi}_r^a$: 搬送波位相(推定後)

Δt : 伝送遅延時間

\bar{P}_r^a : 擬似距離(推定後)

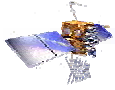
c : 光速

ϕ_r^a : 搬送波位相

a_{f1}^a : GPS衛星時計補正係数の1次項(sec/sec)

P_r^a : 擬似距離

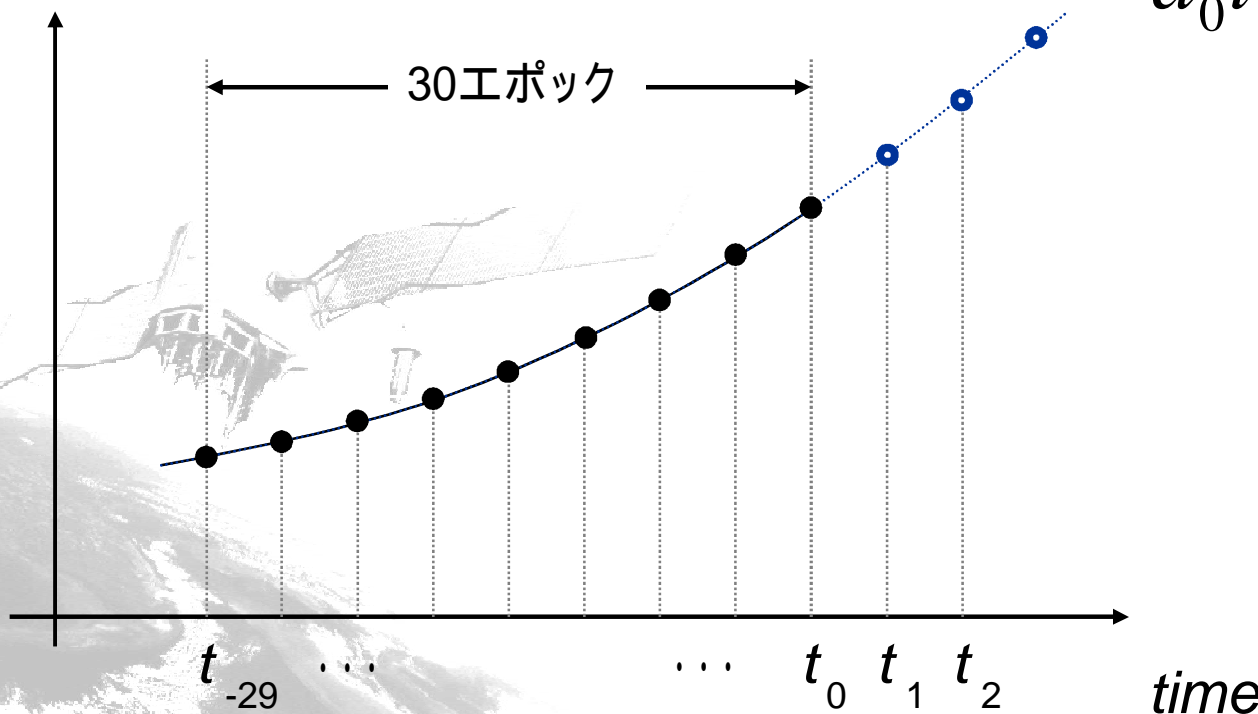
電離層遅延外挿方法



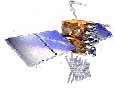
- 2周波を利用した電離層遅延量の推定
- 推定した電離層遅延量を最小二乗法により2次関数でフィッティング

$$a_0 t_n^2 + a_1 t_n + a_2$$

電離層遅延量

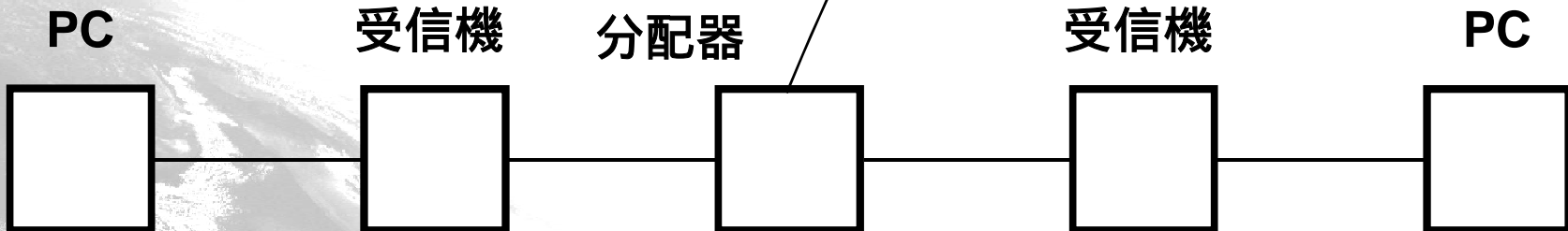
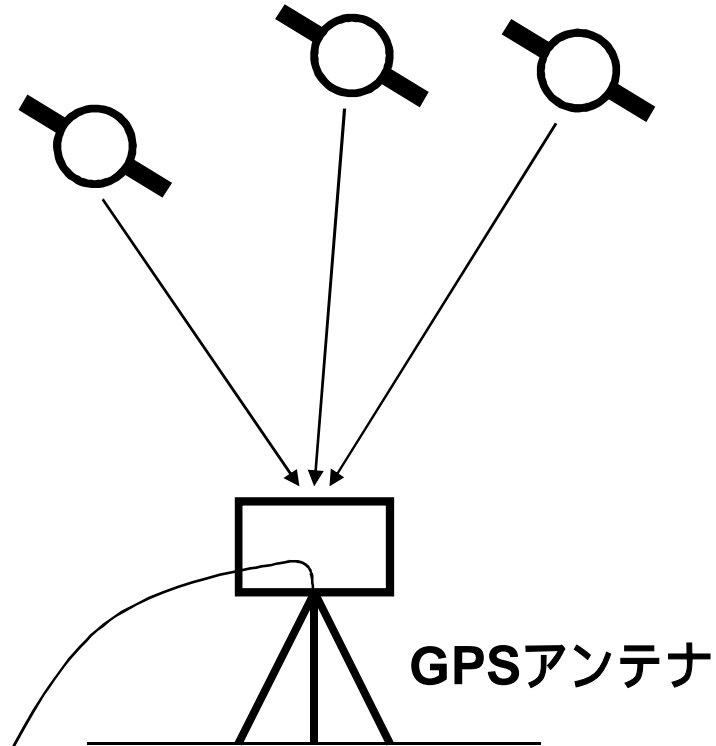
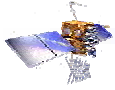


取得データ & 解析条件 (1)

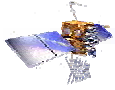


- 位置：東京海洋大学第四実験棟屋上
 - ゼロベースライン 空間的な誤差がない条件
- 日時：2008/1/21 14:00 ~ 2008/1/22 14:00 (UTC)
- 受信機：NovAtel社製OEM4(基準局 & 移動局)
- サンプリングレート：1Hz
- 仰角マスク：15°
- 1秒毎にFIXの有無をチェック
- 評価方法
 - Root Mean Square (RMS) Error
 - FIX率
- 後処理で意図的に0 ~ 30秒の伝送遅延を加える

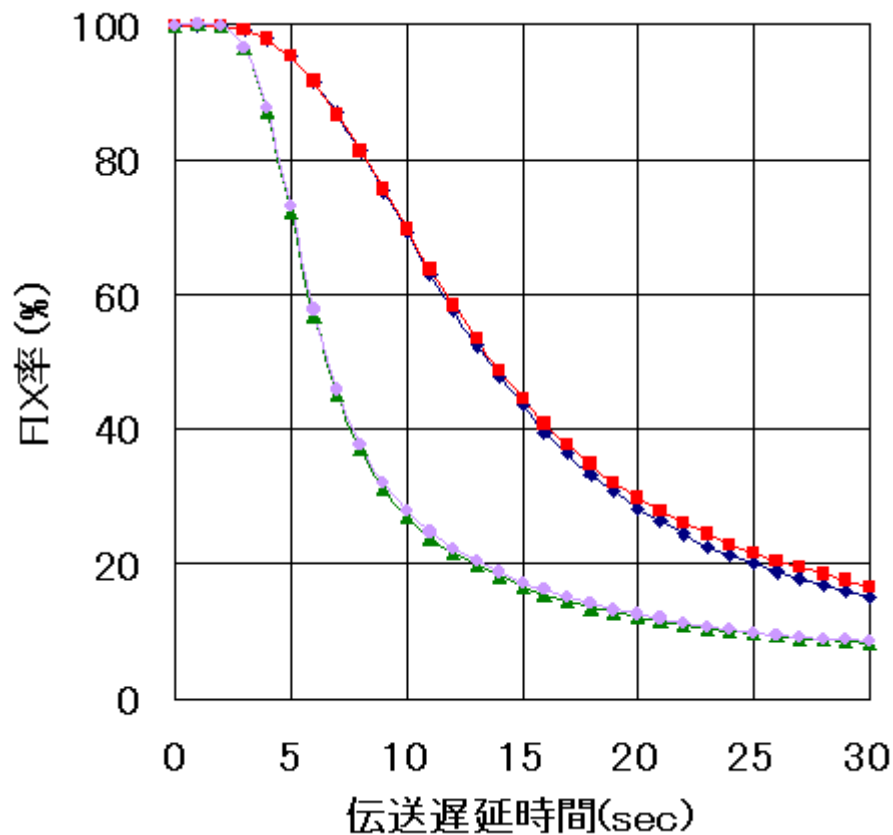
実験概要 (ゼロベースライン)



測位結果(1) ~ FIX率

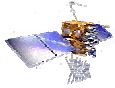


$$\text{FIX率} = \frac{\text{Number of succeeded AR}}{\text{Number of AR}}$$



- ◆ 電離層&衛星時計補正
- 衛星時計補正
- ▲ 電離層補正
- ◇ 補正なし

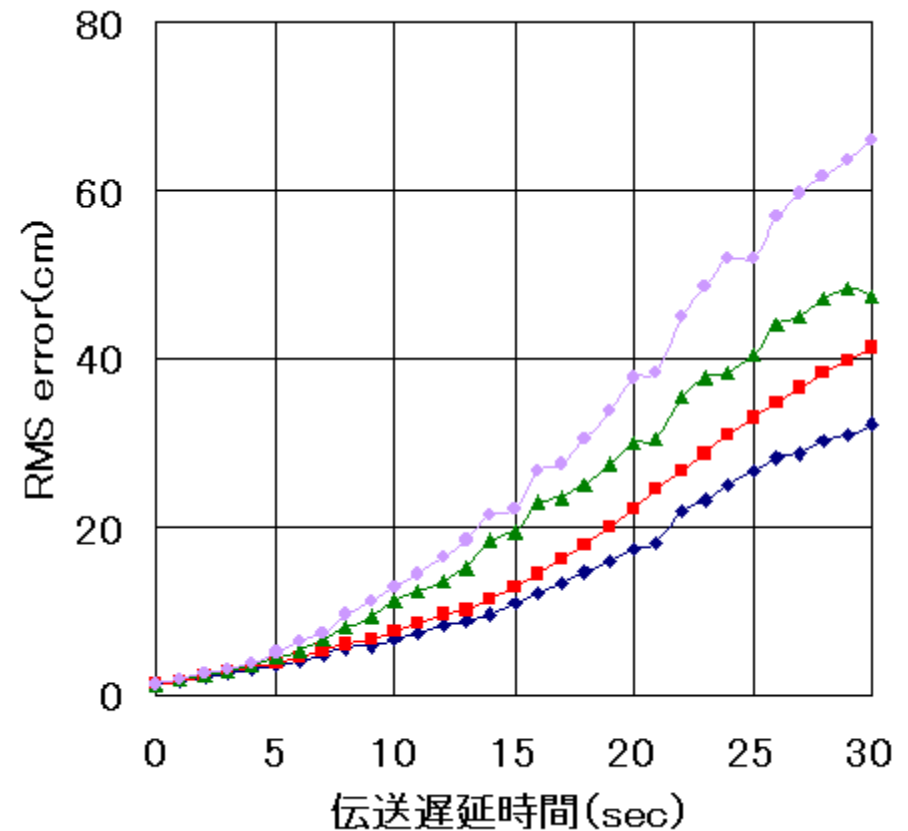
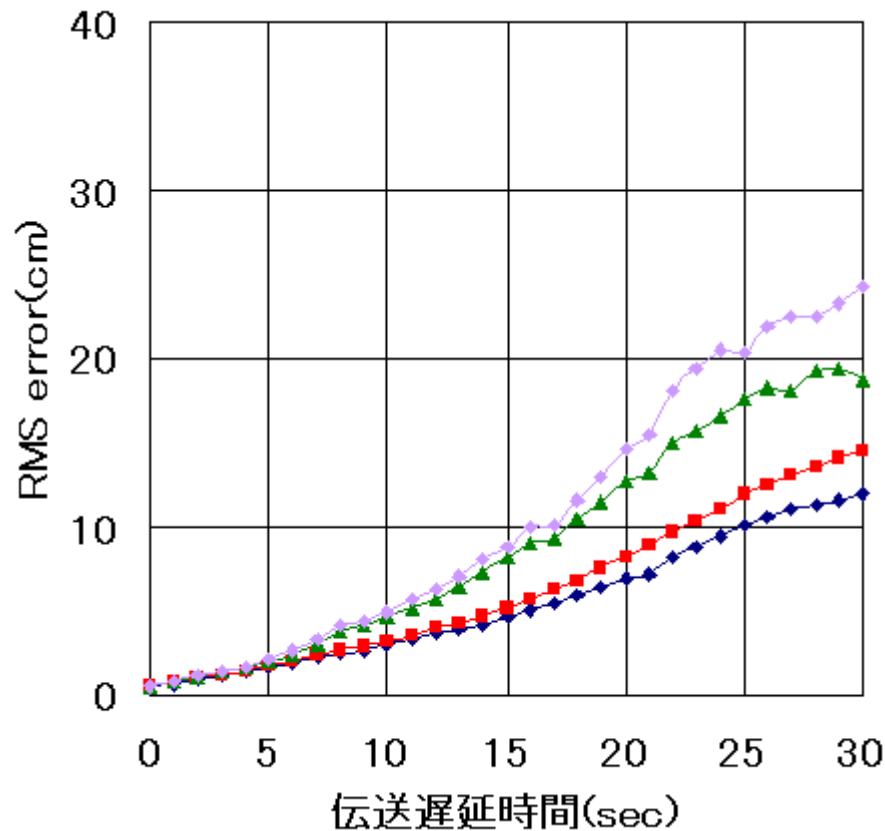
測位結果(1) ~ 測位精度



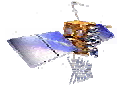
◆ 電離層&衛星時計補正 ■ 衛星時計補正 ▲ 電離層補正 ◆ 補正なし

水平方向

高さ方向

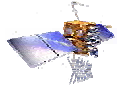


考察 (ゼロベースライン)



- 遅延時間の増加に伴いFIX率、RMSが劣化
時間軸に関する誤差による影響を確認
- 高さ方向の精度は水平方向の精度よりも劣化が激しい
衛星測位ではアンテナに対して水平方向や下からの電波を受信することは不可能であるため
- 衛星時計補正はFIX率、RMSの劣化を効果的に抑えている
提案した補正手法が時間軸に関する誤差を補正
- 電離層補正を行うとRMSの劣化を抑えることができたがFIX率は遅延時間が10secを超えると、補正をしない場合よりも劣化
提案した補正手法が効果的であるとは一概には言えない
- 空間的な誤差の影響を確認する必要

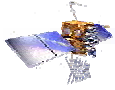
取得データ & 解析条件 (2)



- 基準局：藤沢
- 移動局1：泉 基線長11km
- 移動局2：横須賀 基線長19km
- 日時：2004/12/1 00:00 ~ 24:00 (UTC)
- 受信機：Trimble 5700 (基準局 & 移動局)
- サンプリングレート：1Hz
- 仰角マスク：15°
- 1秒毎にFIXの有無をチェック
- 評価方法
 - Root Mean Square (RMS) Error
 - FIX率



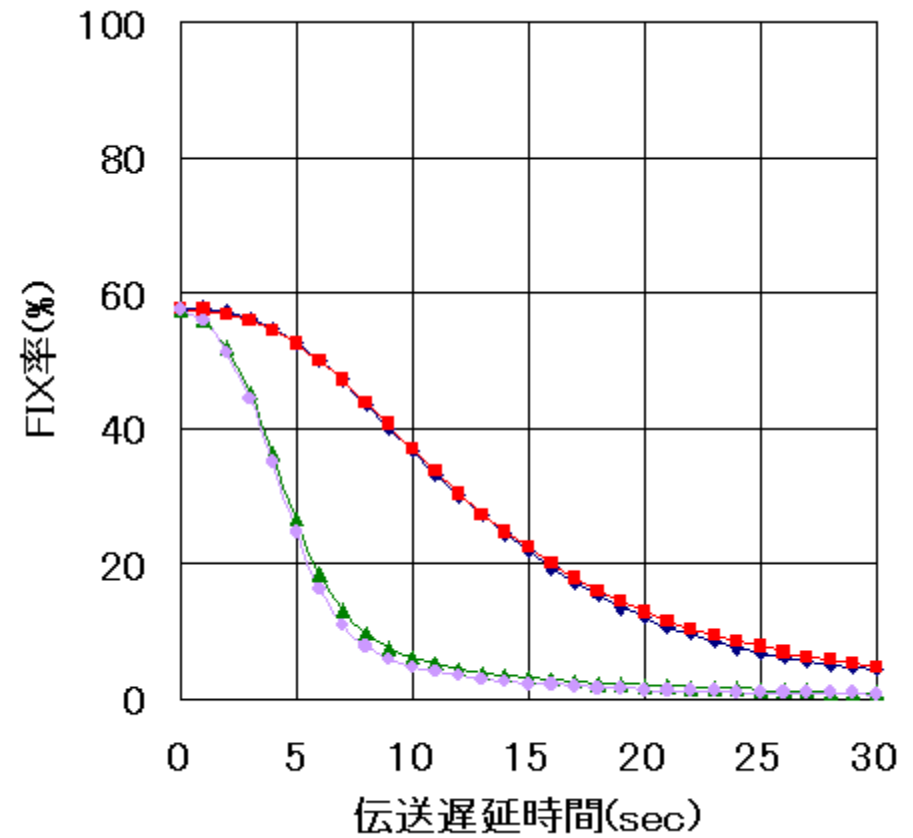
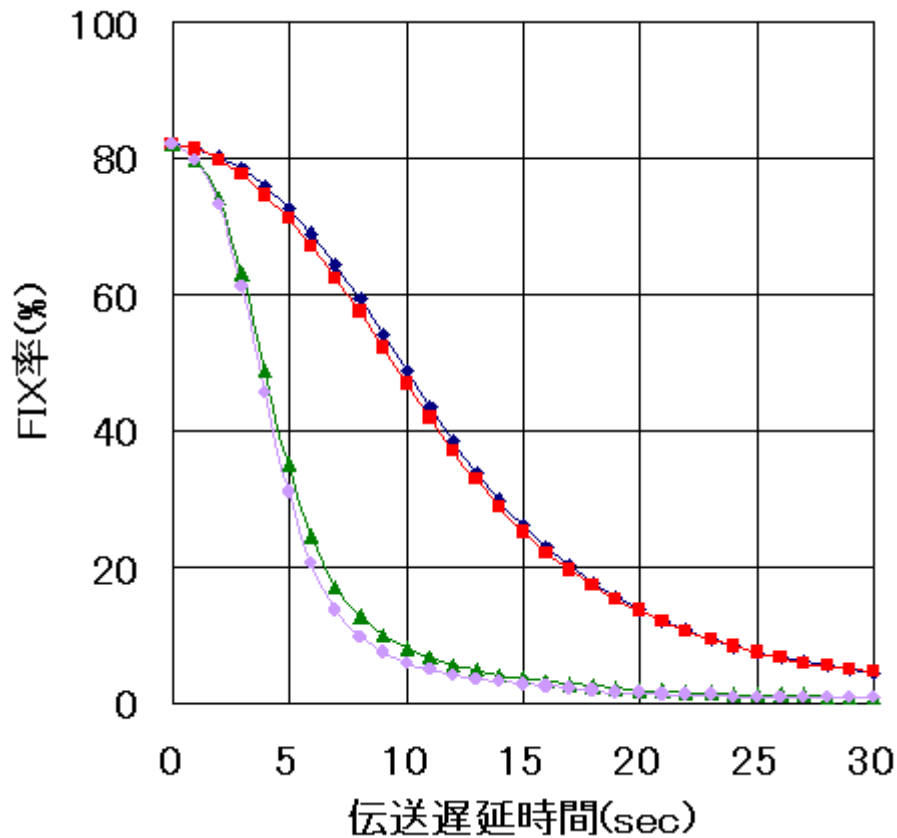
測位結果(2) ~ FIX率



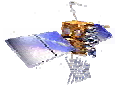
◆ 電離層&衛星時計補正 ■ 衛星時計補正 ▲ 電離層補正 ◆ 補正なし

泉-藤沢 基線長11km

横須賀-藤沢 基線長19km

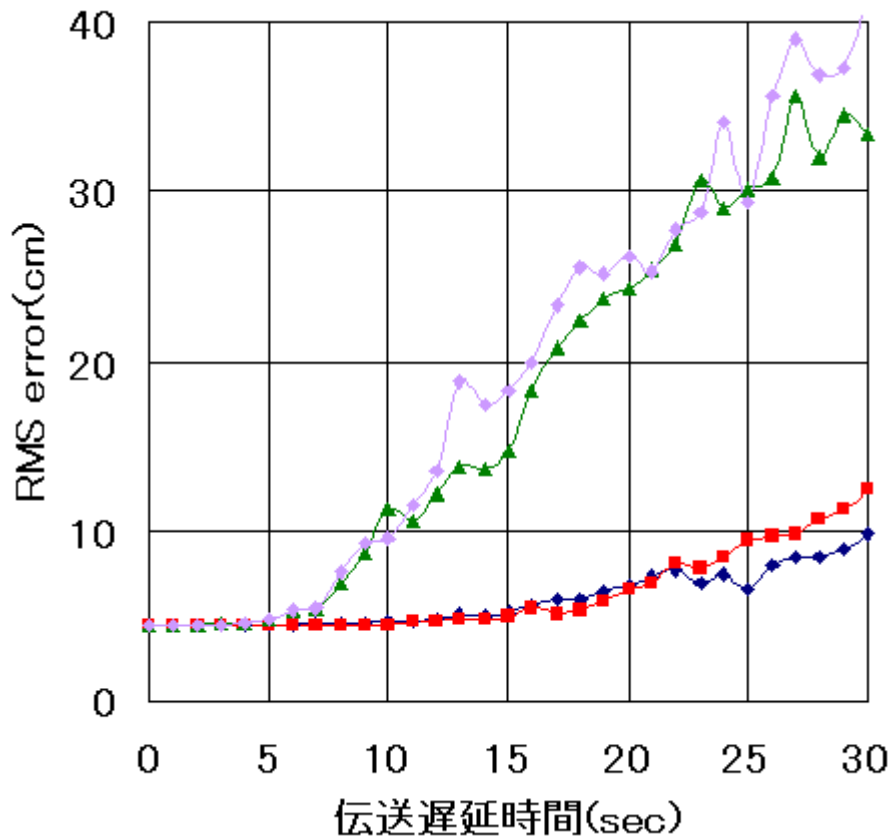


測位結果(2) ~ 水平方向の測位精度

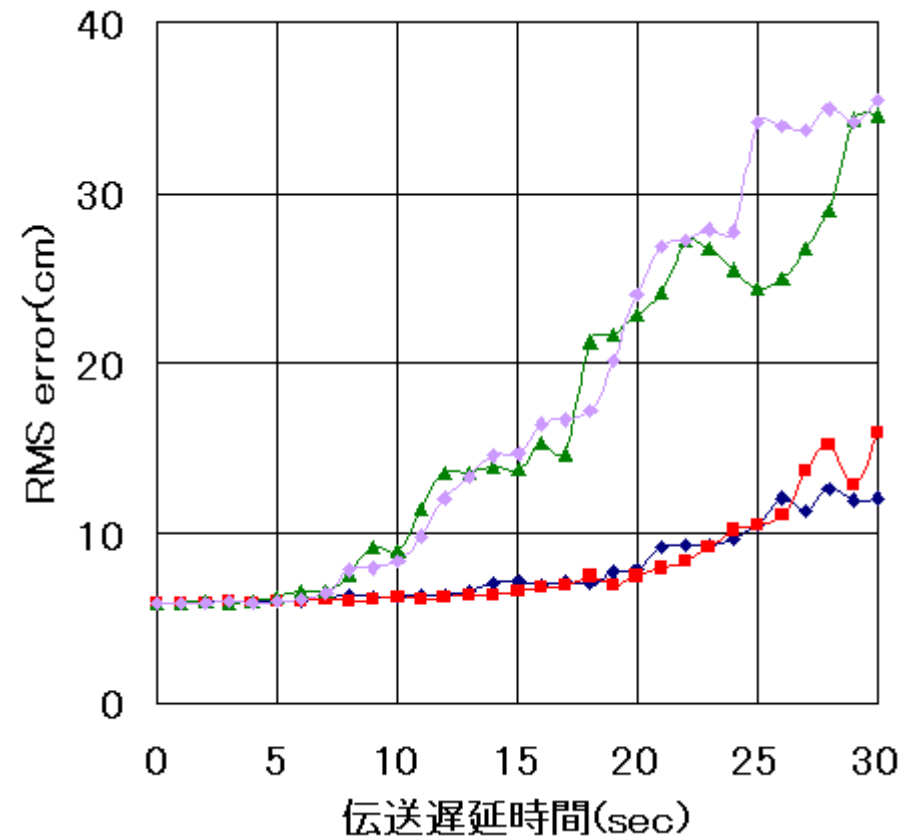


◆ 電離層&衛星時計補正 ■ 衛星時計補正 ▲ 電離層補正 ◆ 補正なし

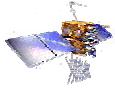
泉-藤沢 基線長11km



横須賀-藤沢 基線長19km



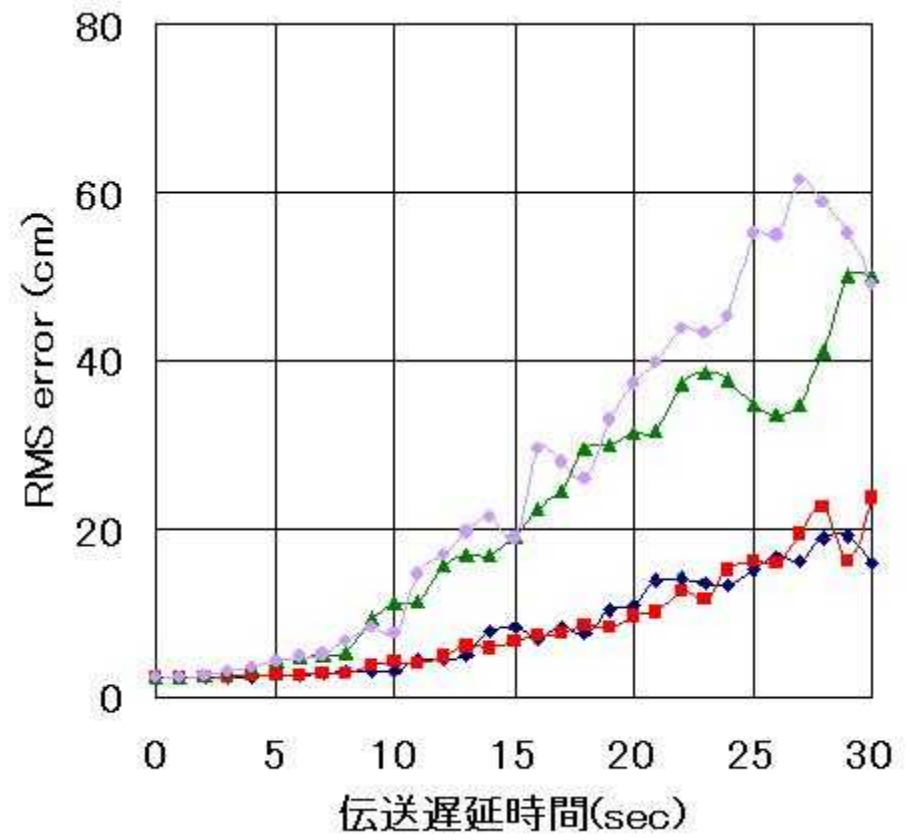
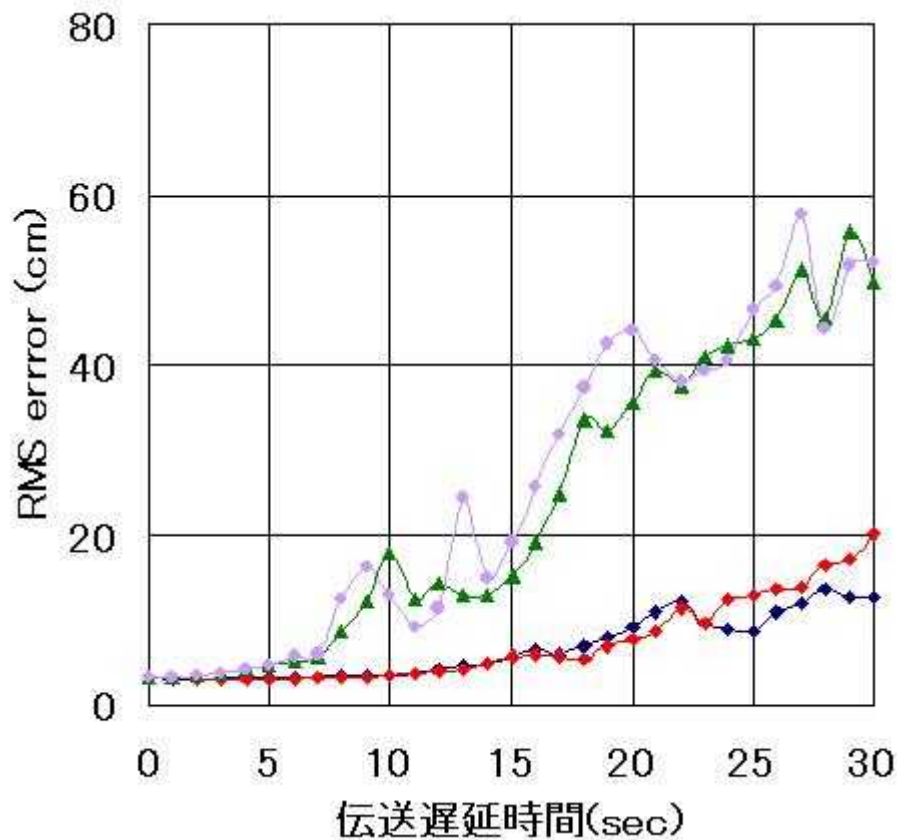
測位結果(2) ~ 高さ方向の測位精度



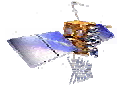
◆ 電離層&衛星時計補正 ■ 衛星時計補正 ▲ 電離層補正 ◆ 補正なし

泉-藤沢 基線長11km

横須賀-藤沢 基線長19km

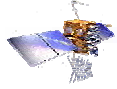


考察 (基線長別)

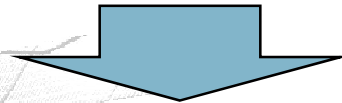


- 遅延時間の増加に伴いFIX率、RMSが劣化
時間 & 空間的な誤差による影響を確認
- 基線長が短いほうがFIX率は高くなる
基線長が短いほうが移動局と基準局の環境が近い
- 基線長の違い(11km 19km)でRMS値に大きな違いはなかった
- 衛星時計補正はFIX率、RMSの劣化を効果的に抑えている
- 電離層補正は補正しない場合と比べ、FIX率、RMSはほとんど変わらなかった
提案した補正手法はあまり効果がなかった

誤差要因に関する考察

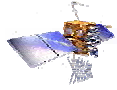


- 主な測位性能劣化要因
 - 衛星時計バイアス 1次の項のみで補正
 - 電離層遅延 劣化を抑えることができなかったと言えない
 - 対流圏遅延
 - 衛星軌道誤差

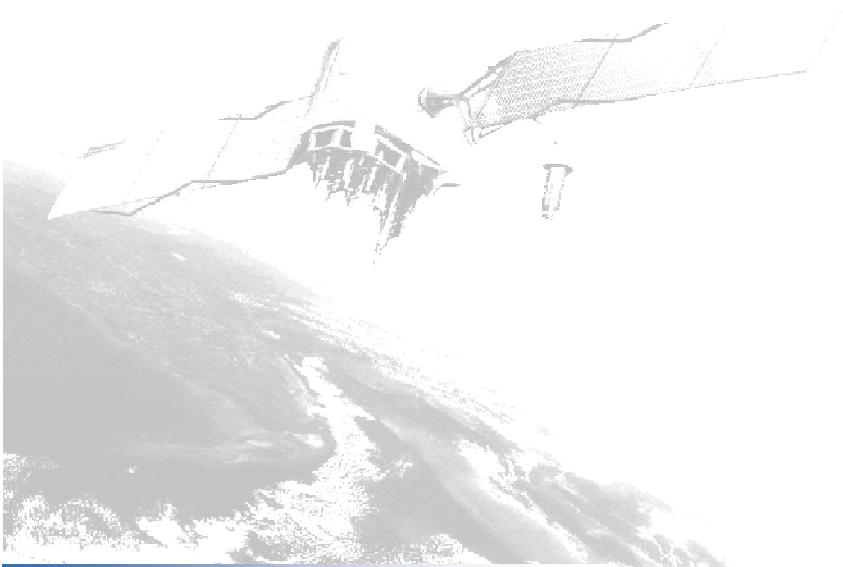
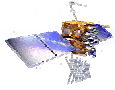


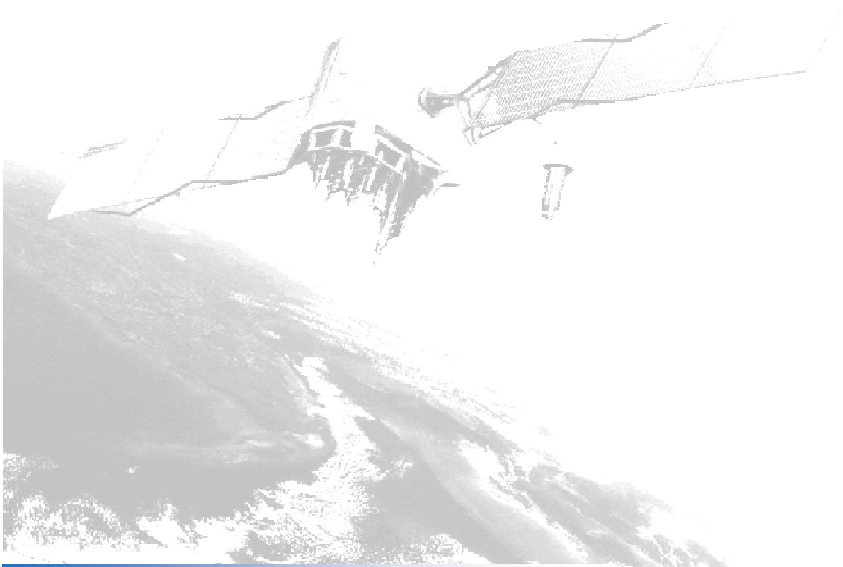
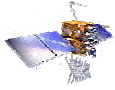
- 補正しきれなかった誤差要因
 - (1) 高次の項 & ランダム変動項の衛星時計バイアス
 - (2) 衛星軌道誤差

まとめ

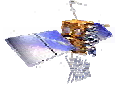


- 非同期モード
 - 補正なし
 - 衛星時計補正
 - 電離層補正
 - 衛星時計 & 電離層補正
 - FIX率
 - Root Mean Square (RMS)
 - 基線長別
- 衛星時計補正が伝送遅延に対して有効であることを確認
- 電離層補正は伝送遅延に対してあまり有効ではなかった





電離層遅延外挿方法 (1/3)



- 2周波を使った電離層遅延量の推定

$$I_{L1,P} = \frac{f_{L2}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} (P_{L2} - P_{L1}) \quad I_{L1,\phi} = -\frac{f_{L2}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} (\lambda_{L2}\phi_{L2} - \lambda_{L1}\phi_{L1})$$

$$I_{L1} = I_{L1,\phi} + \bar{I}_{L1}$$

Where:

\bar{I}_{L1} ($I_{L1,P} - I_{L1,\phi}$) の平均値

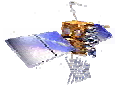
f_{L1} : L1周波数 (1575.42MHz) P_{L1} : L1擬似距離 (m)

f_{L2} : L2周波数 (1227.6MHz) P_{L2} : L2擬似距離 (m)

λ_{L1} : L1の波長 (m) ϕ_{L1} : L1搬送波 (cycle)

λ_{L2} : L2の波長 (m) ϕ_{L2} : L2搬送波 (cycle)

電離層遲延外挿法 (3/3)



— 外挿期間60秒 — 外挿期間30秒 — 外挿期間1秒

