



カルマンフィルタを用いた GPS単独測位精度向上に関する研究

東京海洋大学 情報通信工学研究室

孫 世偉

指導教官 澤田 修治

2007年8月23日



研究の背景

✦ GPS測位において

✦ 安価な高感度受信機での単独測位

- ✦ 数m ~ 数10m程度の精度
- ✦ 利便性は高い

✦ 高価な高精度受信機での単独測位

- ✦ 精度は良いが、利便性は低い
- ✦ 信号品質のチェックが厳しい

✦ 世の中のニーズ

- ✦ 精度(見栄え)を保ちつつ、都市部でも利便性の良い受信機が求められている。



研究の目的

- ✦ 移動体で安価なGPS受信機での単独測位精度向上を目標とした
 - ✦ 最適な信号強度(信号品質の代表的なバロメータ)の閾値を設けることにより、精度の向上を確認する
 - ✦ その結果に対して、カルマンフィルタを用いることによる精度や滑らかさを向上させる
 - ✦ 位置(緯度、経度)のみを観測量として、カルマンフィルタで処理することにより、どの程度精度が向上するのかを確認
 - ✦ カルマンフィルタの観測量に速度情報を追加して、どの程度精度が向上するのかを確認



走行実験

★ 実験装置

- 受信機はu-bloxのAEK-4T
- アンテナは付属のパッチアンテナ

★ データの取得

- 東京海洋大学越中島キャンパス構内
- 車で生データを取得
- 取得の間隔は0.5秒で
- 多くの建物や樹木などに囲まれている





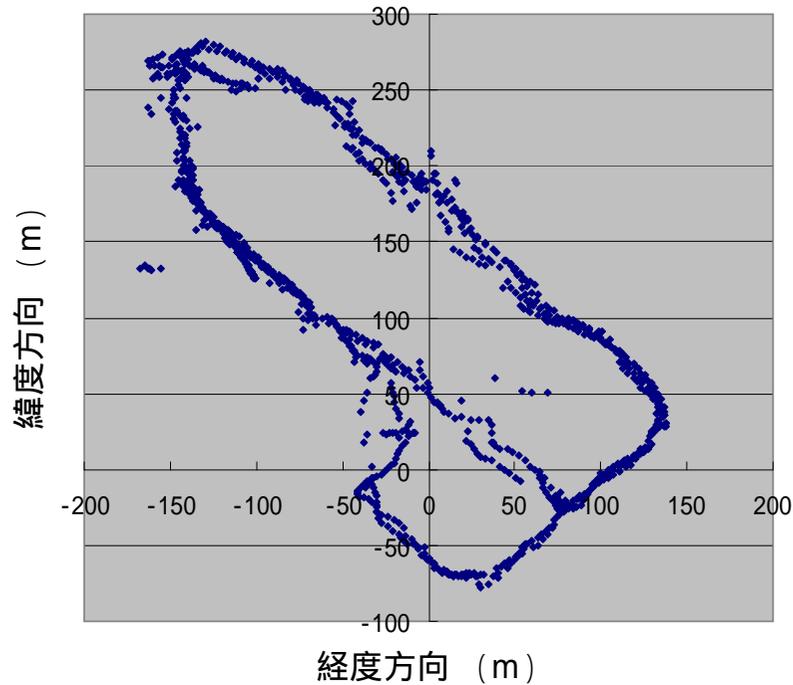
測位計算

- ✦ u-blox受信機が出力する擬似距離を用いて、自身の作成したソフトウェアで測位計算を行った
- ✦ u-blox受信機は信号強度が15 dB-Hz程度までの擬似距離を出力するから、測位計算において、信号強度の閾値を設けたときに(20、25、30、35 dB-Hz)、測位精度がどのように変化するかをチェックした



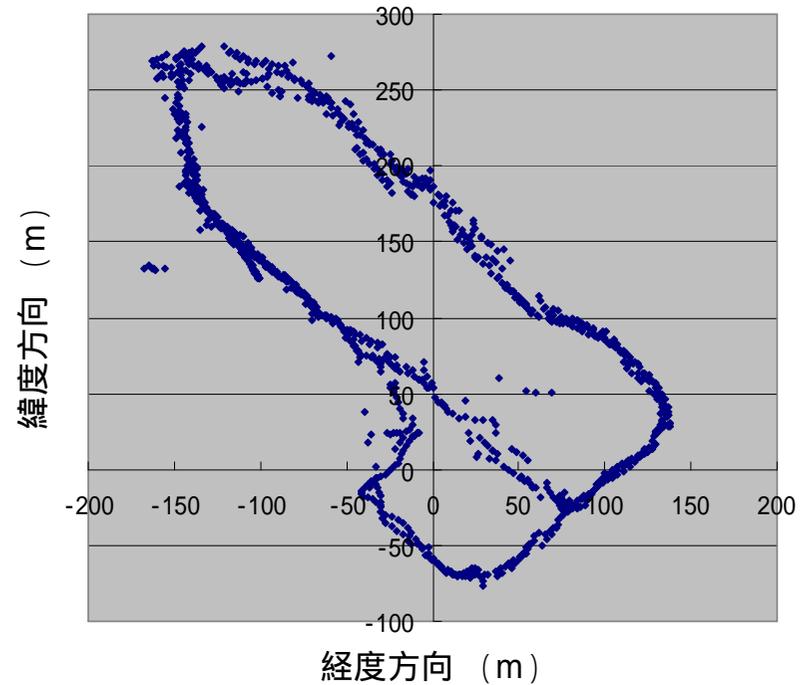
単独測位の結果を比較

20dB-Hz以上の衛星を利用



• 平均可視衛星数8.3個 測位率100%

25dB-Hz以上の衛星を利用

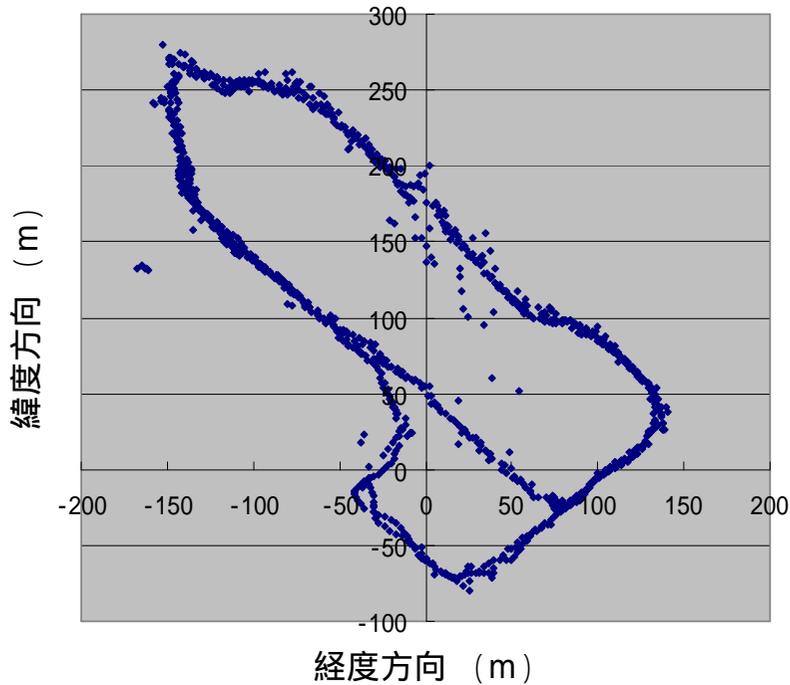


• 平均可視衛星数8.0個 測位率100%



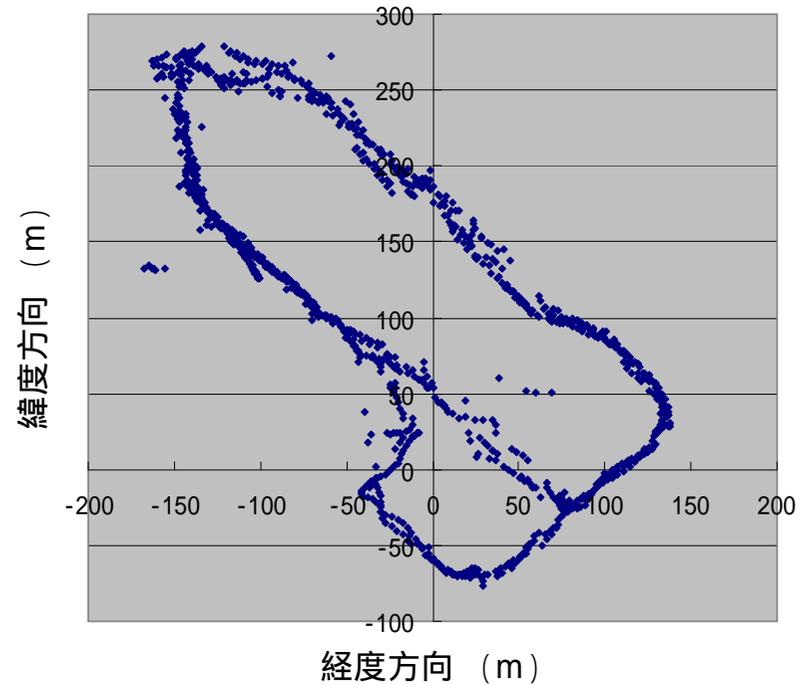
単独測位の結果を比較

30dB-Hz以上の衛星を利用



• 平均可視衛星数7.5個 測位率100%

25dB-Hz以上の衛星を利用

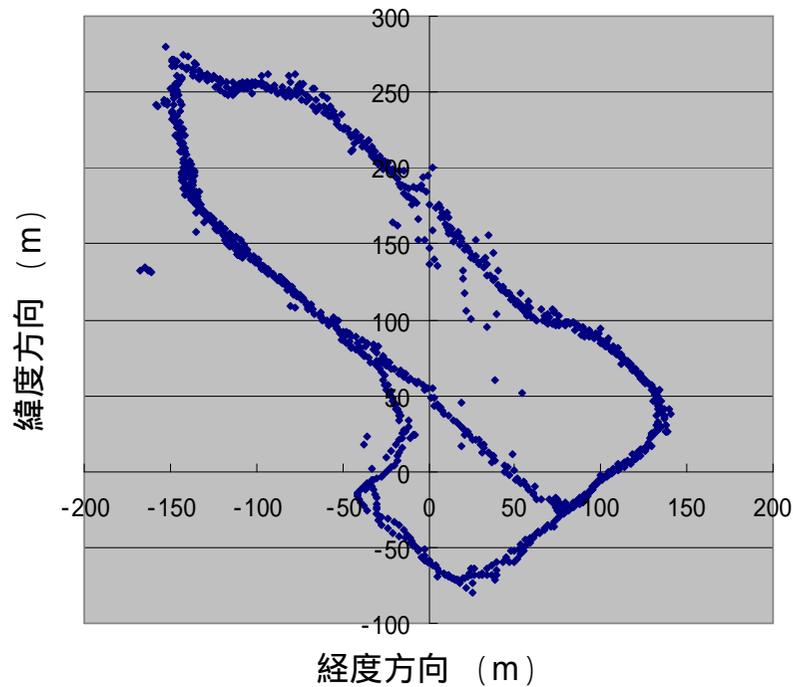


• 平均可視衛星数8.0個 測位率100%



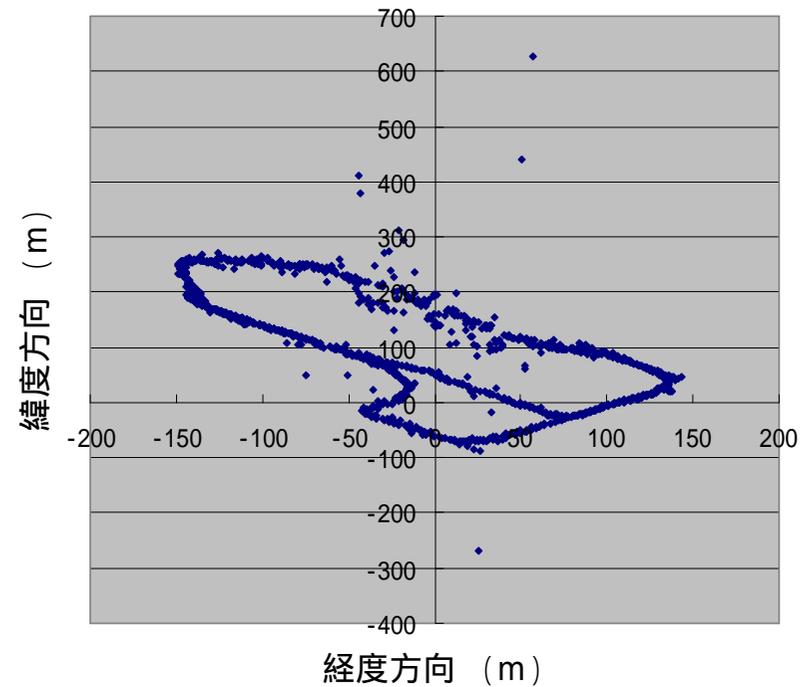
単独測位の結果を比較

30dB-Hz以上の衛星を利用



• 平均可視衛星数7.5個 測位率100%

35dB-Hz以上の衛星を利用

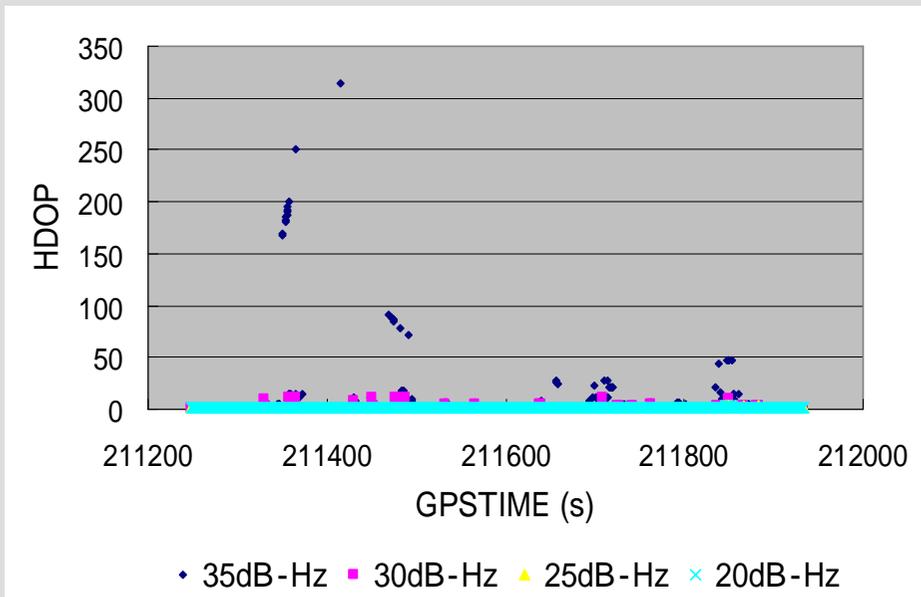


• 平均可視衛星数6.6個 測位率98.6%

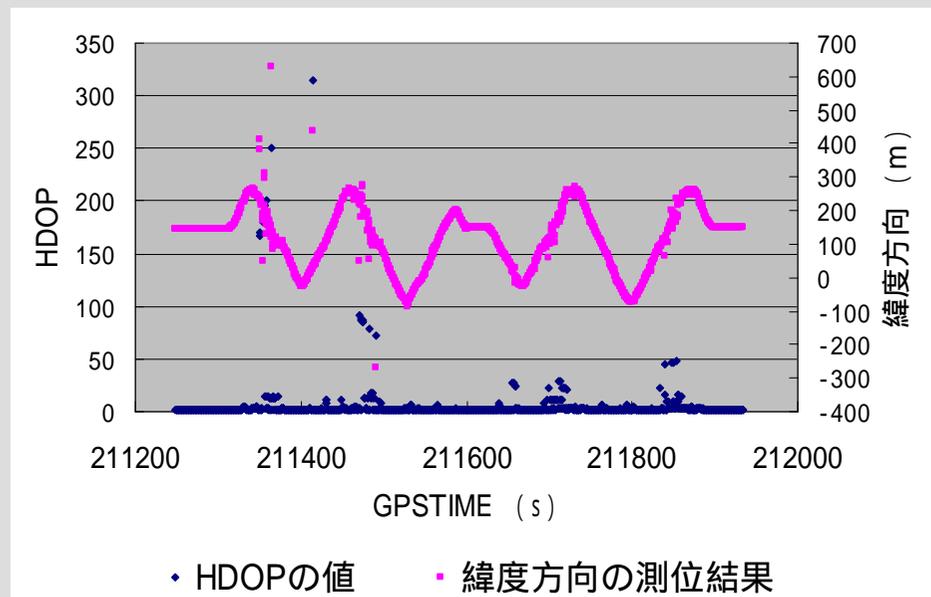


DOPと測位精度

- ✦ DOP (Dilution of Precision)とは衛星の配置により決まる指標であり、水平方向の精度を現す指数をHDOPと呼ぶ



閾値を設けることによるHDOPの比較



閾値35dB-HzのHDOPと測位精度の関係

- ✦ 左の図で、閾値を上げるとHDOPは大きくなる
- ✦ 右の図で、同じ時刻でHDOPが飛べば測位結果も飛んでいる



まとめ-1

- ✦ 信号強度の閾値を設けることによって、測位精度が大きく変わることがわかった
- ✦ 閾値を上げると、利用可能衛星数が減少することから、DOPが大きくなるため、そのバランスが重要であることがわかった
- ✦ 以上より、30dB-Hz程度以上の衛星を利用することが精度の観点から良いことがわかった
- ✦ 信号強度の高い信号だけを使用すると、測位率が落ちるため、測位率が落ちないように、できるだけ多くの衛星の情報を利用し、さらに測位解にフィルターをかけて、精度やなめらかさを向上させることが重要であると考えた



問題設定

★ 基本システム

$$\text{状態方程式: } \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{F}\mathbf{x}_k + \mathbf{G}\mathbf{w}_k$$

$$\text{観測方程式: } \mathbf{y}_k = \mathbf{H}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k$$

x_k : 状態変数

w_k : 状態雑音

y_k : 観測値

v_k : 観測雑音

F : 状態遷移行列

G : 状態雑音行列

H : 観測行列

★ 推定パラメータ

二次元平面内を運動する移動体が時刻 t_k において

位置: $x(k), y(k)$ 速度: $v_x(k), v_y(k)$ 加速度: $a_x(k), a_y(k)$

状態ベクトル: $\mathbf{x}_k = [x(k), y(k), v_x(k), v_y(k), a_x(k), a_y(k)]^T$

★ ニュートンの方程式によって

$$x(k+1) = x(k) + v_x(k)\Delta T + a_x(k)\Delta T^2 / 2.0$$

$$y(k+1) = y(k) + v_y(k)\Delta T + a_y(k)\Delta T^2 / 2.0$$

$$v_x(k+1) = v_x(k) + a_x(k)\Delta T$$

$$v_y(k+1) = v_y(k) + a_y(k)\Delta T$$

$$\Rightarrow \mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta T & 0 & \Delta T^2 / 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta T & 0 & \Delta T^2 / 2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\star \text{観測量 (緯度、経度のみ)} \quad \mathbf{y}_k = [x(k), y(k)]^T \Rightarrow \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$



カルマンフィルタの適用

上のシステムにカルマンフィルタを適用すると、最終的に状態ベクトル x_k の最小分散推定量を求める次のアルゴリズムが得られる

フィルター方程式: $\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (y_k - H_k \hat{x}_{k|k-1})$

$$P_{k|k} = P_{k|k-1} - K_k H_k P_{k|k-1}$$

カルマンゲイン: $K_k = P_{k|k-1} H_k^T (I + H_k P_{k|k-1} H_k^T)^{-1}$

予測方程式: $\hat{x}_{k+1|k} = F_k \hat{x}_{k|k}$ σ_w^2 / σ_v^2 : 雑音分散比

$$P_{k+1|k} = F_k P_{k|k} F_k^T + \sigma_w^2 / \sigma_v^2 \Lambda \quad \Lambda = G G^T = \text{diag}\{0,0,0,0,1,1\}$$

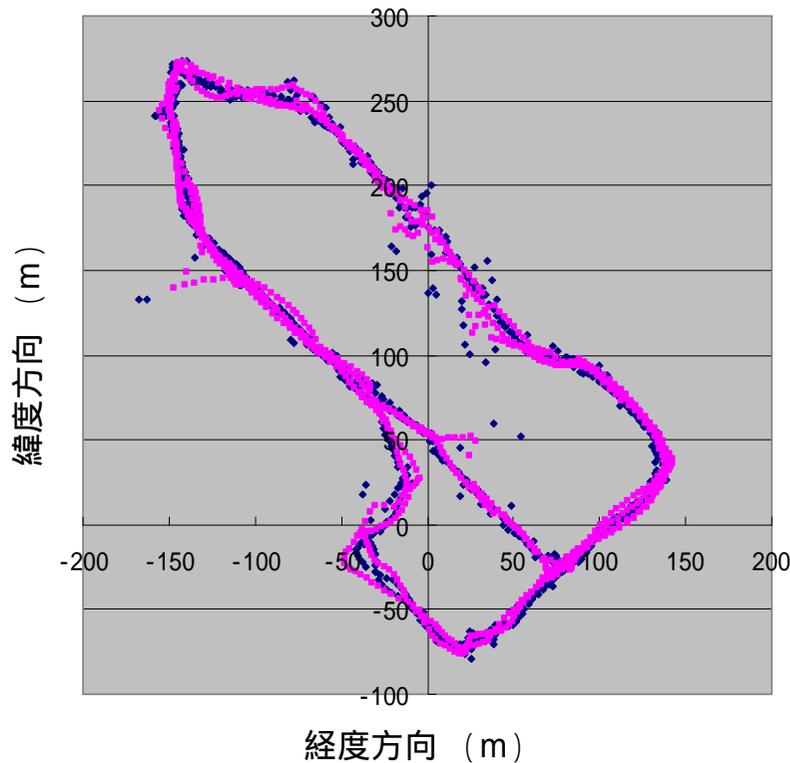
状態雑音 w_k (平均値ベクトル0, 共分散行列 $\sigma_w I$)

観測雑音 v_k (平均値ベクトル0, 共分散行列 $\sigma_v I$)



カルマンフィルタによる結果の比較

車データの結果比較



- 単独測位の結果
- 位置のみでスムージングの結果

信号強度は30dB-Hz以上

- ◆ 大きな飛びがないところで、スムージングできた
- ◆ 大きな飛びがあると、スムージングも測位誤差も改善できなかった
- ◆ そこで、より精度を向上させるために、本稿では観測量に速度情報を追加する手法を選択した



速度推定の方法

★ ドップラー効果 (Doppler effect)

- 利用者の受信機が働いていても、止まっても、衛星との相対速度がある
- 電波信号にはドップラー効果による周波数偏移が現れる

★ 送受信の周波数は次の関係がある

$$f_R = f_T (1 - \rho' / v) \quad \begin{cases} \Delta f = (f_R - f_T) = -\rho' / \lambda \\ \Delta f = f_T \rho' / c \end{cases}$$



$$(V_i - V) \cdot I_i + \Delta \rho' = \rho'_i = \Delta f c / f_T$$

★ 視線速度 ρ' 求める方法:

- 擬似距離変化率
- 搬送波位相変化率
- 受信機が出力するドップラ周波数

だから、ドップラー効果による受信機速度の推定は三つの手法がある

- f_R : 受信の周波数
- f_T : 送信の周波数
- Δf : ドップラシフト
- ρ' : 送信機と受信機の間
の視線距離の変化率
(送信機と受信機との相対速度)
- $\Delta \rho'$: 視線速度の測定誤差
- v : 波の伝搬速度
- λ : 伝搬信号の波長
- c : 光の速度
- V_i : 各衛星の速度ベクトル
- V : 受信機の世界速度ベクトル
- I_i : 視線の単位ベクトル



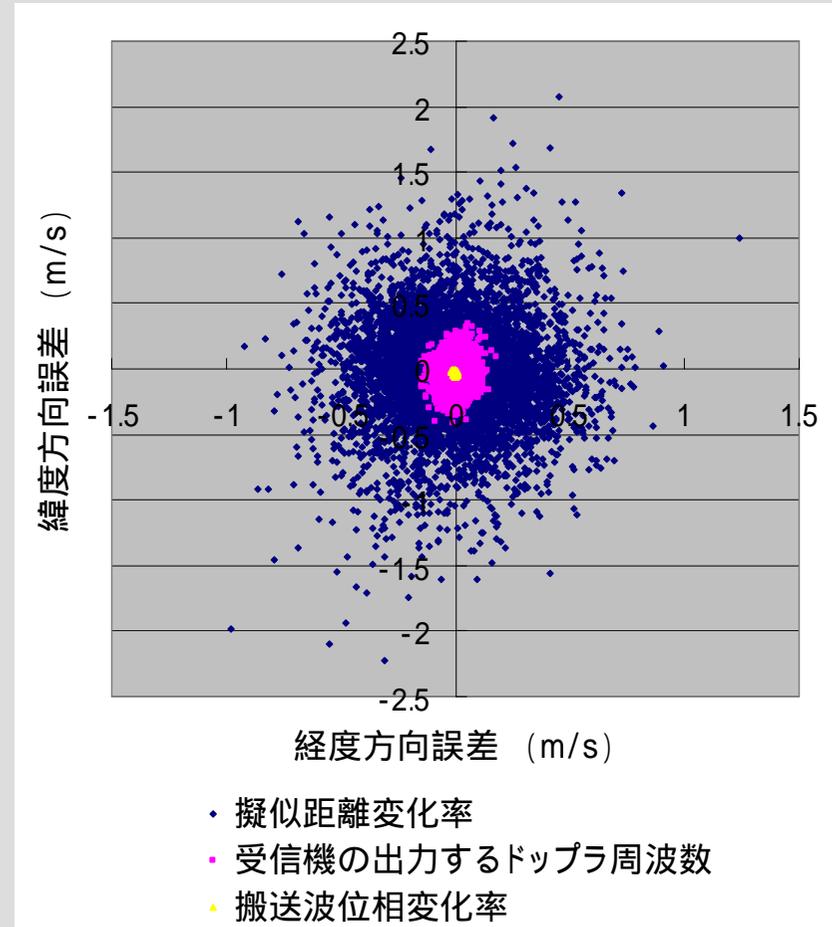
速度推定の比較

★ 解析データ

- u-bloxのAEK-4T
- 第4実験棟屋上
- アンテナを固定
- 2007年8月15日20:00から1時間
- サンプリングレートは2Hzで

★ 比較

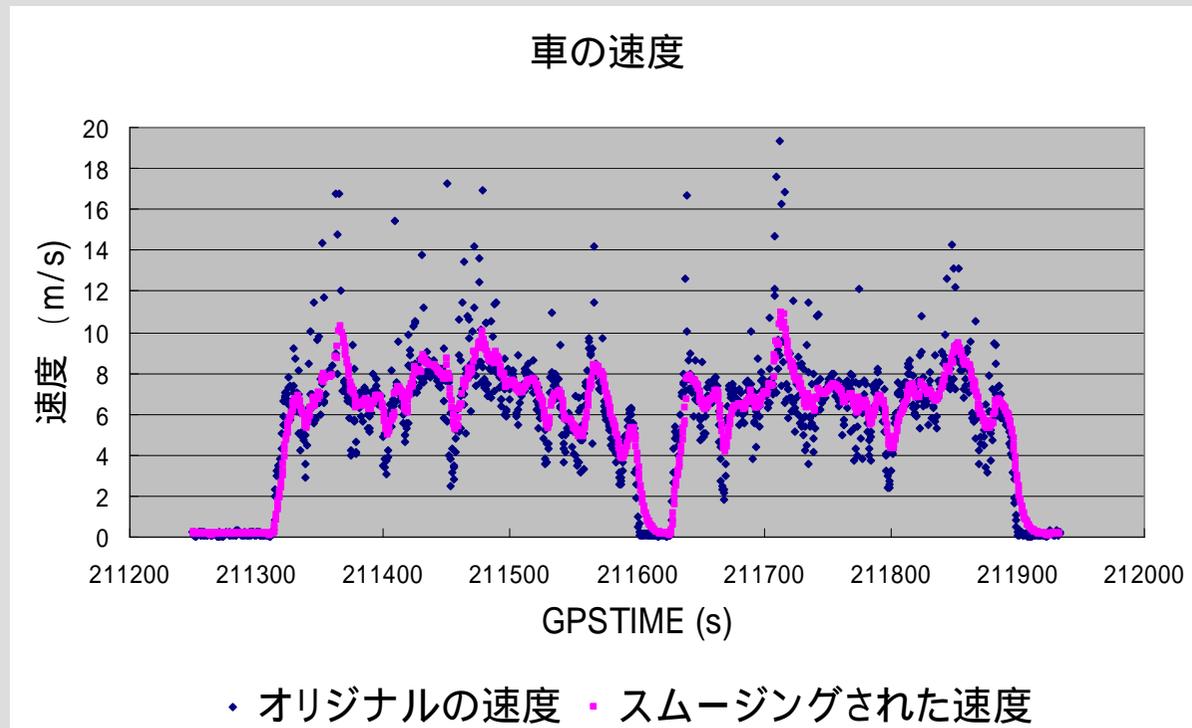
- 擬似距離変化率を利用した結果の誤差はやや大きい
- 搬送波位相変化率を利用した結果の精度は予想通り非常に良かった。ただし、移動体ではサイクルスリップが頻繁に発生するため、受信機の出力するドップラ周波数を利用する手法を今回採用した





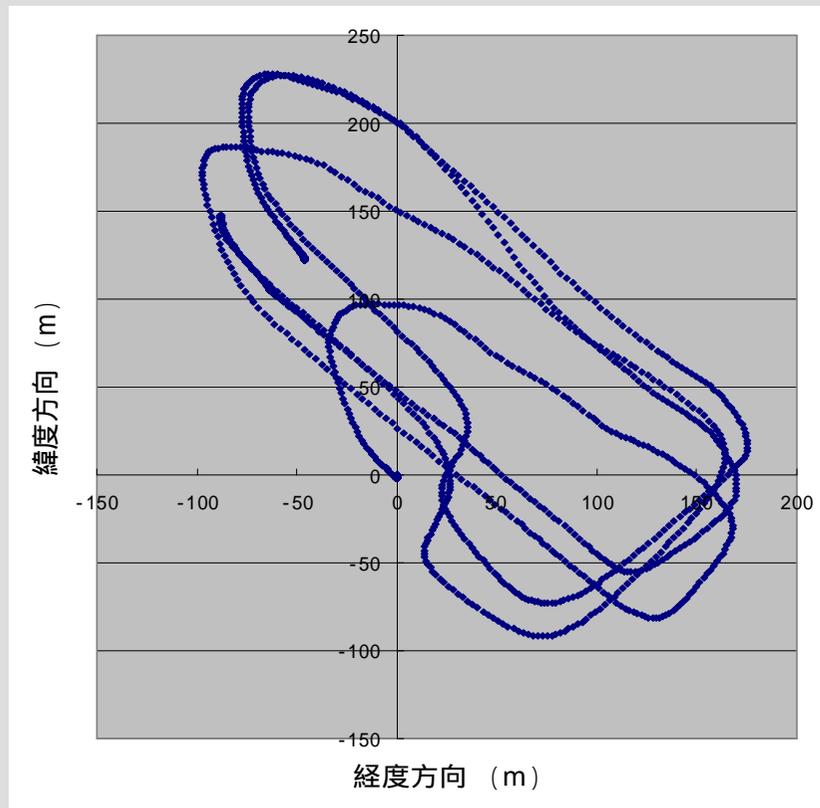
速度のスムージング

- ✦ 受信機出力するドップラ周波数を用いて、速度を算出した
- ✦ ローパスフィルター





速度のみから求めた水平の結果



速度を積分すると、得られた水平の結果はスムーズで、形から移動体の軌跡が明らかにわかった。この速度から求めた位置情報と擬似距離から求めた位置情報をカルマンフィルタで組み合わせることができる。



速度を追加すると

★ 観測ベクトル:

$$\mathbf{y}_k = [x(k), y(k)]^T \quad \Rightarrow \quad \mathbf{y}_k = [x(k), y(k), v_x(k), v_y(k)]^T$$

★ 観測行列:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \Rightarrow \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

★ 観測雑音共分散行列:

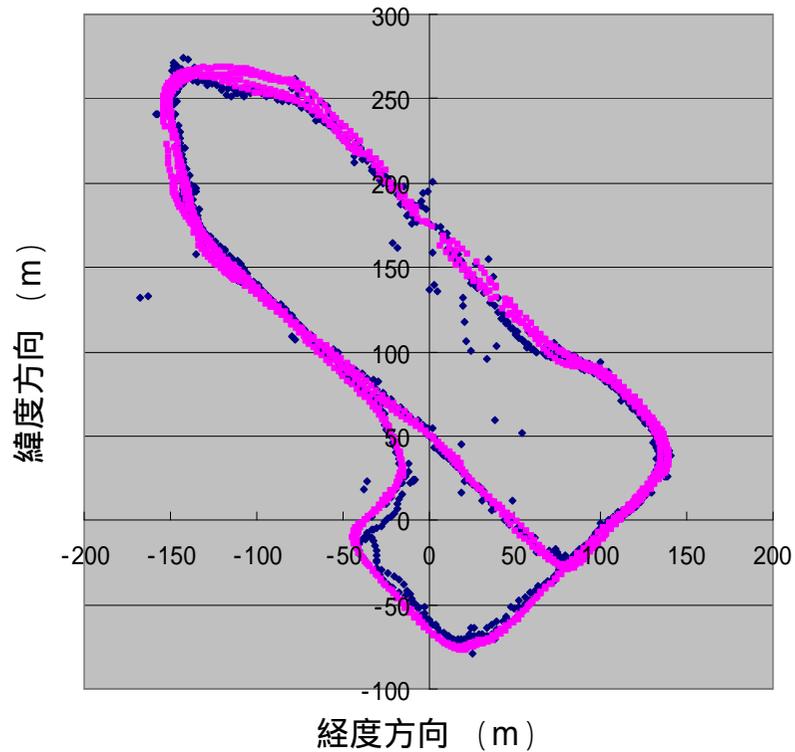
単独測位精度及び速度推定誤差より

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 2^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2^2 \end{bmatrix}$$



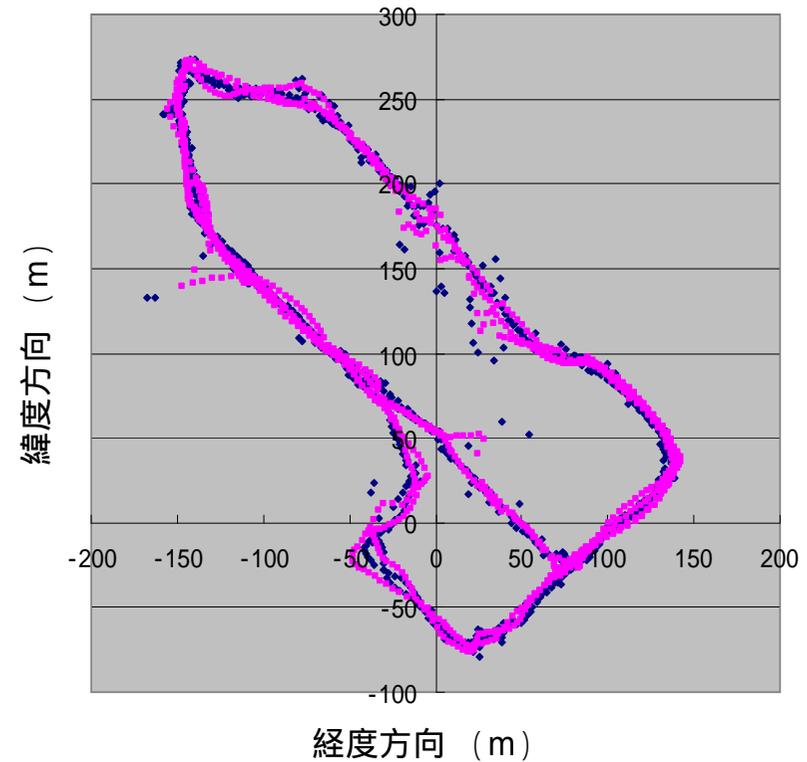
速度を追加した結果の比較

車データの結果比較



- 単独測位の結果
- 速度を追加したスムージングの結果

車データの結果比較



- 単独測位の結果
- 位置のみでスムージングの結果

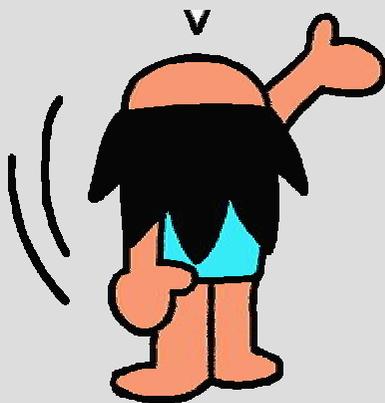


まとめ-2

- ✦ 高感度受信機を利用し、信号強度の閾値 (30dB-Hz程度) を設けることにより、測位精度が向上することを確認した。ただし閾値は場所によって変わる。
- ✦ GPS単独測位の結果 (緯度、経度) に対して、カルマンフィルタを用いることにより、精度や滑らかさの向上を試みた
- ✦ 観測量が位置のみであるときに、大きな飛びが多い場合に精度が劣化することがわかった
- ✦ ドップラー周波数により推定した速度と単独測位解をカルマンフィルタで統合することにより、大きな飛びが消え、単独測位の見栄え (精度) が改善することがわかった



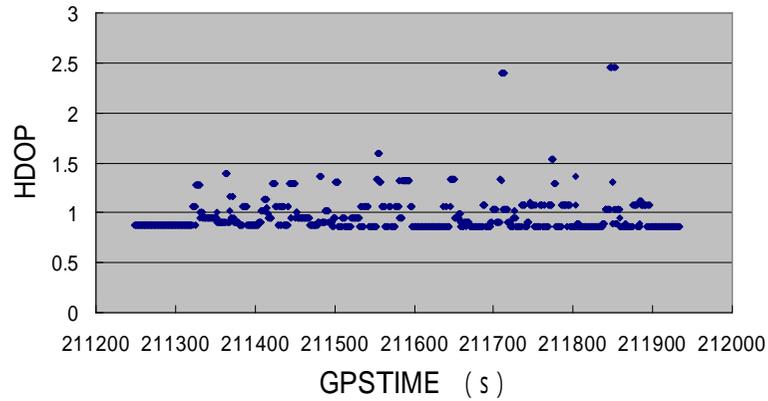
ありがとうございました



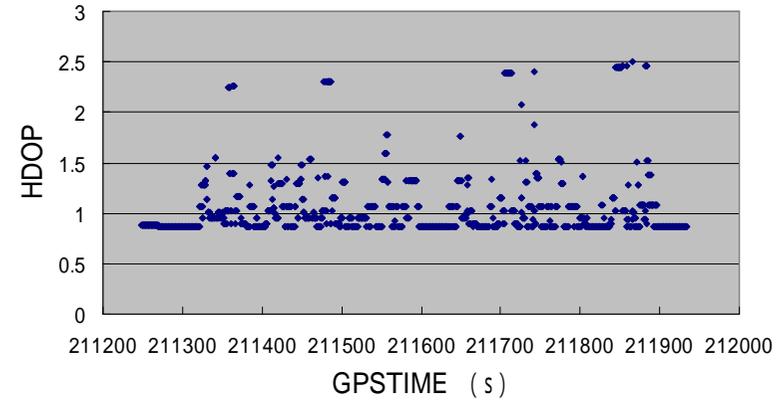


HDOPの比較

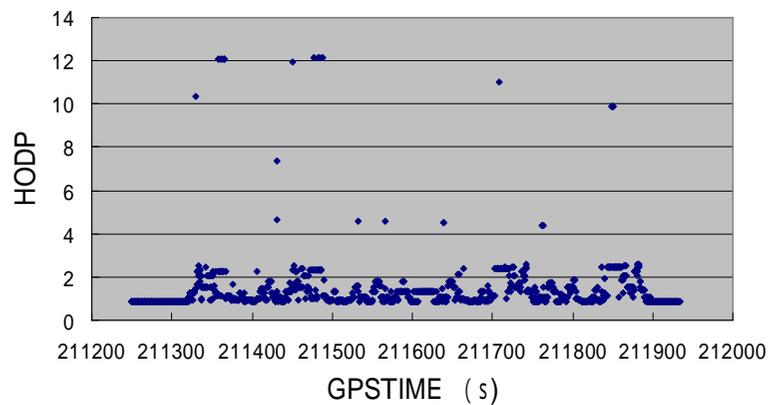
閾値20dB-HzのHDOP



閾値30dB-HzのHDOP



閾値30dB-HzのHDOP



閾値35dB-HzのHDOP

