

GNSS/センサー統合による歩行者 測位に関する研究

海洋科学技術研究科
海運ロジスティクス専攻

劉 健

発表概要

- 研究背景と目的
- 歩行者測位の現状.評価
- GNSSとPDR統合方法について
- 実験
- 結論

研究背景

歩行者測位技術は、様々な情報システムにおいて重要な要素である。

交通安全分野

視覚障害者の支援

マーケティング

位置情報を利用したゲーム、監視.....など

警視庁のまとめによると、昨年1年間の東京都内の交通事故の死者数は161人となり、2年ぶりに戦後最少を記録したが、死者数を事故にあった際の状況別では、歩行中が47.8%、およそ半分に当たる77人で最も多かった。

歩行者の位置情報は不可欠

背景と目的

- 都市部では、建物による衛星電波の遮断や反射、マルチパスなどの影響で、測位精度は大きく劣化する。
- 特に歩行者の場合は常にビルの近いところを歩くため、反射波のみ受信するケースや衛星配置の偏りの影響が極めて大きい。



PDR (Pedestrian Dead Reckoning) 周囲の環境に依存せず、連続的に計測ができる。

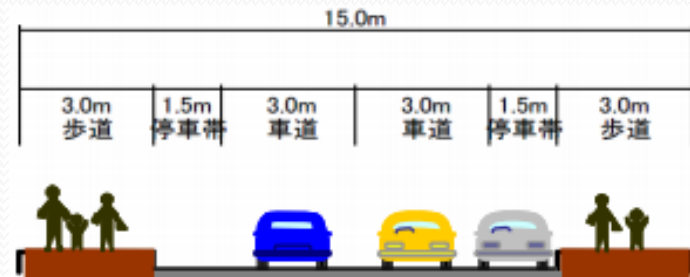
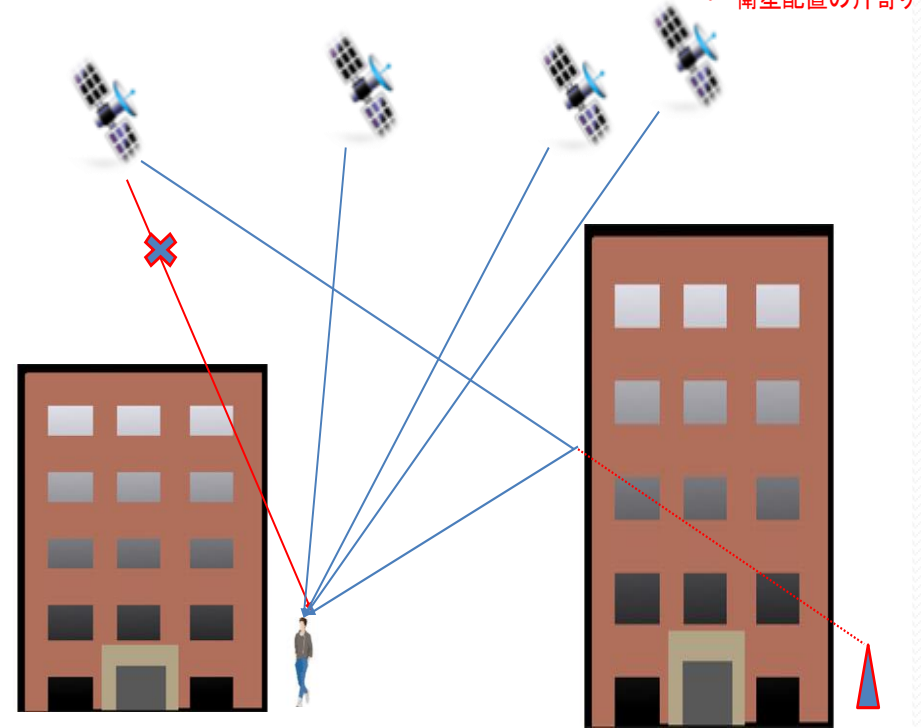


目的

PDRとGNSSを有効に統合する手法を考案し、測位環境厳しい都市部においても、連続に測位を実現することや測位精度の向上を目指す。

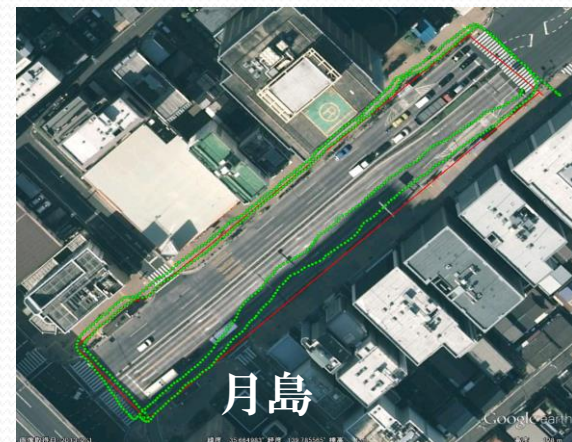
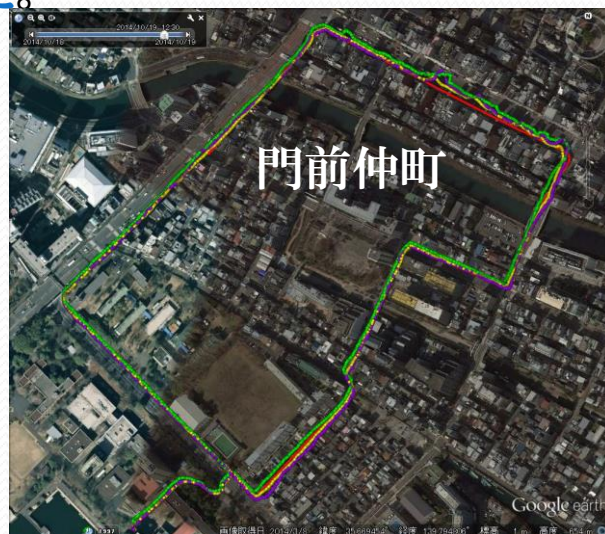
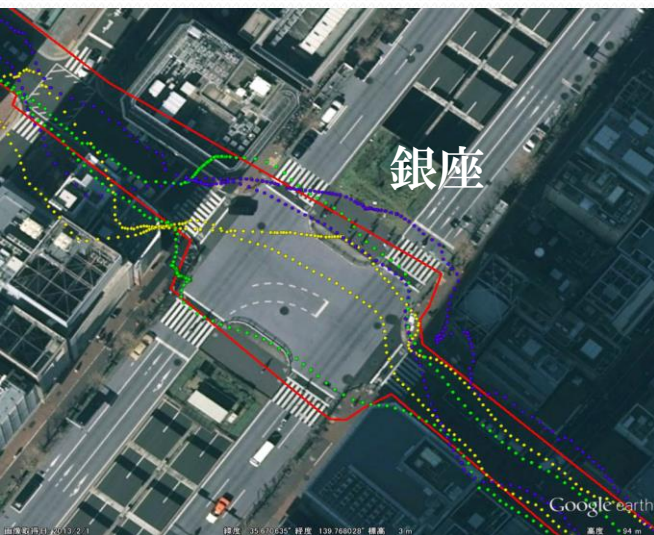
目標：
左の歩道、右の歩道の判別を意識し、推定精度が6メートルを目指す。

歩行者測位環境が厳しい



歩行者測位の現状.評価

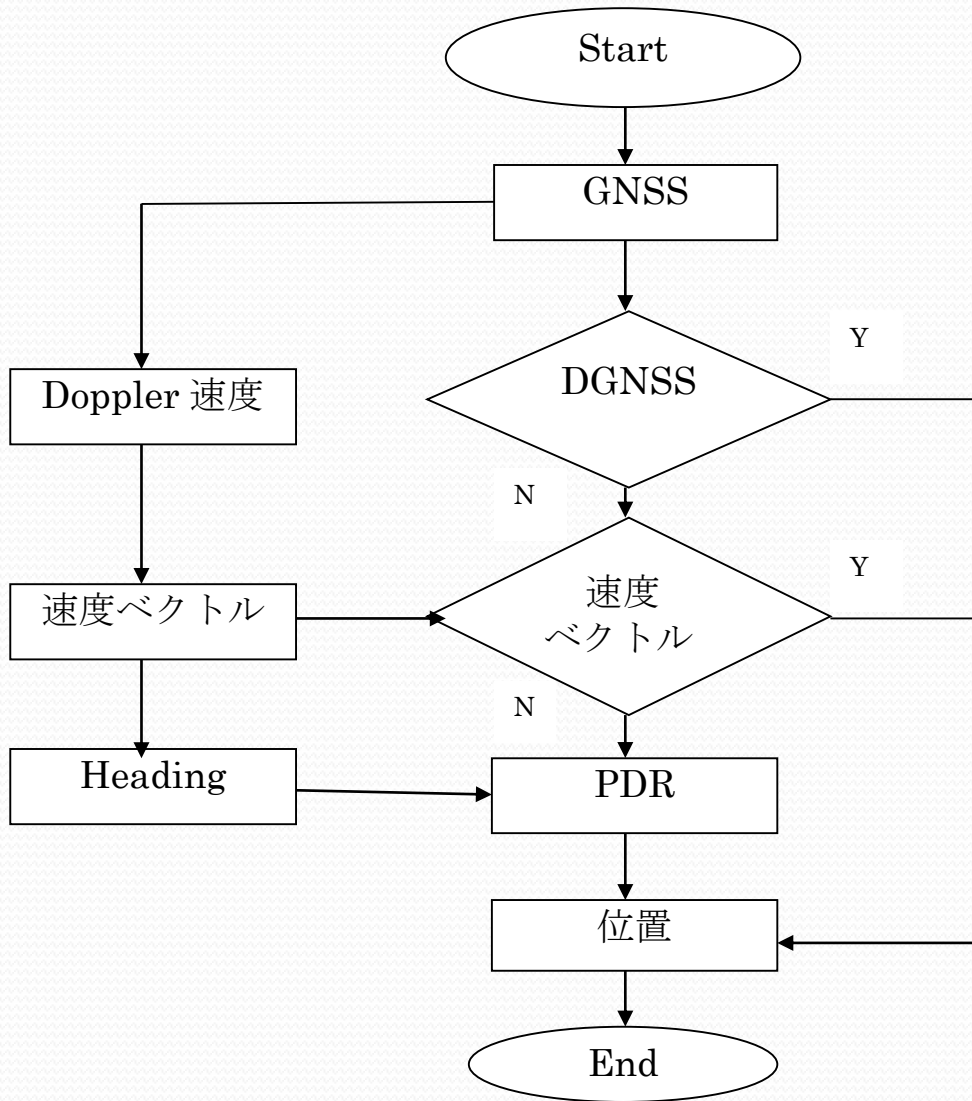
市販の高感度受信機を用いて、オープンスカイから、都心のビルに囲まれた場所等、様々な環境で、歩行者測位実験を実施した。取得した場所の環境による違いやマルチGNSSの衛星組み合わせによる違い、時間帯に応じた衛星数の多い少ないによる違いを中心に検証した。



..... GPS+BeiDou+QZSSGPS+GLO
..... GPS — 実際

実験で、現状の高感度単独測位受信機では都市部において測位精度がときに劣化することが分かった。特に高層ビル街では数十メートルの誤差が度々あった。

GNSS とPDRとの統合方法



統合方法

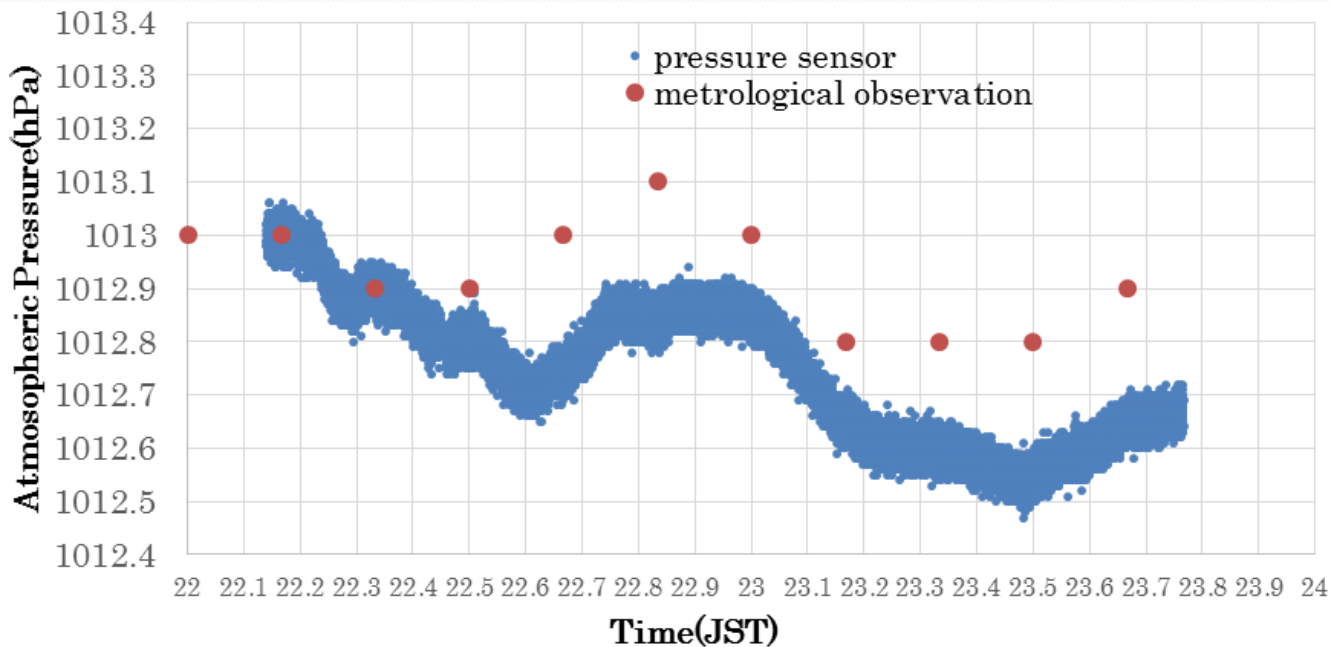
1: DGNSSの位置が得られるときは**DGNSS**の位置を使用する。

2: DGNSSの位置がない時はドップラーから計算した**速度ベクトル**を使用し、位置を推定する。

3: 両方ない場合は、**PDR**を用いて、位置を推定する。

気圧計によるDGNSS誤差検定

水平方向絶対誤差と垂直方向絶対誤差の相関があり、垂直方向に大きな誤差が発生した当該時刻においては、水平方向にも大きな誤差が発生しているといえる。DGNSS測位解による高度と、気圧高度計による高度の差をとり検定を行う。この差を検定するための閾値を設定し、測位解と気圧高度計による高度の差が閾値を超えた場合において、水平方向についても測位解を利用しない。

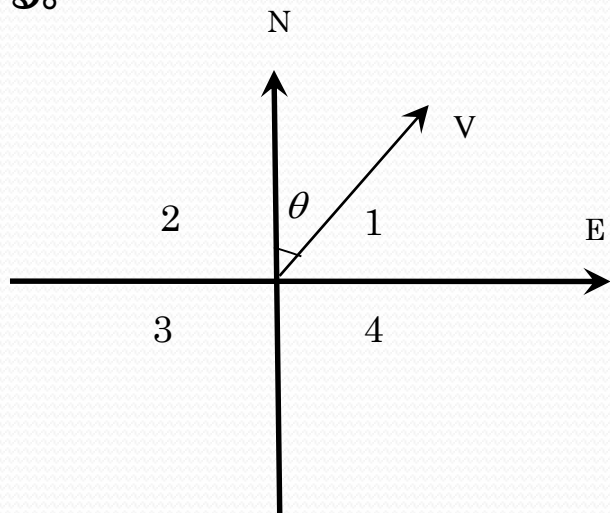


- 観測値の差による最大誤差は 0.3 hPa未満であり、高度に変換すると2 m程であった。

気圧センサーの静止の評価図

速度ベクトル由来の方位角

緯度方向と経度方向の速度情報を用いて、歩行者の方位角を計算することができる。



1: $\theta = \pi / 2 - \arctan (V_N / V_E)$

2: $\theta = \pi / 2 + \arctan (-V_N / V_E)$

3: $\theta = 3\pi / 2 - \arctan (V_N / V_E)$

4: $\theta = 3\pi / 2 + \arctan (-V_N / V_E)$

N:北方向

E:東方向

V:移動体の水平速度 θ :方位角

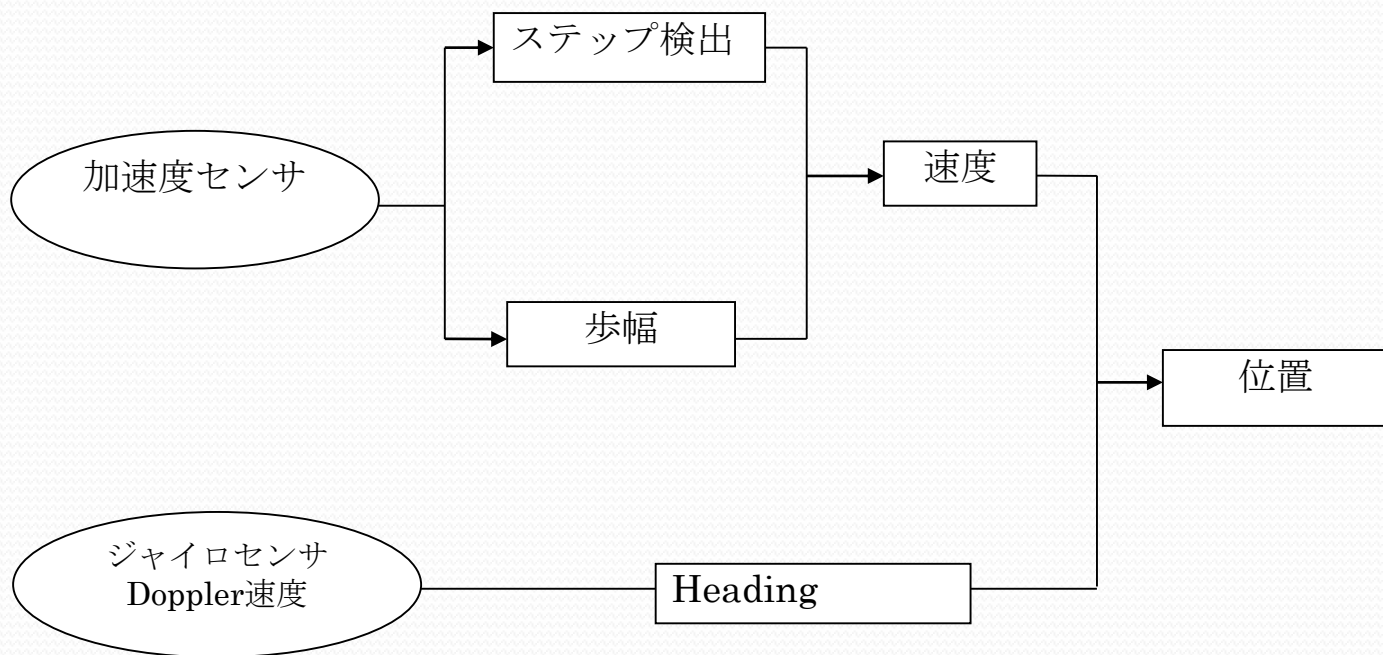
GNSSから得られた方位角の精度は測位環境以外に移動体の速度に大きく依存している。歩行者の場合、移動速度が一般的4 m/sを超えることが無く、遅いため、GNSS由来の速度情報には、信頼性が低い情報も沢山存在する。

信頼性の低いデータを排除する条件

- | | |
|---|-------------------------------|
| ① | 静止、低速のデータ(0.05m/s以下)を排除する |
| ② | ジャイロと比較して角速度の変化が激しいデータを排除する |
| ③ | PDR由来の速度と比較し、速度変化が激しいデータを排除する |

PDRによる自己位置推定

人間が歩行する際の周期的な体の動きにより、身につけたセンサー類の計測値には特徴的なパターンが現れる。



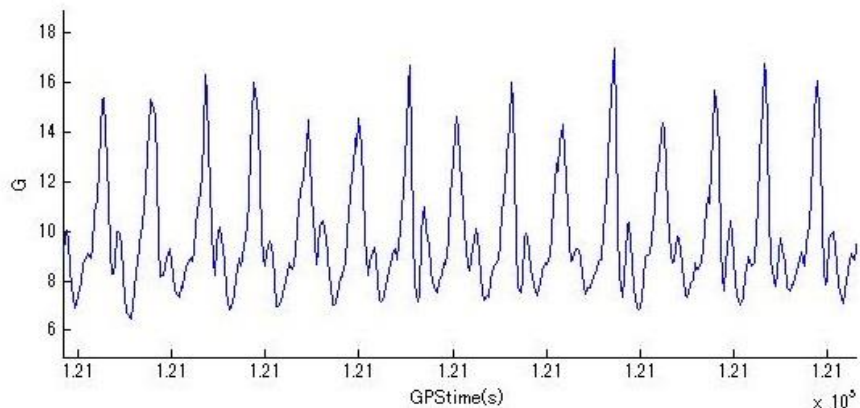
PDRによる自己位置推定の流れ

- 1: 一歩一歩のステップを検出する
- 2: 歩幅あるいは移動速度を導き出す
- 3: 進行方向を推定する
- 4: 位置を決定する

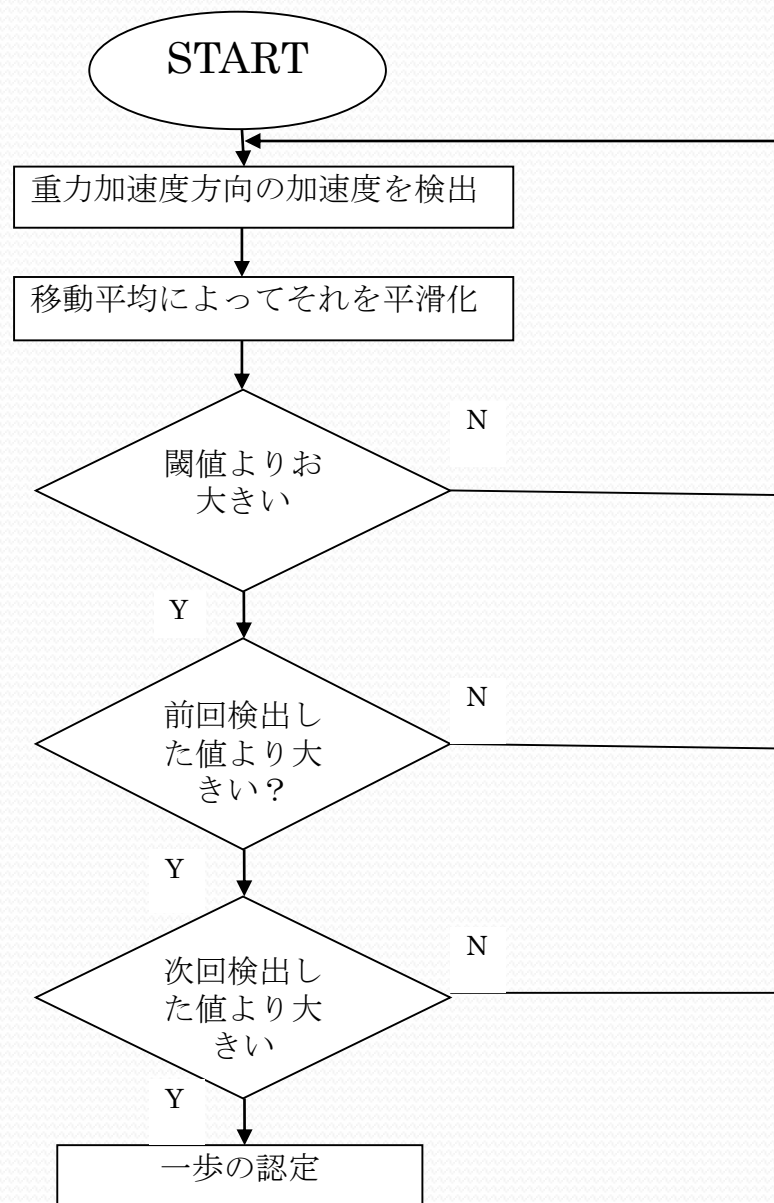
PDRによる自己位置推定

---ステップの検出

ステップ検出は、鉛直加速度の波形に一つステップにつきピークが現れる特性を利用して行う。



また、通常の場合、一步の時間間隔は0.2秒以上があるため、一つステップを検出した後、0.2秒以内に検出しないようにした。



PDRによる自己位置推定-----

歩幅、速度

歩幅モデルは、Weinberg 注「1」の歩幅モデルを採用する

$$l = K \sqrt[4]{a_{v\max} - a_{v\min}}$$

ここで、 $a_{v\max}$ $a_{v\min}$ はそれぞれ、前回のステップから今回のステップまでの鉛直方向加速度の、最大値と最小値である。係数 K は個人によって異なる。

歩幅を一步をかかる時間を割って、速度を求めることができる。

注「1」: H. Weinberg. *Using the ADXL202 in Pedometer and Personal Navigation Applications*. Analog Devices Inc., 2002

PDRによる自己位置推定----- 進行方向

カルマンフィルタによる方位角 (GNSS+ジャイロ)

方位角の推定は以下の状態方程式と観測方程式からなる基本システムによって表現することができる。

$x = (\varphi, \omega)$ 観測値 (方位角, 方位角速度)

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= F_k x_k + G w_k \\ y_k &= H x_k + v_k \end{aligned} \quad F = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

カルマンフィルタを適用し整理すれば、最終的に状態ベクトルの最小分散推定量を求めるアルゴリズムが得られる。

事前状態推定値

$$\hat{x}_{k|k-1} = F_k \hat{x}_{k|k-1}$$

事前誤差共分散行列

$$P_{k|k-1} = F_k P_{k|k-1} F_k^T + Q_k$$

カルマンゲイン

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k)^{-1}$$

状態推定値

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (y_k - H_k \hat{x}_{k|k-1})$$

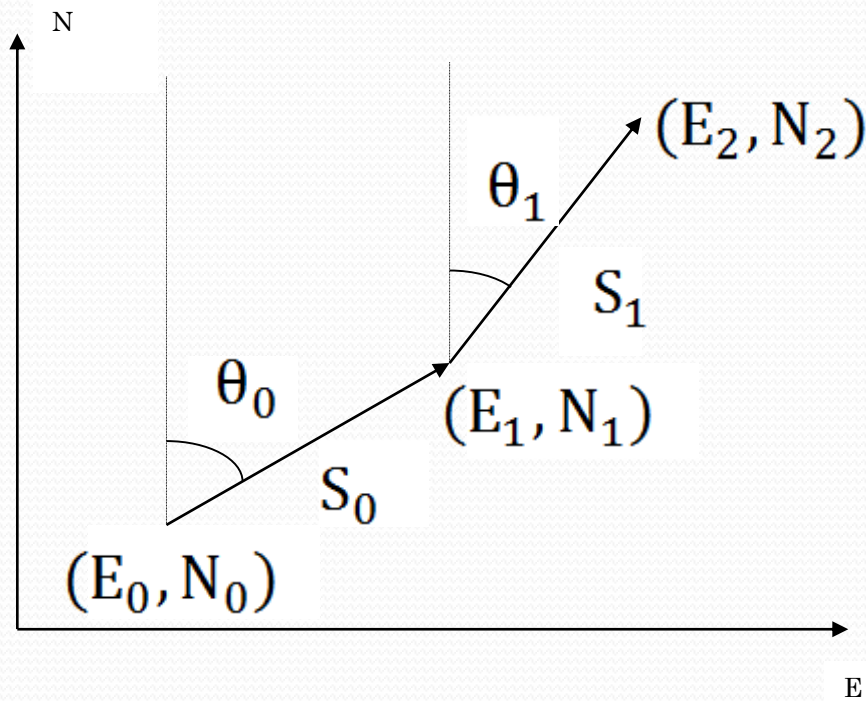
事後誤差共分散行列

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

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_{\Psi_G}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{\Psi_g}^2 \end{bmatrix}$$

PDRによる自己位置推定-----

位置の更新



$$E_1 = E_0 + S_0 \sin\theta_0$$

$$N_1 = N_0 + S_0 \cos\theta_0$$

$$E_2 = E_1 + S_1 \sin\theta_1$$

$$N_2 = N_1 + S_1 \cos\theta_1$$

$$E_k = E_0 + \sum_{i=0}^{k-1} \sin\theta_i S_i$$
$$N_k = N_0 + \sum_{i=0}^{k-1} \cos\theta_i S_i$$

以上の手順で求めた歩数、歩幅S及び進行方向 θ を用いて、位置を計算することができる。

カルマンフィルタによるDGNSS、ドップラー速度、PDR統合結果

$$y_k = \left[x(k), y(k), v_x(k), v_y(k), a_x(k), a_y(k) \right]$$

移動体の位置

速度

加速度

ドップラー由来の速度を優先利用

トラッキングシステムは次のような状態方程式と観測方程式からなる基本システムによって表現することができる

$$x_{k+1} = Fx_k + Gw_k$$

$$y_k = Hx_k + v_k$$

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

$$R = \begin{bmatrix} 300 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 300 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \delta v & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \delta v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathcal{G}a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathcal{G}a \end{bmatrix}$$

状態変数: x_k

状態雑音: w_k

観測値: y_k

観測雑音: v_k

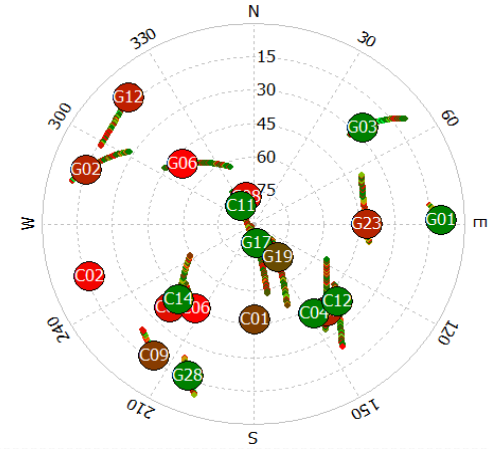
状態遷移行列: F

状態雑音行列: R

観測行列: H

実験概要

- 1、日時 2016/1/8 7時半から15分程度
- 2、データの取得場所:銀座付近 (約1000m)
- 3、受信機:長田電機(株)が製作したトヨタIT開発センター殿向け高精度歩行者端末技術評価用試作機SB-70-T1 (下の表)
- 4、アンテナ:u-blox付属アンテナ
- 5、取得データ: nmea, rawデータ Frequency: 5Hz
- 6、レファレンス: カメラ映像の元に、真値座標を推定
- 7、基準局との距離 < 4km



- 7:使用衛星:GPS+BeiDou+QZSS
- 8:衛星利用条件: マスク 15度
信号強度は閾値は 6dBHz 設定
HDOP < 10

GNSS受信機	u-blox製EVK-M8T
気圧・温度	MS5611-01BA3 / Measurement
加速度センサ(3軸)とジャイロセンサ(3軸)	AH-6120LR(AH-6120LR EB02 を搭載)



受信機をリュックバックに固定



実験環境

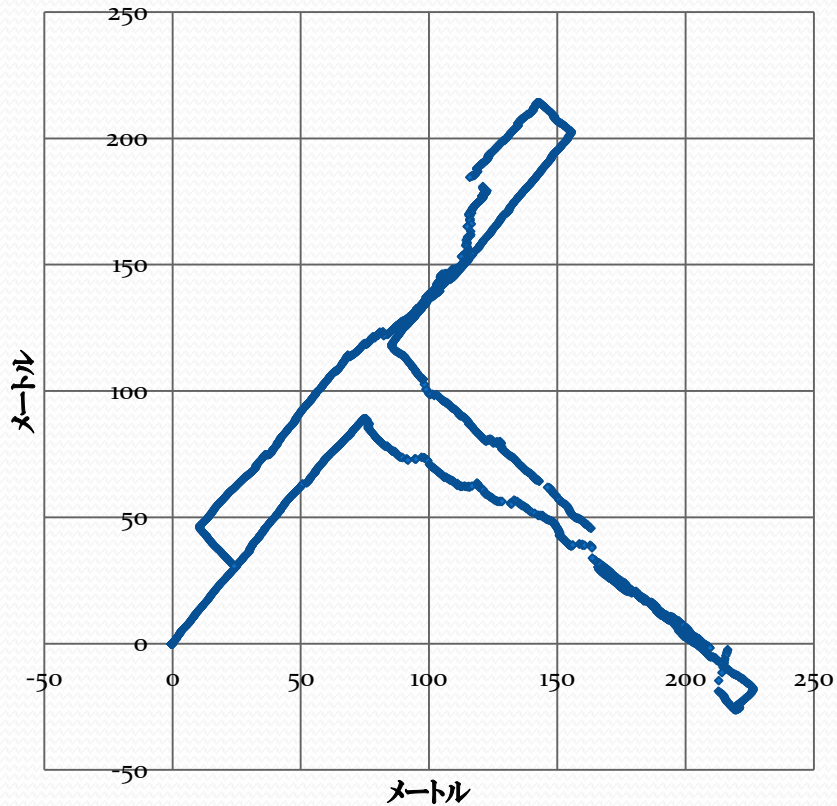


およそ15分の歩行映像を16倍スピードで早送りしました。左の魚眼カメラの映像から、測位環境が厳しい事が分かります。

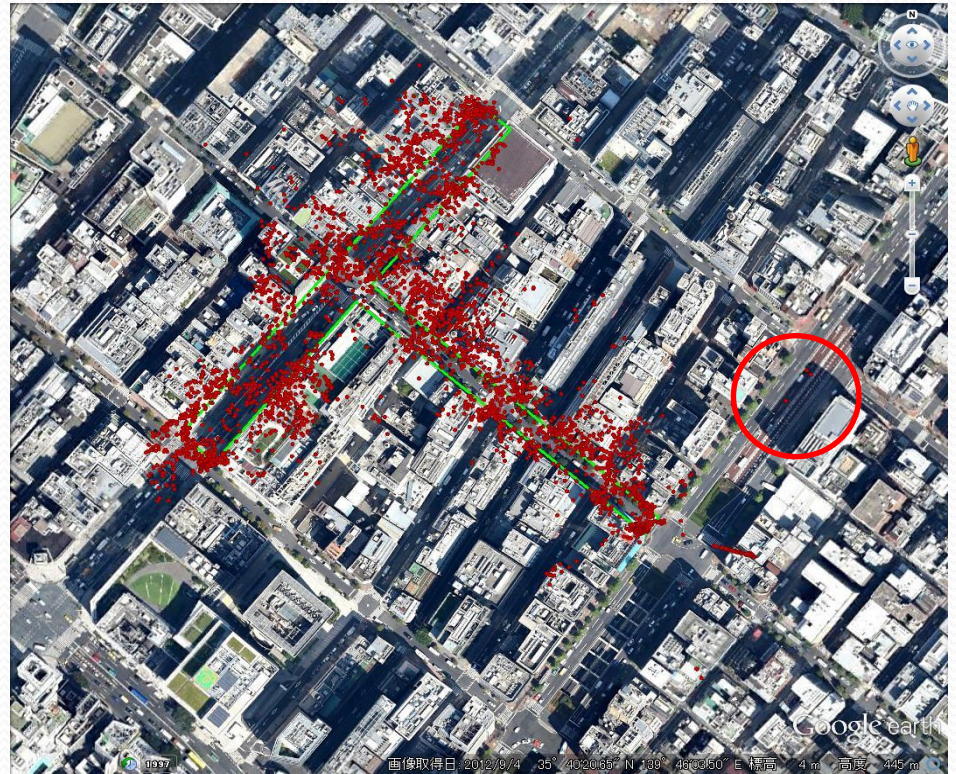
右の映像がデータを取得する当時に体に貼り付けたカメラで撮った映像です



ドップラー速度による水平結果 & DGNSSの測位結果



ドップラー速度による水平結果

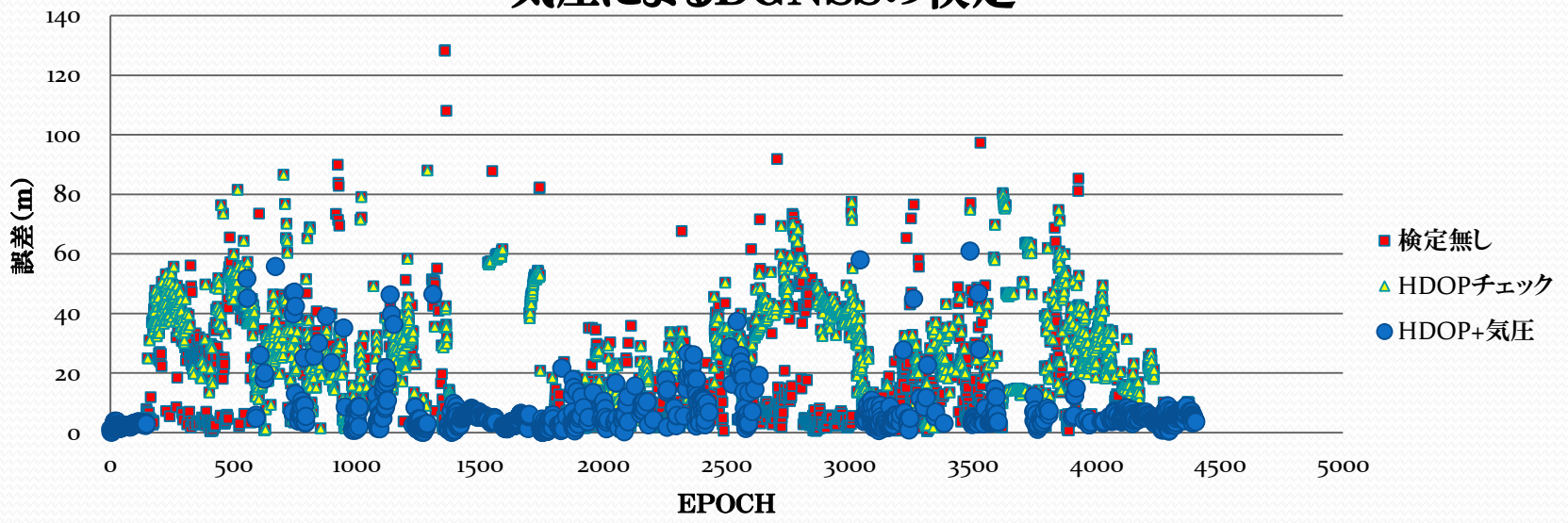


DGNSSの測位結果

気圧計、HDOPによる DGNSS誤差検定結果

HDOPチェック: HDOP > 3 → 測位解を排除
 HDOP+気圧 : HDOP > 3 && | DGNSS高度-気圧高度計 | > 10 → 測位解を排除

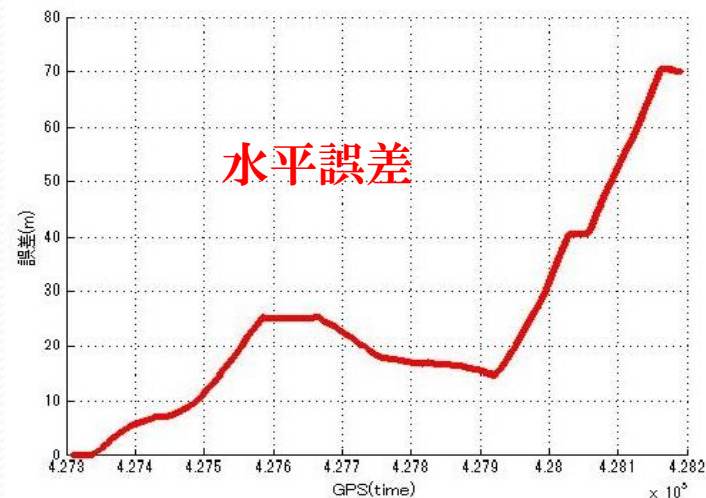
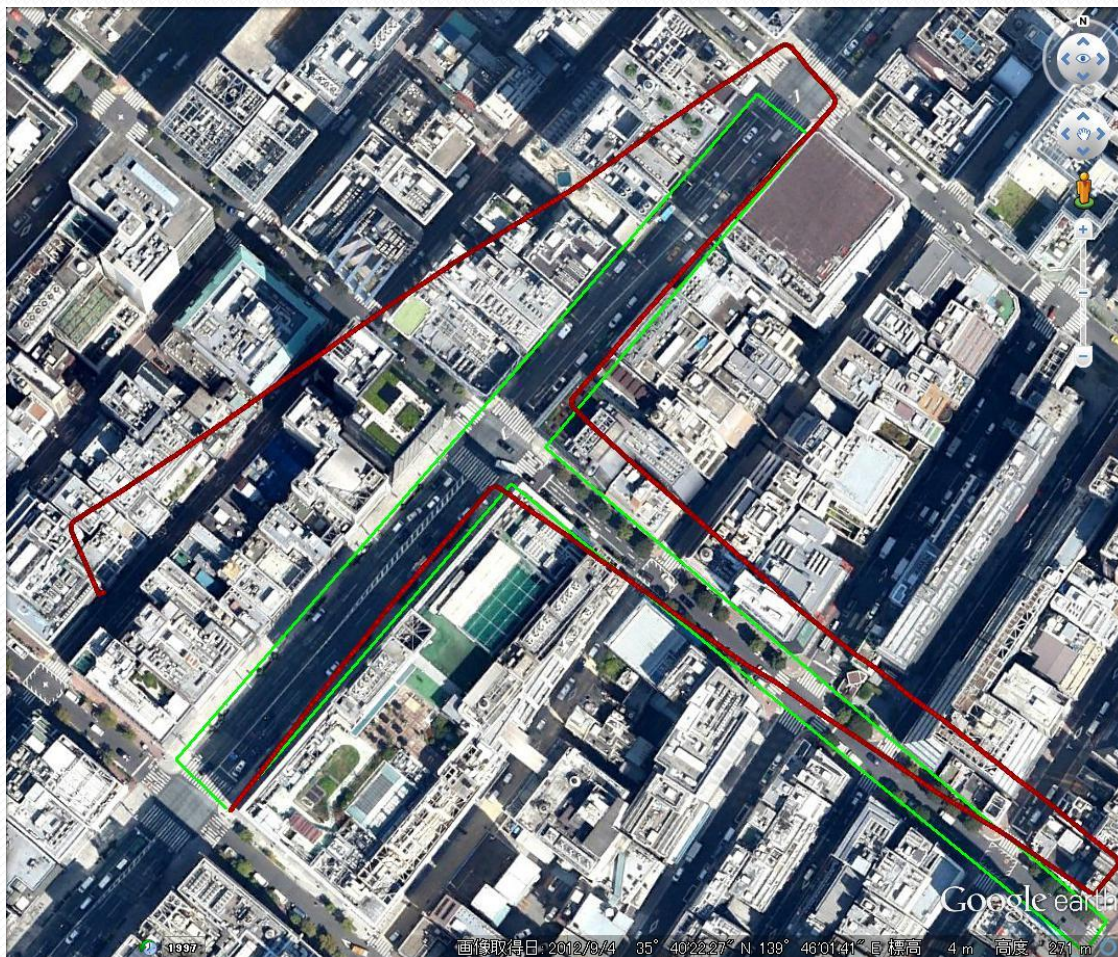
気圧によるDGNSSの検定



水平	チェックなし	HDOPチェック	HDOP+気圧
最大誤差	128.4(m)	88.0(m)	61.0(m)
標準偏差	19.01(m)	17.5(m)	4.2(m)
測位率	93.3%	65.1%	27.4%

PDRのみの位置推定結果

衛星からの情報を使わずに、PDRのみの測位結果を示す。



PDRのみ	水平誤差
最大誤差	70.3(m)
標準偏差	17.5(m)
平均誤差	23.7

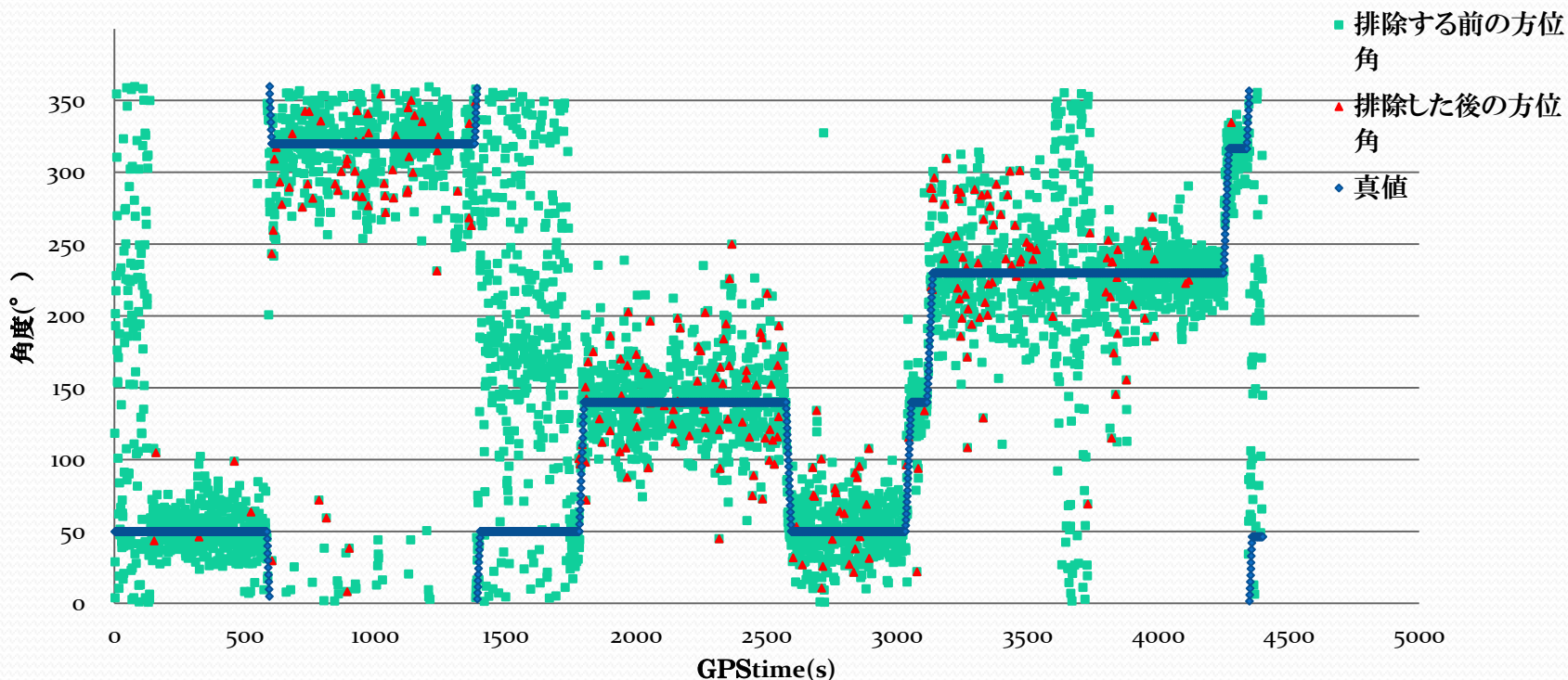
.....PDRのみ

.....真値

ドップラー速度由来方位角の結果

排除する条件

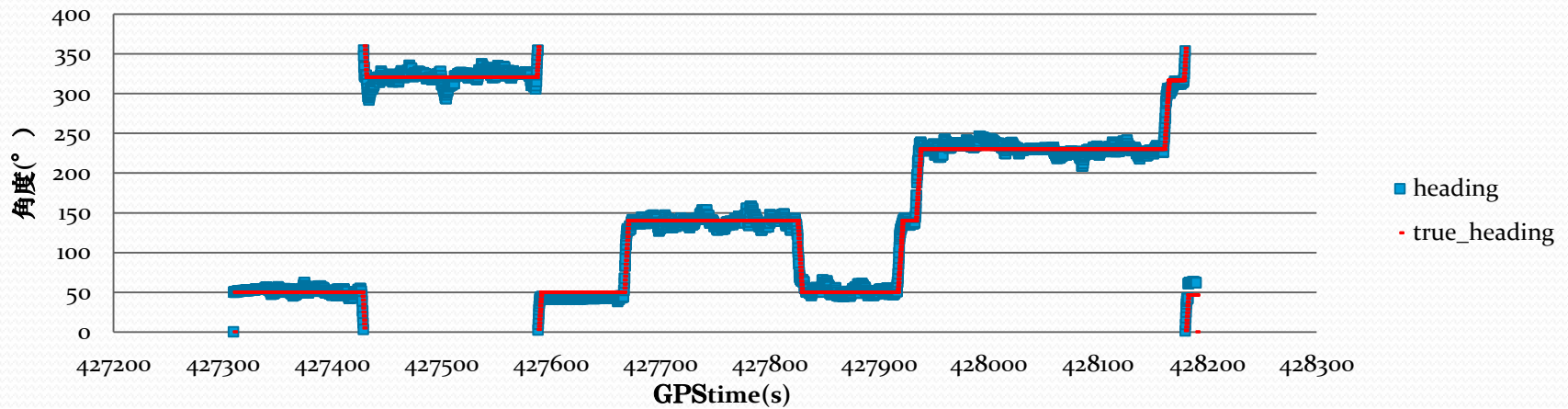
- | | |
|---|-----------------------------|
| ① | 静止、低速のデータ(0.05m/s以下)を排除する |
| ② | ジャイロと比較して角速度の変化が激しいデータを排除する |
| ③ | PDR由来の速度と比較し、変化激しいデータを排除する |



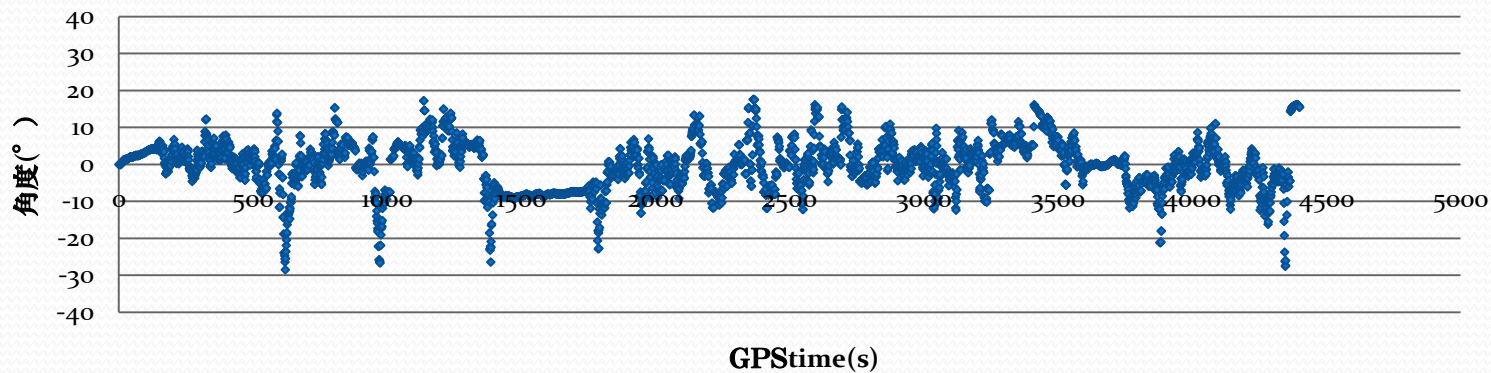
排除切れてない部分があるが、なるべし信頼性が低いデータを排除することが重要である。

GNSSとジャイロによる方位角計算した結果(進行方向)

方位角

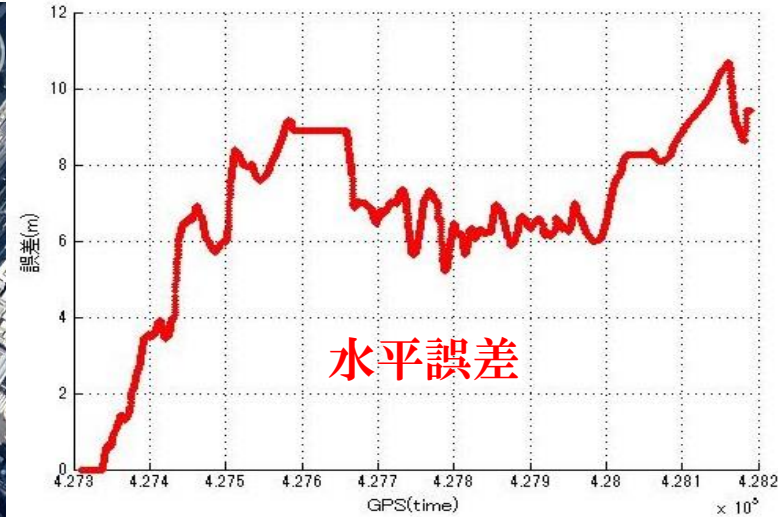
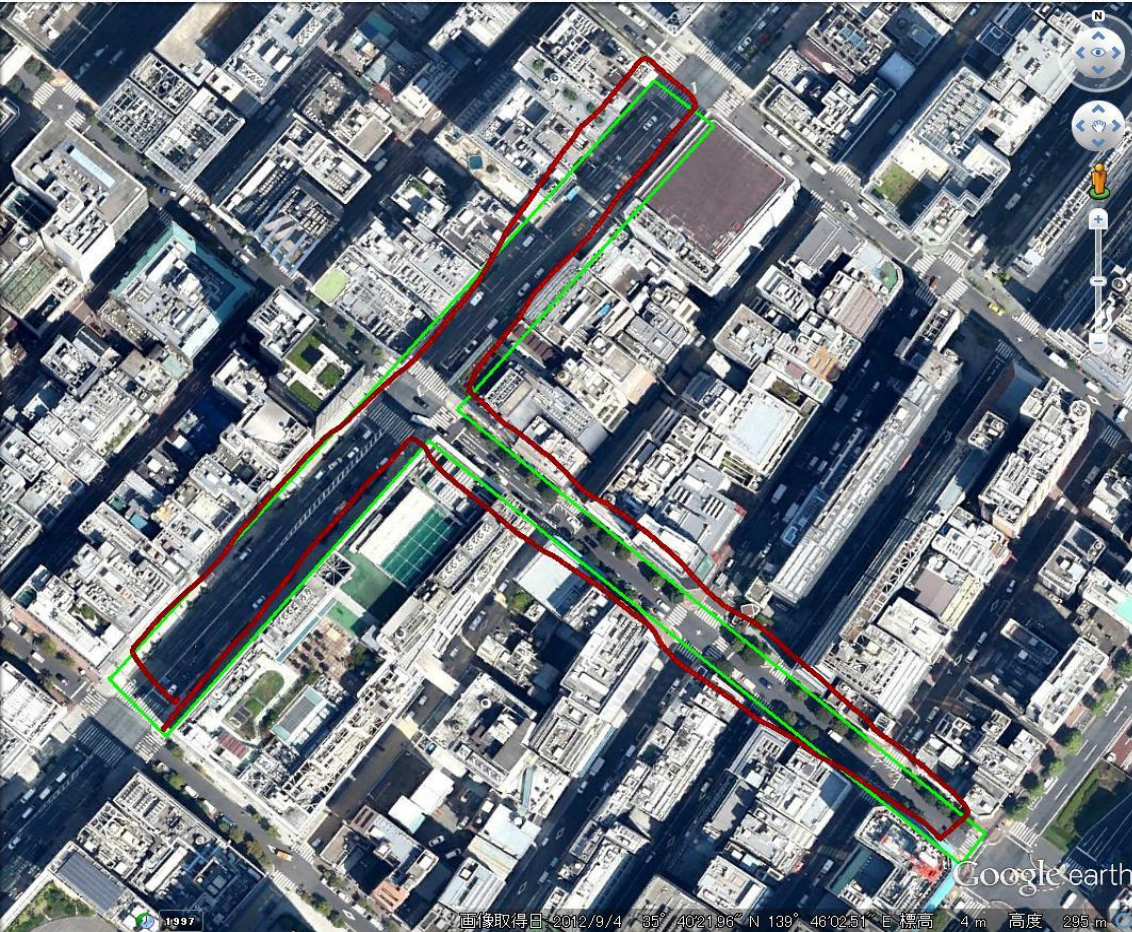


誤差



統合することにより、ドップラー由来の方位角と比べ、精度が大幅向上したことを見られる。

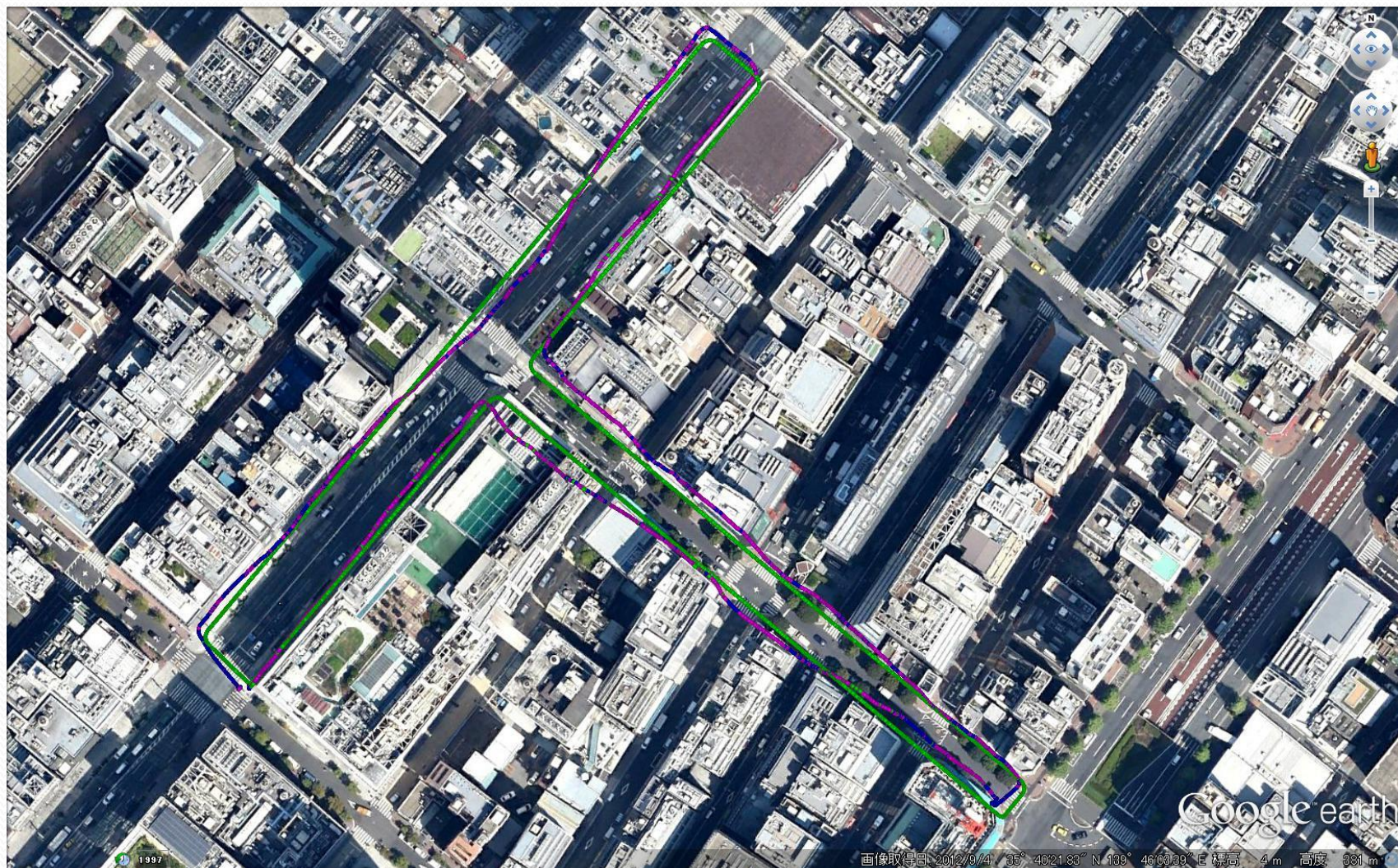
推定した進行方向を用いたPDR 位置推定結果



PDR + 推定方位	水平
最大誤差	10.7(m)
標準偏差	2.3(m)
平均誤差	6.7(m)

.....推定した方位角を使用したPDR
.....真値

DGNSS、ドップラー速度、PDR統合結果

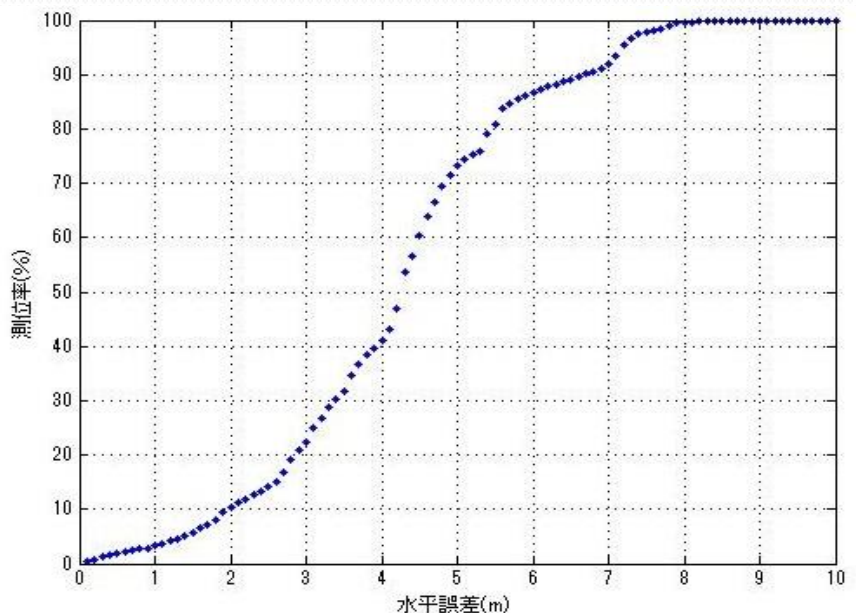
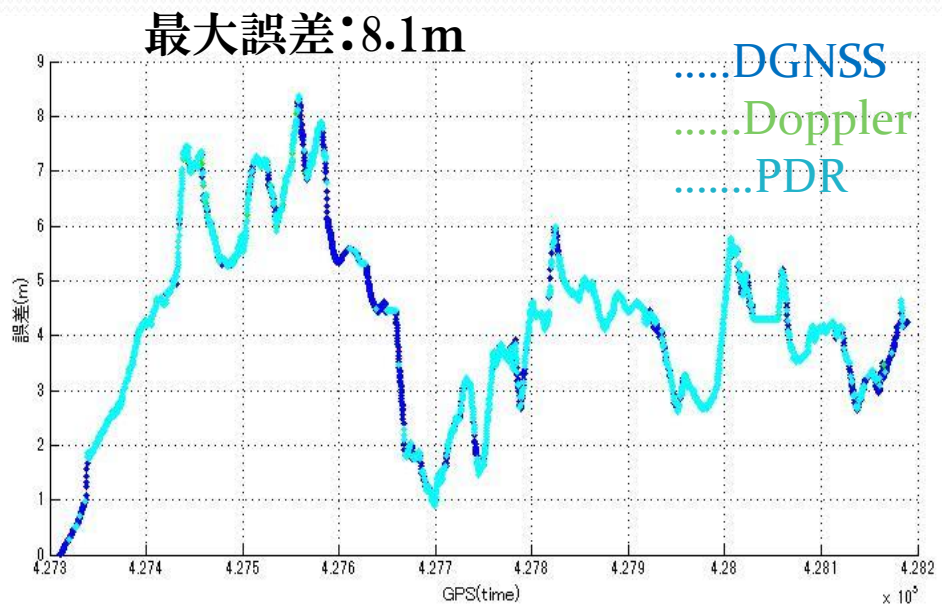


.....統合結果 真値

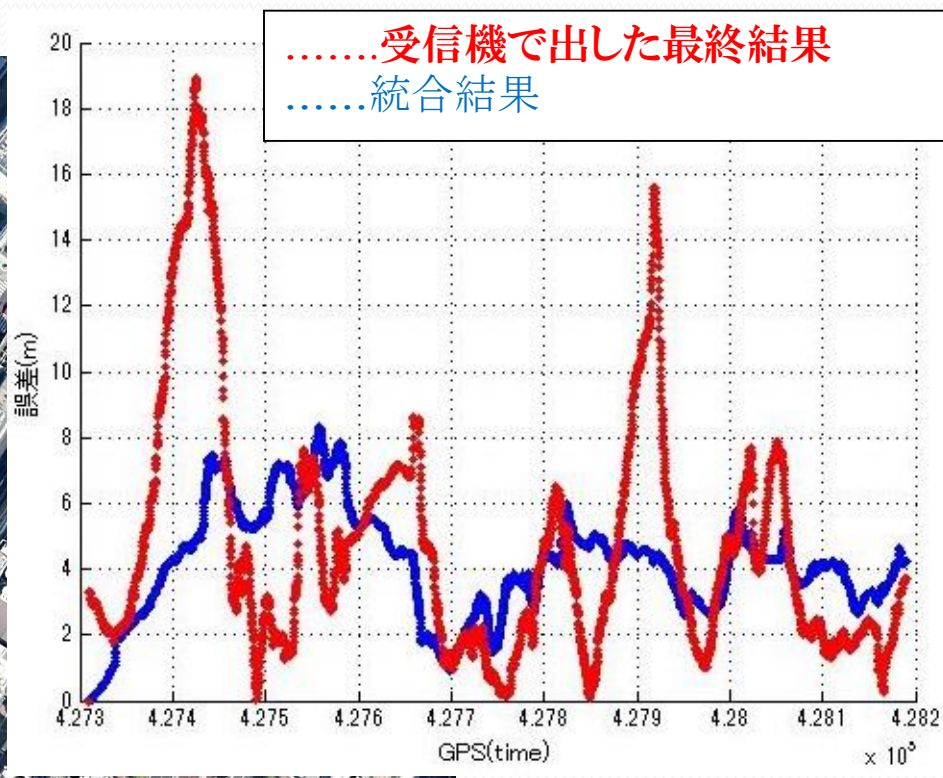
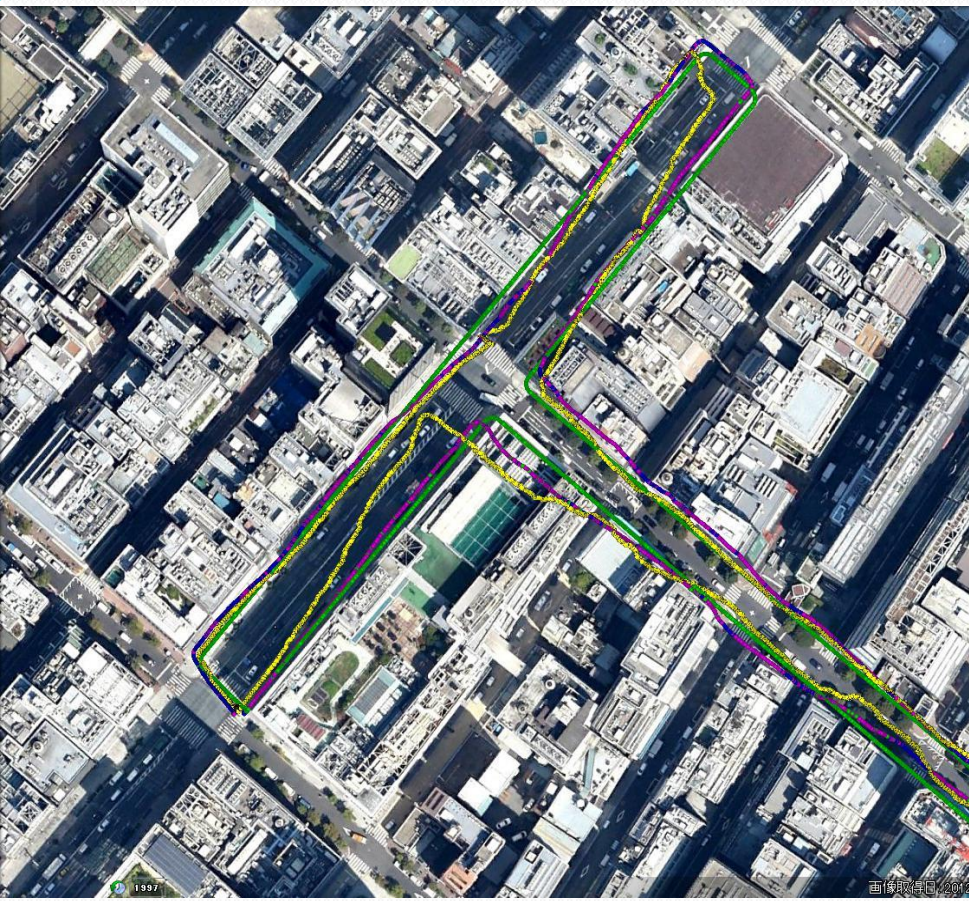
DGNSS、ドップラー速度、PDR統合結果

水平誤差	DGNSS		Doppler 利用		PDR		統計	
	回数	割合	回数	割合	回数	割合	回数	割合
EPOCH	1209	27.44%	108	2.45%	3085	70.01%	4402	100.0%
誤差平均	3.9(m)		5.6(m)		4.2(m)		4.2(m)	
標準偏差	1.9(m)		1.3(m)		1.5(m)		1.7(m)	

1. 測位率が100%になった
2. 統合することにより、水平誤差5m以内の割合は71.5%で、**6m以内の割合は86.9%**になった。
3. 最大誤差約8.1mであった。



受信機で出した最終結果との比較



.....統合結果
受信機
真値

	水平誤差	測位率	誤差平均値	標準偏差	最大誤差
DGNSS		92.4%	19.0(m)	18.0(m)	128.4(m)
PDRのみ		100.0%	23.7(m)	17.5(m)	70.3(m)
方位推定+PDR		100.0%	6.7(m)	2.3(m)	10.7(m)
受信機で出した最終結果		100.0%	4.7(m)	3.8(m)	18.9(m)
統合結果		100.0%	4.2(m)	1.7(m)	8.1(m)

まとめ1

- 本研究では、PDRとGNSSを有効に統合する手法を考案し、測位環境厳しい都市部においても、連続に測位を実現することや測位精度の向上を目指した。
- 先ず、PDRシステムを構築した。PDRの進行方向はGNSSから得られる方位角とジャイロからの角速度を用いて、カルマンフィルタにより推測した方位角を算出した。
- 次に、気圧センサーを用いて、擬似距離測位に発生する大きな測位誤差を取り除いた。
- 最後に、カルマンフィルタにより擬似距離測位結果、ドップラー周波数による速度ベクトル結果、PDR及び計算して得られた方位角を用いて、効率的に位置を推測する手法を提案した。

まとめ2

東京銀座付近での精度の検証と評価結果、低コスト市販受信機の測位精度が、最大数十メートルまで劣化するのに対し、本研究で提案した手法を使用することによって、最大誤差を10メートルに抑えることができた。目標誤差**6m**以内の割合は**86.9%** になった。

ご清聴有難うございました!

PDRによる自己位置推定-----

ステップ検出の検証実験

ステップ検出の精度を検証するため、実験を5回行った。毎回100歩を歩いた。5回の結果が下の表にまとめる。

実験	実走行 (steps)	ステップ検証回数 (steps)	誤差	確率 (%)
1	100	100	0	100
2	100	100	0	100
3	100	99	1	99
4	100	100	0	100
5	100	100	0	100

ステップの検出の平均確率は**99.9%**、最低確率**99.0%**、**誤差は1%**以内に抑えた。

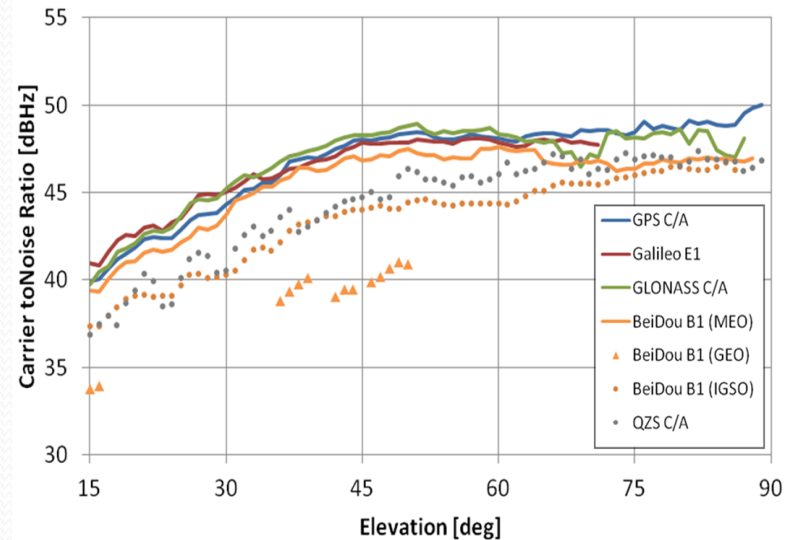
衛星利用条件

- 衛星利用する条件は以下の通り

マスク: 15度

HDOP: 10以下

信号強度: しきい値は6dBHzと設定



仰角-信号強度図

信号強度による検定は、衛星の仰角と信号強度には相関があり、仰角によるあるべき信号強度が予想できる閾値を設定することにより信号の低下している衛星を判別する。衛星から受信した信号強度が仰角に対する閾値を下回った時にはその衛星の観測値を使用しないことで異常なマルチパス誤差を含む衛星を排除することである。

実験のまとめ

水平誤差	測位率	誤差平均値	標準偏差	最大誤差
DGNSS	92.4%	19.0(m)	18.0(m)	128.4(m)
PDRのみ	100.0%	23.7(m)	17.5(m)	70.3(m)
方位推定+PDR	100.0%	6.7(m)	2.3(m)	10.7(m)
nmea	100.0%	4.7(m)	3.8(m)	18.9(m)
提案手法	100.0%	4.2(m)	1.7(m)	8.1(m)

DGNSS単独の場合、PDR 単独の場合、低コスト市販受信機が出した最終結果に比べて、よりは高い位置精度を達成できた

水平誤差	測位率	誤差平均値	標準偏差	最大誤差
n m e a	100.0%	4.7 (m)	3.8 (m)	18.9 (m)
提案手法	100.0%	4.2 (m)	1.7 (m)	8.1 (m)

カルマンフィルタによる GNSSとPDRの統合

カルマンフィルタのアルゴリズム

事前状態推定値 $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = \mathbf{F}_k \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$

事前誤差共分散行列 $\mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{F}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{F}_k^t + \mathbf{Q}_k$

カルマンゲイン $\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1}$

状態推定値 $\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{y}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1})$

事後誤差共分散行列 $\mathbf{P}_{k|k} = \mathbf{P}_{k|k-1} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1}$

PDRによる自己位置推定----- 進行方向

カルマンフィルタによる方位角 (GNSS+ジャイロ)

方位角の推定は以下の状態方程式と観測方程式からなる基本システムによって表現することができる。

$x = (\varphi, \omega)$ (方位角, 方位角速度)

$$x_{k+1} = F_k x_k + G \omega_k \quad F = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$
$$y_k = H x_k + v_k$$

カルマンフィルタを適用し整理すれば、最終的に状態ベクトルの最小分散推定量を求めるアルゴリズムが得られる。

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (y_k - H_k \hat{x}_{k|k-1})$$

$$\hat{x}_{k+1|k} = F_k \hat{x}_{k|k}$$

$$\hat{x}_{k+1|k} = F_k \hat{x}_{k|k} \quad R = \begin{bmatrix} \sigma_{\Psi_G}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{\Psi_g}^2 \end{bmatrix}$$

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k)^{-1}$$

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

$$P_{k+1|k} = F_k P_{k|k} F_k^T + G_k Q_k G_k^T$$