

低コストIMUとドップラソナーを用いた 複合航法に関する基礎的研究

東京海洋大学 情報通信工学研究室
八田大典

学籍番号:1955015

指導教員:久保信明 福田巖

背景

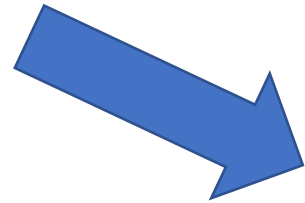


Multi-GNSS時代の到来
準天頂衛星

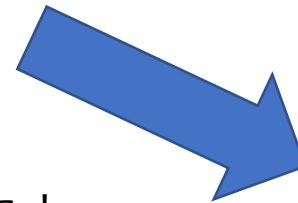
出典:みちびきウェブサイト

みちびき3号機のCG画像

<https://qzss.go.jp/overview/download/cg-image3.html>



MADOCA等によって
高精度測位が手軽に利用できる時代に！



出典:みちびきウェブサイト

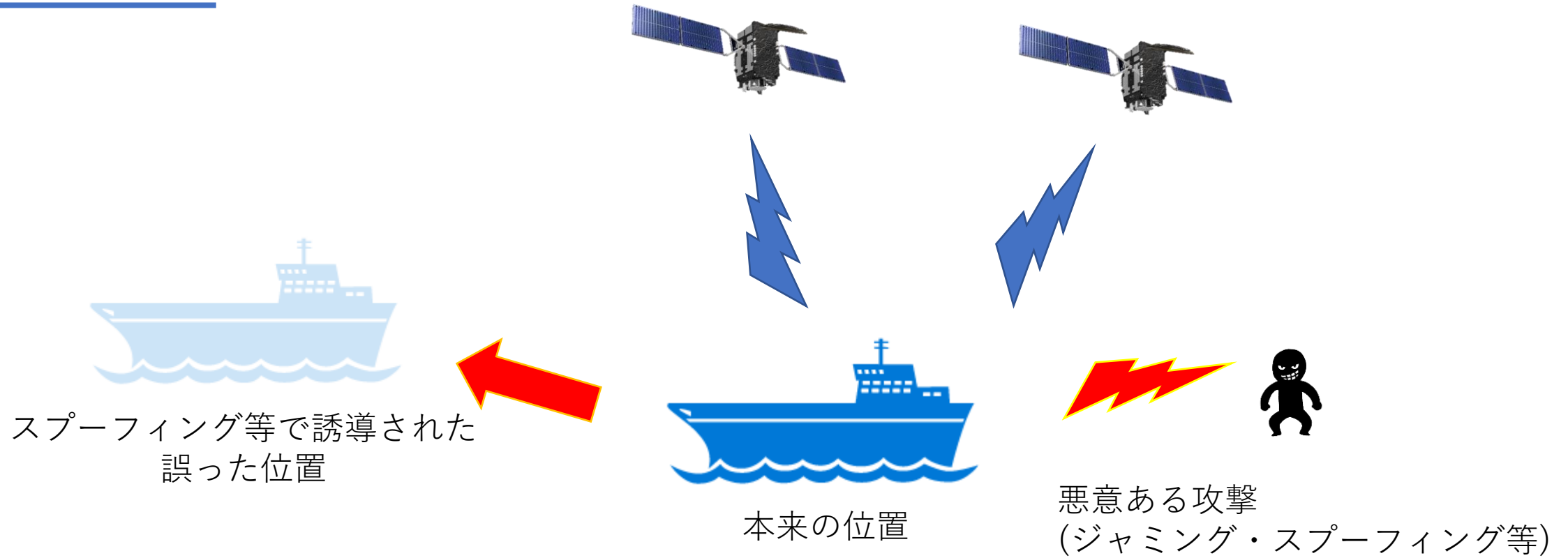
小型ボートの自動着岸をみちびきのCLASで実現

https://qzss.go.jp/usage/userreport/njmk_200518.html



自律運航船やAIS、ECDIS等が普及するにあたって
航海計器としてのGNSSの重要性が増している

背景



GNSSを活用する上でスプーフィング・ジャミングは大きな問題

デッドレコニング

- Dead Reckoning(DR/推測航法)

GNSSが利用できない場合にジャイロ・加速度センサといった
他センサの情報を元に現在位置を推測できる航法の一つ

車の場合:

トンネル内や都市部等でGNSSが利用不可能になった場合に**車輪速センサ**や
ジャイロ・加速度センサの情報を利用して現在位置を推測する

GNSSに代わる測位システム例:Inertial Navigation System(INS)

何故既に存在するINSを利用しないのか？
INSは非常に高価（2,000万円で0.6 mile/hの誤差）

目的



Inertial Measurement Unit(IMU)



ドップラーログ(DVL)

IMUとドップラソナーを用いてデッドレコニング



ジャミング・スプーフィングの対策とする
シンプルかつ低コストセンサの搭載のみで、現在運航している船舶にも搭載可能

想定ケース

航海中にジャミングまたはスプーフィングを受けて
GNSSが利用不可能になったことを検出



デッドレコニングに移行

IMU/ドップラソナーを組み合わせでDRを行う

低精度MEMS IMUの欠点

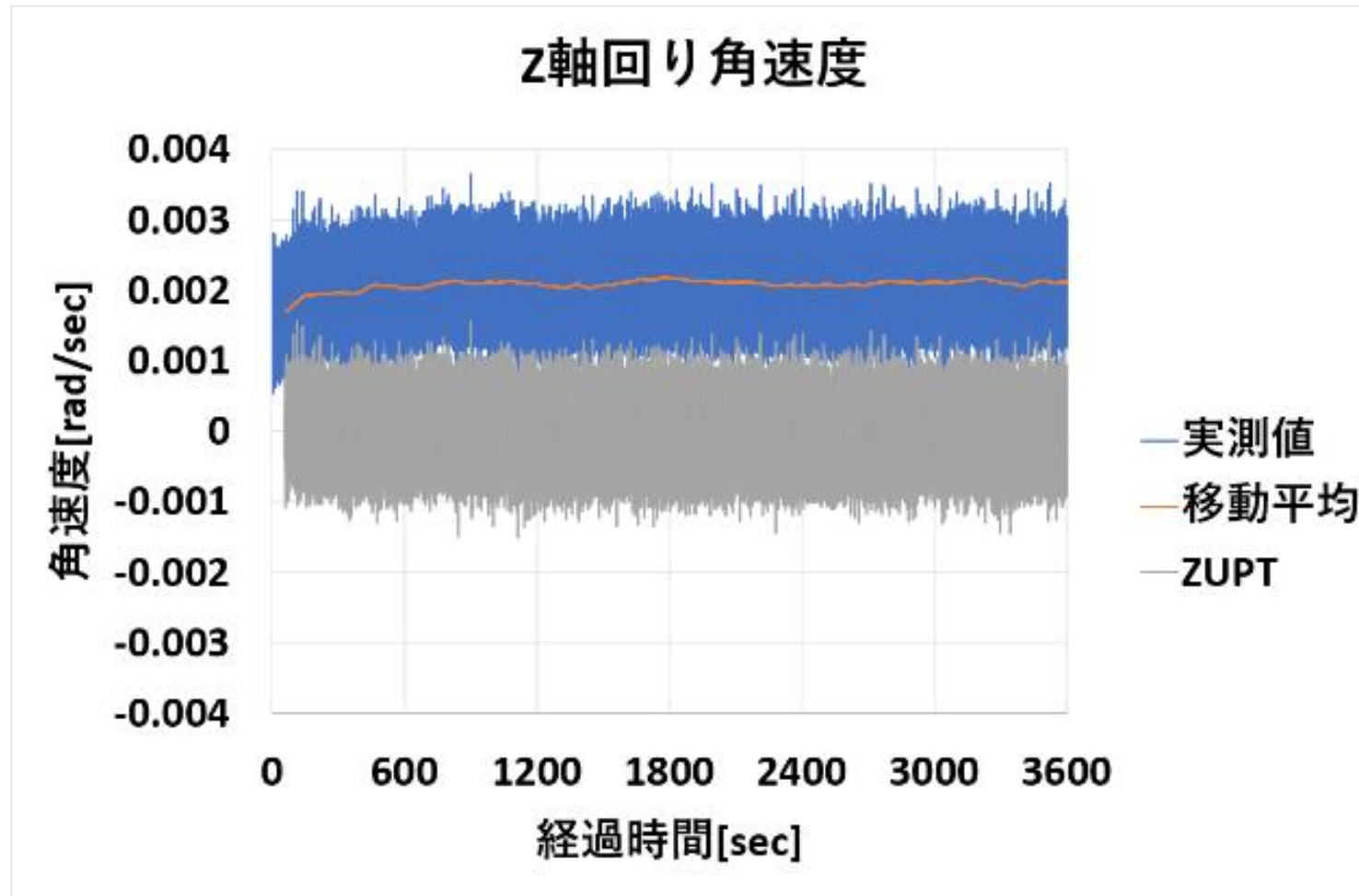
- 誤差が蓄積する

センサ自体の誤差が大きく、モデリングも難しいため位置を出す際の積分誤差が大きくなる



- 誤差の低減
 1. バイアス補正を行う
 2. 積分誤差の問題をDVLを使用することにより改善
 1. DVLの値のばらつきを、IMUにより補正（相補フィルタの考え方）
 2. カルマンフィルターを用いたスムージング

ZUPT(Zero velocity Update)

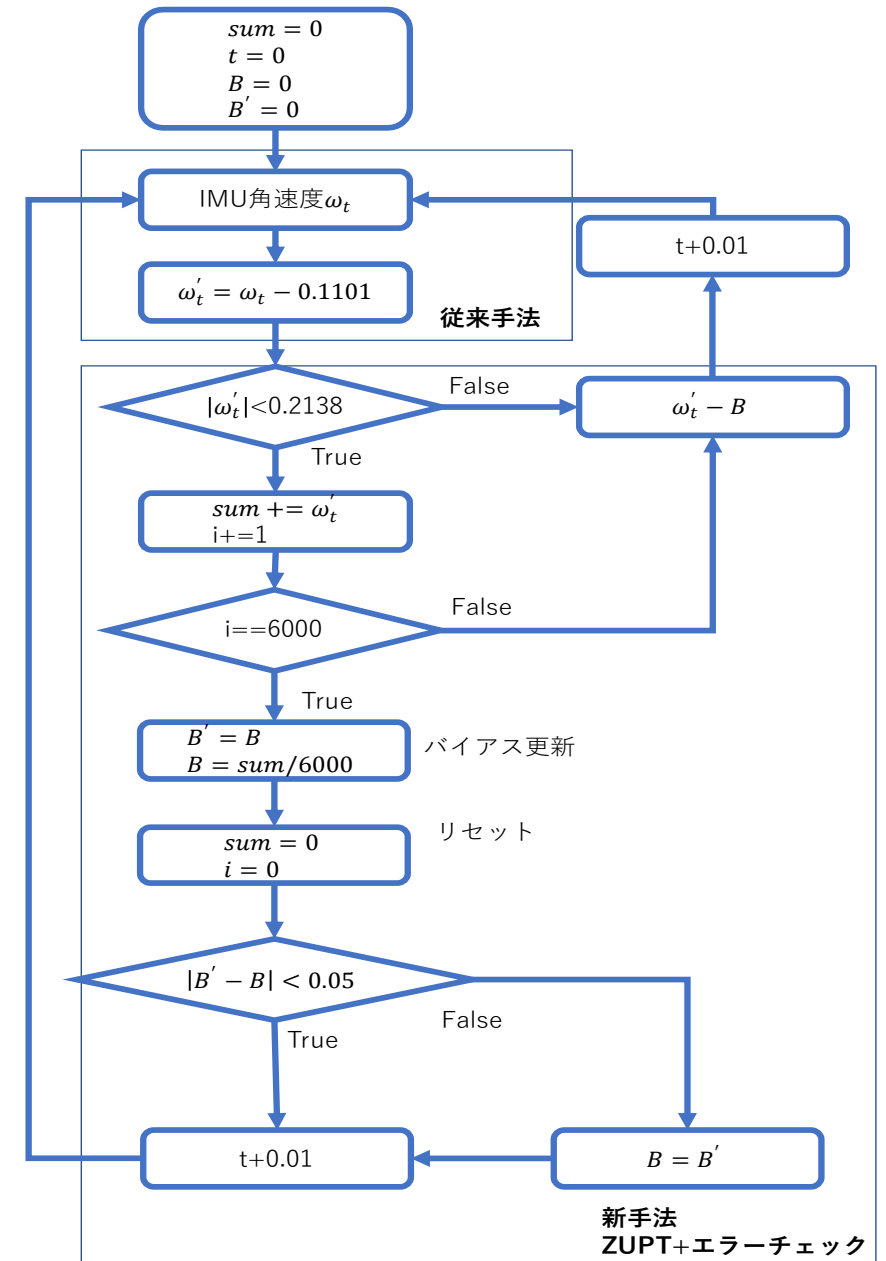


ジャイロ・加速度センサが完全静止状態でなければ正しくオフセットできない

移動中のZUPT

条件

1. Z軸の角速度のみに対してZUPTを行う
2. 初期バイアスの除去(直進区間の平均値)
従来は初期バイアス補正のみ行っていた
3. 一定以上の角速度を検出した場合は平均する値に含めない
4. ZUPTのエラーチェックを行い、異常値は弾いて前のZUPT結果を使う



カルマンフィルタ

状態方程式

$$x_{k+1} = F_k x_k + G w_k \dots (1)$$

観測方程式

$$y_k = H x_k + v_k \dots (2)$$

1ステップ前の推定値から現在の状態を修正

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (y_k - H_k \hat{x}_{k|k-1}) \dots (3)$$

次ステップの値を推定

$$\hat{x}_{k+1|k} = F_k \hat{x}_{k|k} \dots (4)$$

カルマンゲインの更新

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \dots (5)$$

誤差共分散行列の更新

$$P_{k|k} = P_{k|k-1} - K_k H_k P_{k|k-1} \dots (6)$$

次ステップの誤差共分散行列の推定

$$P_{k+1|k} = F_k P_{k|k} F_k^T + G_k Q_k G_k^T \dots (7)$$

$$x_k = [V_{x_k} \quad V_{y_k} \quad a_{x_k} \quad a_{y_k}] \quad (8)$$

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t_S & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t_S \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad R = \begin{bmatrix} \sigma_{V_x}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{V_y}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{a_x}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{a_y}^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$\Delta t_S = 1[\text{sec}] \dots$ ドップラソナー観測周期

$\sigma_{V_x} = 0.11 \dots$ Sonar表示速度(X方向)の誤差標準偏差

$\sigma_{V_y} = 0.11 \dots$ Sonar表示速度(Y方向)の誤差標準偏差

$\sigma_{a_x} = 0.06 \dots$ IMU加速度(X方向)の誤差標準偏差

$\sigma_{a_y} = 0.06 \dots$ IMU加速度(Y方向)の誤差標準偏差

σ_V の設定にはGNSSとソナー速度の差分の標準偏差

σ_a の設定にはIMUを静止状態で設置して観測した値の標準偏差に動揺を考慮した値を設定した

実験

実験概要

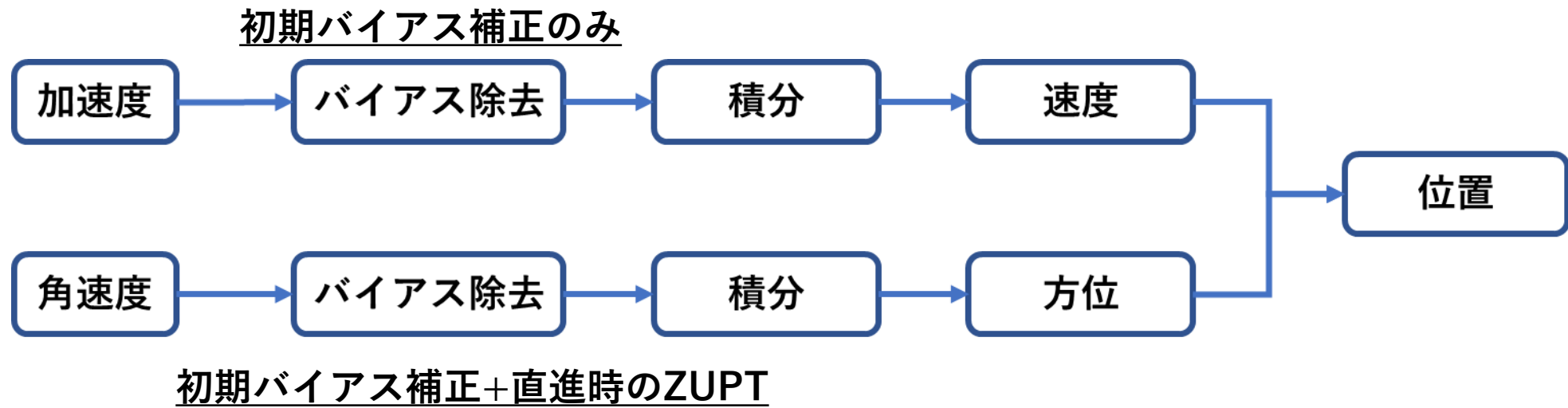
実験概要		
日時	2019/10/4	
実験場所	東京湾羽田空港付近	
使用船舶	汐路丸	
センサ	GNSS	Trimble SPS855 (RTK)
	IMU	東京航空計器 CSM-MG100
	Sonar	汐路丸に設置されたドップラソナー
GNSS基準局	設置場所	東京海洋大学第4実験棟屋上
	受信機	Trimble NetR9

取得データ一覧					
	角速度	加速度	方位	速度	位置 (RTK)
IMU	100Hz	100Hz	＼	＼	＼
GNSS	＼	＼	5Hz	5Hz	5Hz
Sonar	＼	＼	＼	1Hz	＼



白線が通常航海区間
赤線が実験区間

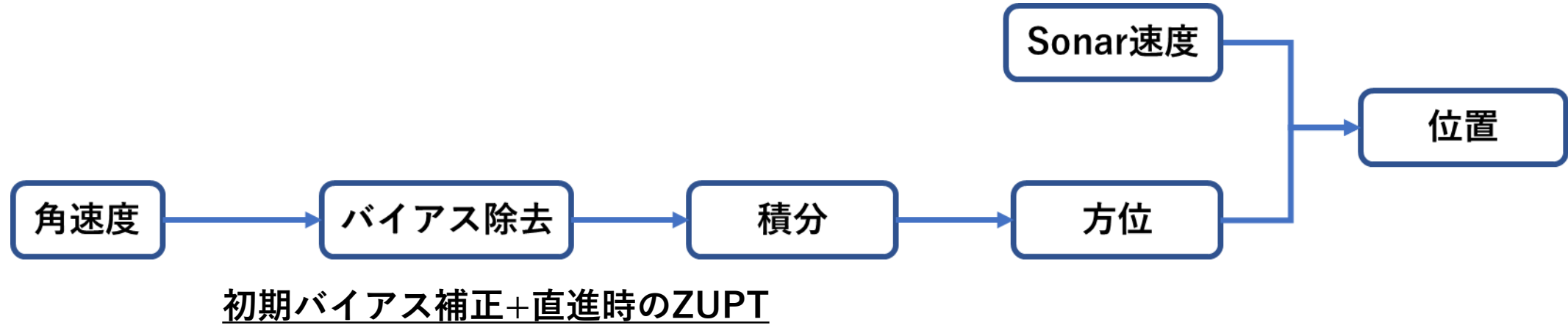
組み合わせ1



IMUのみ

→積分により誤差が増大する(特に加速度が問題)

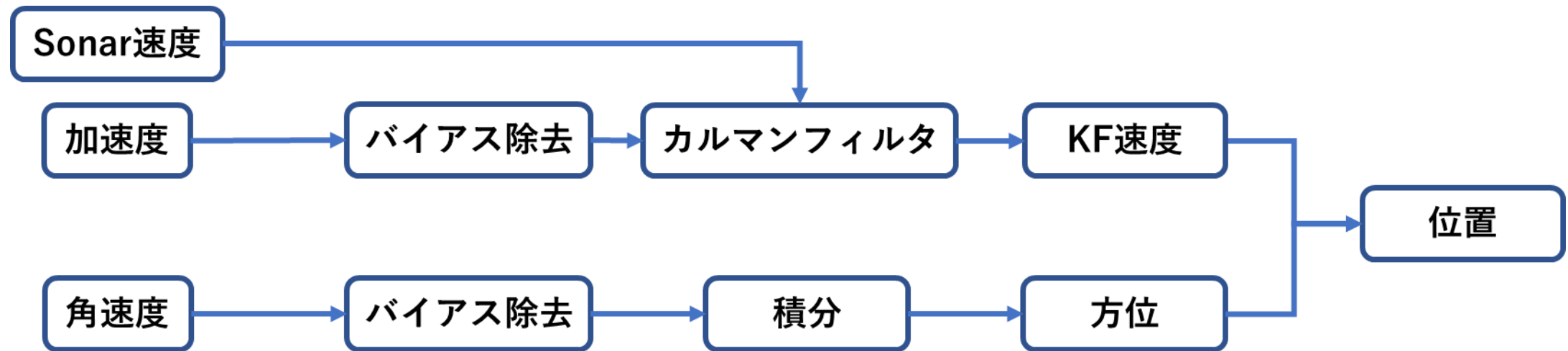
組み合わせ2



IMU+ドップラソナー

→ ドップラソナーで速度を求める場合しばしば飛びが見られる

組み合わせ3



IMU+ドップラソナー+カルマンフィルタ

→ドップラソナーの飛びをIMUの加速度とカルマンフィルタで補正！

使用したセンサ類

GNSS

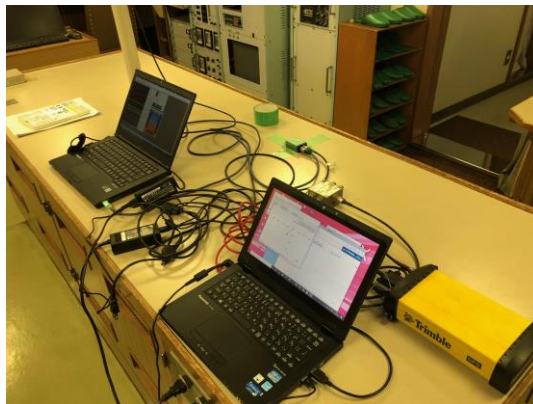


Trimble SPS855

IMU



東京航空計器
MG-100



汐路丸研究室内に設置

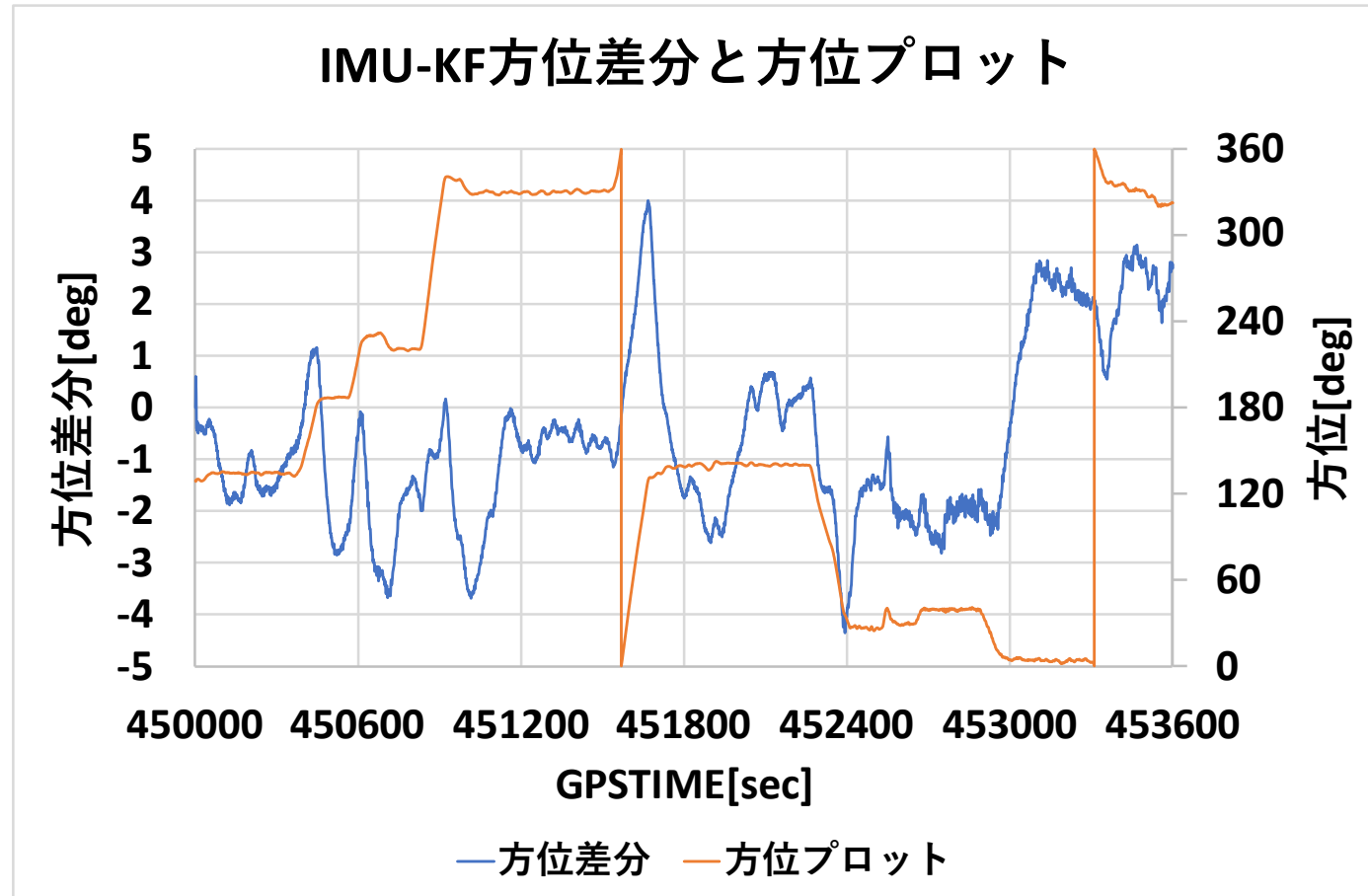
ドップラソナー



ATLAS DOLOG SYSTEM

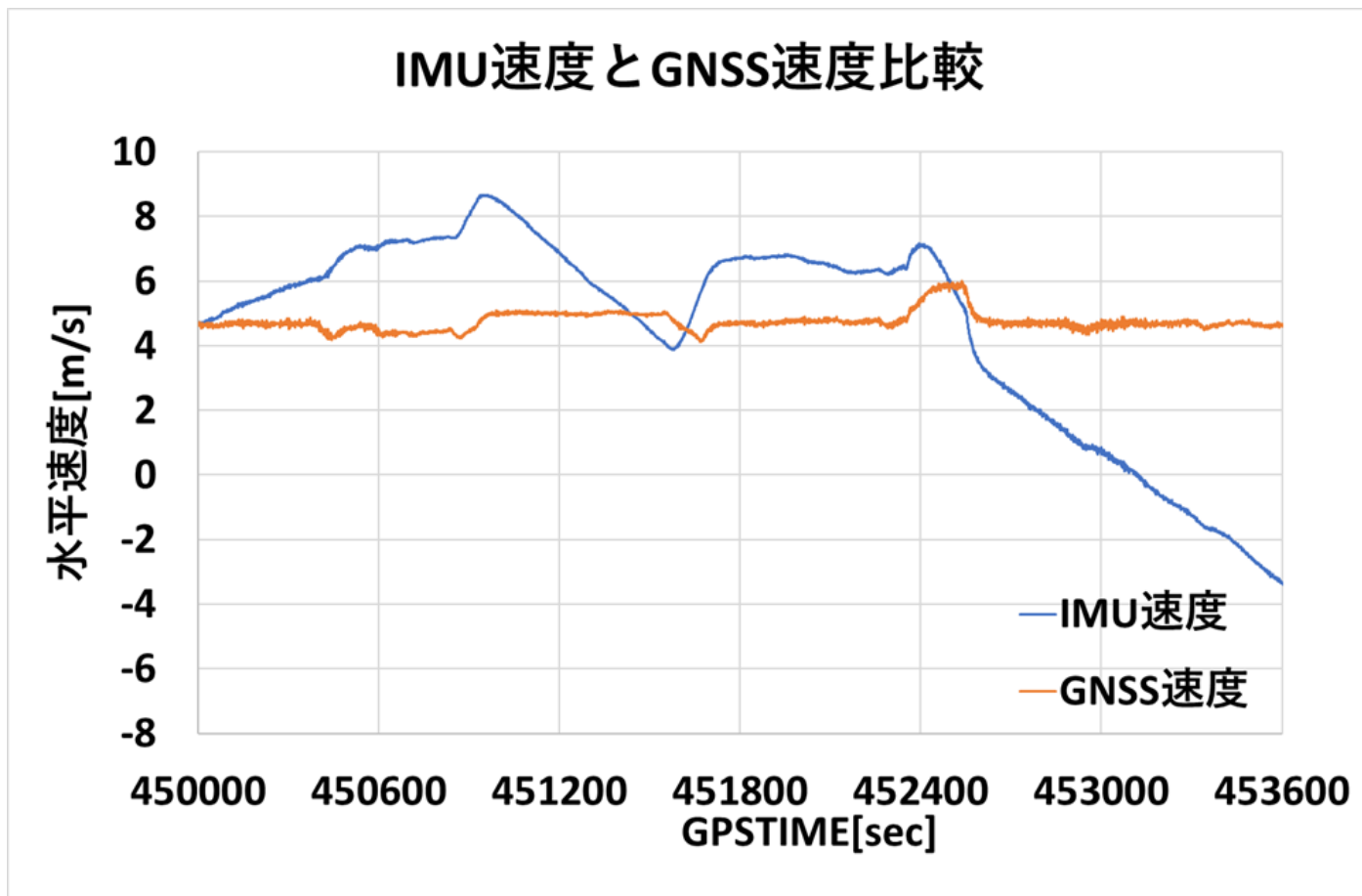
実験結果

方位誤差



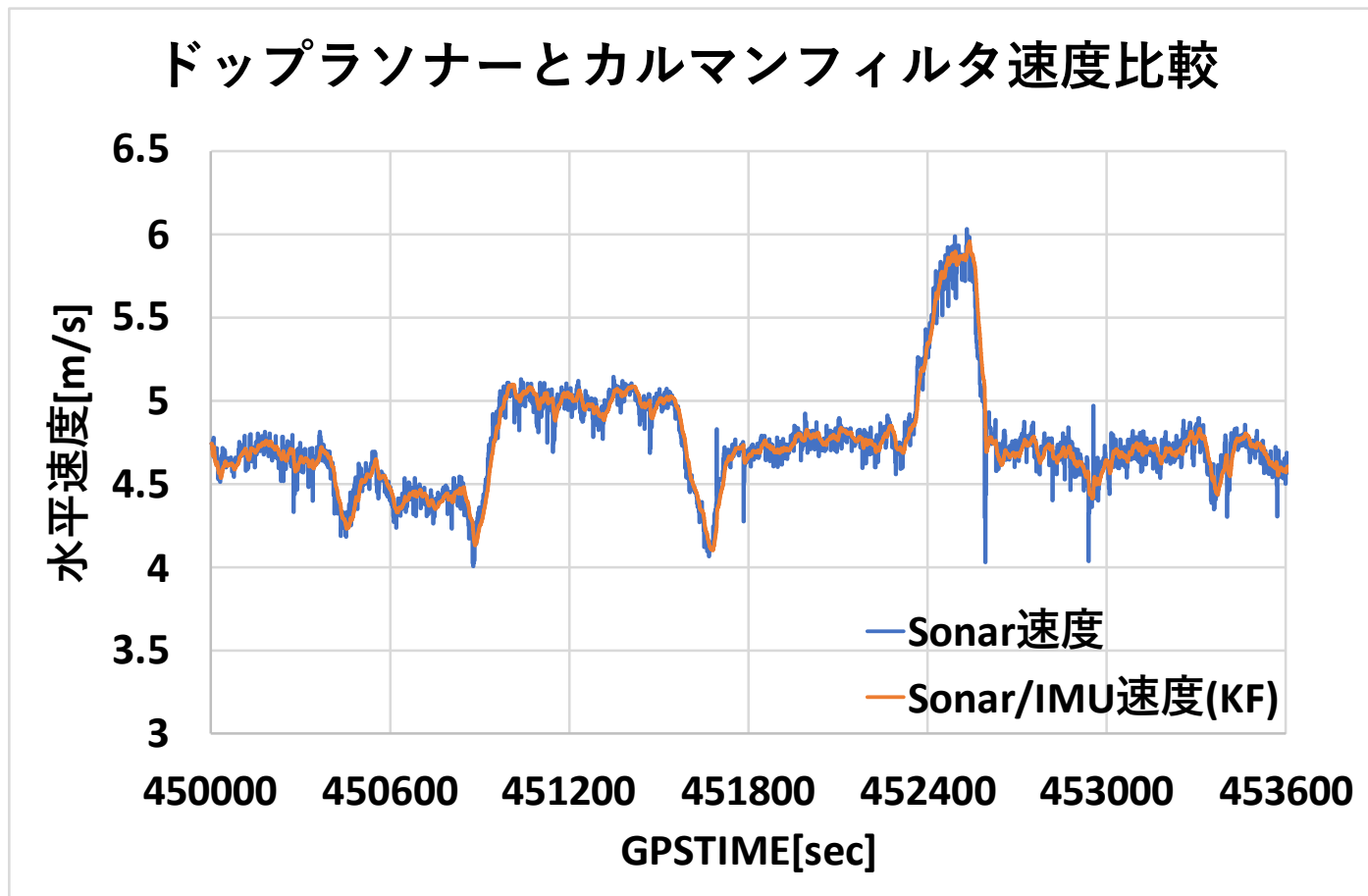
GNSS方位をカルマンフィルタでスムージングした方位を比較値として利用した

速度比較



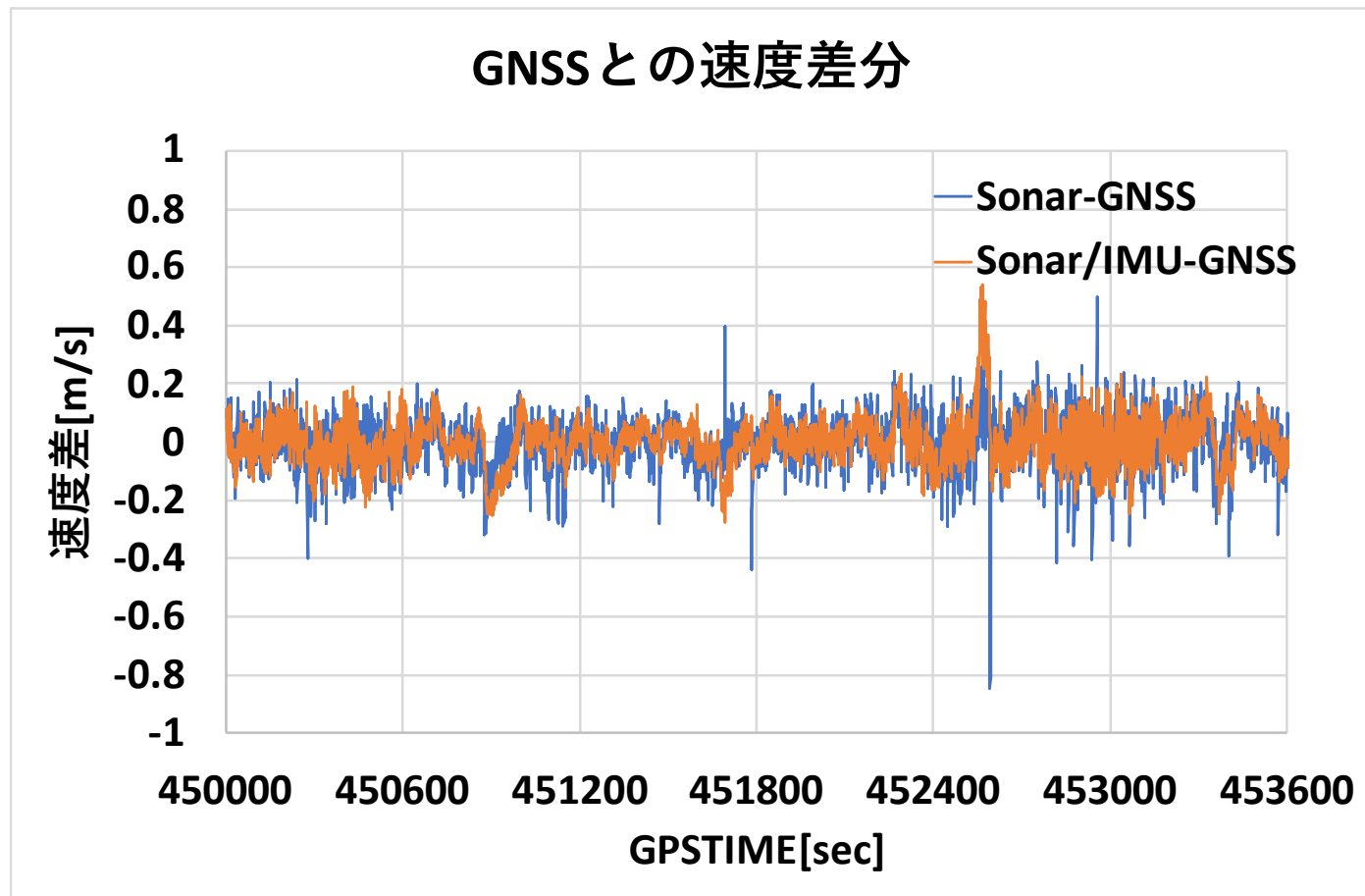
IMUの加速度積分によって求めた速度はこのような時間経過と共に誤差が蓄積する

速度比較



ソナー速度にはしばしば突発的な飛びが見られるが、カルマンフィルタによって取り除くことができる

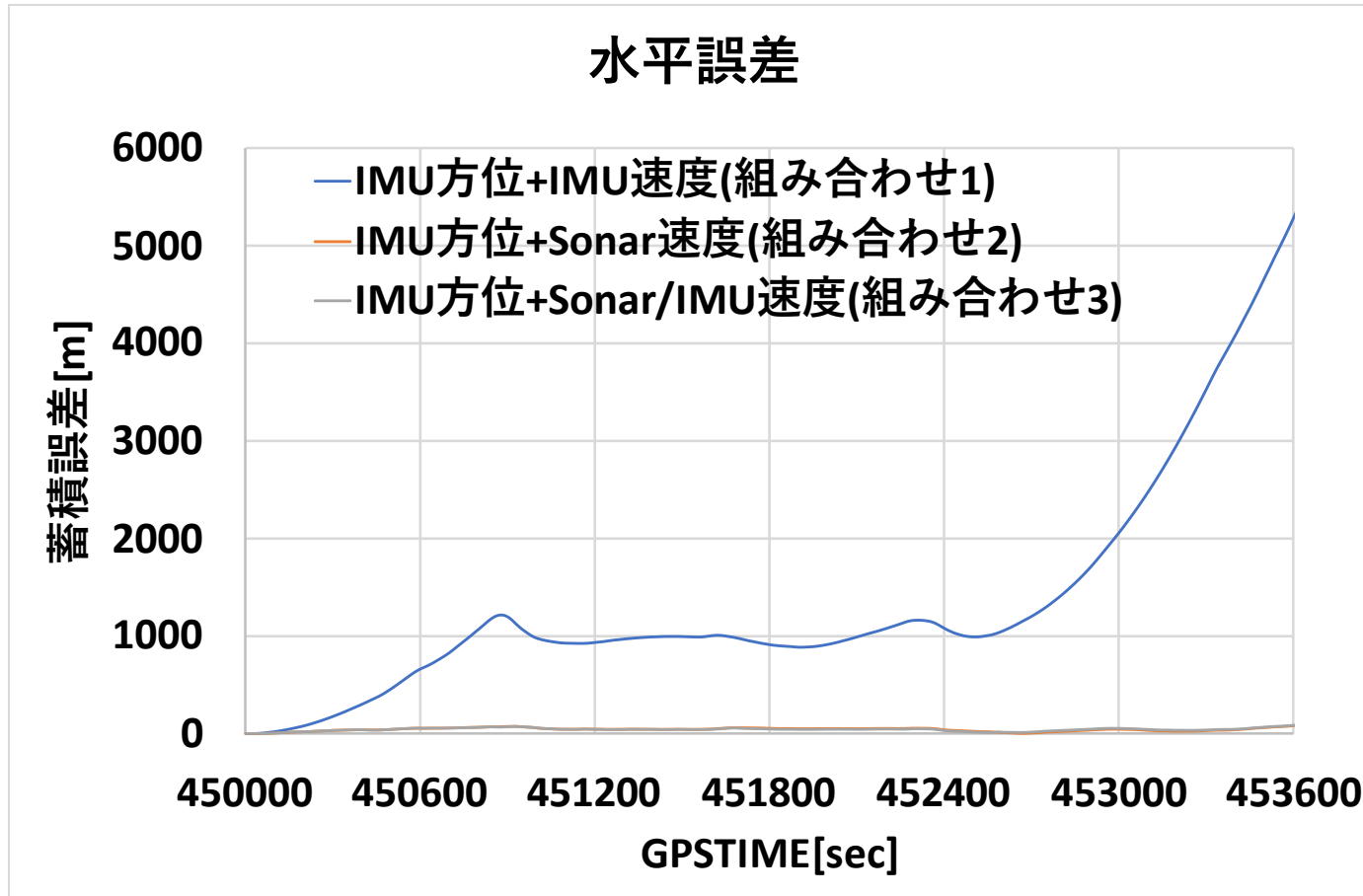
速度比較



最大誤差
Sonar:0.84[m/s]
Sonar/IMU:0.54[m/s]

標準偏差
Sonar:0.09[m/s]
Sonar/IMU:0.08[m/s]

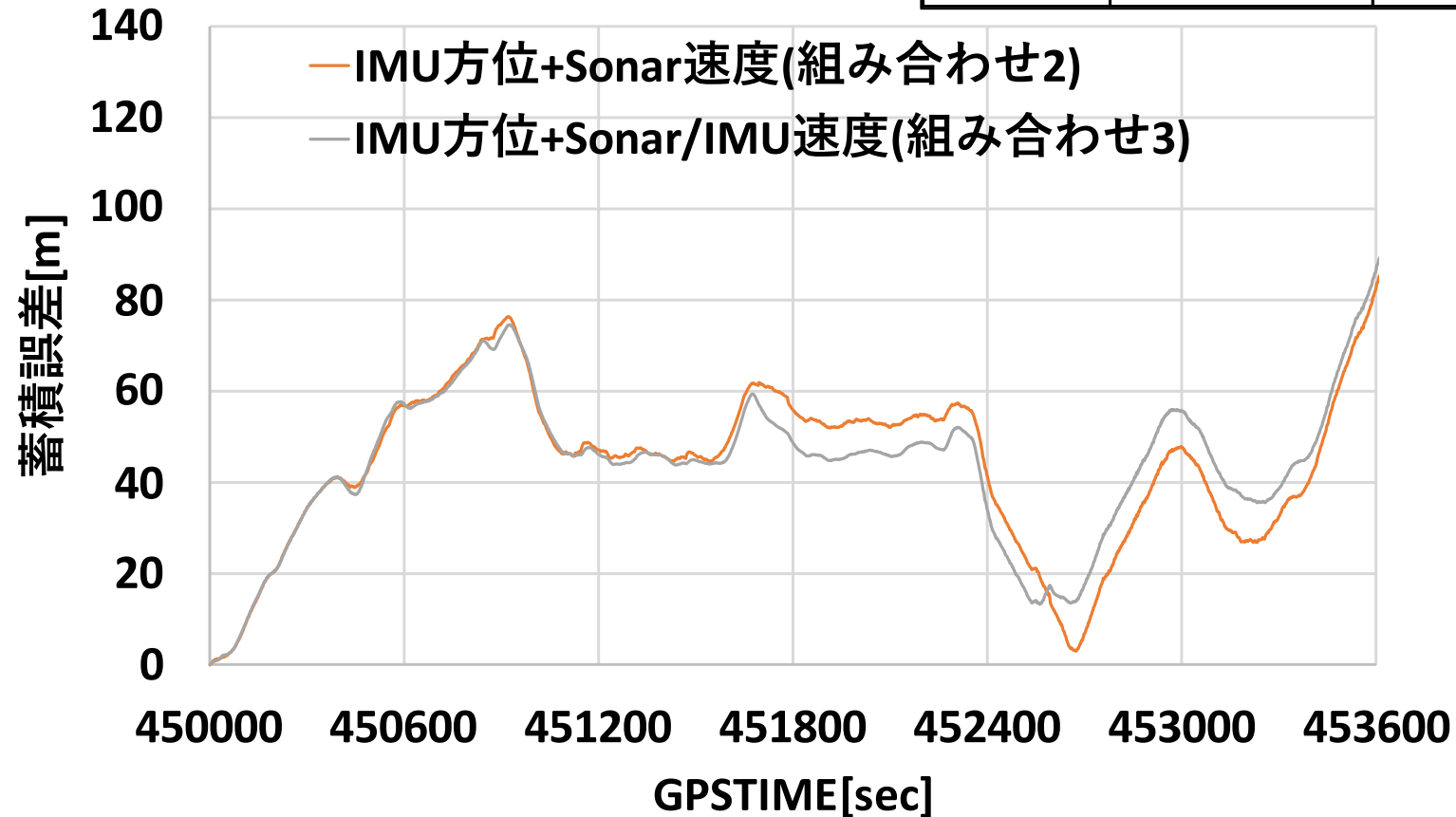
水平絶対誤差（位置）



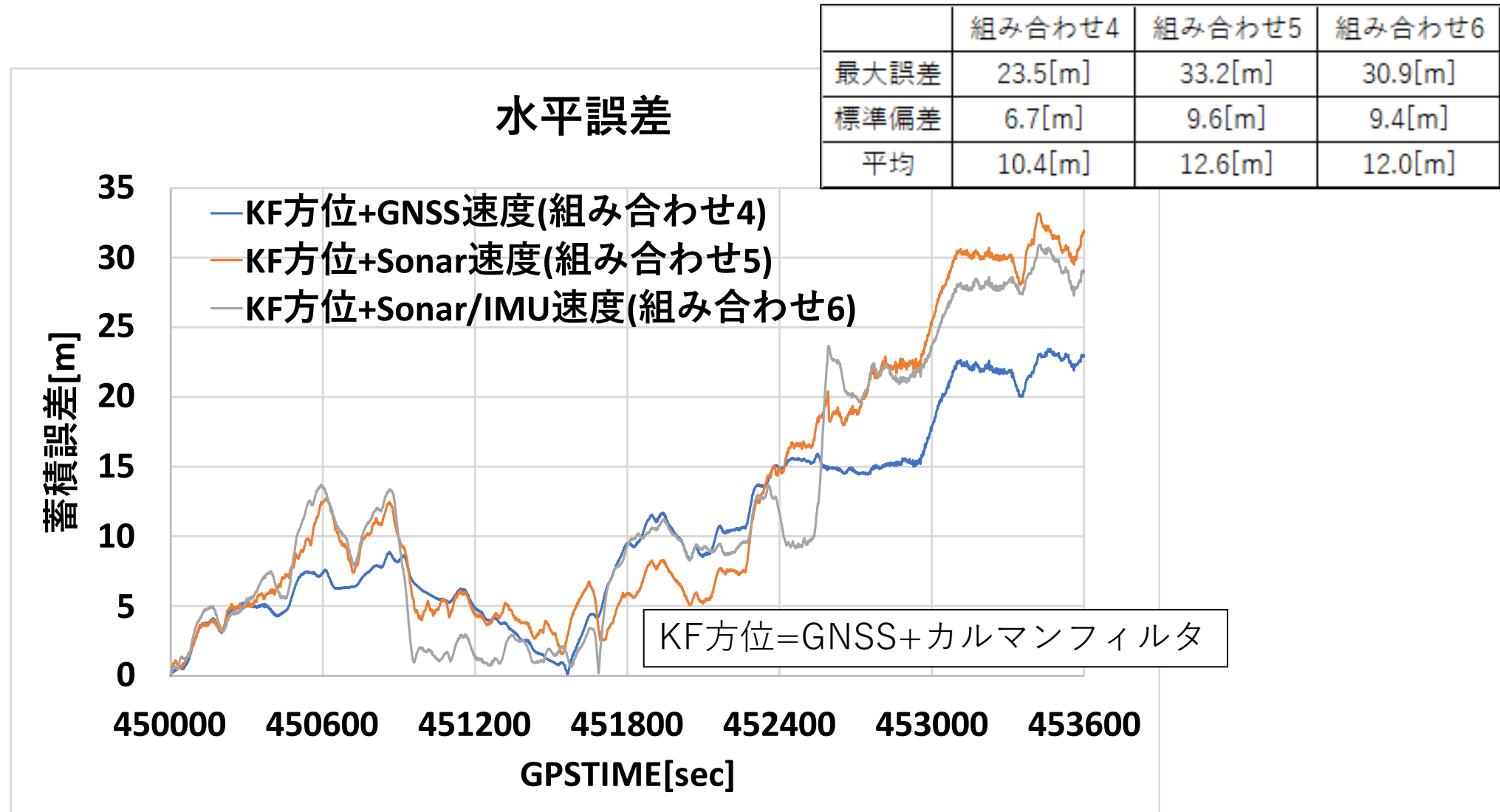
水平絶対誤差 (位置)

	組み合わせ1	組み合わせ2	組み合わせ3
最大誤差	5277.2[m]	82.5[m]	86.5[m]
標準偏差	1124.9[m]	17.3[m]	16.1[m]
平均	1341.9[m]	43.7[m]	44.0[m]

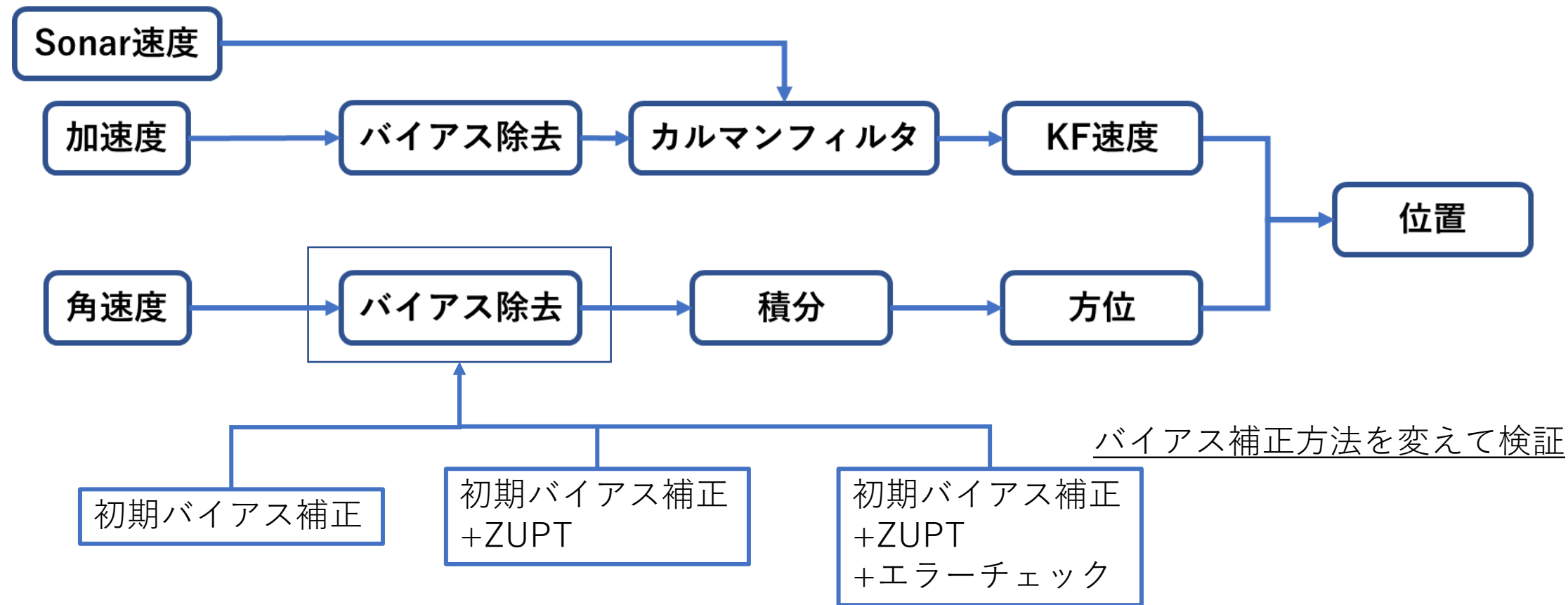
水平誤差



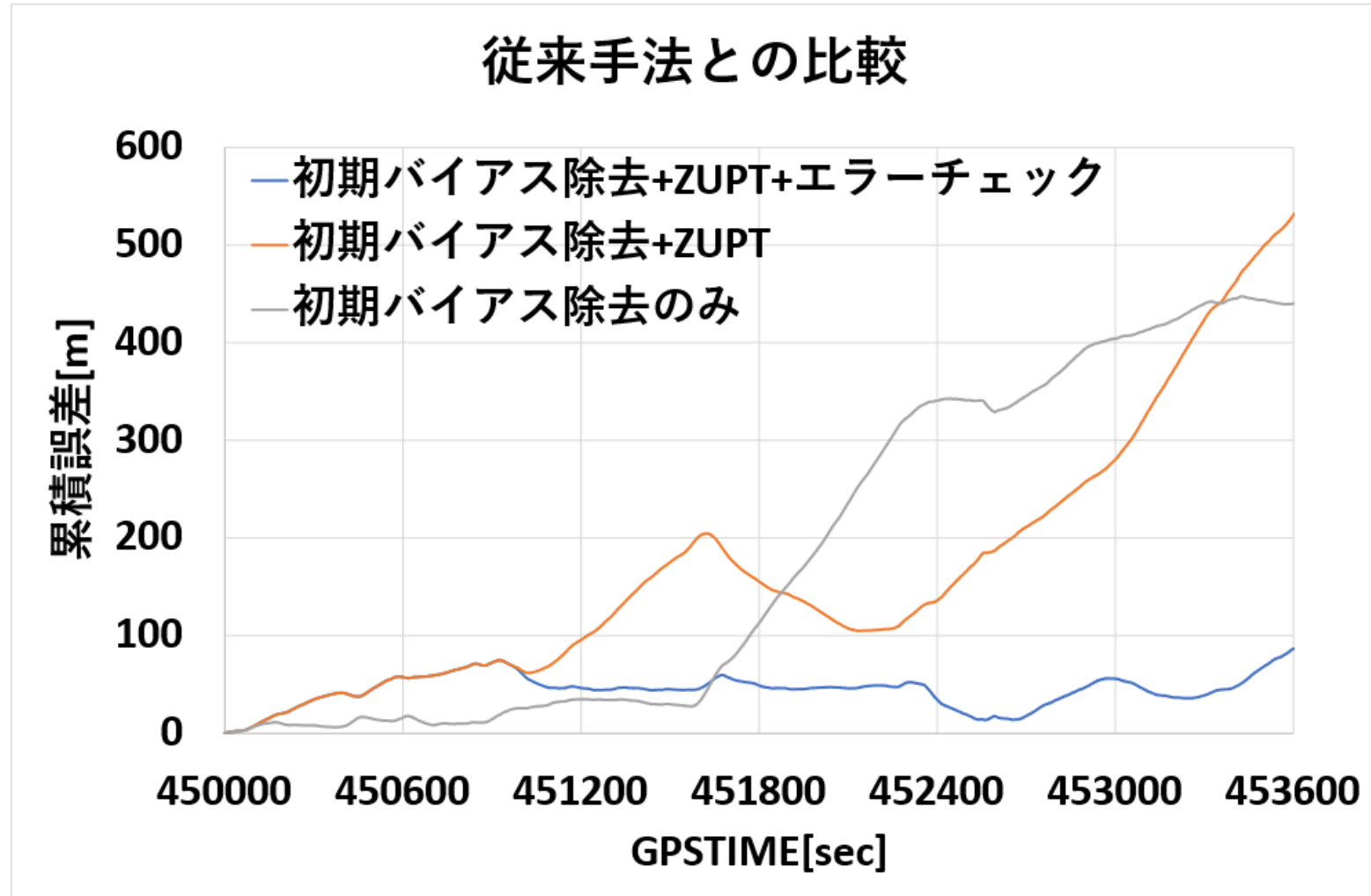
方位精度を向上させた場合の効果



バイアス補正効果の検証



従来手法との比較



角速度のバイアス除去のやり方次第で測位性能は大きく変わる

まとめ

	使用センサ	評価	特徴
速度推定精度	IMU	×	バイアスによって誤差が蓄積
	Sonar	△	原因不明の飛びが発生
	IMU/Sonar	○	加速度を利用することで飛びを除去
方位推定精度	IMU(ZUPT)	△	ZUPTで取り切れないバイアスが残存
位置推定精度	IMU	×	方位・速度のバイアス蓄積によって大きな誤差が発生
	IMU/Sonar	○	速度は良好だが、方位性能に問題あり

速度はSonar/IMUでも十分な精度が得られるが、方位性能については課題がある

今後の課題

- GNSSに依らない方位精度の向上
 1. ジャイロコンパスの使用を検討
 2. 変針時のスリップの推定
- 風潮流によるドリフトの影響を考慮
 1. より良い加速度計の利用
 1. 今回は速度の絶対値のみ使用
 2. DVLもY軸の精度は悪い
- ドップラソナー速度性能の向上
→より新しいドップラソナーの使用

ご清聴ありがとうございました