

修士論文発表会

GNSS/IMU/Odometerを用いた  
統合測位手法に関する研究

海運ロジスティクス専攻  
情報通信工学研究室

2155005 小松 大生

# 目次

---

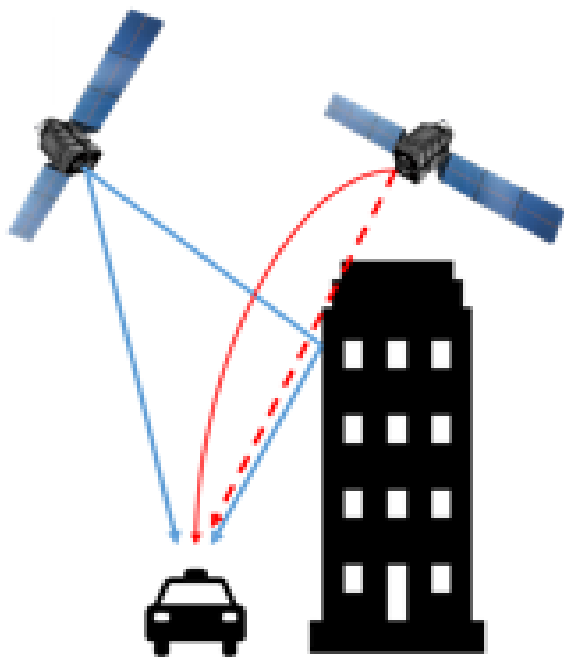
1. 研究の背景
2. IMUについて
  - 誤差要因
3. Odometerの利用
  - 方位推定
  - 水平位置推定
4. 統合手法について
  - 2つの統合手法の比較
5. 実行結果
  - 通常都市部
  - 高層ビル街
6. まとめ

# 1. 研究の背景

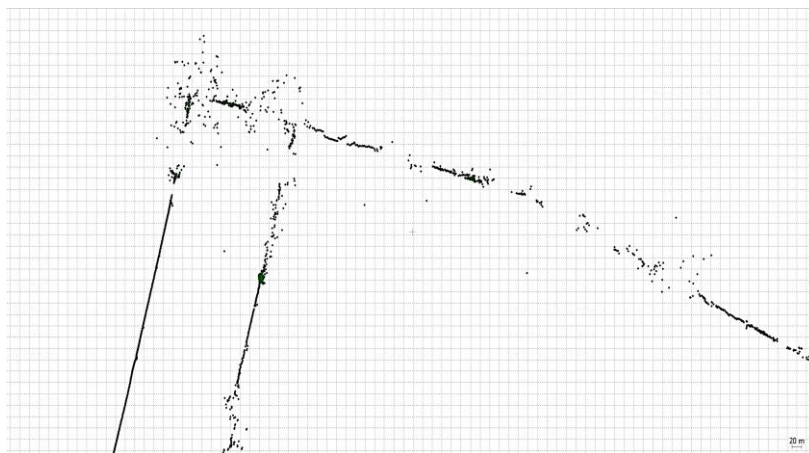
- 自動運転車や建設現場等、GNSSは位置情報の取得において重要な役割を担う
- しかし、高層ビル街のようなマルチパスや信号遮断が頻繁に起こる環境では、**GNSS単体の測位精度は低下**

## IMUとの統合

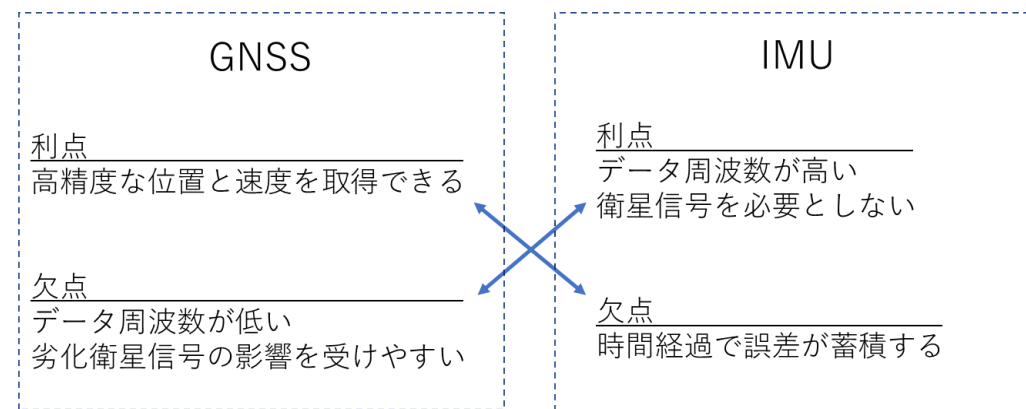
GNSSとIMUは、互いの欠点を補い合うことができる



マルチパスや信号遮断

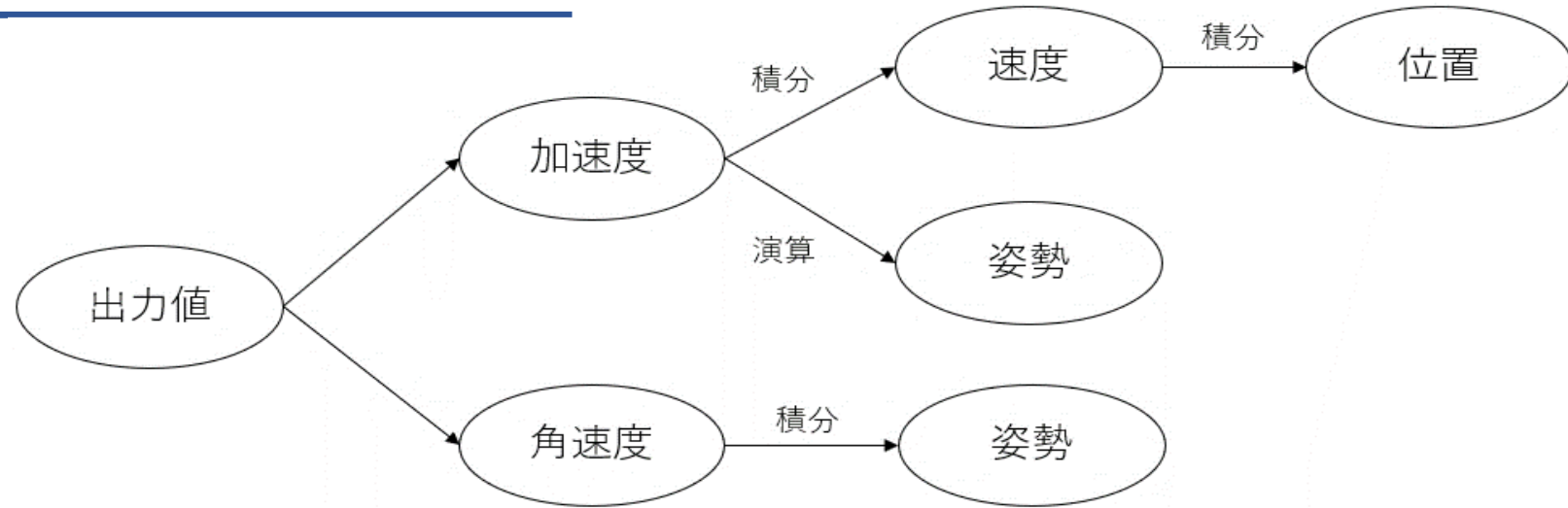


高層ビル街でGNSS測位を行った例

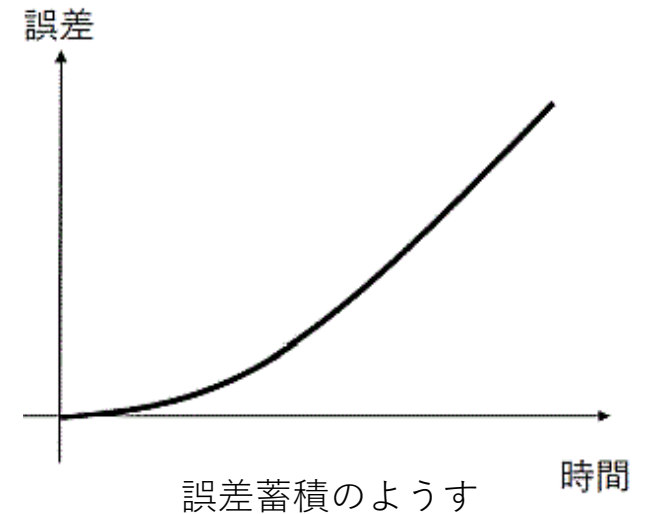
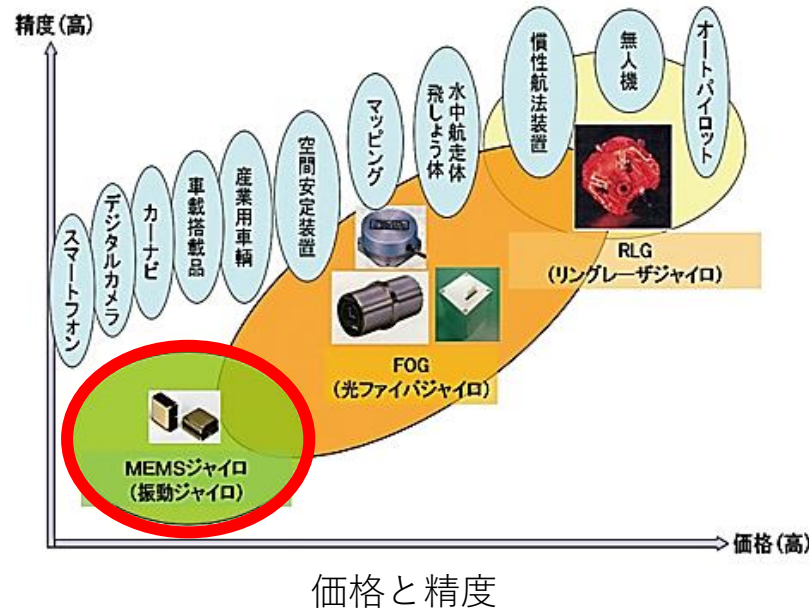


# 2. IMUについて

- 加速度や角速度をそれぞれXYZ軸で計測できる
- 今回使用するのはMEMSセンサ
- 時間積分で誤差が蓄積する



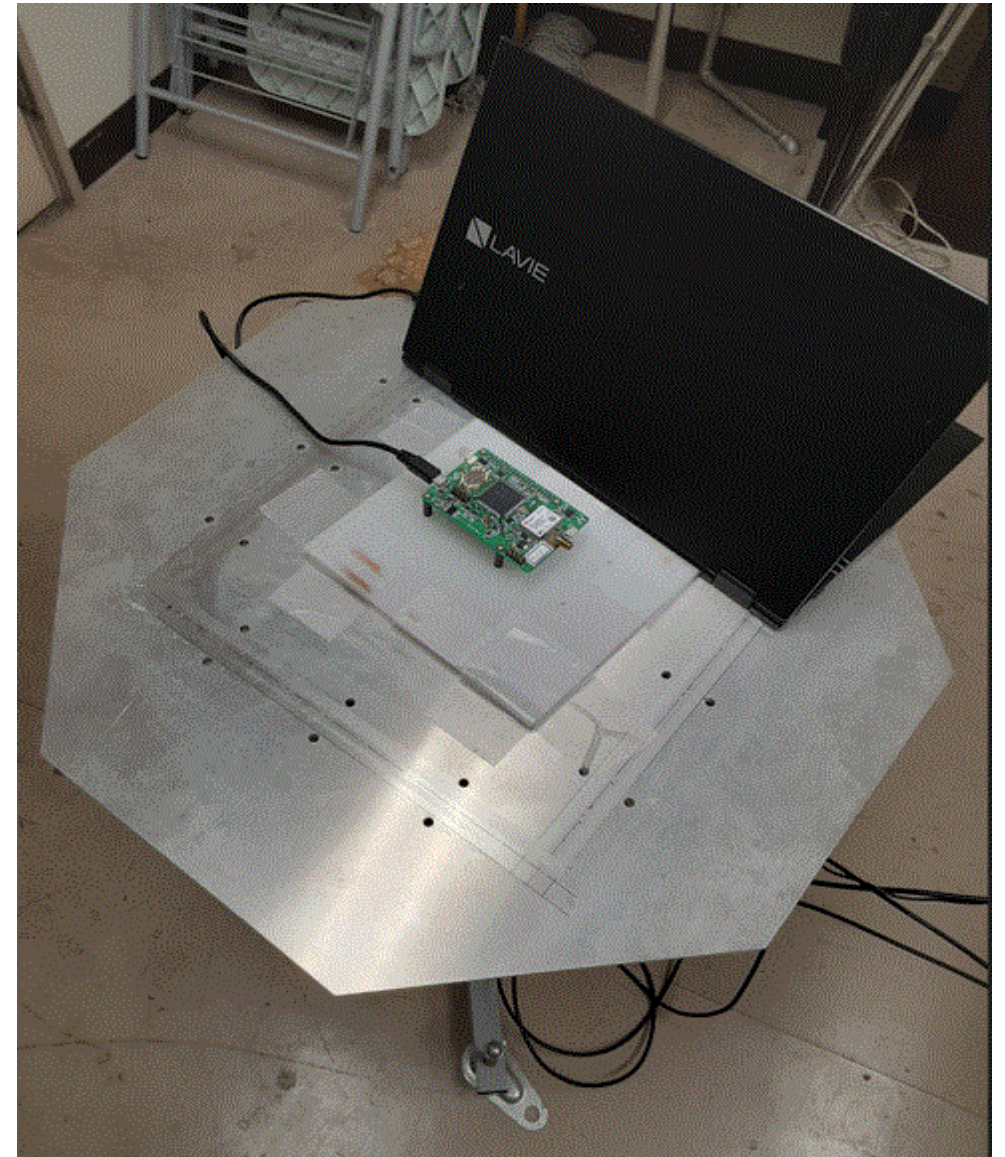
STMicro社製IMU



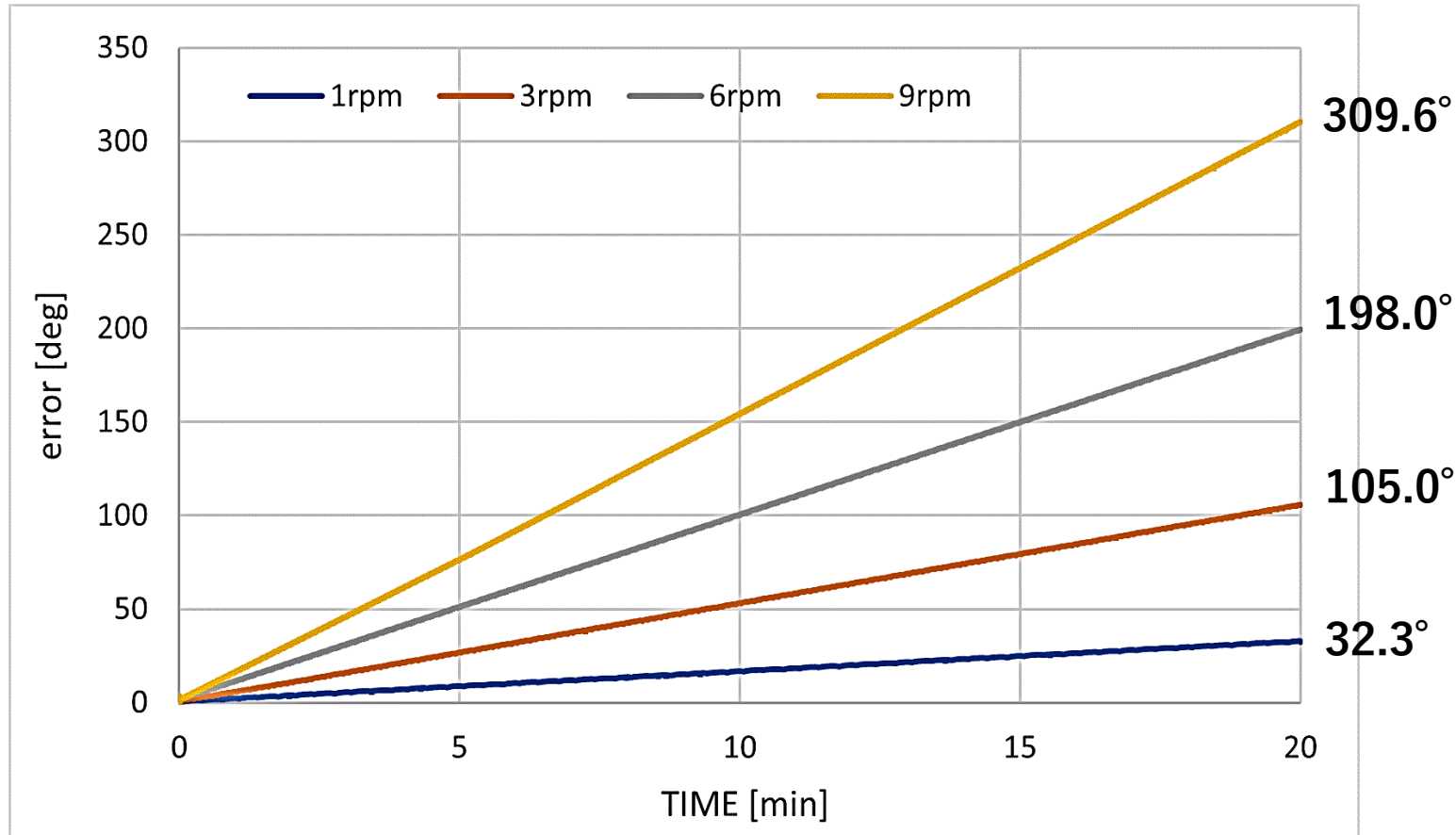
## 2. IMU誤差要因 – 旋回運動

- 回転台を使い、旋回によるジャイロの蓄積誤差を調べる
- 旋回速度は1(rpm), 3(rpm), 6(rpm), 9(rpm)で、それぞれ20分間

$$1(\text{rpm})=360(\text{deg}/\text{min})$$



## 2. IMU誤差要因 – 旋回運動



方位蓄積誤差

$$\langle 1(\text{rpm})=6(\text{deg/s}) \rangle$$

$$32.3(\text{deg})/20(\text{min})=\mathbf{0.027(\text{deg/s})}$$

$$\langle 3(\text{rpm})=18(\text{deg/s}) \rangle$$

$$105.0(\text{deg})/20(\text{min})=\mathbf{0.087(\text{deg/s})}$$

$$\langle 6(\text{rpm})=36(\text{deg/s}) \rangle$$

$$198.0(\text{deg})/20(\text{min})=\mathbf{0.165(\text{deg/s})}$$

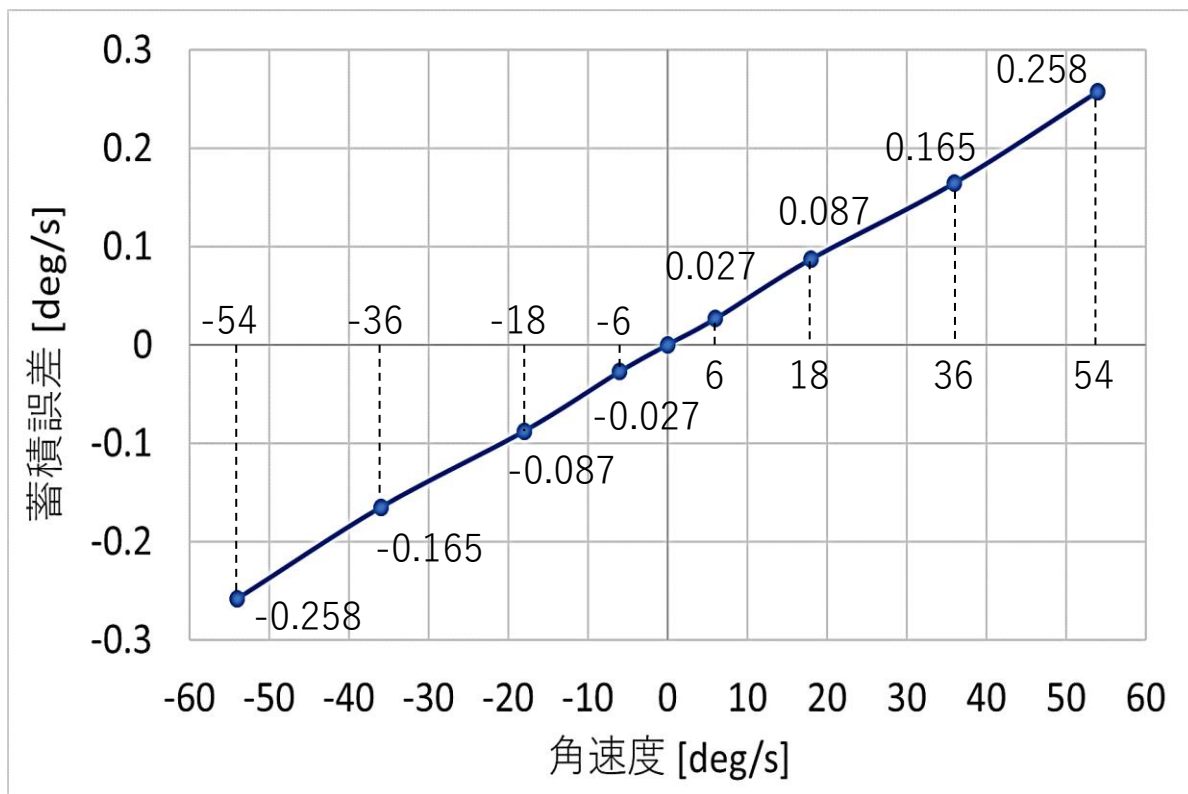
$$\langle 1(\text{rpm})=6(\text{deg/s}) \rangle$$

$$309.6(\text{deg})/20(\text{min})=\mathbf{0.258(\text{deg/s})}$$

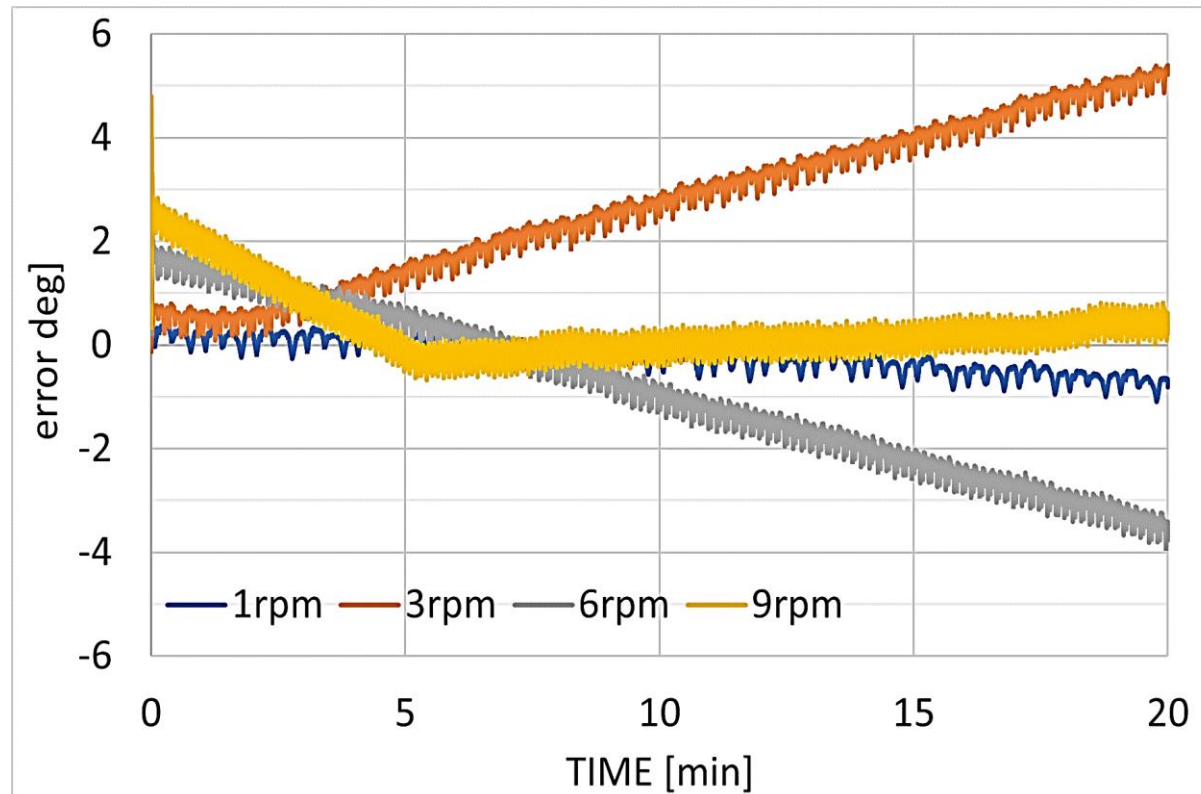
## 2. IMU誤差要因 – 旋回運動

$$y = (6E - 08)x^3 - (4E - 08)x^2 + (0.0046)x + (8E - 5)$$

旋回補正式の適用により、方位精度が大幅に向上した



角速度と蓄積誤差の関係

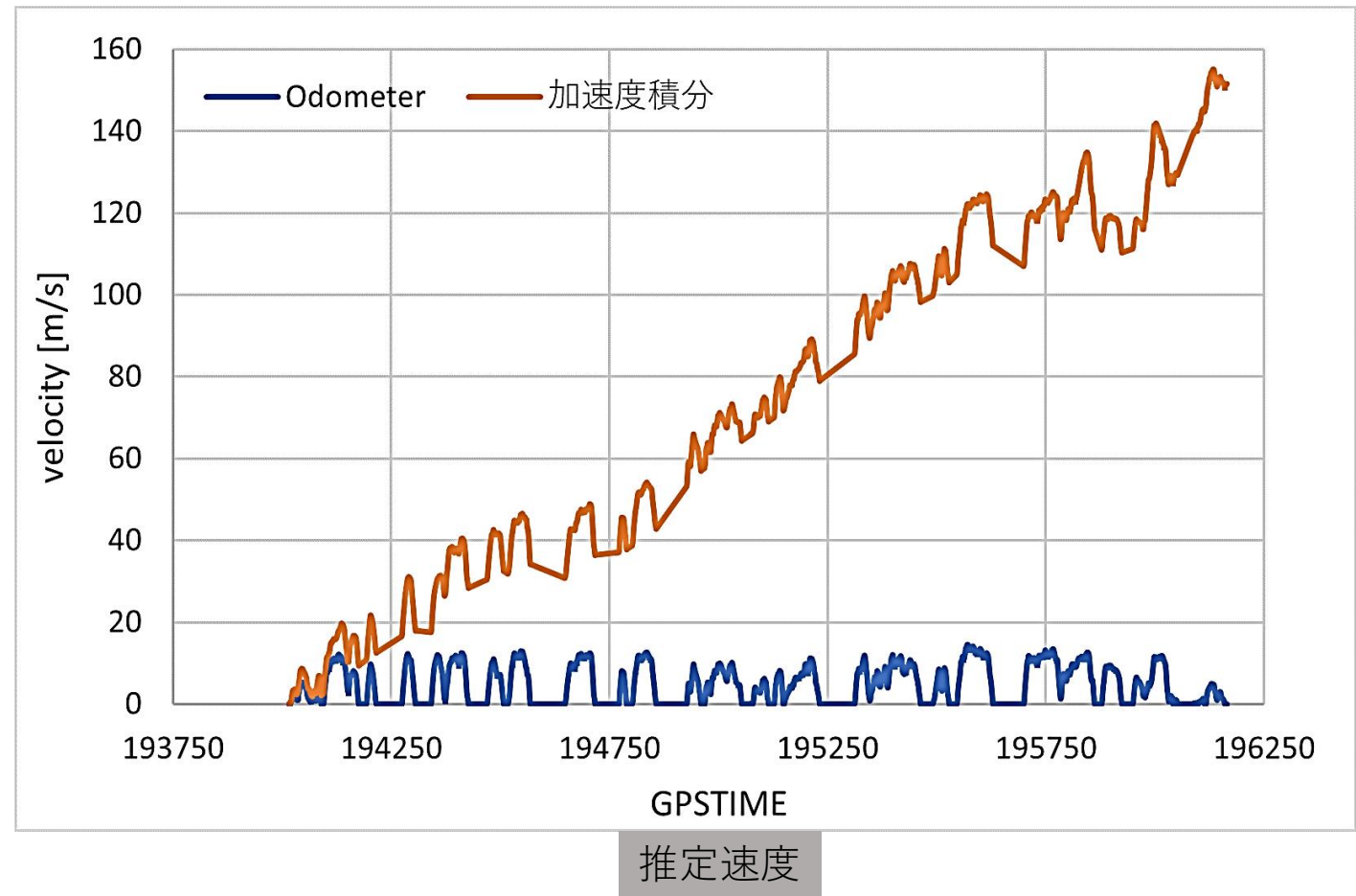


補正後の方位誤差

### 3. Odometerの利用



IMUの加速度は精度が低い



POSLVX125のOdometer（走行距離計）を用いて、車速を取得

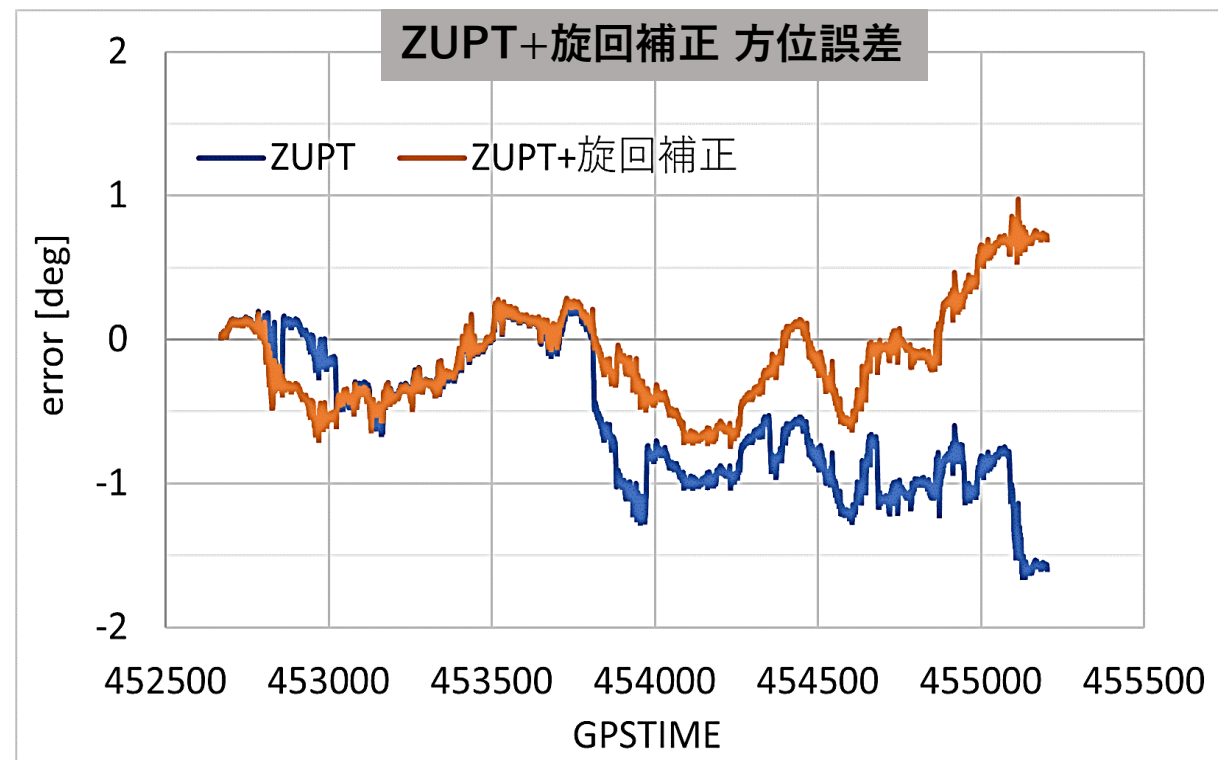
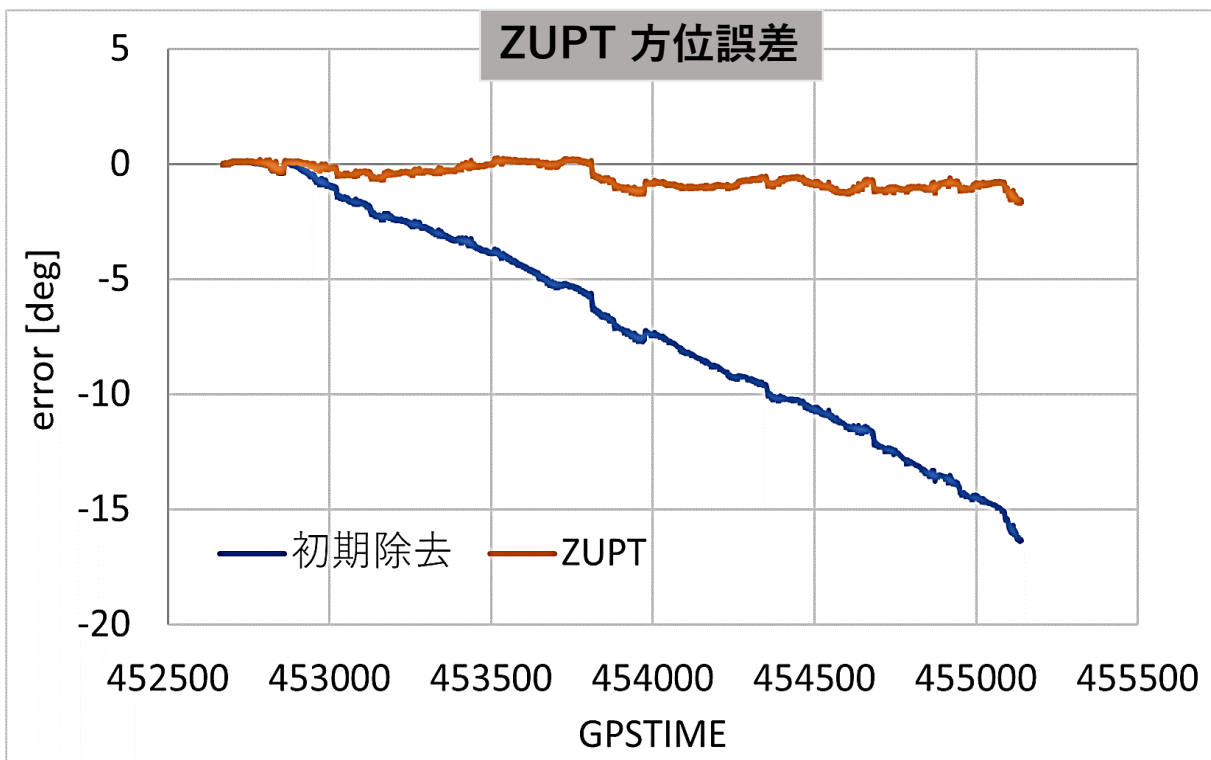


### 3. Odometerの利用 – 方位

ZUPT ... 角速度のバイアス成分を消去するためにおこなう処理

**車両の速度が0であれば、角速度の真値も0である**から、その時の角速度出力値はバイアスとして  
みなすことができる

ZUPT+旋回補正 ... ZUPT処理を行った後、旋回補正式を適用



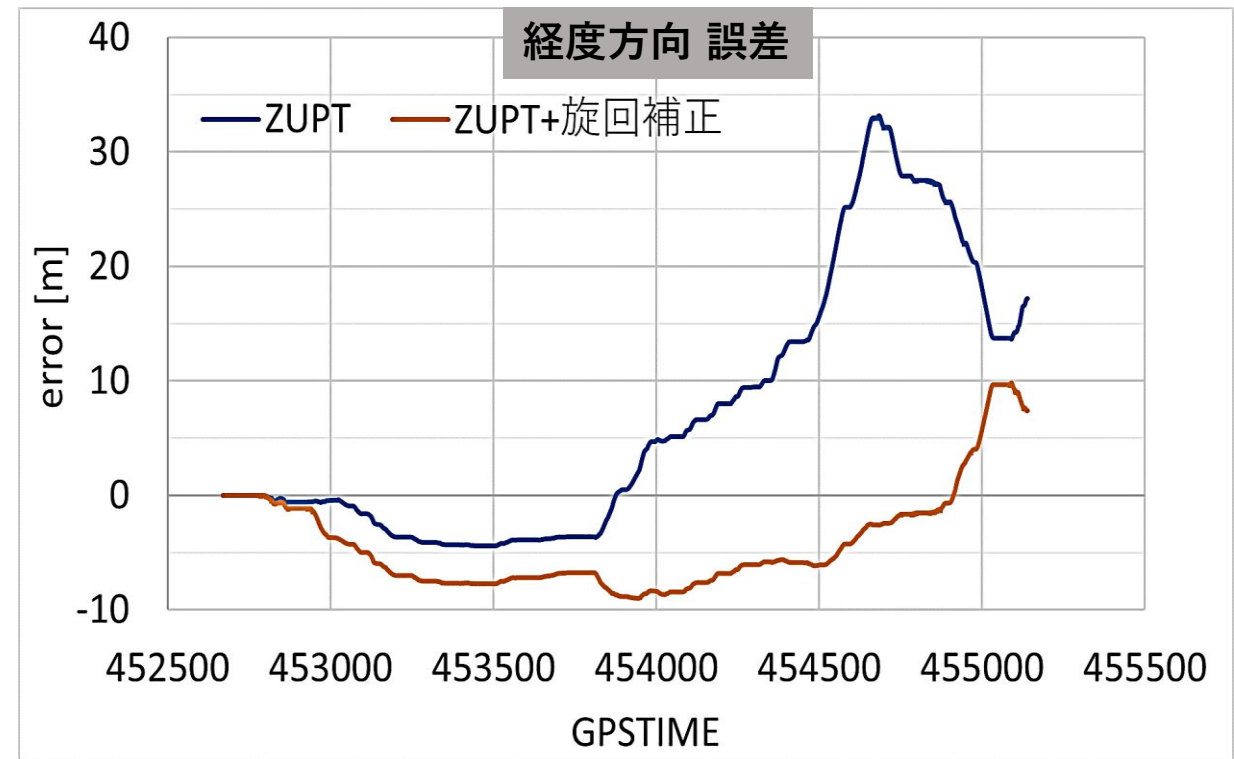
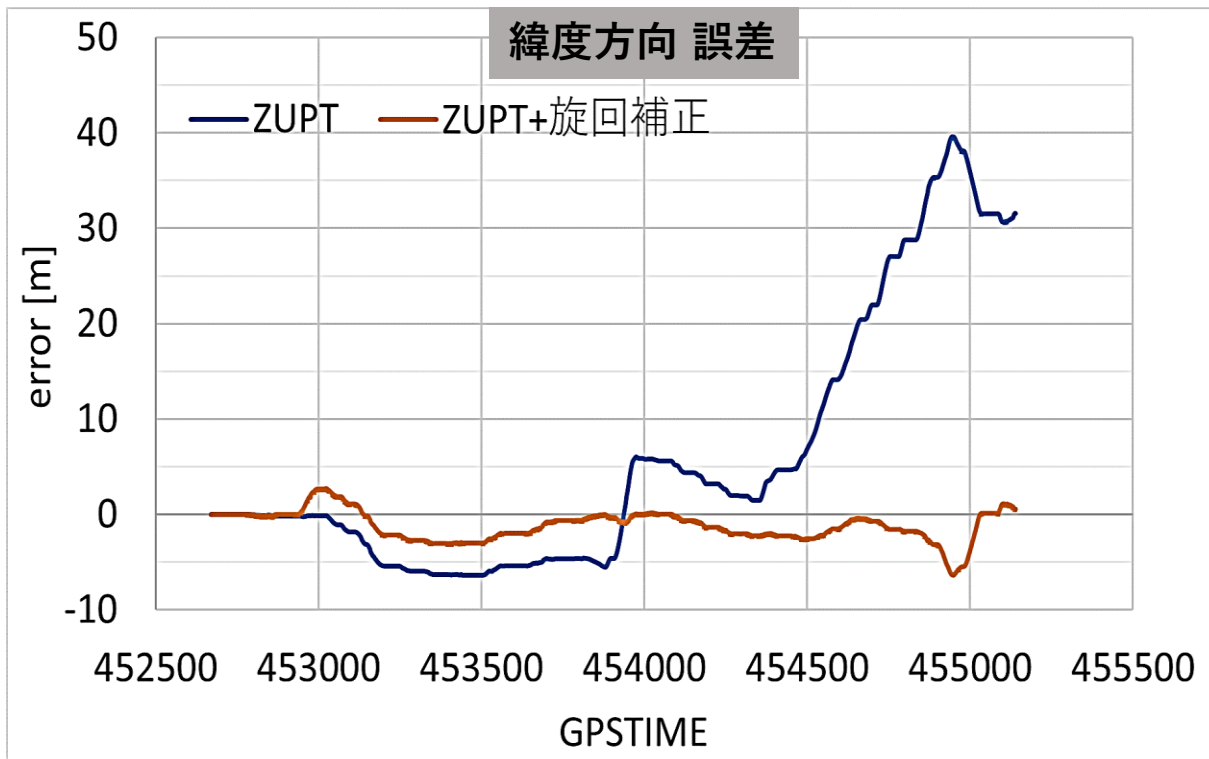
# 3. Odometerの利用 – 水平位置

IMU方位+Odometerによる水平位置推定

$$Lat_t = Lat_{t-1} + (V_t + V_{t-1})/2 * \Delta t * \cos(\psi)$$

$$Lon_t = Lon_{t-1} + (V_t + V_{t-1})/2 * \Delta t * \sin(\psi)$$

$Lat$  : 緯度    $Lon$  : 経度    $V$  : 車速    $\psi$  : 方位  
 $t$  : 時刻



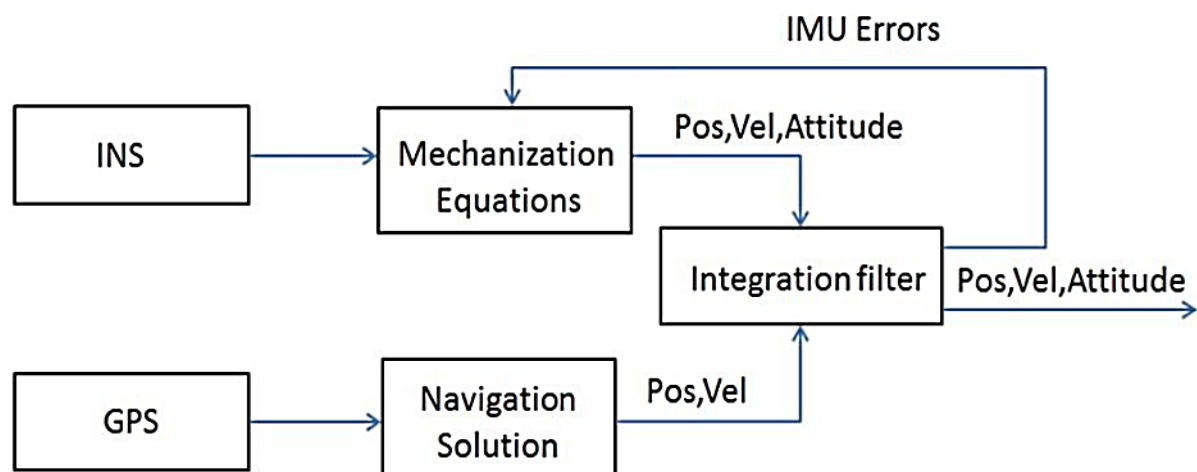
# 4. 統合手法について

## ルースカップリング (LC)

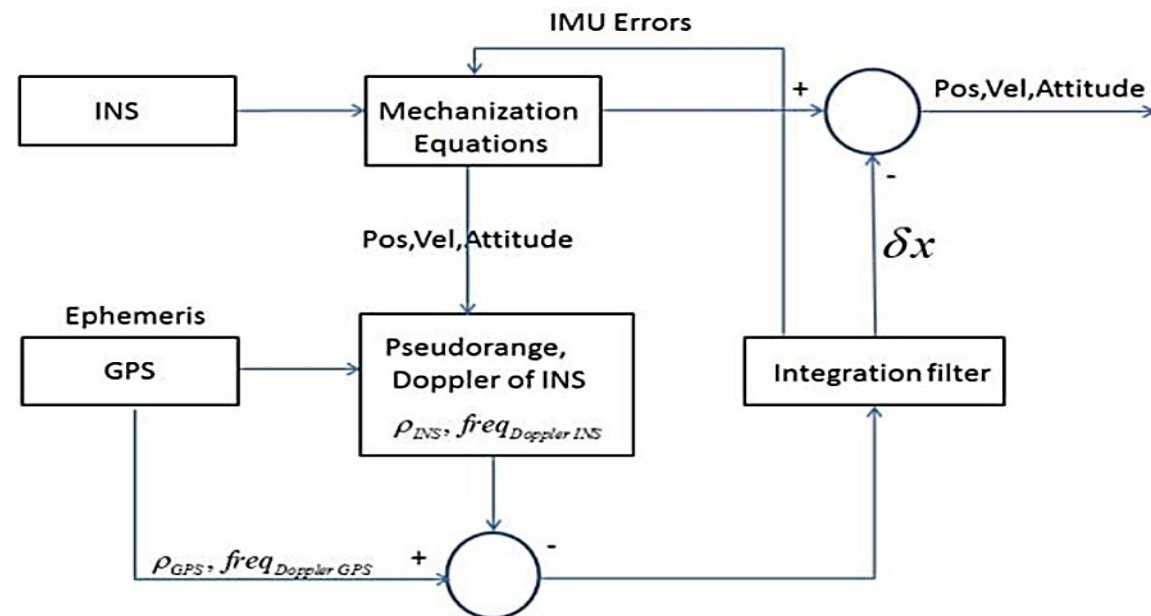
- GNSSとIMUそれぞれで算出した**航法解 (位置、速度、姿勢) の統合**を行う
- GNSS測位を行うために**衛星数が最低4機必要** → 高層ビル街では誤差の蓄積が大きい

## タイトカップリング (TC)

- GNSSとIMUを**観測値 (擬似距離、擬似距離変化率) の段階で統合**を行う
- **衛星数が少なくても実行可能** → 高層ビル街での利用に適している



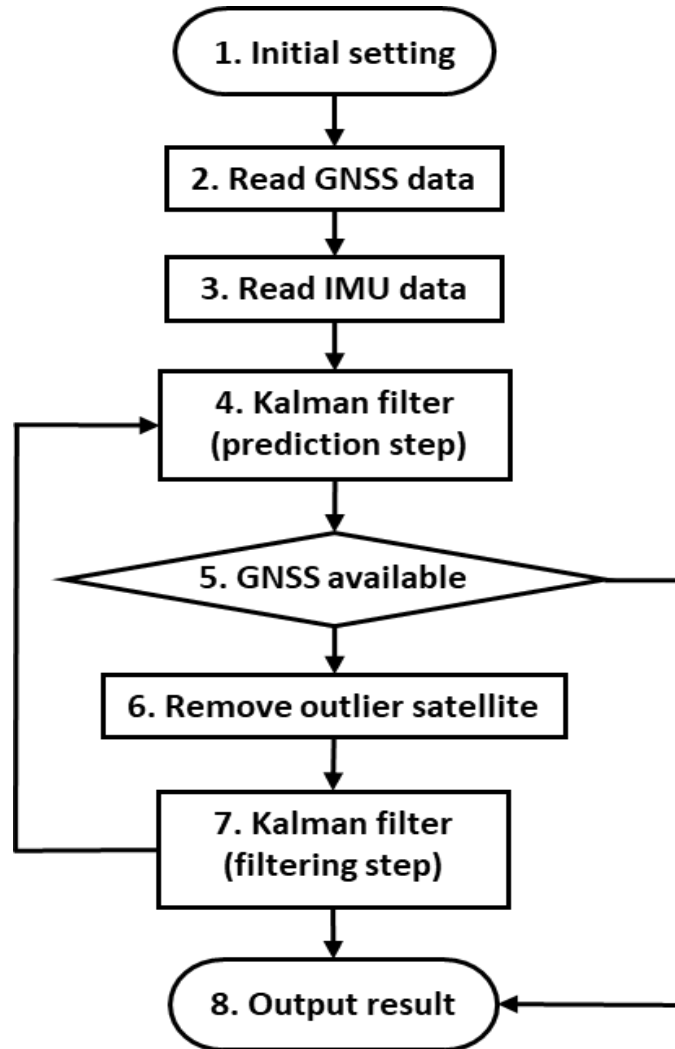
LC フロー



TC フロー

引用 : Loose and Tight GNSS/INS Integrations: Comparison of Performance Assessed in Real Urban Scenarios Sensors (Basel). 2017 Feb; 17(2): 255. Published online 2017 Jan 29. doi: 10.3390/s17020255

# 4. 統合手法について



TC プログラム

1. 初期値入力 (GPSTIME、位置、速度、姿勢)
2. GNSS観測値読み込み (擬似距離、擬似距離変化率、衛星位置、衛星速度、仰角、信号強度)
3. IMUデータ読み込み (加速度、角速度)
4. カルマンフィルタ予測ステップ (状態量と誤差共分散の事前推定)
5. 利用可能衛星があれば6、なければ8へ
6. 異常衛星の排除 (仰角、信号強度、クロック誤差の閾値より判断)
7. カルマンフィルタ更新ステップ (状態量と誤差共分散の事後推定)
8. 結果の出力 (位置、速度、姿勢)

# 4. 状態方程式

$$x_k = \varphi x_{k-1} + \mu_{k-1}$$

$$x = \underbrace{\begin{bmatrix} r_x & r_y & r_z \end{bmatrix}}_{\text{Pos}} \underbrace{\begin{bmatrix} v_x & v_y & v_z \end{bmatrix}}_{\text{Vel}} \underbrace{\begin{bmatrix} A_x & A_y & A_z \end{bmatrix}}_{\text{Att}} \underbrace{\begin{bmatrix} f_x & f_y & f_z \end{bmatrix}}_{\text{Acc}} \underbrace{\begin{bmatrix} w_x & w_y & w_z \end{bmatrix}}_{\text{Gyro}} \underbrace{\begin{bmatrix} t & t' \end{bmatrix}}_{\text{Clock}}$$

$$\varphi = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & dt * I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0 & 0 \\ 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & dt * I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0 & 0 \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & dt * I_{3 \times 3} & 0 & 0 \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0 & 0 \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & 0 & 0 \\ 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 1 & dt \\ 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$I_{3 \times 3}$  : 3 × 3 単位行列     $dt$  : 0.02[s]

SD : 標準偏差

$$w_{SD}^{noise} : 1.8e - 13 [rad/s]$$

$$f_{SD}^{noise} : 1e - 3 [m/s^2]$$

$$f_{SD}^{bias} : 1e - 5 [m/s^2]$$

$$w_{SD}^{bias} : 5.7e - 14 [rad/s]$$

$$t_{SD}^{drift} : 1 [m]$$

$$t'_{SD}^{drift} : 1 [m/s]$$

システム共分散行列  $Q$

$$= \text{diag} \left( dt * I_{1 \times 3} * w_{SD}^{noise}, dt * I_{1 \times 3} * f_{SD}^{noise}, I_{1 \times 3} * 0, dt * I_{1 \times 3} * f_{SD}^{bias}, dt * I_{1 \times 3} * w_{SD}^{noise}, t_{SD}^{drift}, t_{SD}^{drift} \right)$$

# 4. 観測方程式

LC

$$y_k = Hx_k + v_k$$

$$x = \underbrace{[r_x \ r_y \ r_z]}_{\text{Pos}} \ \underbrace{[v_x \ v_y \ v_z]}_{\text{Vel}} \ \underbrace{[A_x \ A_y \ A_z]}_{\text{Att}} \ \underbrace{[f_x \ f_y \ f_z]}_{\text{Acc}} \ \underbrace{[w_x \ w_y \ w_z]}_{\text{Gyro}}$$

$$H = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix}$$

観測共分散行列  $R$



$$R = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} * GNSS_{SD}^{pos2} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} * GNSS_{SD}^{vel2} \end{bmatrix}$$

$$GNSS_{SD}^{pos} = 0.03[m]$$

$$R = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} * GNSS_{SD}^{pos2} * 10000 & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} * GNSS_{SD}^{vel2} \end{bmatrix}$$

$$GNSS_{SD}^{vel} = 0.003[m/s]$$

$$R = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} * GNSS_{SD}^{pos2} * 1000000 & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} * GNSS_{SD}^{vel2} \end{bmatrix}$$

# 4. 観測方程式

TC

$$y_k = Hx_k + v_k$$

$$x = \underbrace{\begin{bmatrix} r_x & r_y & r_z \end{bmatrix}}_{\text{Pos}} \underbrace{\begin{bmatrix} v_x & v_y & v_z \end{bmatrix}}_{\text{Vel}} \underbrace{\begin{bmatrix} A_x & A_y & A_z \end{bmatrix}}_{\text{Att}} \underbrace{\begin{bmatrix} f_x & f_y & f_z \end{bmatrix}}_{\text{Acc}} \underbrace{\begin{bmatrix} w_x & w_y & w_z \end{bmatrix}}_{\text{Gyro}} \underbrace{\begin{bmatrix} t & t' \end{bmatrix}}_{\text{Clock}}$$

$$H = \begin{bmatrix} H_{p,k} & 0_{N_{\text{sat}} \times 3} & 0_{N_{\text{sat}} \times 3} & 0_{N_{\text{sat}} \times 3} & 0_{N_{\text{sat}} \times 3} & \mathbf{1}_{N_{\text{sat}} \times 1} & 0_{N_{\text{sat}} \times 1} \\ 0_{N_{\text{sat}} \times 3} & H_{p,k} & 0_{N_{\text{sat}} \times 3} & 0_{N_{\text{sat}} \times 3} & 0_{N_{\text{sat}} \times 3} & 0_{N_{\text{sat}} \times 1} & \mathbf{1}_{N_{\text{sat}} \times 1} \end{bmatrix} \quad N_{\text{sat}} : \text{利用衛星数}$$

$$H_{p,k} = \begin{bmatrix} \frac{\check{x} - x_1}{d_1} & \frac{\check{y} - y_1}{d_1} & \frac{\check{z} - z_1}{d_1} \\ \frac{\check{x} - x_2}{d_2} & \frac{\check{y} - y_2}{d_2} & \frac{\check{z} - z_2}{d_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\check{x} - x_{N_{\text{sat}}}}{d_{N_{\text{sat}}}} & \frac{\check{y} - y_{N_{\text{sat}}}}{d_{N_{\text{sat}}}} & \frac{\check{z} - z_{N_{\text{sat}}}}{d_{N_{\text{sat}}}} \end{bmatrix}$$

$x_j, y_j, z_j$  : 衛星位置

$\check{x}, \check{y}, \check{z}$  : 予測アンテナ位置

$d_j$  : 予測擬似距離

# 4. 観測方程式

TC

観測共分散行列  $R$

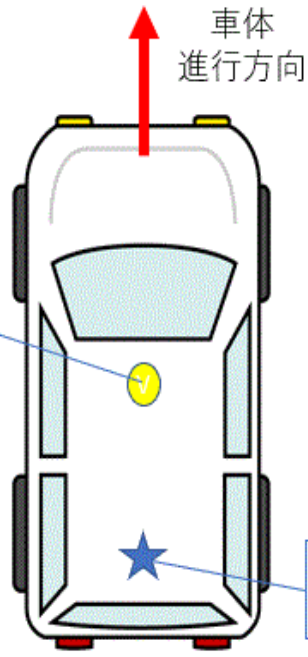
$$= \text{diag} \left( r_{SD,1}^{\text{noise}}, r_{SD,2}^{\text{noise}}, \dots, r_{SD,Nsat}^{\text{noise}}, r'_{SD,1}{}^{\text{noise}}, r'_{SD,2}{}^{\text{noise}}, \dots, r'_{SD,Nsat}{}^{\text{noise}} \right)$$

$r$  : 擬似距離     $r'$  : 擬似距離変化率     $r_{SD}^{\text{noise}} : 1[m]$      $r'_{SD}{}^{\text{noise}} : 6e - 3[m/s]$



# 5. 通常都市部 概要

2022年12月28日 25分程度



## 使用機器

- u-blox GNSSアンテナ ZED-F9P
- STMicro IMU
- Trimble GNSSアンテナ
- POSLVX125 (真値)

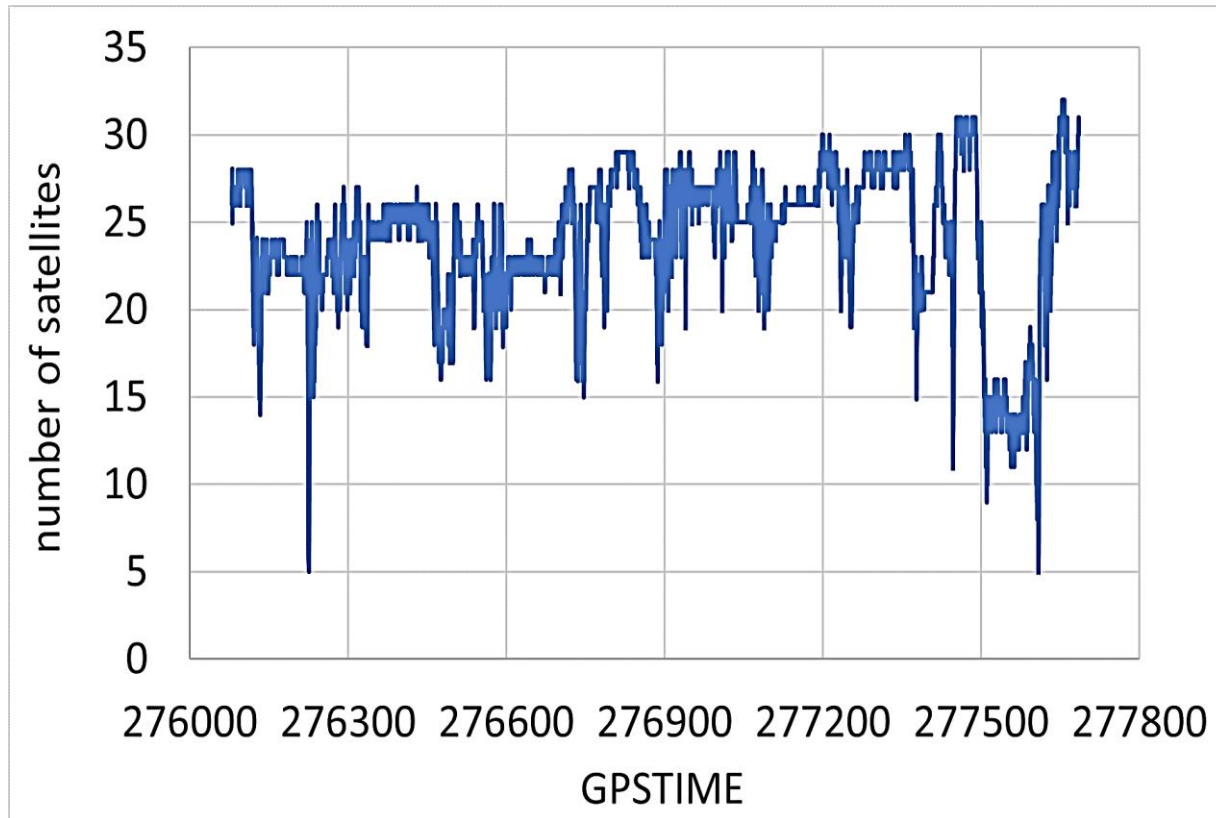


走行経路

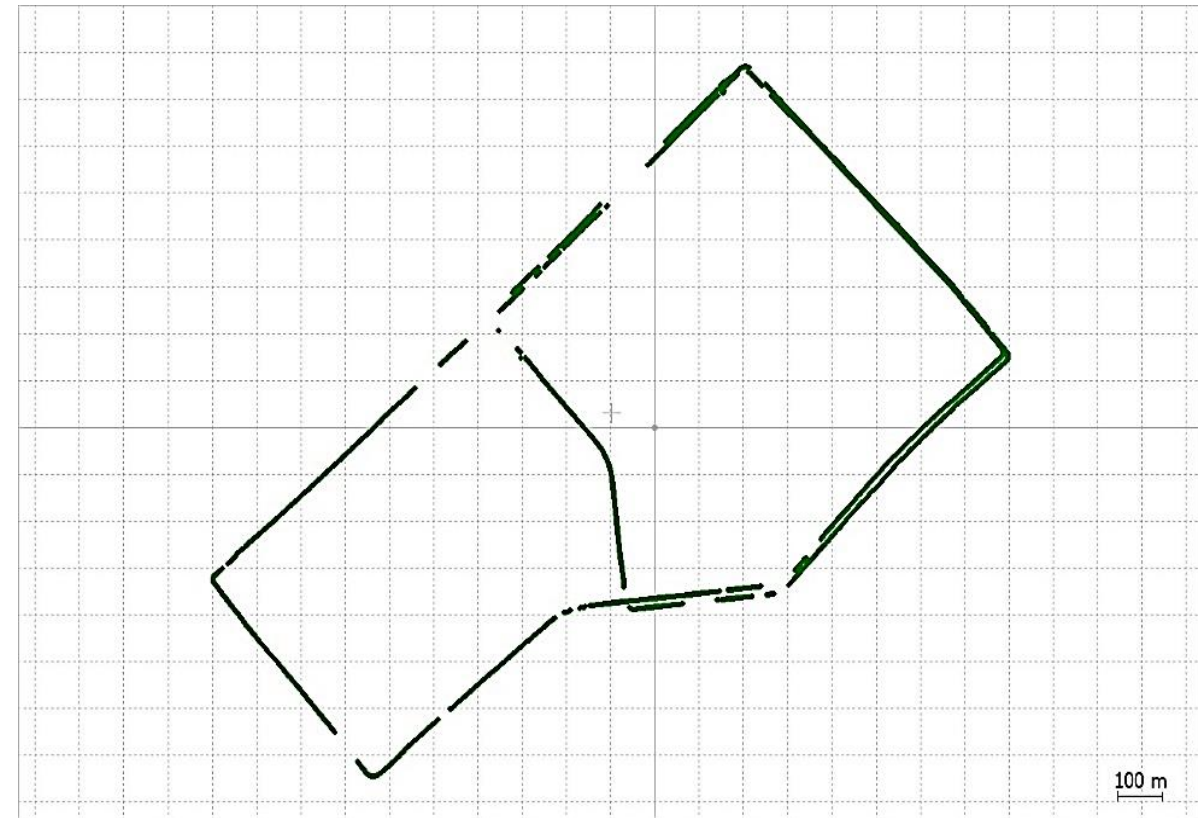
# 5. GNSS測位結果

利用可能衛星が多い区間が多く、FIX率も高い

FIX率 83%



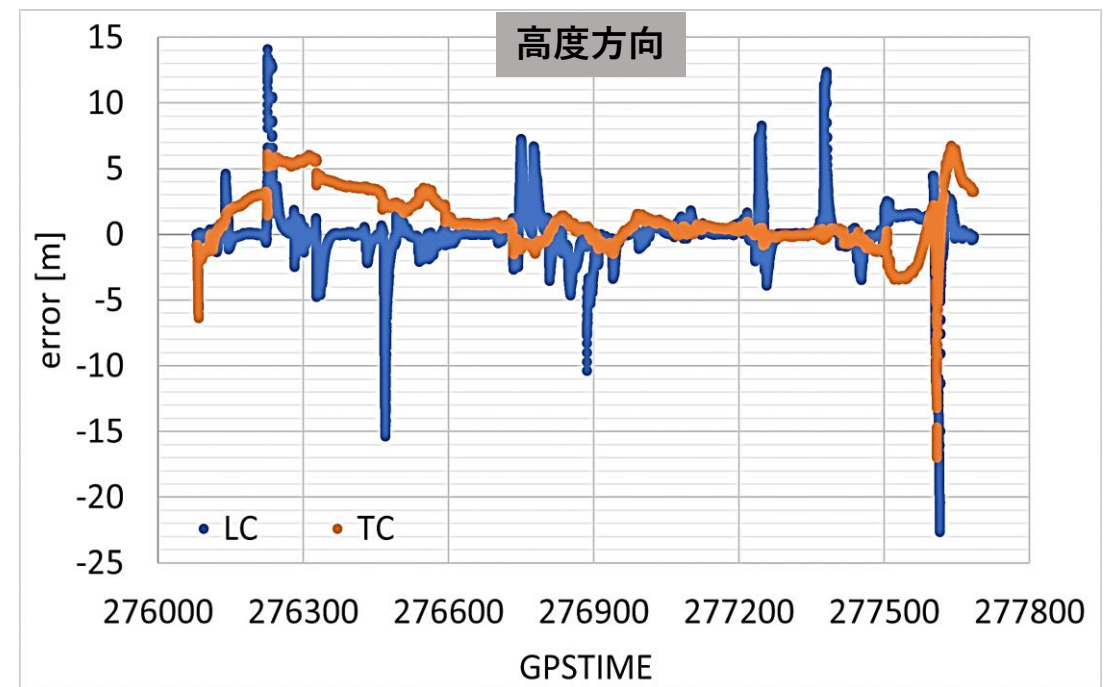
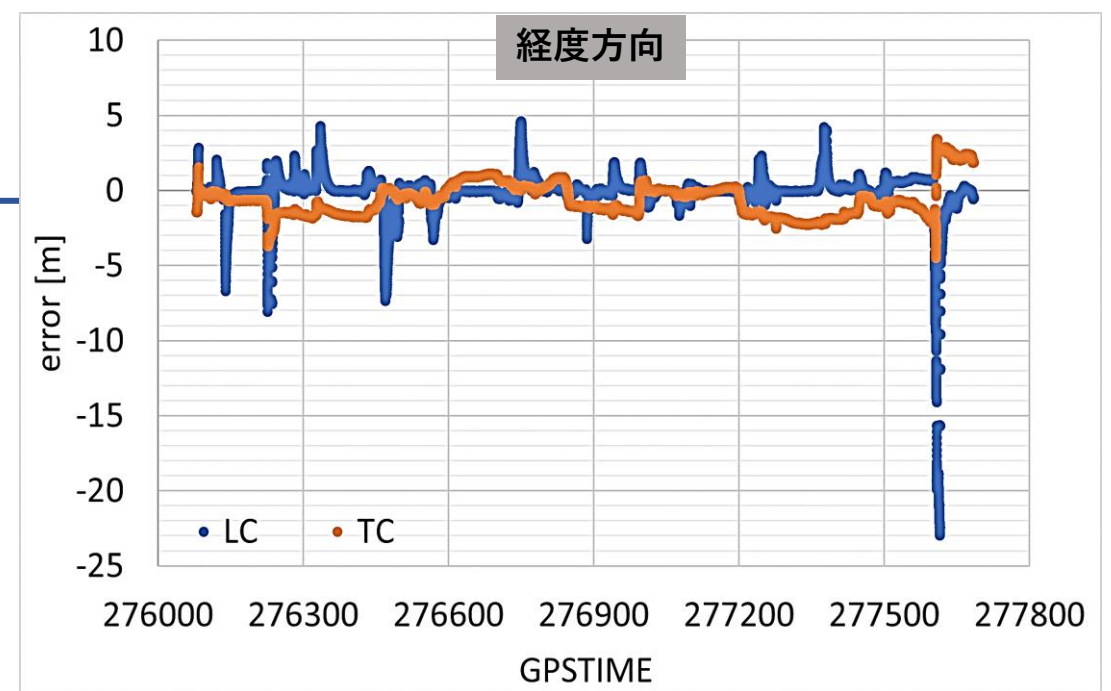
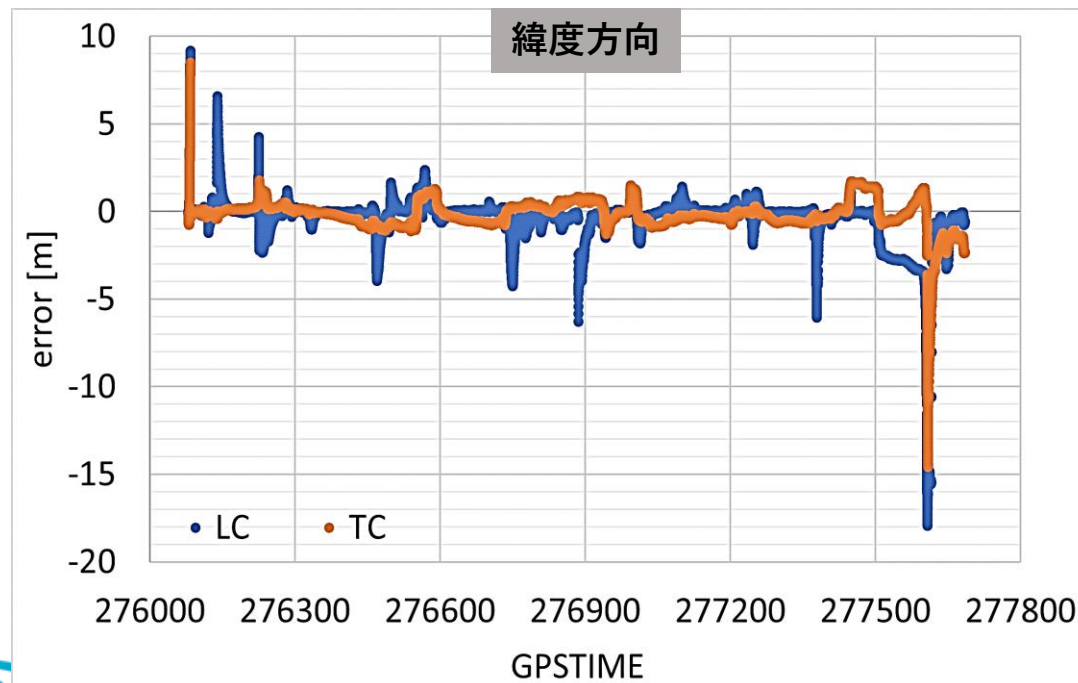
利用衛星数



RTK-GNSS測位 FIX解

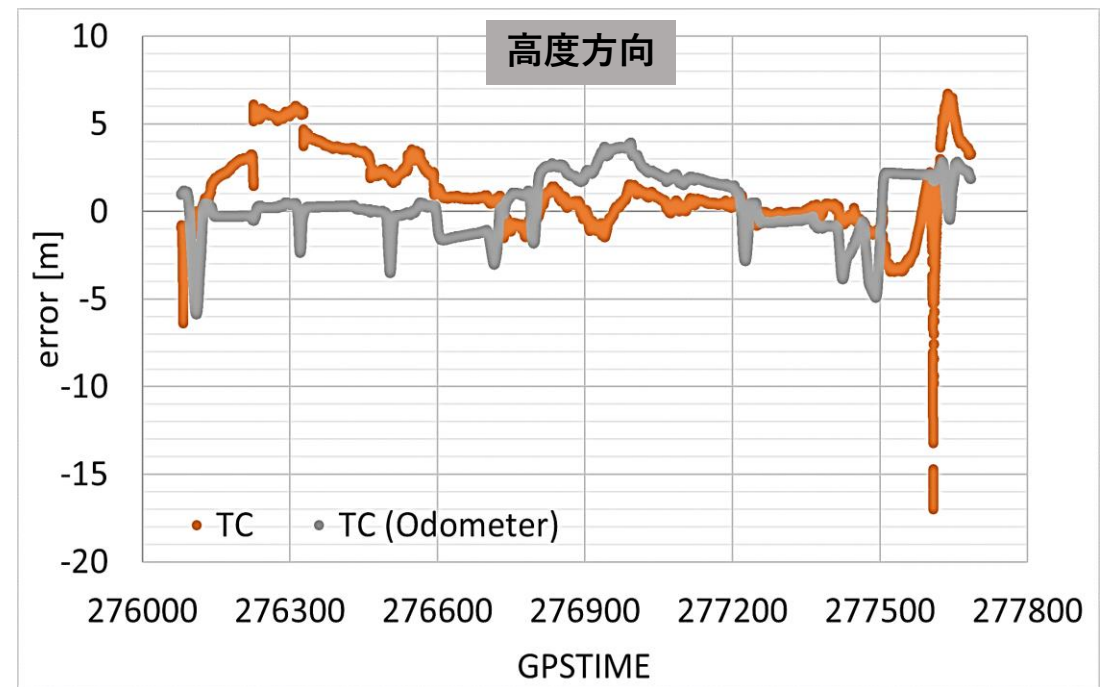
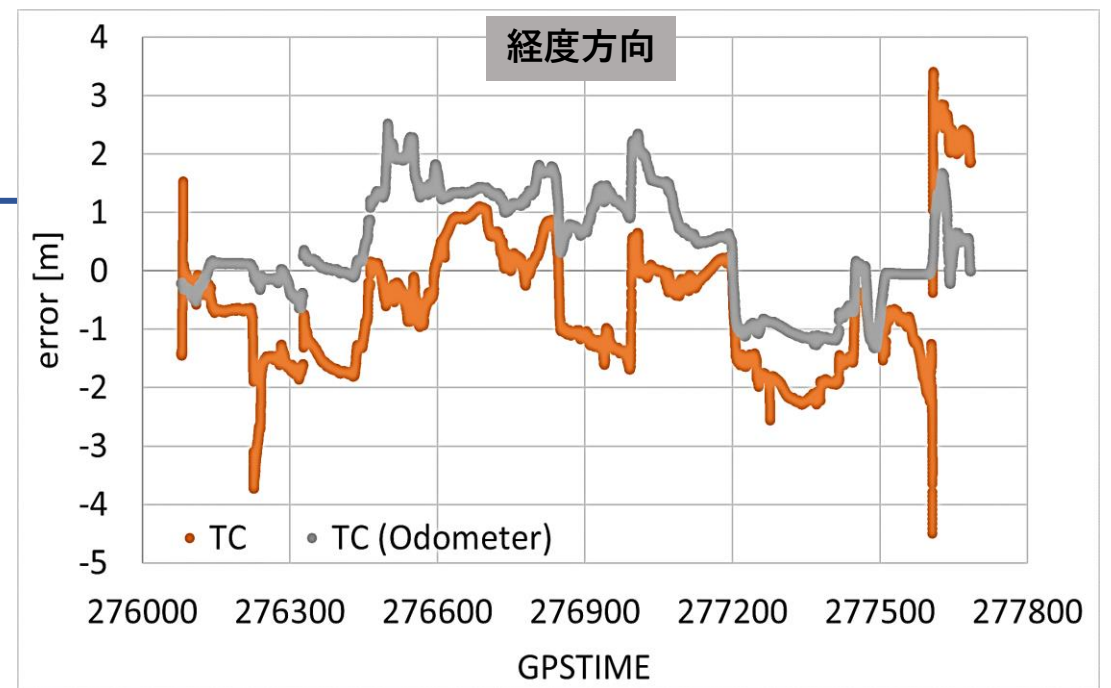
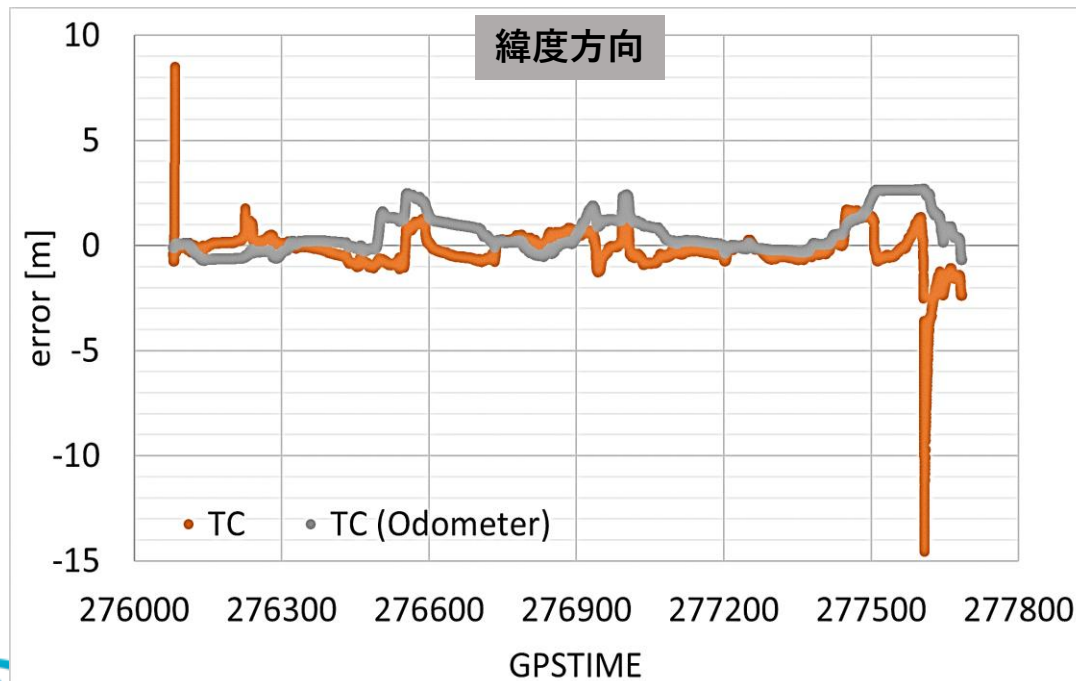
# 5. LCとTCの比較

- ✓ オープンスカイ区間では、両者の精度差は小さい
- ✓ FIX解を得られない区間では、TCの方が蓄積誤差が小さい



# 5. TC (Odometerの利用)

- ✓ オープンスカイ区間では、両者の精度差は小さい
- ✓ 利用可能衛星の少ない区間でも、Speedを利用することで誤差の蓄積を抑えられる

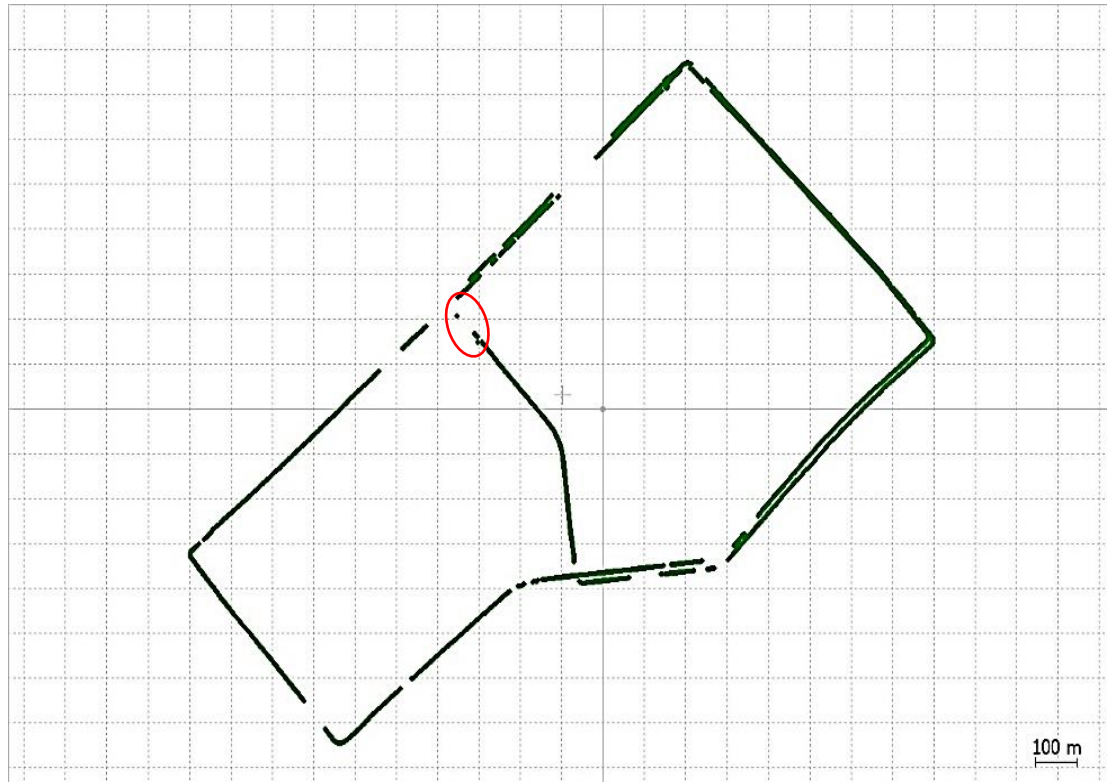


# 5. ミスFIXについて

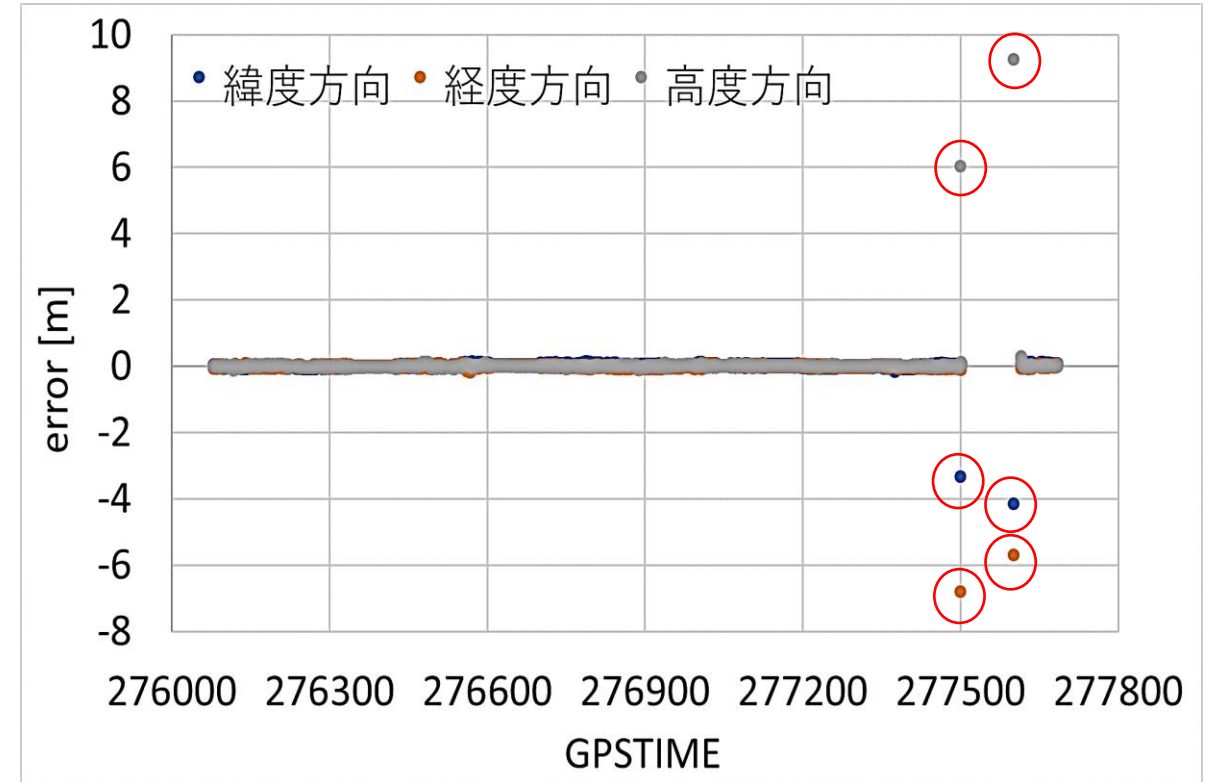
利用可能衛星数が少ない環境では、RTK測位のFIX解に大きな誤差が含まれることがある

## ミスFIX

水平位置による除去 高度による除去



RTK測位 FIX解



FIX解の誤差

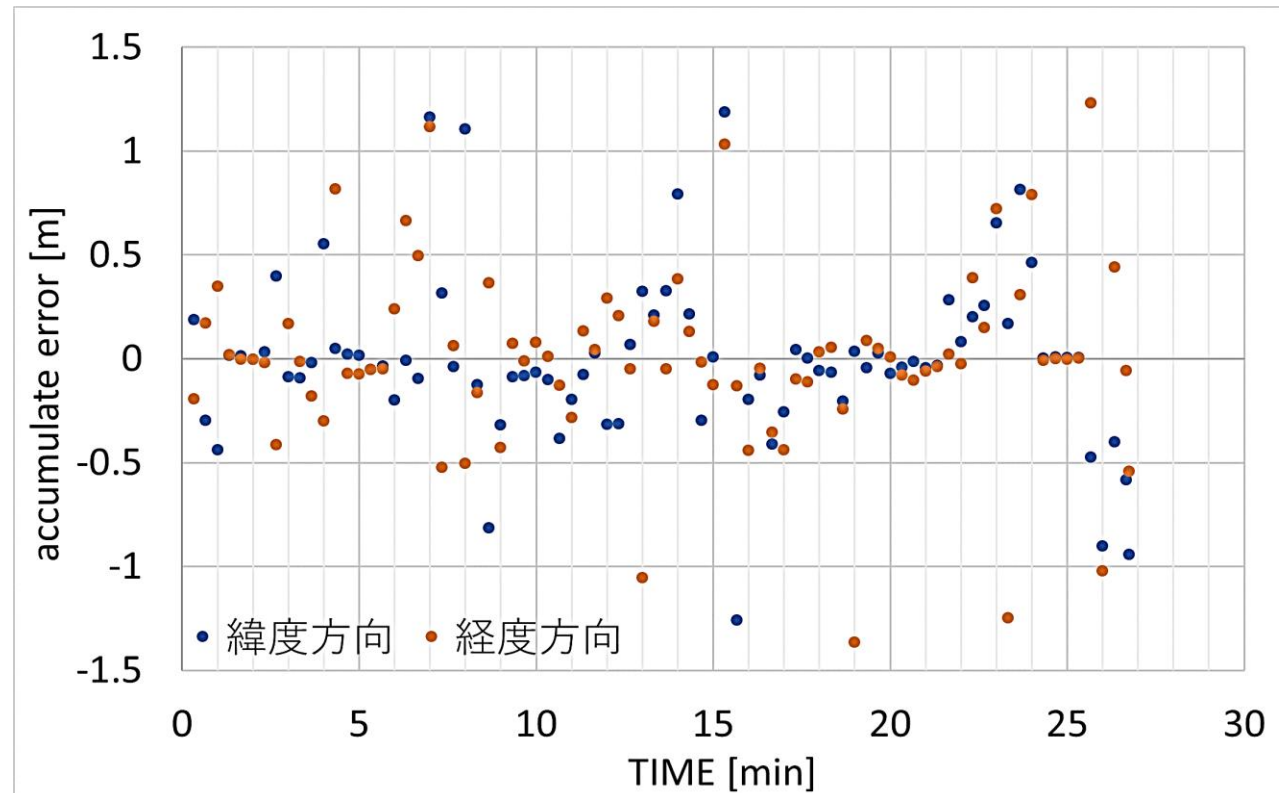
# 5. 水平位置による除去

RTK-FIX解を連続して得られない時間は、最大で20秒程度

Odometer利用の場合の測位結果について  
走行時間26分を20秒ごとに区切り、**20秒間の蓄積誤差**を調べる



以下プロット図より、  
更新ステップで求めた水平位置とRTKの水平位置を比較し、  
**1.5[m]以上**の差分がある時、ミスFIXと判断する



20秒間の蓄積誤差

# 5. 高度による除去

## 気圧センサの利用

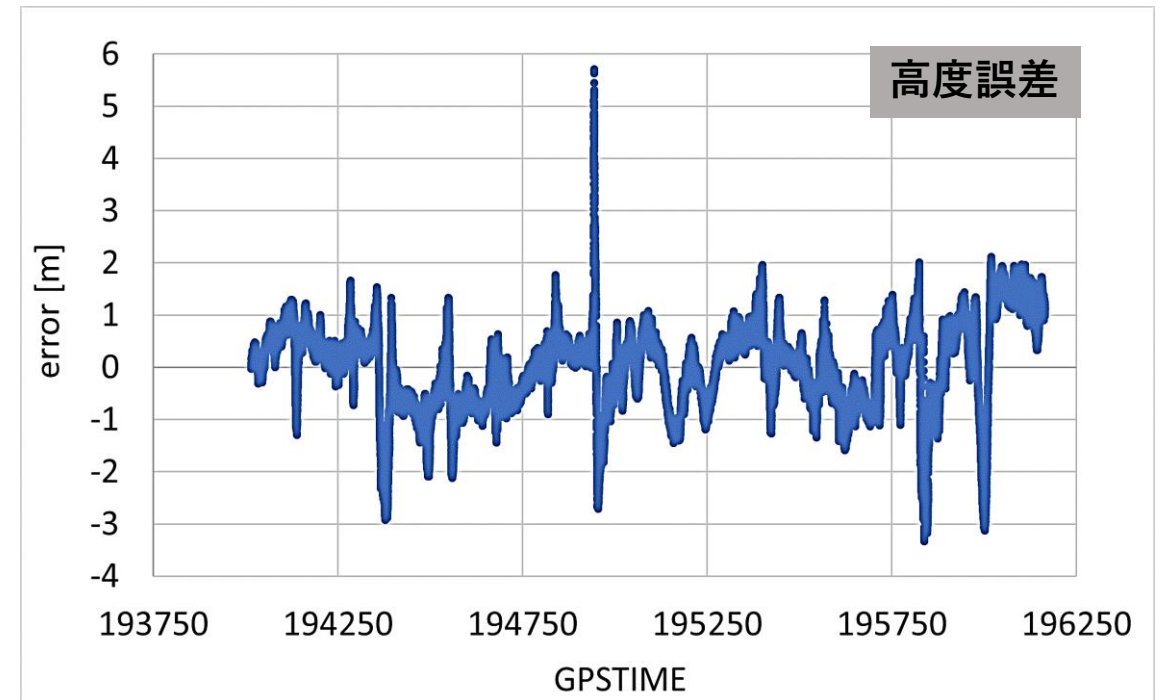
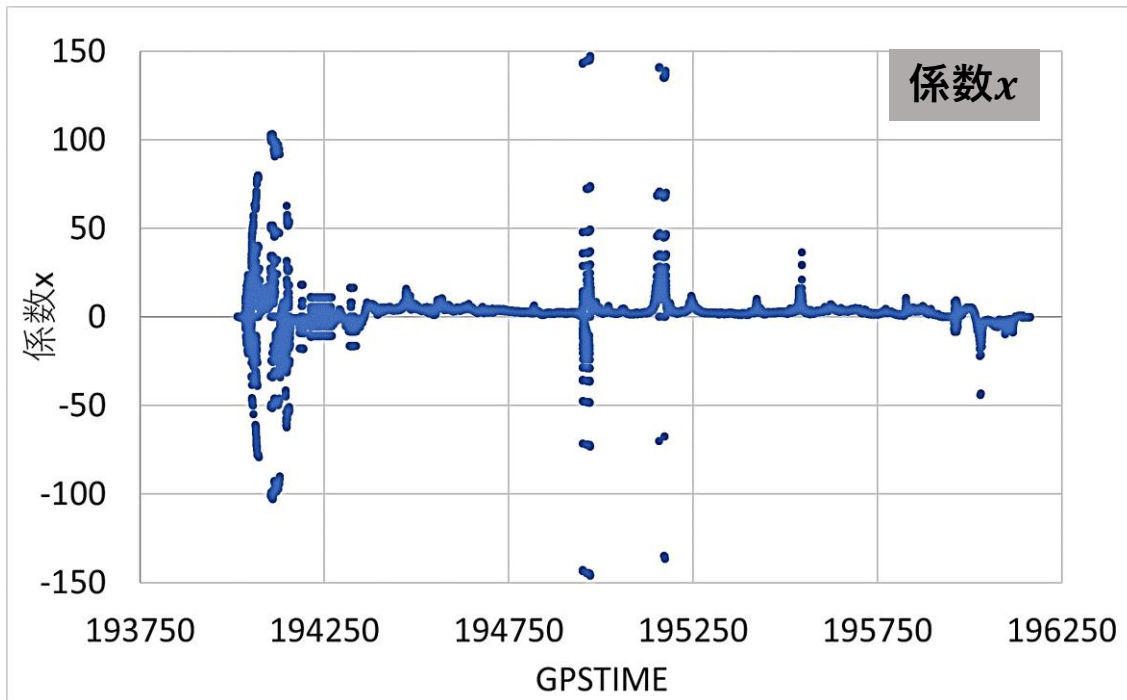
気圧の変動による高度の変動を調べる

$ALT(ref)$  : Altitude from POSLV  
 $ALT(0)$  : Altitude from RTK Fix  
 $ALT(obs)$  : Altitude estimation

$P(0)$  : Pressure at start time  
 $P(obs)$  : Pressure from Barometer

$$ALT(ref) = ALT(0) + x \cdot (P(0) - P(obs))$$

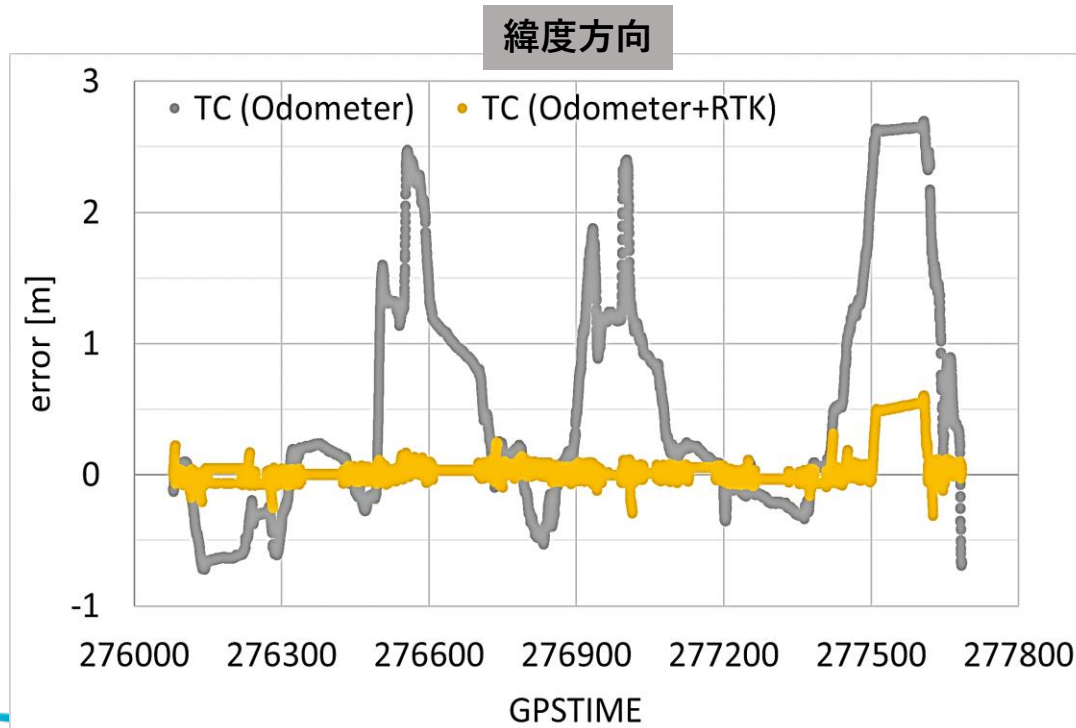
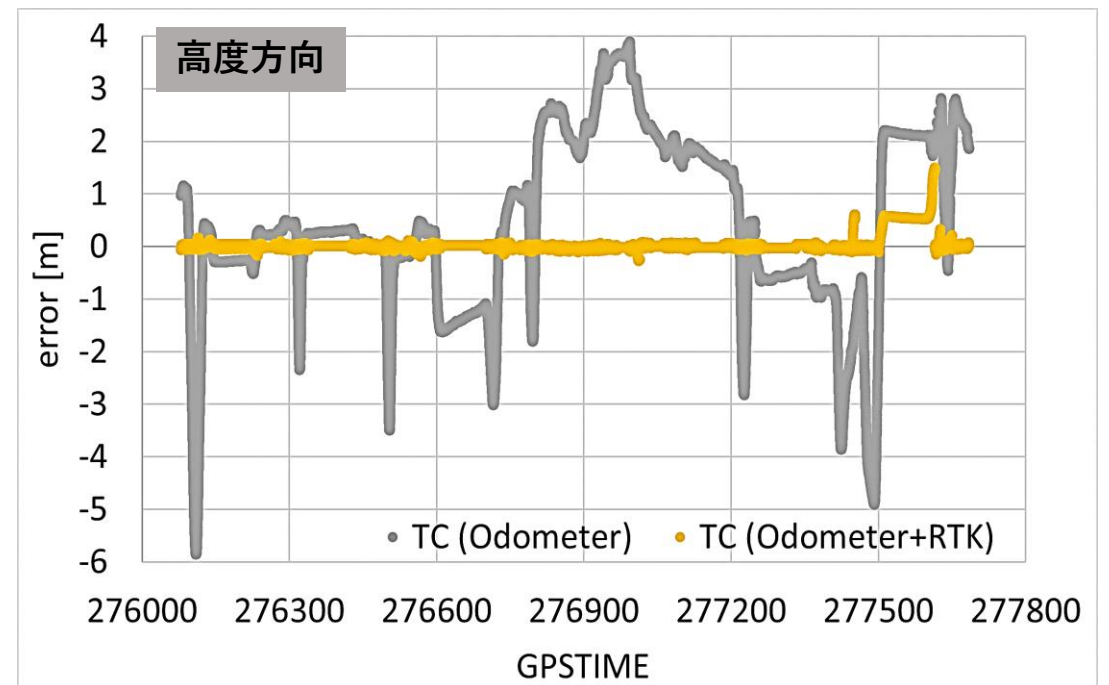
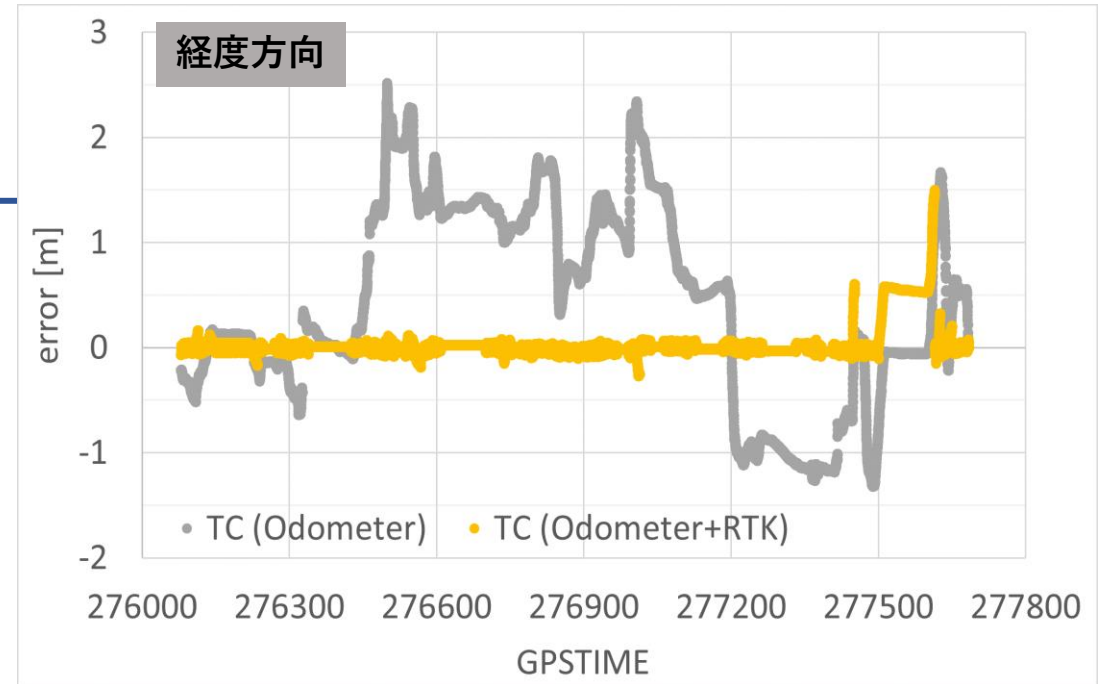
$$ALT(obs) = ALT(0) + 2.6 \cdot (P(0) - P(obs))$$



気圧センサから求めた高度とRTKの高度を比較し、**3[m]以上**の差分があるとき、ミスFIXと判断する

# 5. TC (Odometer + RTK)

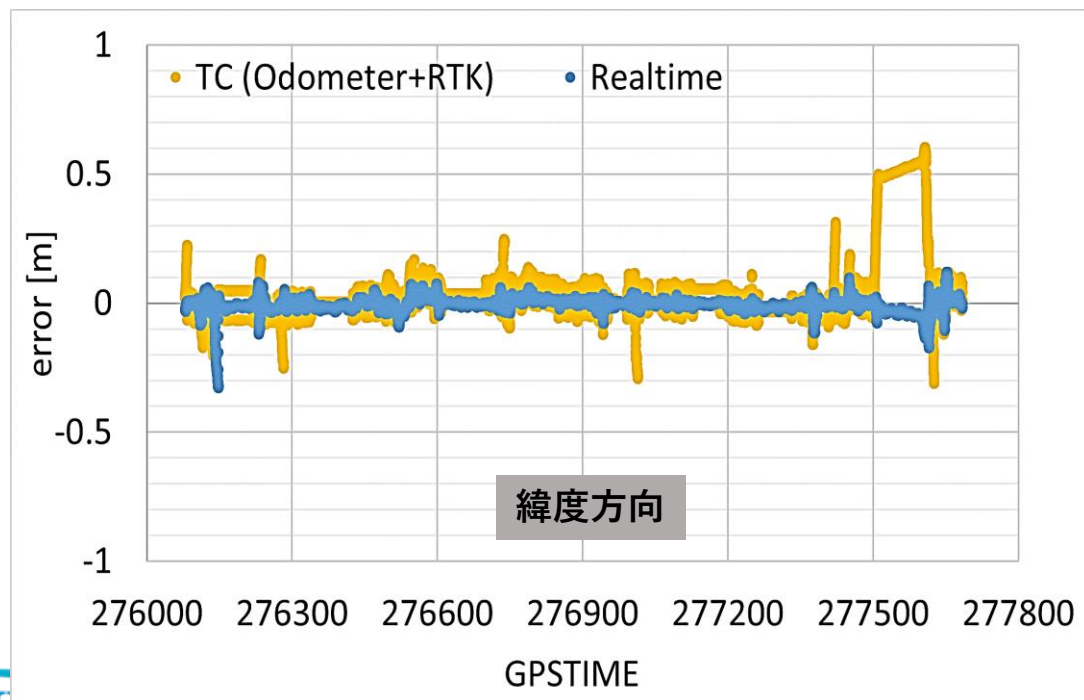
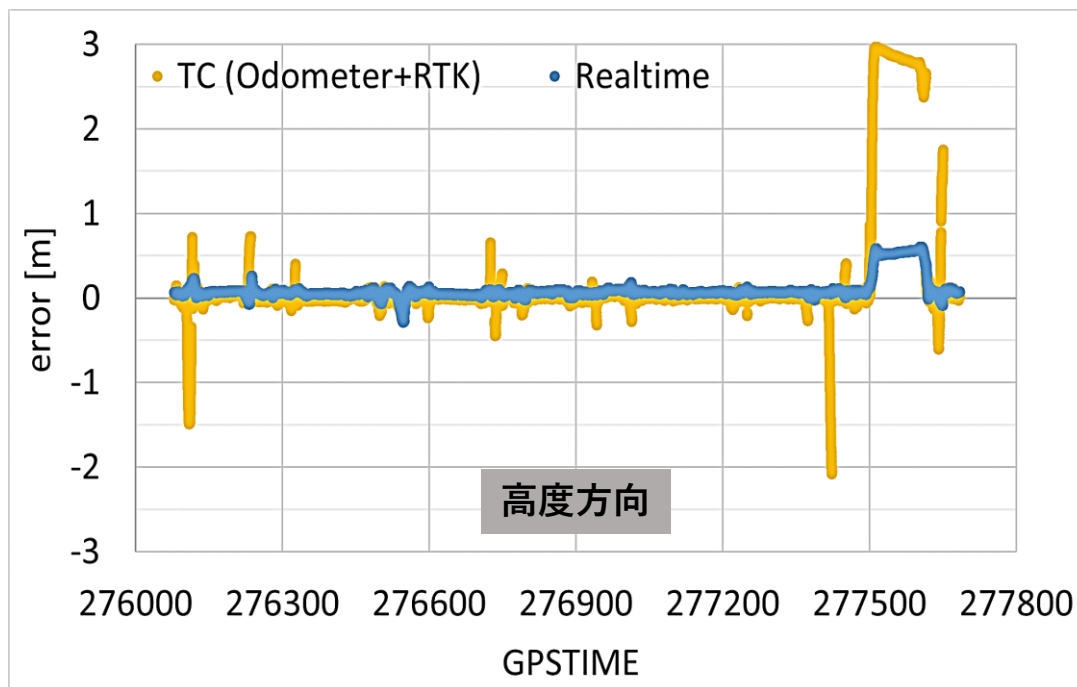
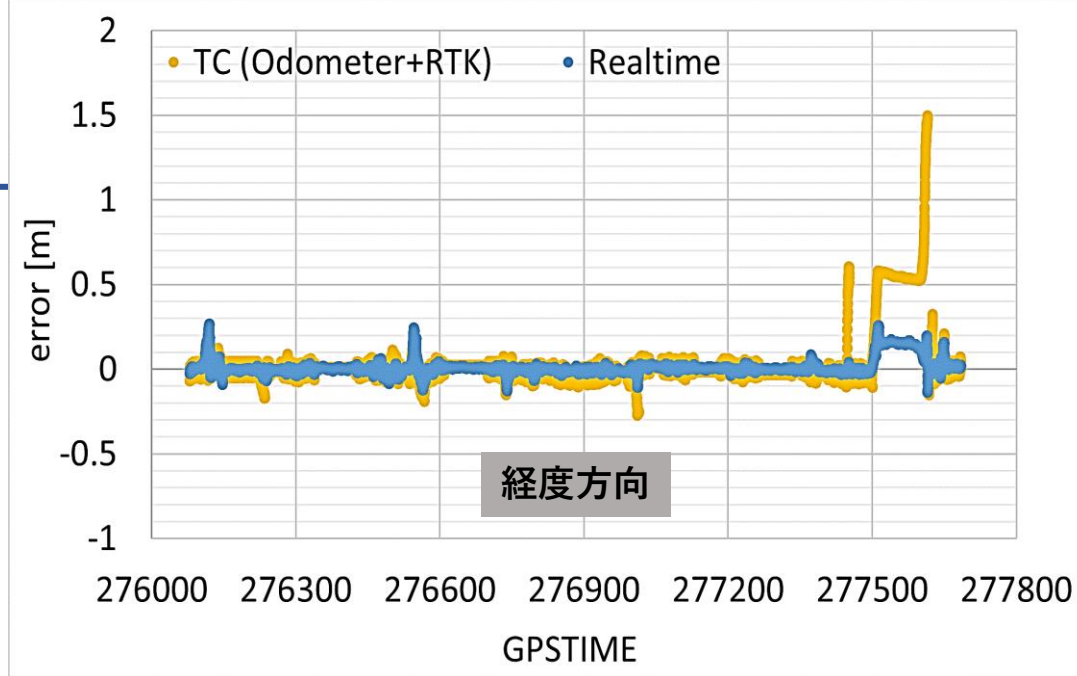
- ✓ FIX解が得られる度に誤差はリセットされるため、全体的に誤差を大きく低減している
- ✓ 大きなミスFIXは全て取り除くことができた





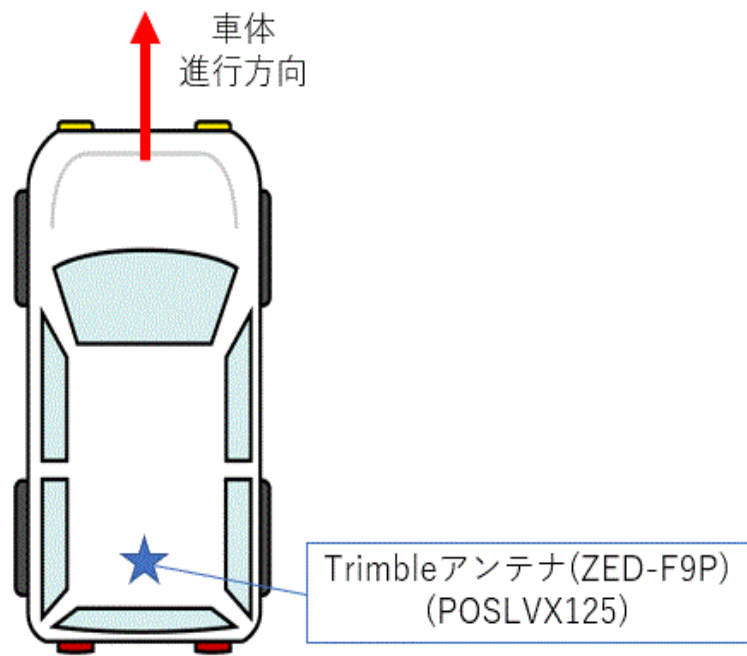
# 5. POSLVX リアルタイム比較

- ✓ 水平位置はGNSS観測値が十分に得られない区間でRTK利用の精度が劣っていた
- ✓ 特に高度方向は精度差が大きい



# 5. 高層ビル街 概要

2022年6月24日 35分程度



## 使用機器

- u-blox ZED-F9P
- STMicro IMU
- Trimble GNSSアンテナ
- POSLVX125 (真値)

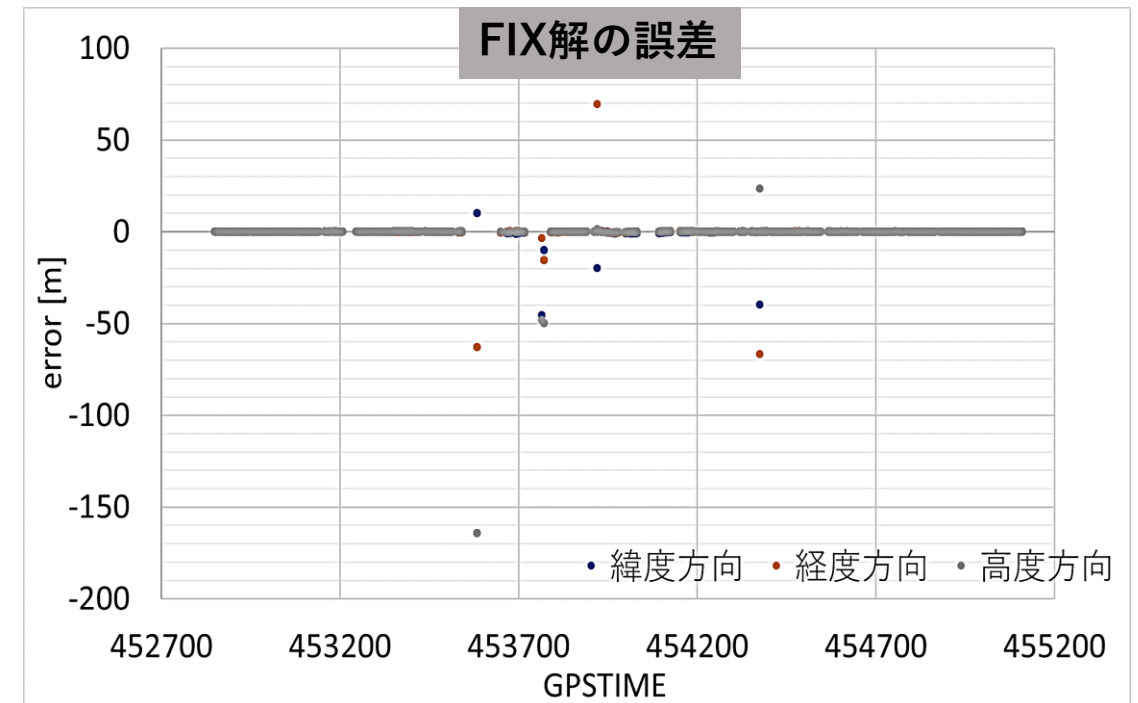
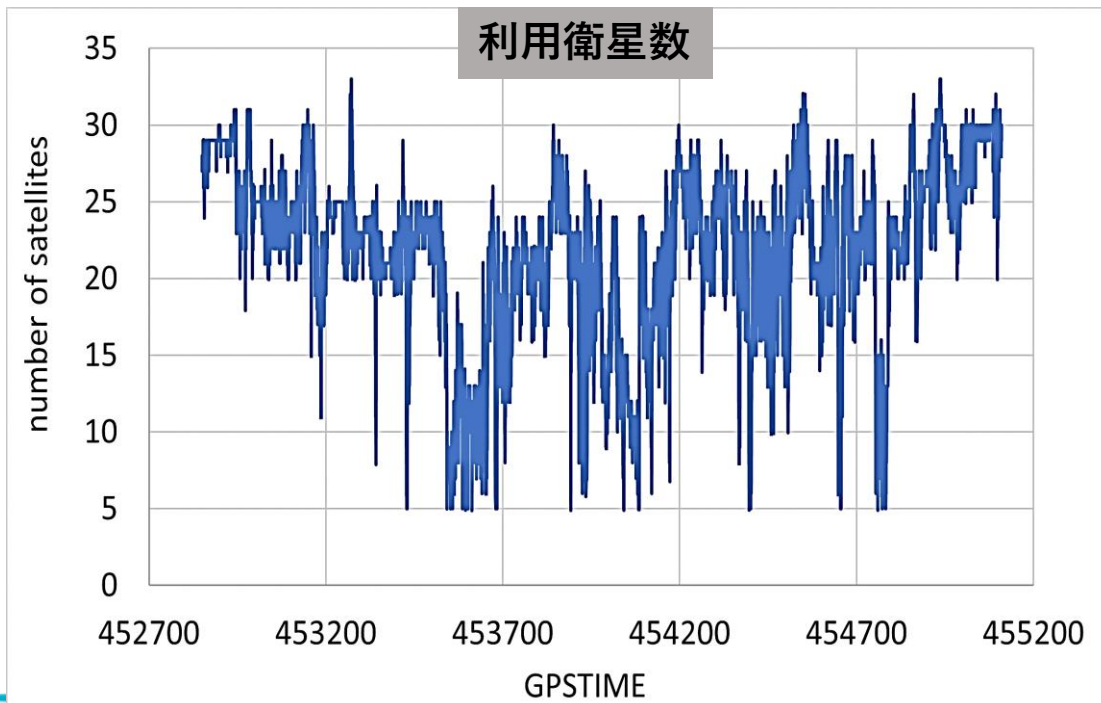
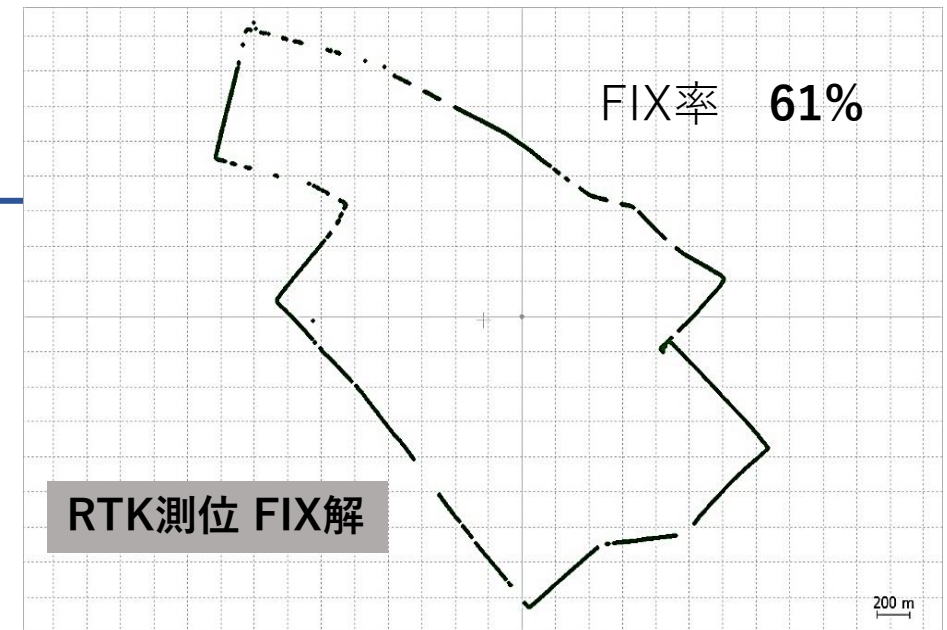


走行経路

# 5. GNSS測位結果

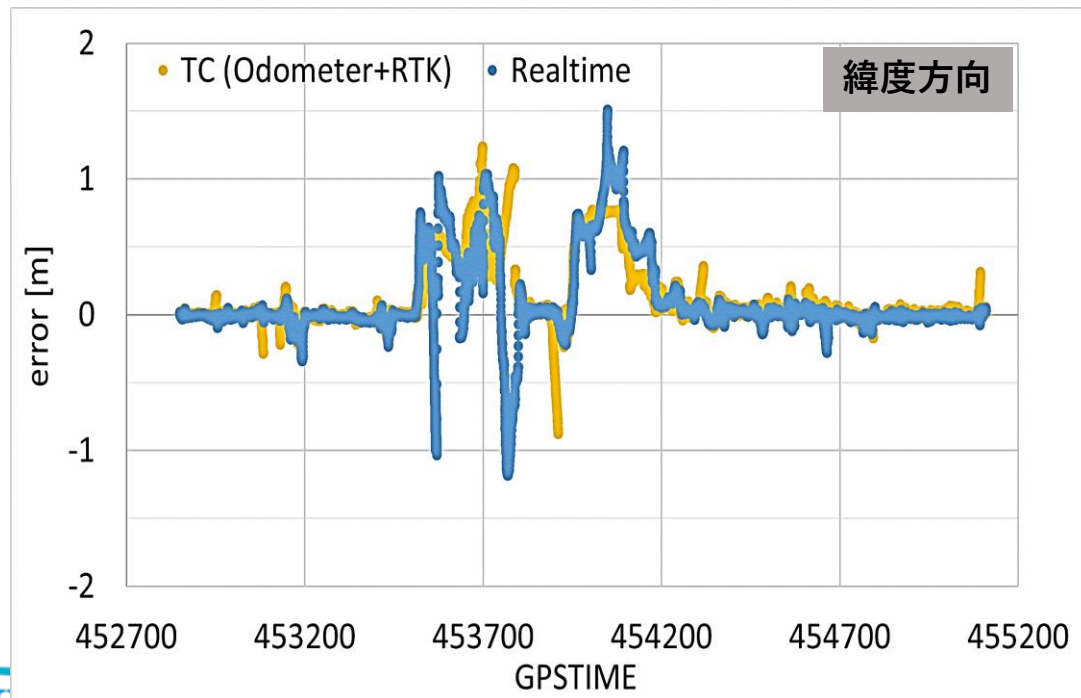
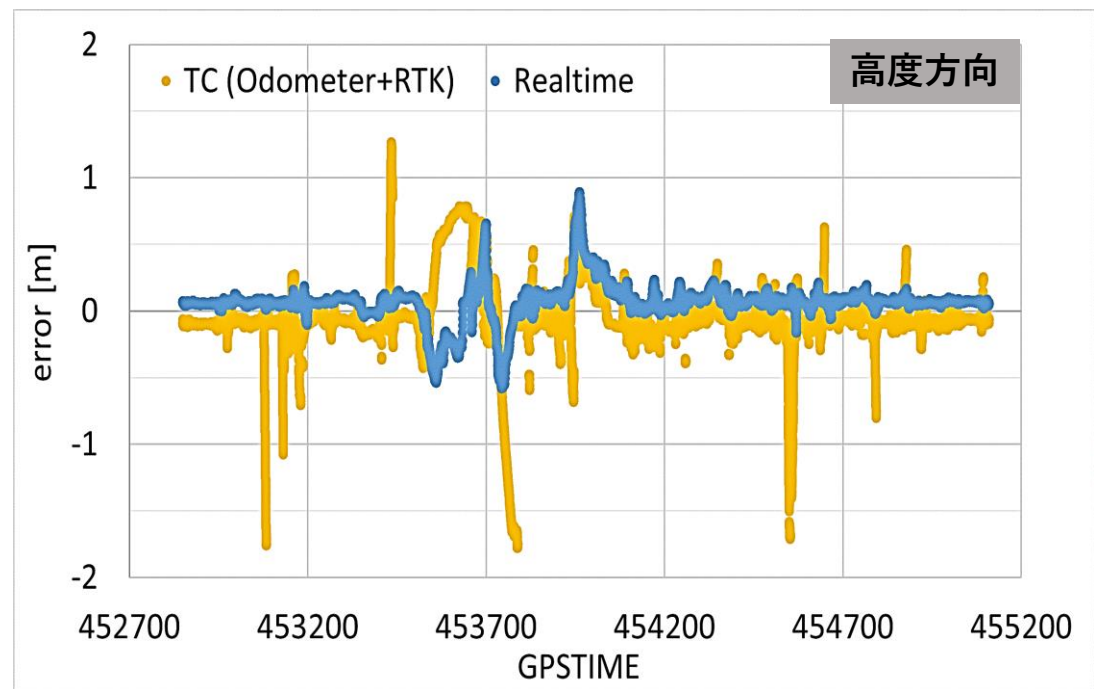
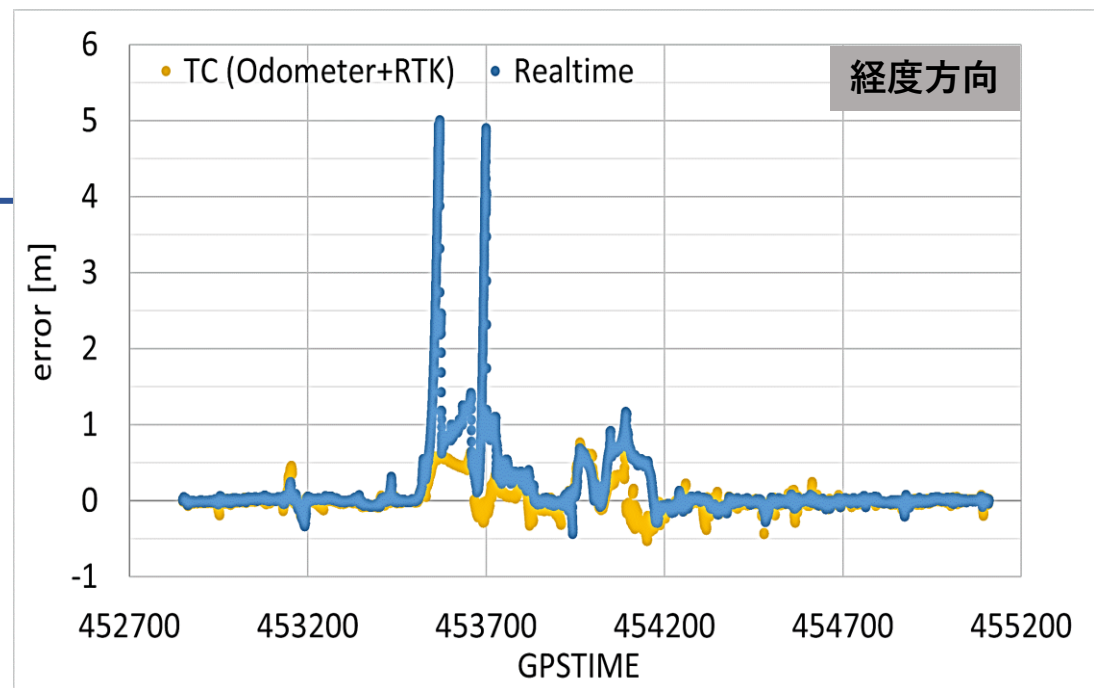
利用可能衛星が少ない区間が多い

ミスFIXが多く、誤差も大きい



# 5. POSLVX リアルタイム比較

- ✓ 水平位置はRTK利用の精度が上回っていた
- ✓ 高度方向はPOSLVXの方が良い



## 6. まとめ

---

- IMUの誤差要因への対処やOdometerの利用により、**方位精度や水平位置精度を向上させる**ことができる  
→GNSSが使えない区間の測位精度を維持
- オープンスカイ区間ではLCとTCの精度はほぼ同等だが、**利用可能衛星の少ない区間ではTCの方が優れている**
- TCでは、**RTK測位のFIX解の利用やミスFIXの除去**により、POSLVXリアルタイム処理に近い精度で水平位置推定を行うことができた

### 今後の課題

- **車両の傾きを正確に推定**することにより、高度方向の推定精度を向上させる
- **スリップ角の推定**により、方位や水平位置の推定精度を向上させる