

複数のセンサーを利用したGNSSの 性能向上に関する研究

東京海洋大学大学院
海運ロジスティクス専攻
陳 迪晗(1055002)

研究の背景と目的

- 都市部における衛星測位は、電波環境が悪く、衛星信号の遮蔽が多発し衛星測位がうまく働かない時間帯が存在
- マルチパスなどの影響でRTKでも水平誤差が1メートル以上まで増加



- 本研究の目的は **GNSS (本発表ではGPSのみ)**、**IMU と車速センサー**を有効的に統合する方法と、統合することで得られるメリットを調査すること

TARGET: 水平絶対誤差1m以内の割合 > 90%

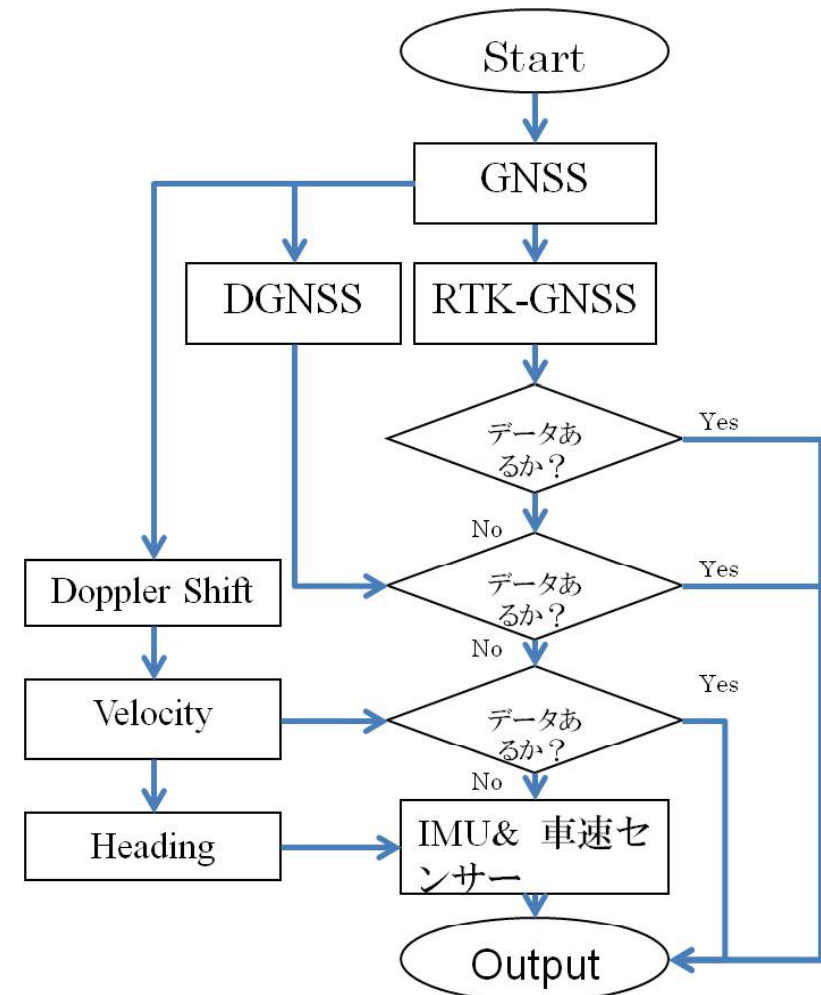
発表の概要

- GNSS、IMUと車速センサーの統合方法
 - 実験概要（以下の解析で利用するデータ）
 - 実験結果
 - 統合における信頼性の向上手法の提案
 - 3種類の実験結果
 - ① 2周波RTK+DGNSS
 - ② DGNSS
 - ③ 1周波RTK
 - 結論
- 修士1年目
- 修士2年目

GNSS、IMUと車速センサーとの統合方法

RTKを例に統合方法（優先順位）を以下に示した

- ①RTKのFIX解が得られるときは**FIX解**を使用する。
- ②RTKのFIX解がない時は**DGNSSの位置**を使用する。
- ③両方ない場合、ドップラシフトから計算した**速度ベクトル**を使用して位置を計算する。
- ④以上のどちらも算出できない場合は、**IMUと車速センサー**を使用して位置を推定する。



RTKとDGNSSの概要

- センサとの融合に加えて、GNSSの限界を知ることが重要であるので、RTKとDGNSSの利用を第一に考えた
- 衛星利用条件は以下で統一
マスク15度、HDOP<10、受信すべき信号強度
- RTK：LAMBDA法＋Ratioテスト（3以上）
（FLOAT解算出にドップラ速度データ利用）
- DGNSS：通常の擬似距離補正方式

GNSSより速度計算

- 衛星と受信機の間には相対速度があるため、**Doppler shift**を検知できる。
- Ephemeris情報から**衛星速度**を計算できる。

Doppler shift
衛星速度



正確な移動体速度

Doppler frequency

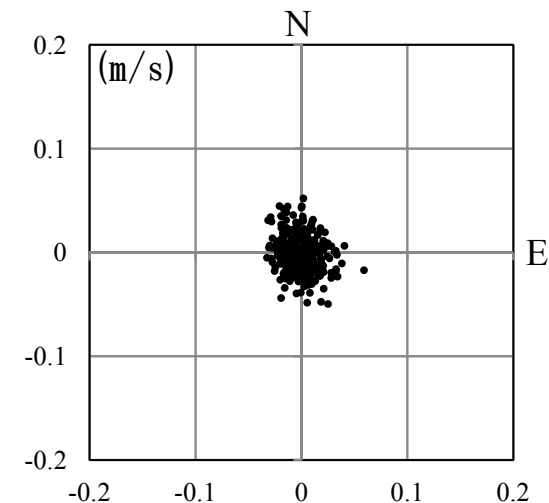


数cm/sの速度精度が得られる

Carrier frequency



約1cm/sの速度精度が得られる



Carrier frequencyから
算出した速度精度の例

GNSSより移動体方位角の計算

(方位角はGNSSがないとき特に重要で、精度を決定する要素)

**GNSSの速度情報は3次元ベクトルのため、直接方位角を計算可能
ただし静止時はノイズになり、方位角は算出できない！**

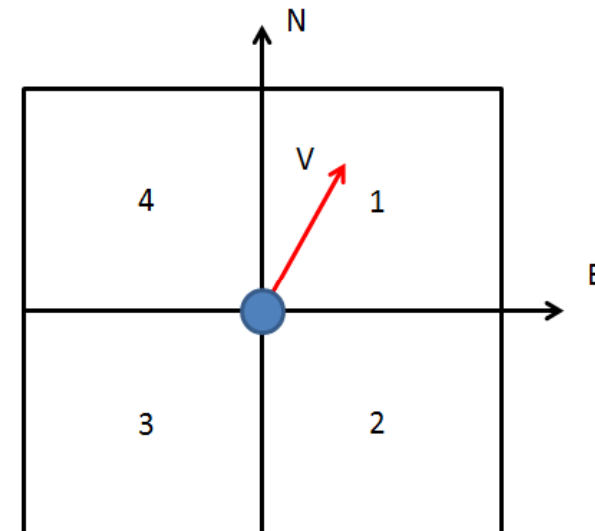
- 北方向の方位角を0と定義し、方位角は右回りで増大する。ここでNは北方向、Eは東方向、Vは移動体の水平速度である。
- 方位角は以下のように計算することができる。

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

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

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

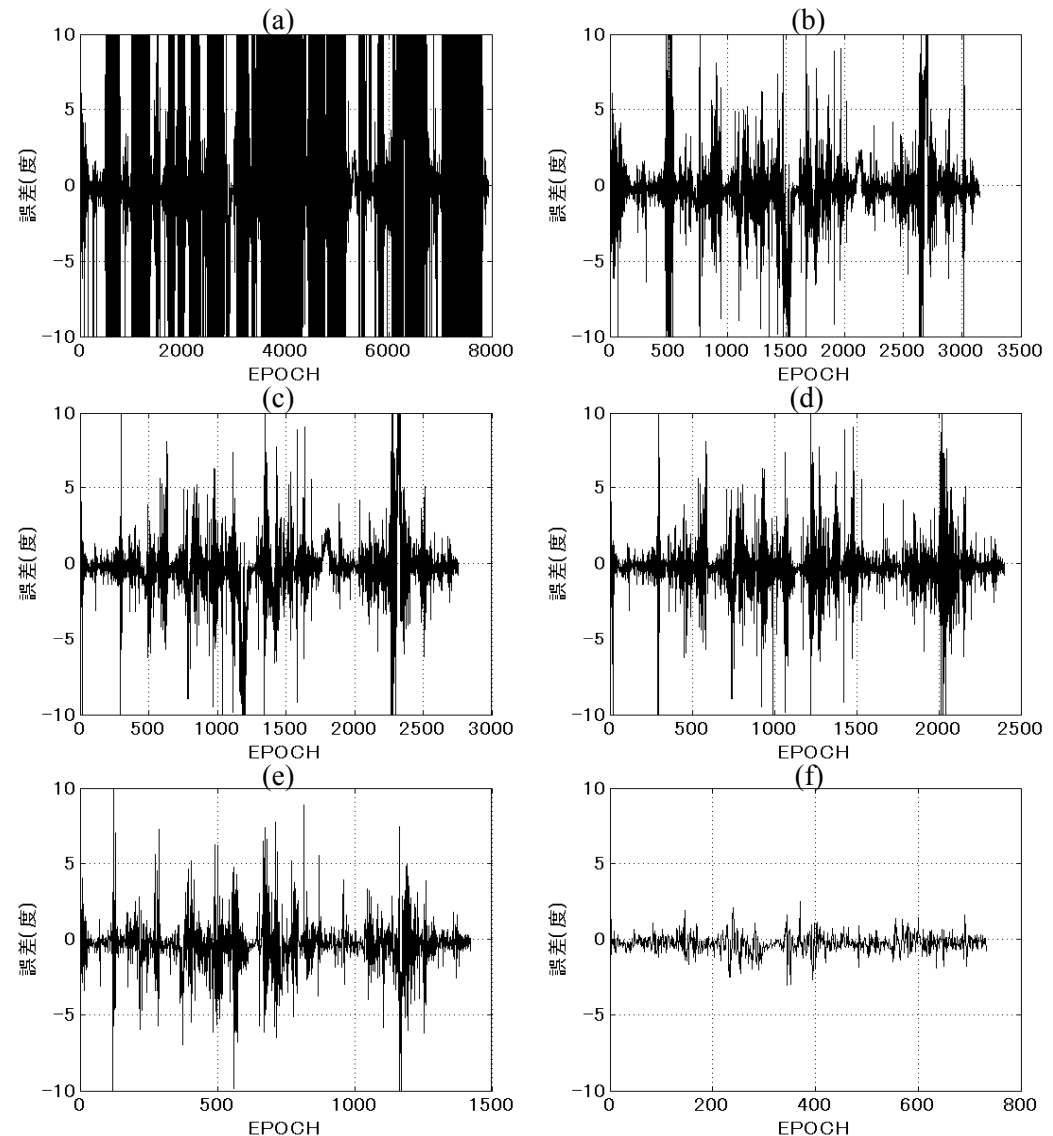
4: $\Psi = 3\pi / 2 + \arctan(-V_N / V_E)$



各条件での方位角の精度 (都市部実験データ)

(方位角を得られた時間を蓄積して表示)

条件付きで方位角を選ぶ	
(a)	元の速度情報を利用する
(b)	状況 (a) + ①
(c)	状況 (a) + ① + ②
(d)	状況 (a) + ① + ② + ③
(e)	状況 (a) + ① + ② + ③ + ④
(f)	状況 (a) + ① + ② + ③ + ④ + ⑤
条件 ①	低速のデータを排除する (ここは1m/sと設定する)
条件 ②	HDOPが大きいデータを排除する (ここは5と設定する)
条件 ③	旋回率が高いデータを排除する (ここは4°/sと設定する)
条件 ④	車速センサーと比較して速度変化が激しいデータを排除する
条件 ⑤	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



GNSS + ジャイロによる方位角計算

- GNSSから方位角を求め、ジャイロから角速度を得て、時刻 t における移動体の状態を $x_k = (\psi_{G_k}, \omega_{g_k})$ とし、初期条件は既知とし、Sideslipはゼロと仮定する。

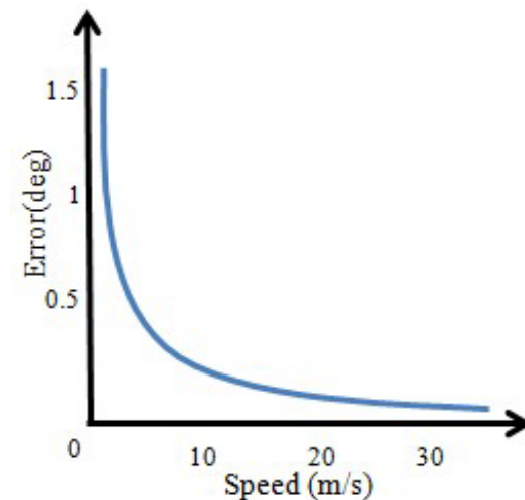
GNSSからの方位

ジャイロの角速度

- GNSSからの方位角は速度より計算されているため、方位角のノイズもGNSSからの速度に依存している。速度が大きくなると、単純に方位角の誤差が小さくなる。確度のメトリックは以下のようなになる。

$$\sigma_{\psi_G} = \sigma_{v_G} / v$$

- σ_{v_G} はGNSSからの速度の確度である。



GNSS + ジャイロによる方位角計算

GNSSからの方位

ジャイロの角速度

- 方位角の推定は右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。
- これに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右のアルゴリズムが得られる。

ψ_{G_k} : GNSSからの方位角

ω_{g_k} : ジャイロからの角速度

$$x_k = (\psi_{G_k}, \omega_{g_k})$$

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

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

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

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

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

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

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_{\psi_g}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{\omega_g}^2 \end{bmatrix}$$

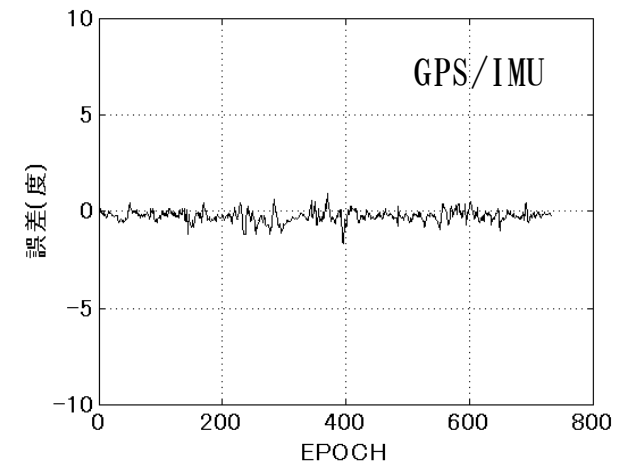
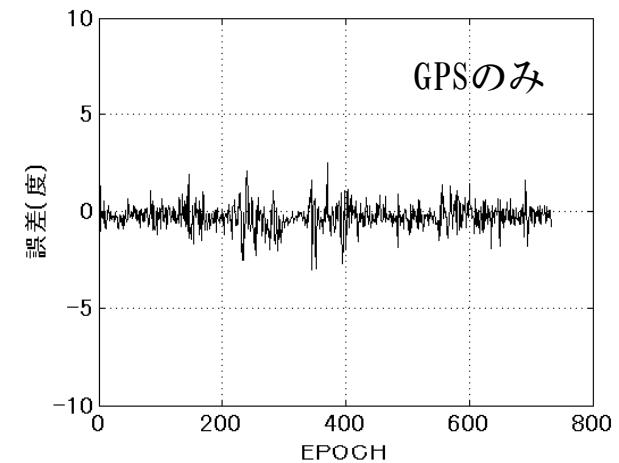
GNSSとジャイロによる方位角計算

- 上の結果はGPSのみの場合（原始データ+五つの条件）、下の結果はGPSとジャイロを統合して推定した方位角である。統合することにより、GPSのみの場合に比べ精度の向上が見られる。

方位角の精度はGNSSのoutage区間の精度向上に極めて重要

（都市部実験データ）

方位角誤差（度）	平均誤差	標準偏差
GPSのみ	-0.27	0.64
GPS/IMU	-0.26	0.29



実験概要

- 実験データは共通、3回取得（2010-2011）。
- 名古屋駅周辺は衛星電波の遮蔽が多くて、測位環境が非常に悪い。
- 長久手周辺は比較的開けている。

実験	実験 1	実験 2	実験 3
実験場所	名古屋駅周辺	長久手周辺	名古屋駅周辺
実験時間	2010年7月	2011年2月	2011年7月
測位環境	厳しい	比較的開けている	厳しい
真値	POS/LV (Applanix) 全ての実験のレファレンスとして利用		
アンテナ	NovAtel GPS 702		
受信機	NovAtel OEM 5 (10Hz)		
IMU	Crossbow IMU 440	Low-cost ジャイロ	
車速センサー	Can Speed		



POS/LV：常に20cm-30cm以内の精度を保証

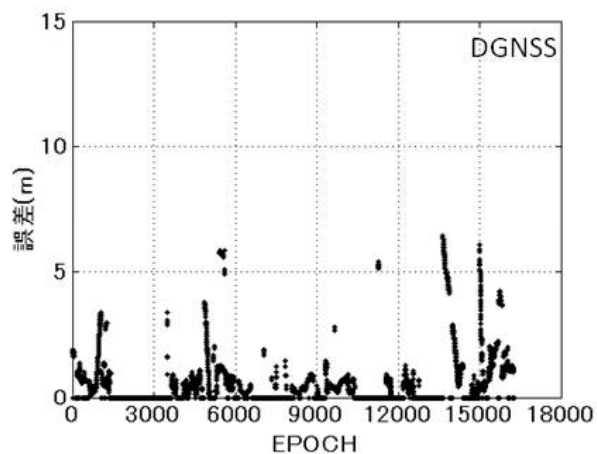
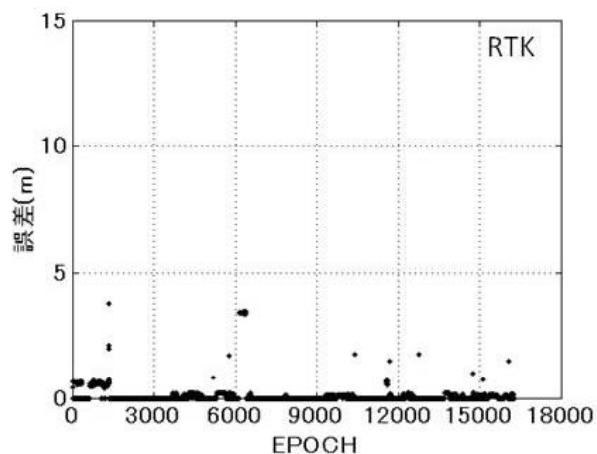


実験データ解析の目的

- 都市部での2周波RTKの限界を知る
- 比較的開けた場所での1周波RTKの限界を知る
- GNSSとセンサの融合で測位率を100%にする
- GNSSとセンサで融合した測位結果の精度検証

GNSSの測位誤差と測位率

(実験1：名古屋駅周辺)

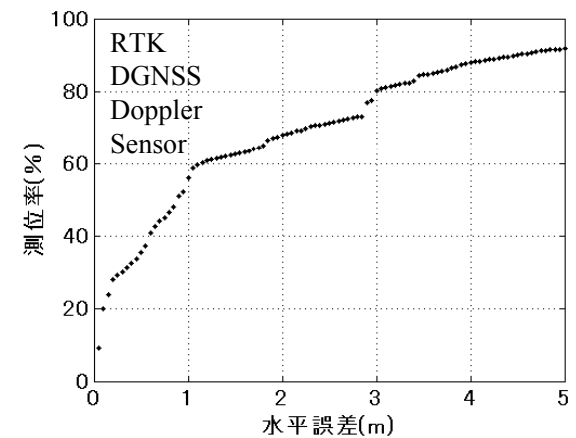
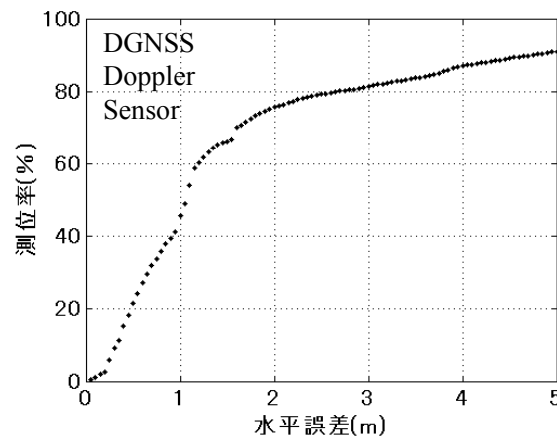
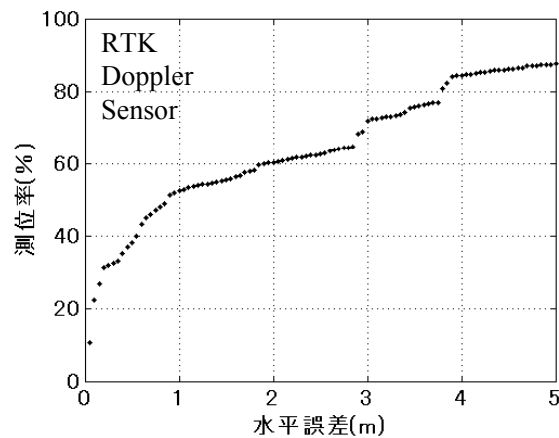
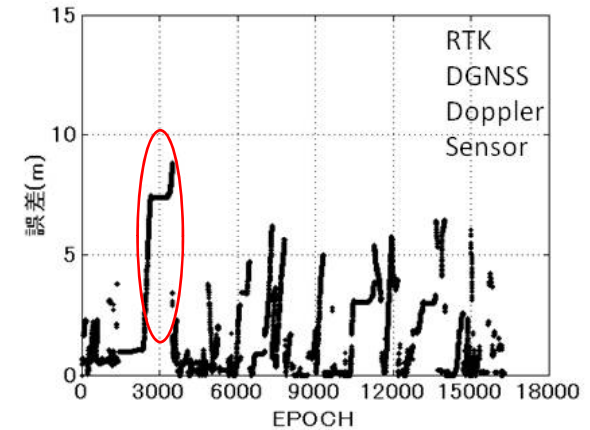
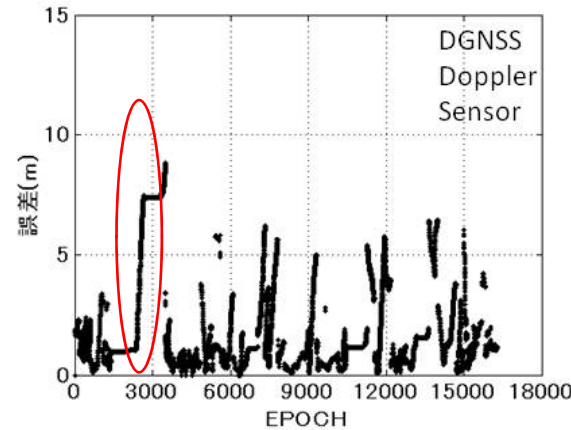
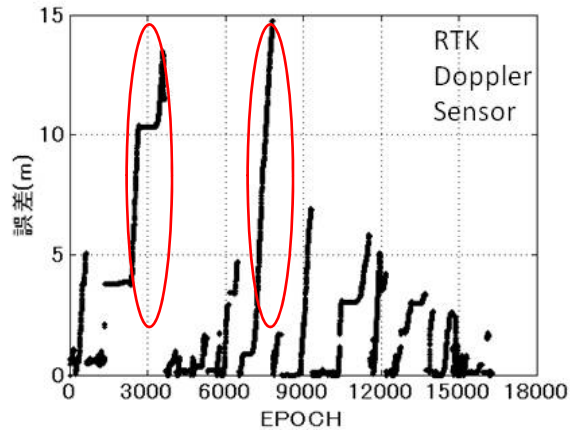


水平誤差(m)	2周波RTK		DGNS	
	回数	割合 (100%)	回数	割合 (100%)
<=1m	4944	30.4	4405	27.1
>1m	275	1.7	2248	13.8
outage	11051	67.9	9617	59.1
平均誤差 (m)	0.32		1.1	
標準偏差(m)	0.74		1.23	

Outage (s)	2周波RTK	DGNS
最大値	233.2秒	207.7秒
平均値	14.6秒	9.5秒
回数	76	102

実験結果（2010年の従来手法）

（実験1：名古屋駅周辺）



2周波RTKとセンサ

DGNSSとセンサ

2周波RTK+DGNSSとセンサ

RTKのメリット小、Outage区間で誤差増大→INSの精度重要

統合方法の信頼性の向上について

(2011年に提案した3つの内容)

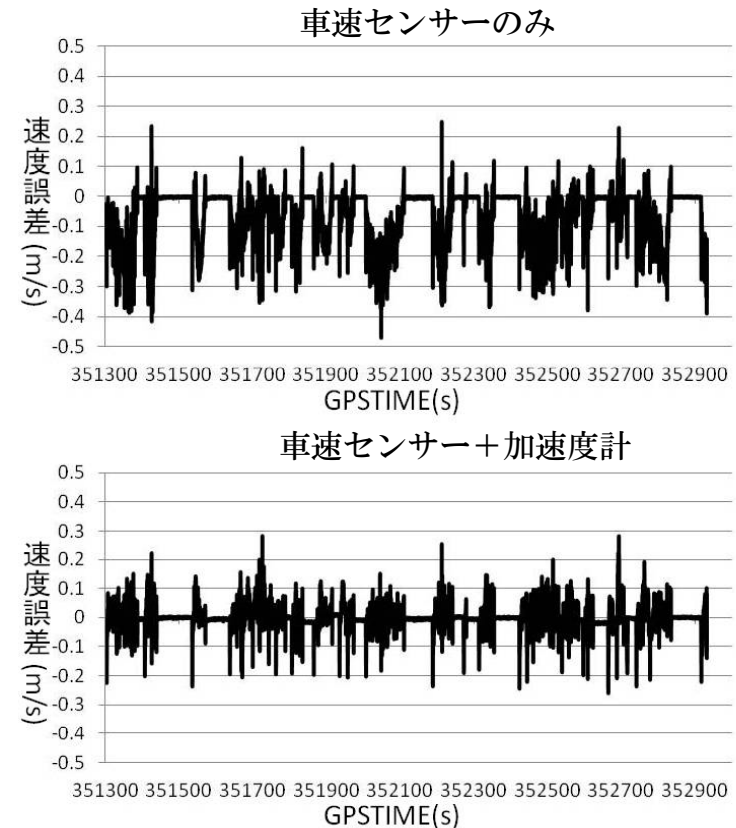
- ①車速精度の向上
- ②方位角精度の向上
- ③Wrong Fixの検出方法

車速精度の向上

(実験1：名古屋駅周辺)

- 車速センサーから得られる速度は、外部からの影響を受けず、時間が経過しても誤差が増大しない特徴がある。
- 右上に実験1に使われた車速センサーからの速度とPOS/LVとの誤差を示す。
- より精度の高い速度を得るために、車速センサーと加速度計を統合することを考えた(右下図)。
- 状態方程式と観測方程式からなる基本システムは以下のように表現することができる。

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



(実験1)

速度誤差 (m/s)	平均	標準偏差
車速センサーのみ	-0.068	0.086
車速センサー+加速度計	0.004	0.039

方位角利便性の向上

(実験1：名古屋駅周辺)

- DOPが悪いデータ、高回転率のデータを排除することで、信頼性の高い方位角を選出することができたが、GNSSからの方位角が利用できる回数を増やすために、排除せず、カルマンフィルタの観測雑音をそれぞれの状態で更新することにした。
- 状態は以下のように分ける。
 - (1) HDOPが低い (5以下) かつ低回転率 ($4^\circ /s$ 以下)
 - (2) HDOPが高い (5以上) かつ低回転率 ($4^\circ /s$ 以下)
 - (3) HDOPが低い (5以下) かつ高回転率 ($4^\circ /s$ 以上)
 - (4) HDOPが高い (5以上) かつ高回転率 ($4^\circ /s$ 以上)



大きく逸脱する誤差はこの outageの長さが大きな原因

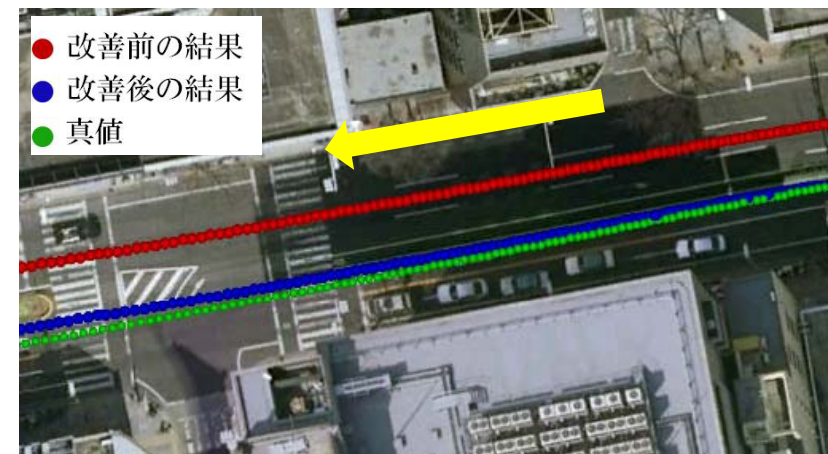
方位角誤差($^\circ$)	観測雑音固定	状態別で更新
平均値	-0.24	-0.24
標準偏差	0.44	0.37

Outage平均値

5.4s



4.3s



Wrong Fixの検出方法

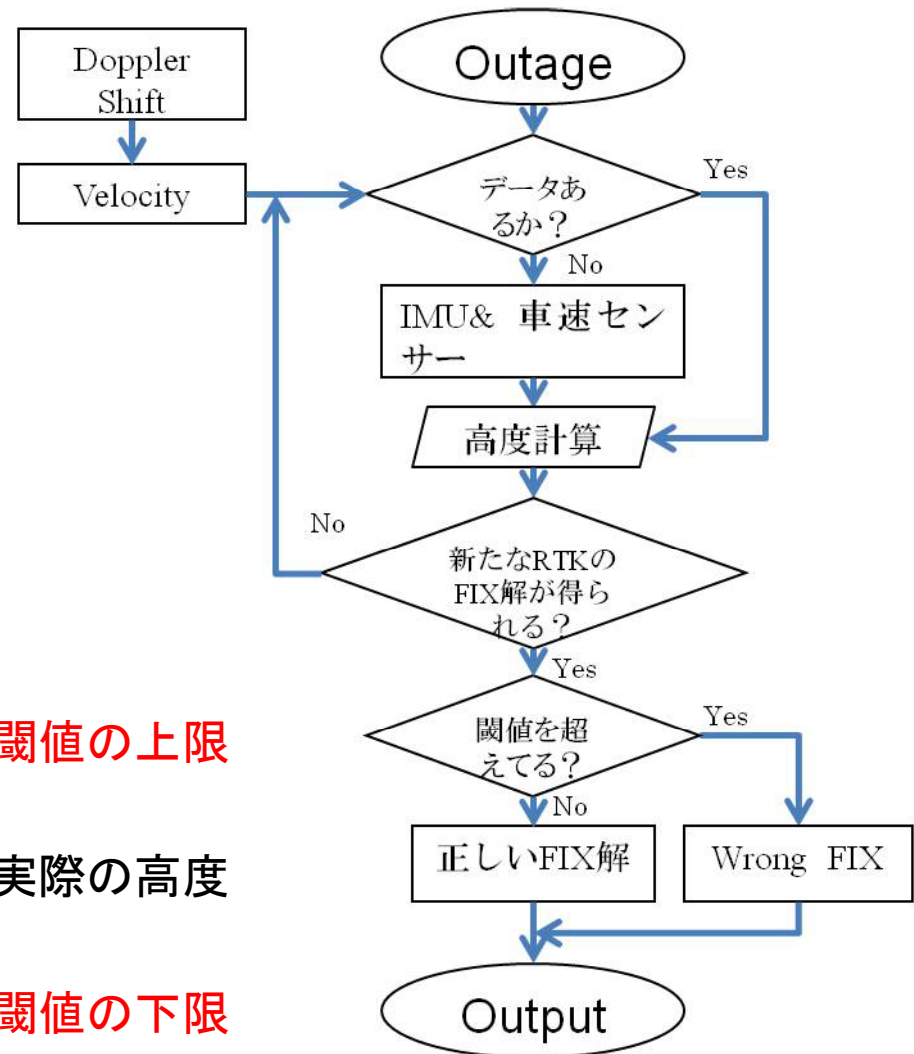
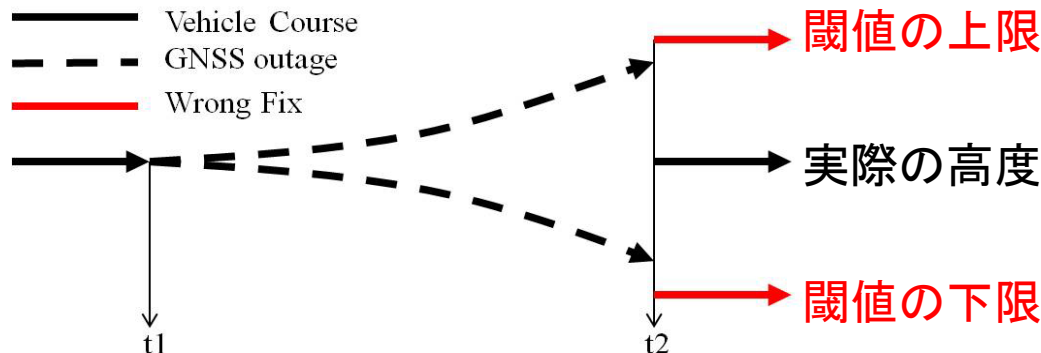
- RTKのFIX解の信頼性は高いが、実際に **wrong fix** を完全に避けることは現状できない。RTKの信頼性を向上するには、wrong fix検知が非常に重要。

水平絶対誤差 > 1m

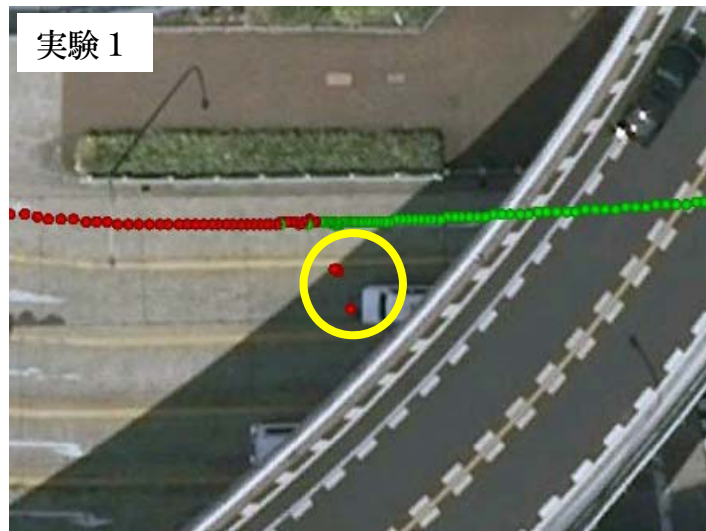
Wrong Fix

- GNSSが利用不可な時、上方向の速度で高度を計算する。速度も使用不可な時は、地面の傾斜角と移動した距離によって移動体の高さ変化を計算する。傾斜角の情報はIMUセンサーで推定する。

$$\Delta h = \int_{t1}^{t2} v \sin(\theta) dt$$



Wrong Fixの検出



- RTK-GNSSのFIX解
- 提案する手法の解

水平誤差 (m)	実験1 (名古屋)		実験2 (長久手)	
	Wrong fix 回数	検出回数	Wrong fix 回数	検出回数
1m~2m	13	9	6	6
2m~3m	3	3	73	73
>3m	259	259	46	46

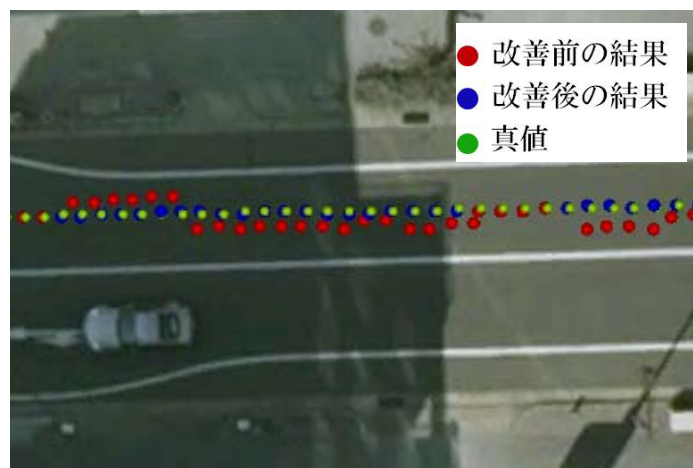
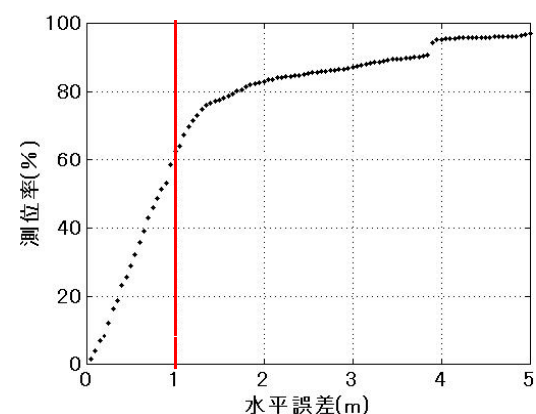
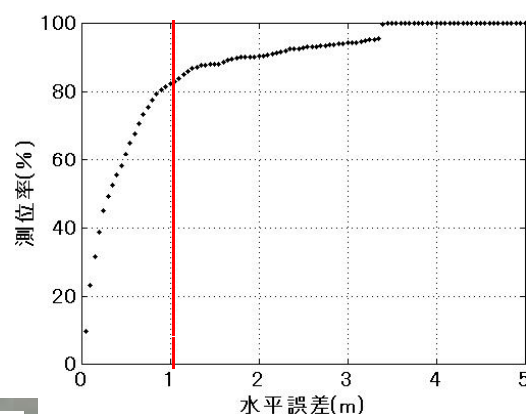
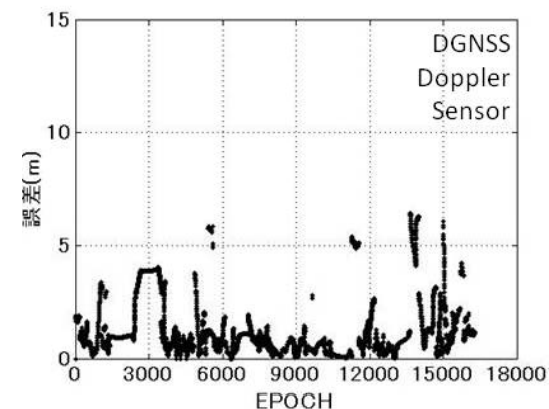
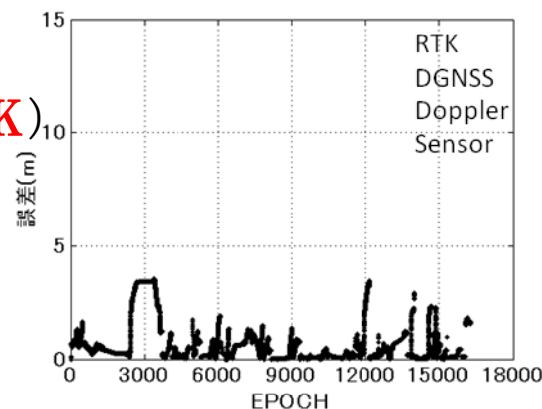
2m以上の誤差の検出率は100%



実験結果

(実験1：名古屋駅周辺 **2周波RTK**)

- 改良した測位手法の実験1の結果を右に示した。双方 (RTK、DGNSS) の場合で大きく改善できた。
- RTK+DGNSSの場合、水平誤差が最大で**3.5m以内 (2010年度の9mより大幅に改善)**になった。またDGNSSの場合、5m以内の割合が95%をこえた。



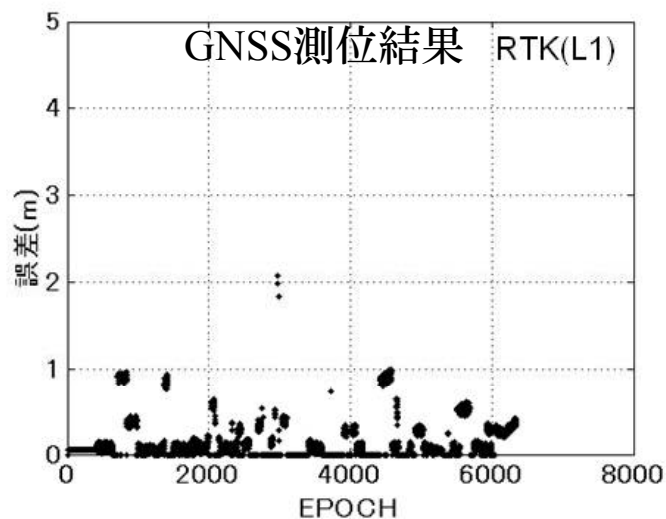
2周波RTK+DGNSSとセンサ

DGNSSとセンサ

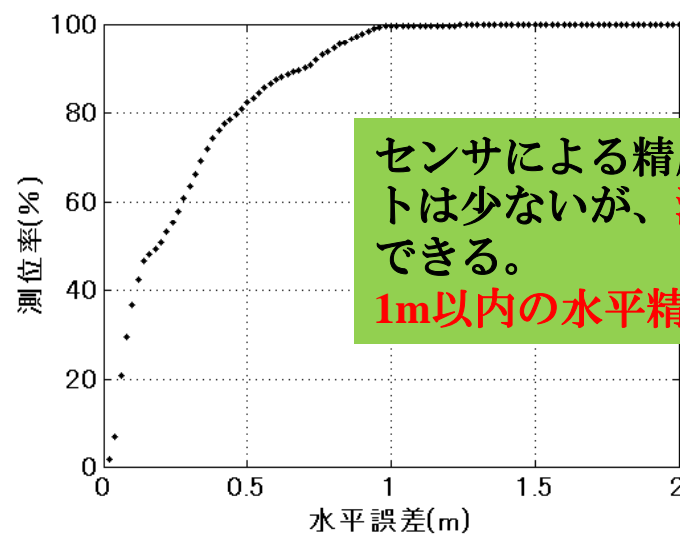
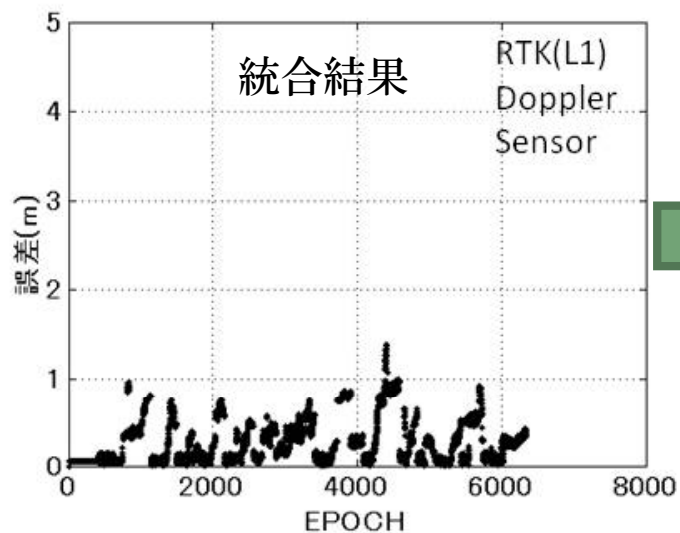
水平誤差 (m)	2周波RTK		DGNSS	
	回数	割合 (100%)	回数	割合 (100%)
≤1m	13379	82.2	10164	62.5
>1m	2891	17.8	6106	37.5
平均誤差 (m)	0.65		1.26	
標準偏差 (m)	0.86		1.3	

実験結果

(実験2：長久手周辺 **1周波RTK**)



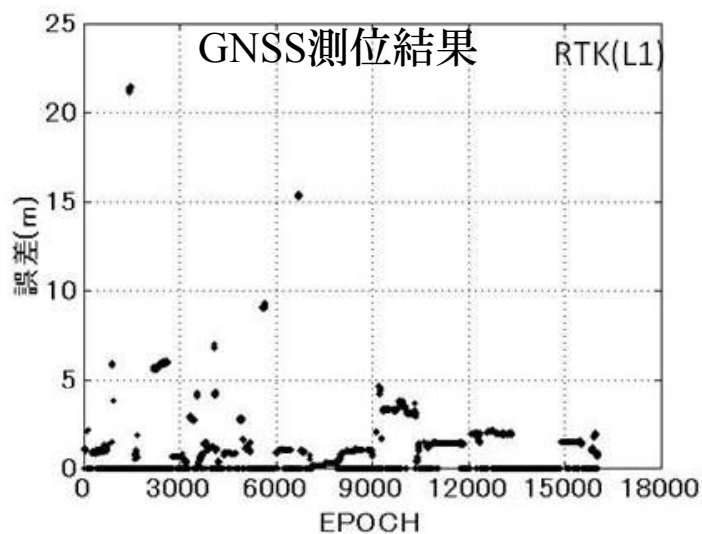
水平誤差(m)	1周波RTK		統合結果	
	回数	割合(100%)	回数	割合(100%)
<0.5m	3283	51.7	5213	82.2
0.5m~1m	407	6.4	1096	17.3
>1m	4	0.1	31	0.5
outage	2646	41.8	0	0
Mean (m)	0.21		0.27	
STD (m)	0.23		0.25	



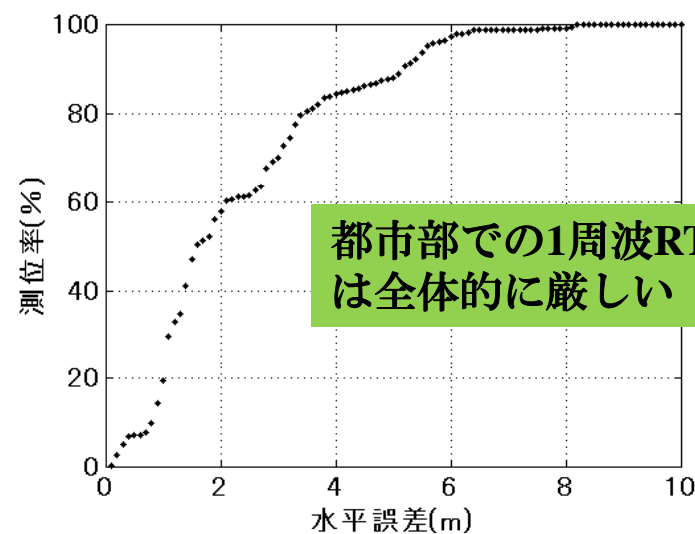
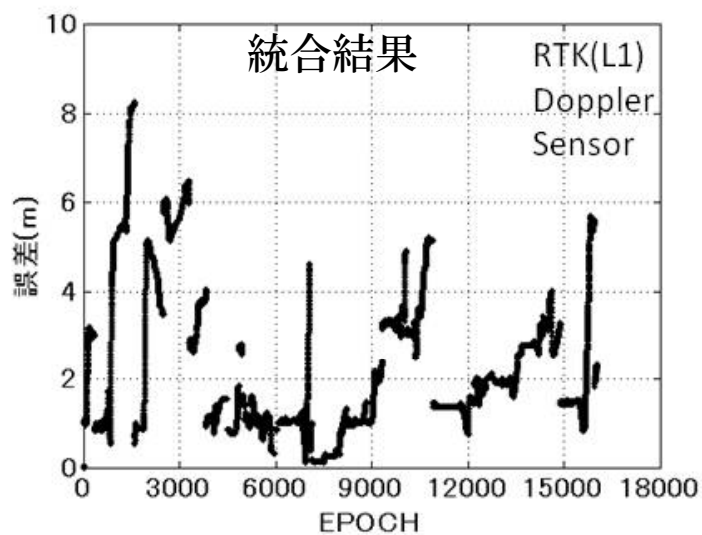
センサによる精度向上メリットは少ないが、**測位率100%**にできる。
1m以内の水平精度99.5%

実験結果

(実験3：名古屋駅周辺 1周波RTK)



水平誤差(m)	1周波RTK		統合結果	
	回数	割合(100%)	回数	割合(100%)
<=4m	6752	42.1	13532	84.4
>4m	440	2.7	2498	15.6
Outage	8838	55.2	0	0
Mean (m)	1.8		2.31	
STD (m)	2.07		1.69	



まとめ1

- 本研究ではIMU、車速センサーとGNSSを統合する方法を提案した。
- ドップラによる移動体速度より方位角の算出方法を紹介し、信頼性の高い方位角を抽出する方法を提案した。
- カルマンフィルタを利用して、GNSSから得られた方位角とMEMSジャイロから得られた角速度情報を統合する方法を提案した。
- さらに、提案した手法の信頼性を向上させるために、**速度精度の向上、方位角精度の向上、Wrong Fixの検知**について提案した。実験データで、全体の信頼性を向上させたことを確認した。

修士
1年目

修士
2年目

まとめ2

- 都市部データにおいて、GNSSのみで約32%の利便性をセンサとの融合で100%まで拡張した
- 都市部データにおいて、2周波RTK+センサの提案するアルゴリズムを用いて、100%測位率で最大約3.5mの水平誤差まで低減した
- 比較的開けた場所では、1周波RTK+センサで100%測位率で水平1m以内を99%以上達成した
- 本研究のターゲットであった水平誤差1m以内の割合は、都市部で82%（2周波）、開けた場所で99%以上（1周波）であった

ご静聴ありがとうございました！

謝辞：貴重な実験データを提供頂いた豊田中央研究所殿に
深く感謝いたします。

位置、速度、加速度の統合方法（補足）

- ここで、GNSSの位置が得られるとき、二次元平面内を運動する移動体の軌道をスムーズに推定する方法を紹介する。
- RTKを使用する場合、得られる測位解の精度が高いため、この方法により精度を劣化させるケースがあるため、DGNSS程度の測位結果に対して使用すると効果が得られる
- 時刻 t_k における、移動体の位置を (x_k, y_k) 、速度を (v_{x_k}, v_{y_k}) 、加速度を (a_{x_k}, a_{y_k}) とし、初期条件 $(x_0, y_0, v_{x_0}, v_{y_0}, a_{x_0}, a_{y_0})$ は既知とする。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。

$$\begin{aligned}
 X_{k+1} &= F_k X_k + G w_k \\
 Z_k &= H X_k + v_k \\
 X_k &= (x_k, y_k, v_{x_k}, v_{y_k}, a_{x_k}, a_{y_k})
 \end{aligned}$$

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

$$R = \begin{bmatrix} hdop^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & hdop^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_v^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_v^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_a^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_a^2 \end{bmatrix}$$

U-blox受信機での統合結果例（補足）



周囲の開けた晴海付近走行データ

DGNSS水平誤差 (m)	平均誤差	標準偏差
統合前	0.66	0.42
統合後	0.60	0.30

DGNSS水平誤差

