

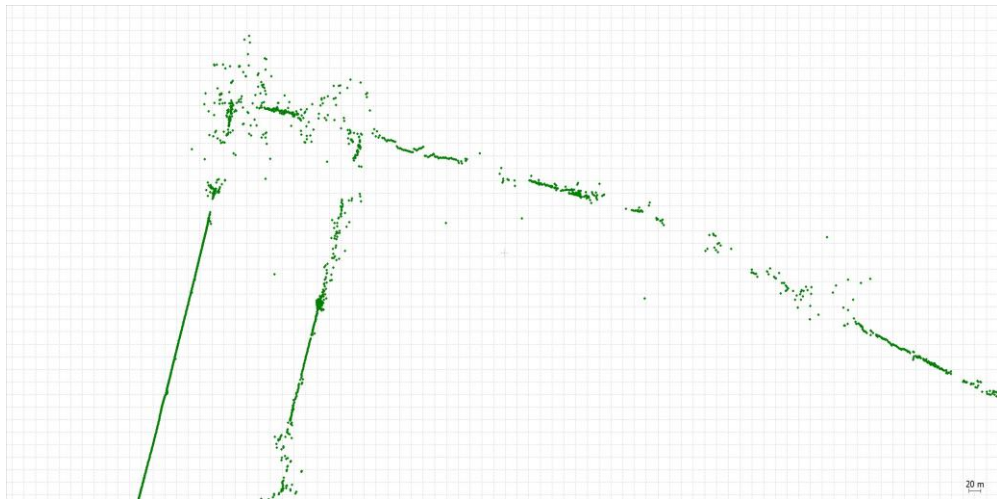
2106
RTK-GNSS/IMU/Speed
タイトカップリングの評価

東京海洋大学 情報通信工学研究室

小松大生 久保信明

背景

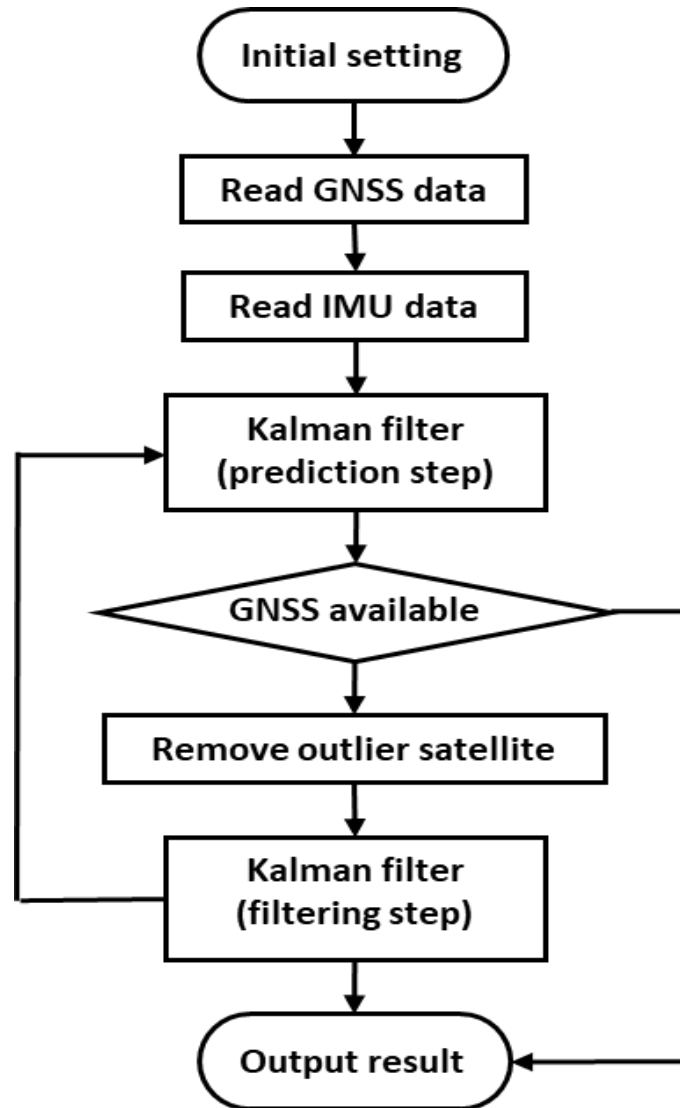
- 都市部のようなマルチパスや信号遮断が頻繁に起こる環境では、GNSS単体で十分な測位精度を得ることができない
- ルースカップリングでは衛星数が4機以上ないとGNSS測位が行えず、統合による測位解の補正が不可となる
- 一方、タイトカップリングでは擬似距離やドップラー周波数といった観測値の段階で統合を行うため、衛星数が4機未満であっても測位解を補正することができる
- 可視衛星数の少ない都市環境においては、タイトカップリングは有効であるといえる



都市部でGNSS測位を行った例

	特徴
LC	GNSS...位置、速度 IMU...位置、速度、姿勢 2つの独立した航法解を統合
TC	GNSS...擬似距離、ドップラー周波数 IMU...位置、速度 → 擬似距離、ドップラー周波数 IMUの推定値とGNSSの観測値を統合

TC概要



1. 初期値入力 (GPSTIME、位置、速度、姿勢、クロック誤差、クロックレート誤差)
2. GNSS観測値読み込み (擬似距離、擬似距離レート、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. 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. 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)

状態方程式

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

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

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

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

SD : 標準偏差

システム共分散行列 Q

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

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

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

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

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

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

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

観測方程式

$$y_k = Hx_k + v_k$$

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

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

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

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

観測方程式

観測共分散行列 R

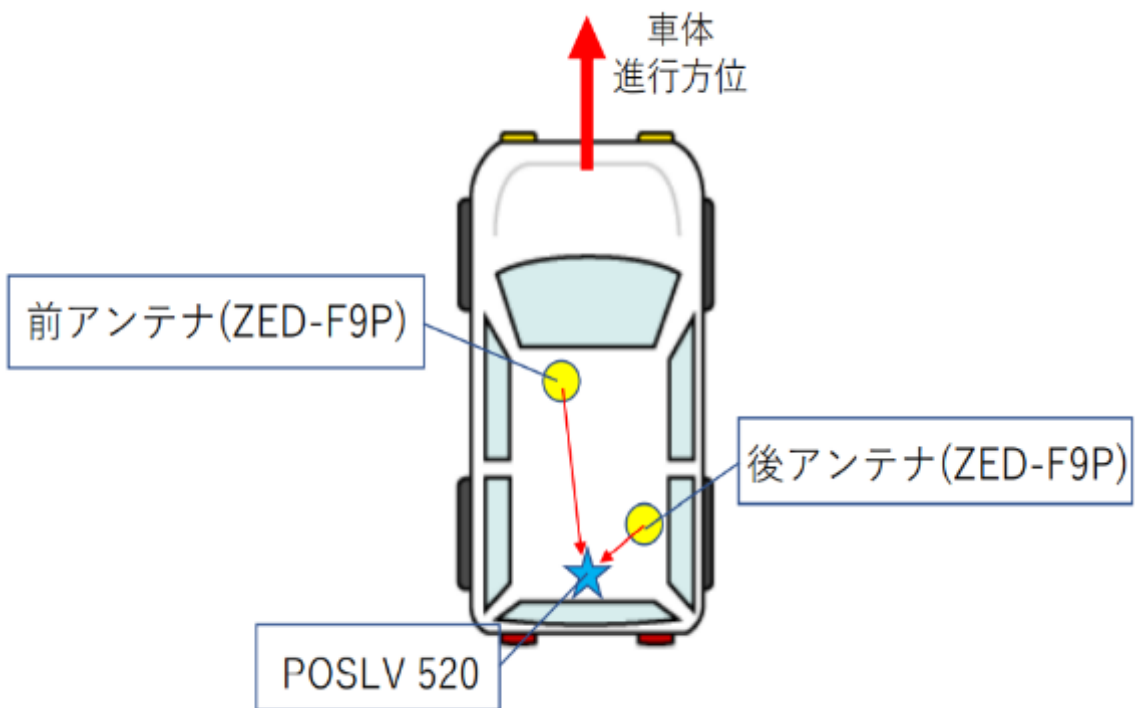
$$= \text{diag} \left(G_1^2 * r_{SD}^{\text{noise}}, G_2^2 * r_{SD}^{\text{noise}}, \dots, G_{N_{\text{sat}}}^2 * r_{SD}^{\text{noise}}, G_1^2 * r'_{SD}{}^{\text{noise}}, G_2^2 * r'_{SD}{}^{\text{noise}}, \dots, G_{N_{\text{sat}}}^2 * r'_{SD}{}^{\text{noise}} \right)$$

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

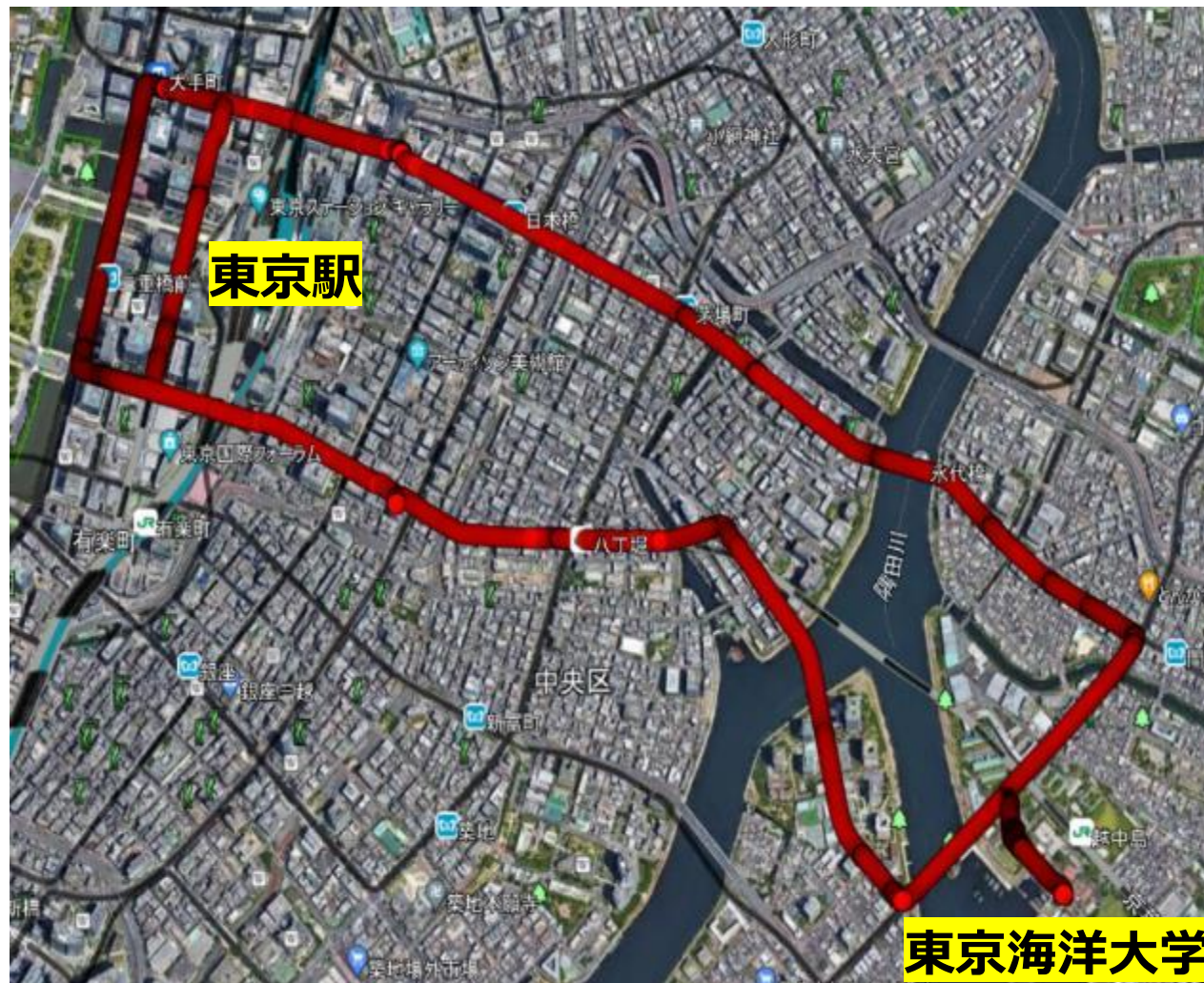
$elevation < 40^\circ$ のとき、 $G_j : 10$
 $< 35^\circ$ のとき、 $G_j : 1000$

実験1 概要

2021年3月2日 35分程度



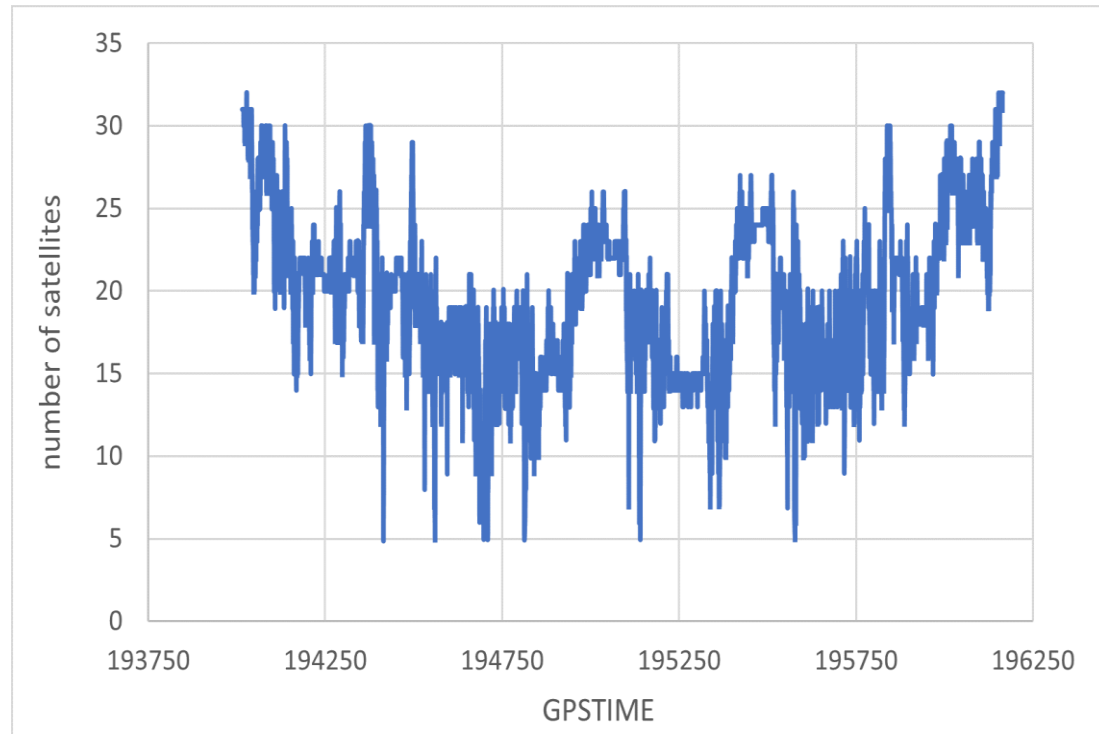
IMUはSTMicro社製の廉価品（6軸MEMSセンサ）
（別途Speedセンサを搭載）



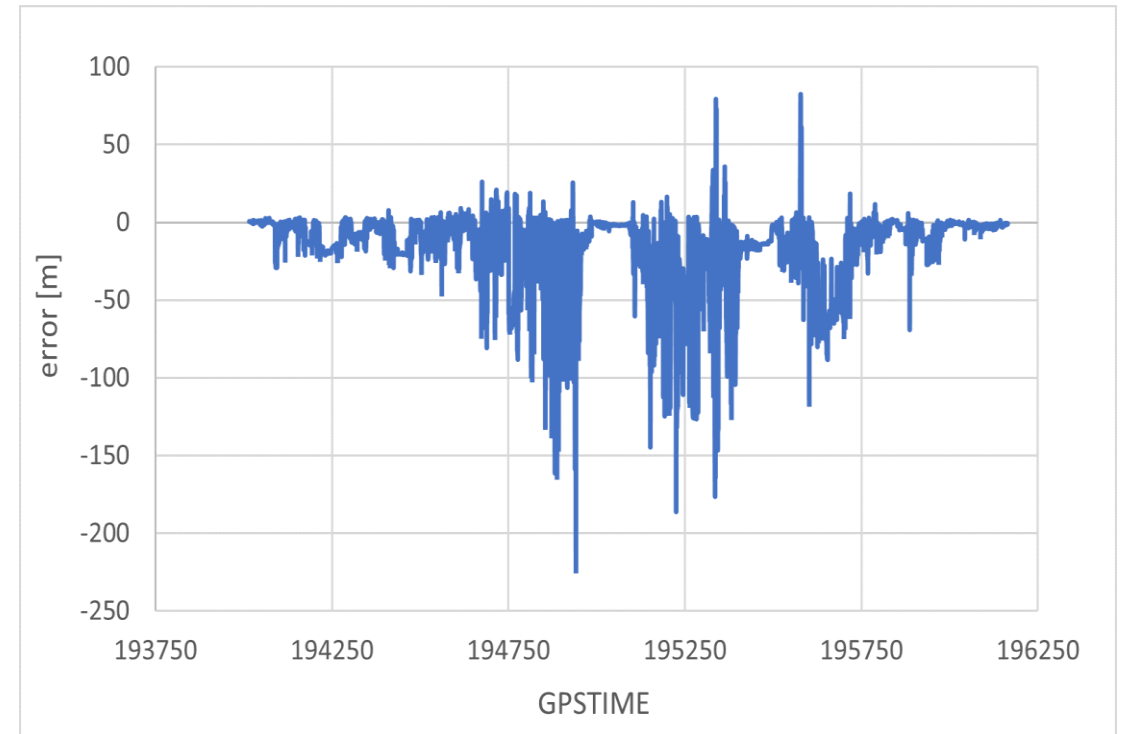
DGNSS測位結果

衛星数の少ない区間が多く、厳しい測位環境であると言える

衛星数



DGNSS誤差 (ECEF-X)



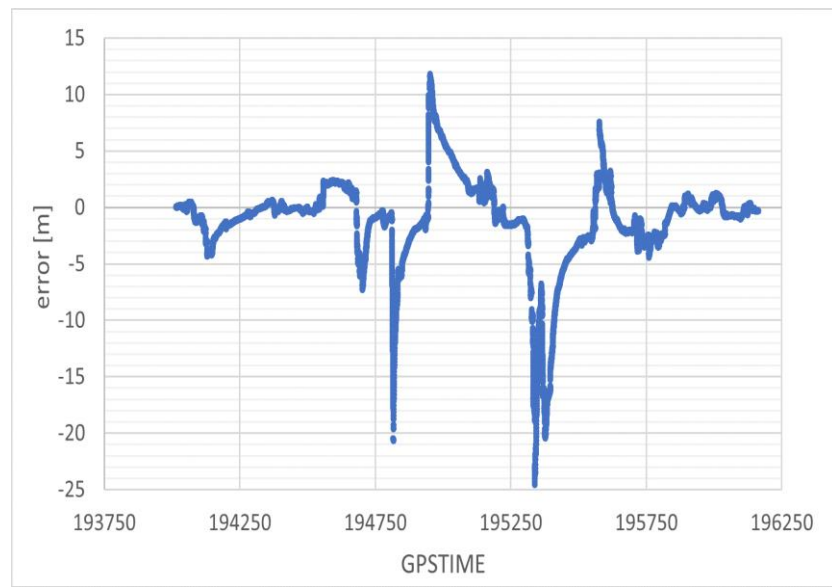
TC実行結果 (GNSS観測値とIMUのみ)

POSLVを真値とした場合の位置誤差 (ECEF座標系)

X

Y

Z



MAX : 24.6[m]
RMS : 4.2[m]



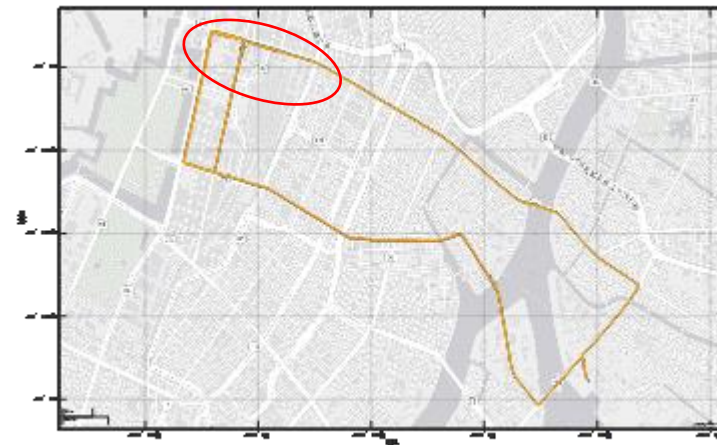
MAX : 13.0[m]
RMS : 3.9[m]



MAX : 16.1[m]
RMS : 3.5[m]

TC実行結果 (GNSS観測値とIMUのみ)

青 : POSLV 橙 : TC結果



カルマンフィルタ変更点 (Speed利用の場合)

状態方程式

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

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

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

$$A = \begin{bmatrix} \cos A_z & 0 & 0 \\ \sin A_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \text{diag}(0,0,1)$$

観測共分散行列 R

$$= \text{diag} \left(G_1^2 * r_{SD}^{\text{noise}}, G_2^2 * r_{SD}^{\text{noise}}, \dots, G_{N_{\text{sat}}}^2 * r_{SD}^{\text{noise}}, G_1^2 * r'_{SD}^{\text{noise}}, G_2^2 * r'_{SD}^{\text{noise}}, \dots, G_{N_{\text{sat}}}^2 * r'_{SD}^{\text{noise}} \right)$$

r : 擬似距離 r' : 擬似距離レート r_{SD}^{noise} : 1[m] r'_{SD}^{noise} : $1e-3$ [m/s]

$elevation < 40^\circ$ のとき、 G_j : 10

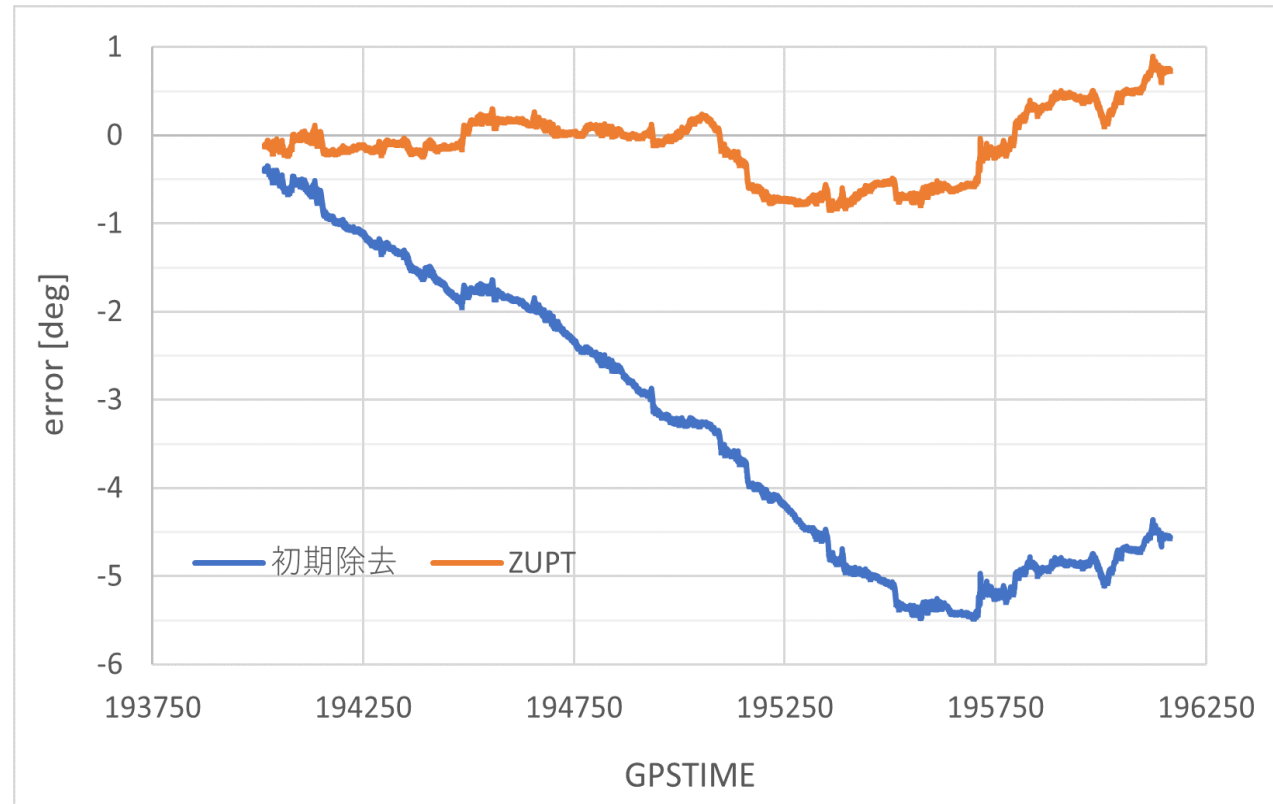
$< 35^\circ$ のとき、 G_j : 1000

ZUPT処理について

z軸角速度が $0.16[\text{deg}/\text{s}]$ 以下の時、車両が停止中または直進中と判断
10[s]以上の停止または直進で、その時間帯の出力値をバイアスとして取り除く

始めの停止時のバイアスのみ除去した場合と比べて、積分した結果の方位精度は向上する

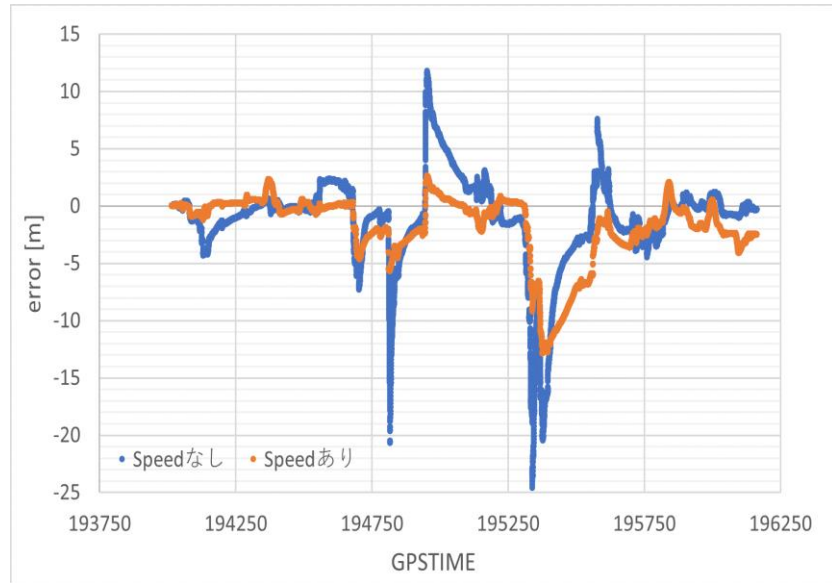
POSLVとの方位誤差



TC実行結果 (Speed利用)

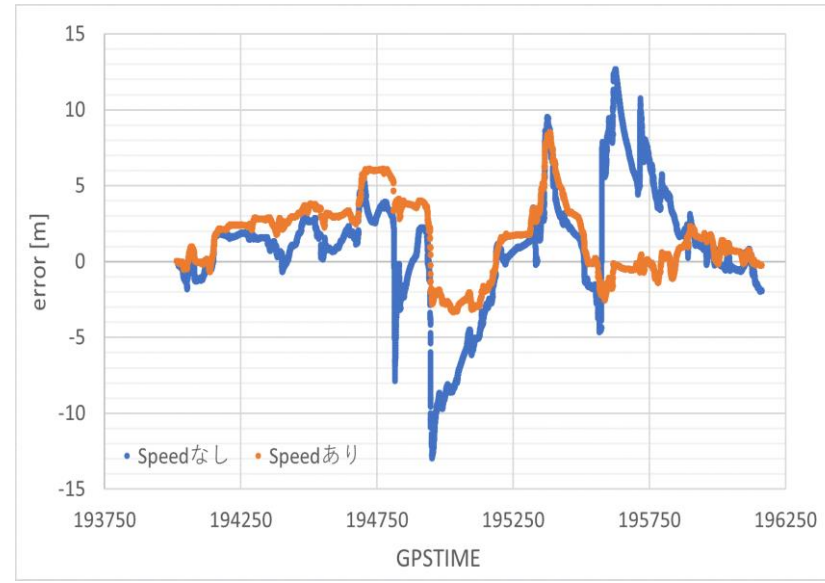
POSLVを真値とした場合の位置誤差 (ECEF座標系)

X



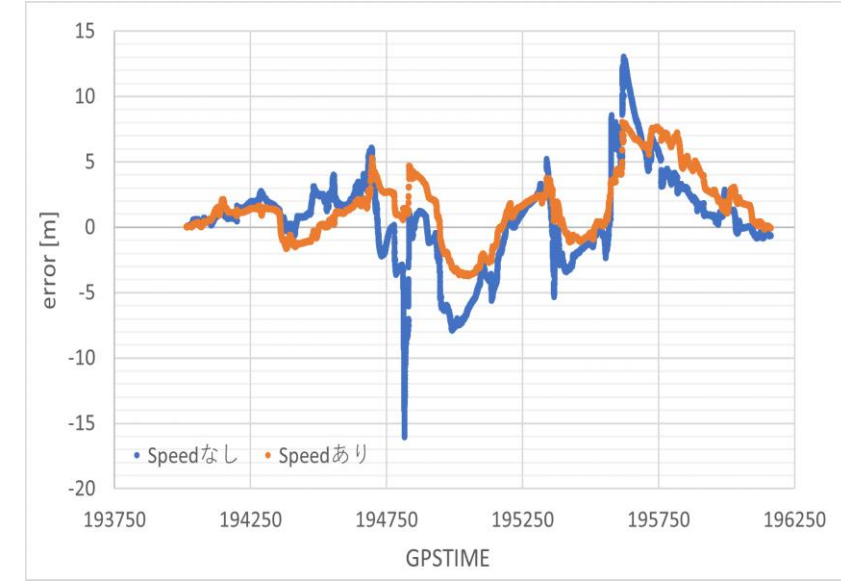
MAX : 12.9[m]
RMS : 3.4[m]

Y



MAX : 8.5[m]
RMS : 2.8[m]

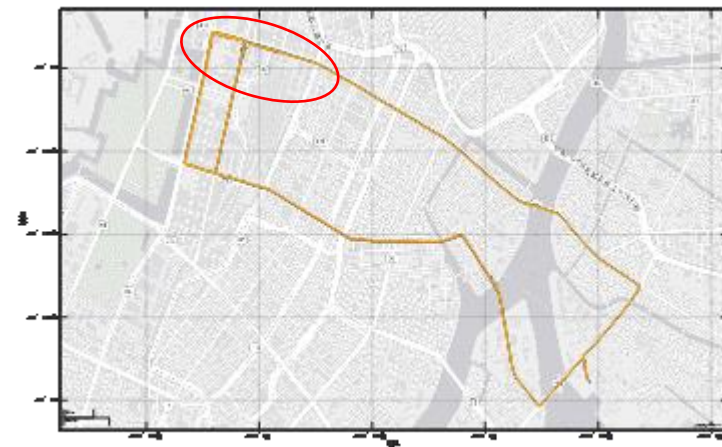
Z



MAX : 8.0[m]
RMS : 3.0[m]

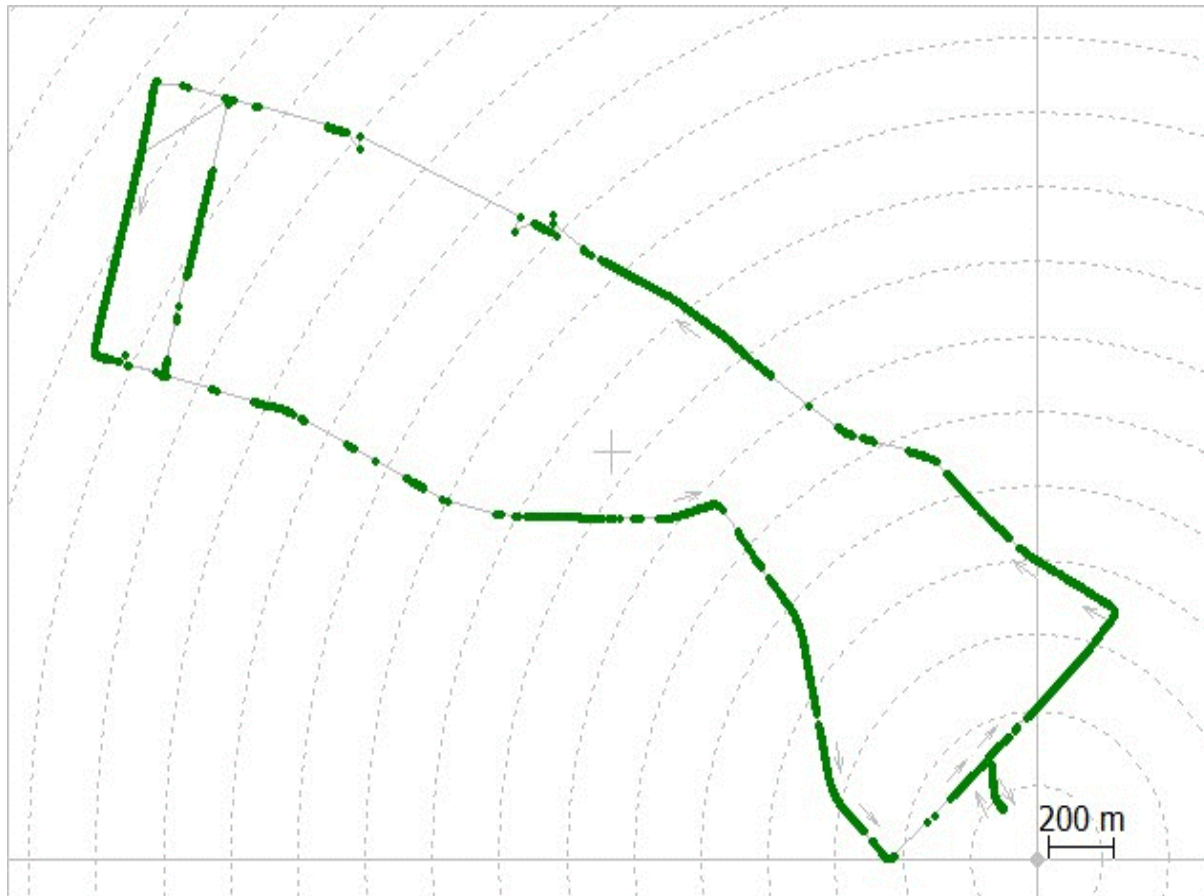
TC実行結果 (Speed利用)

青 : POSLV 橙 : Speedなし 黄 : Speedあり



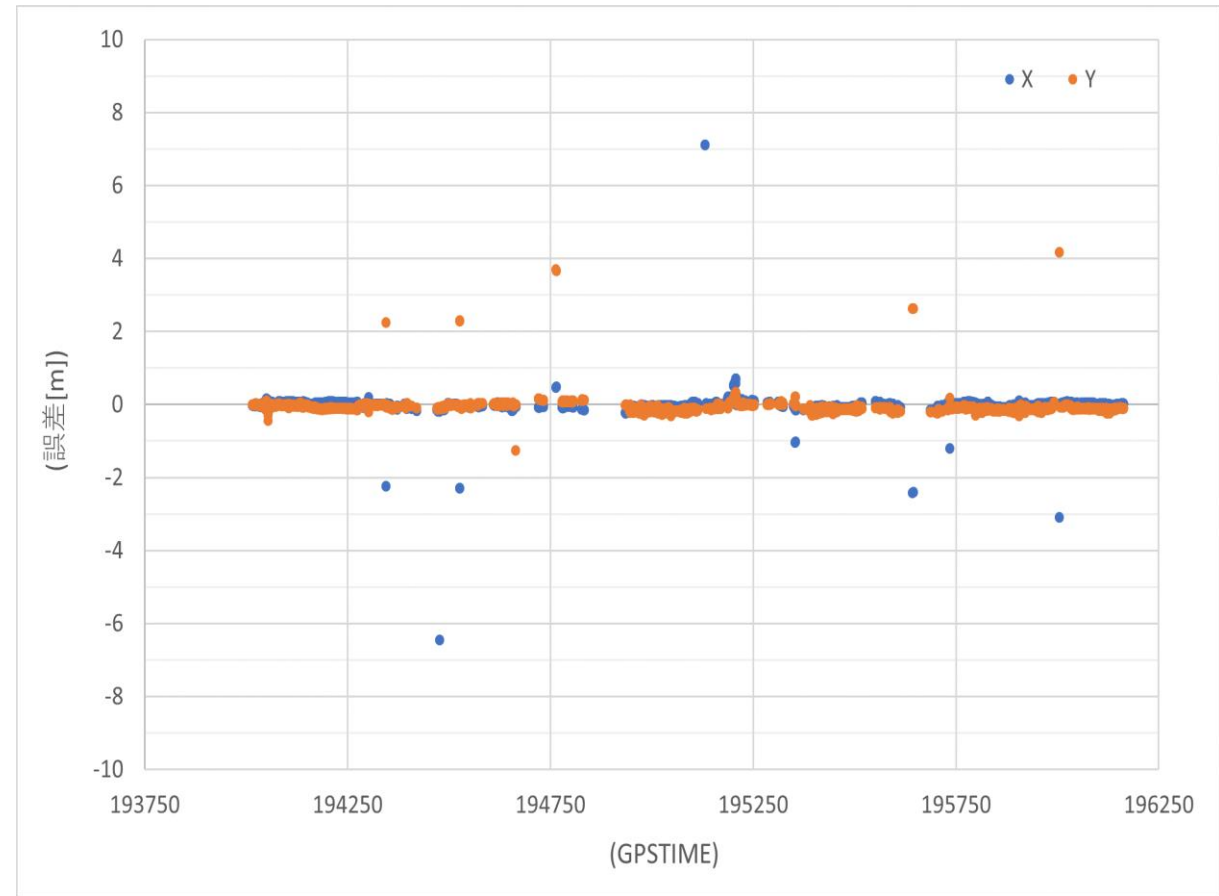
RTK利用

RTKプロット



FIX率 52%

POSLVとの位置誤差 (FIX解のみ)



ミスFIX検知

水平位置による検知

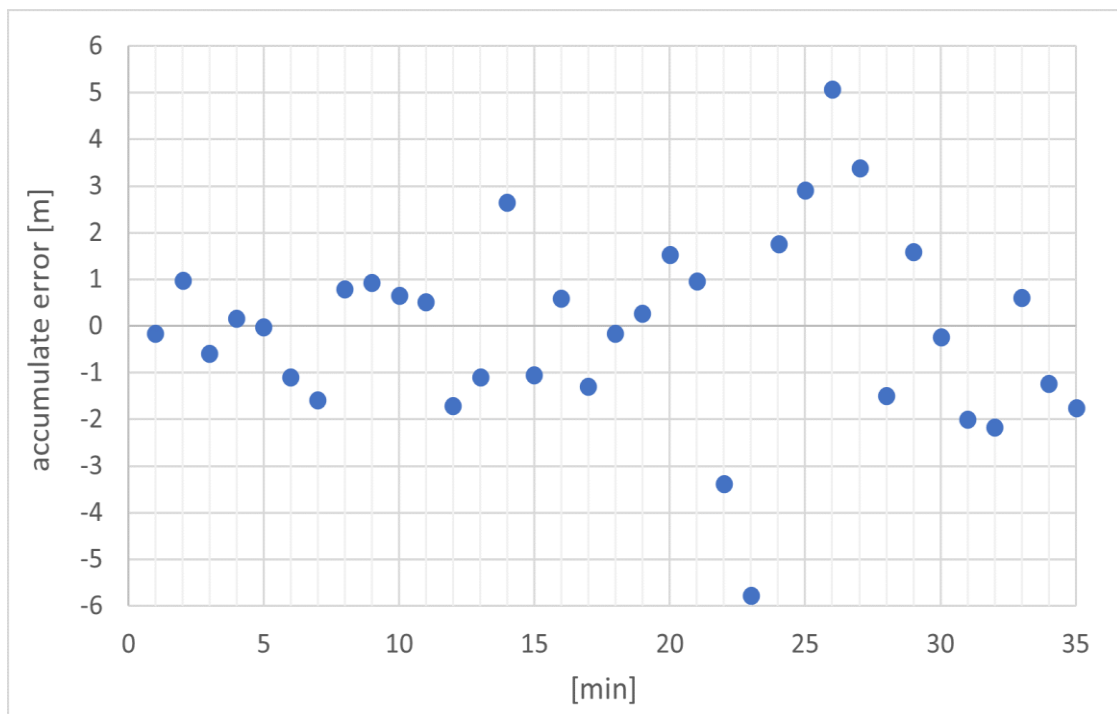
RTK-FIX解を連続して得られない時間は、最大で1分程度

Speed利用の場合の測位結果について
走行時間35分を1分ごとに区切り、**1分間の蓄積誤差**を調べる

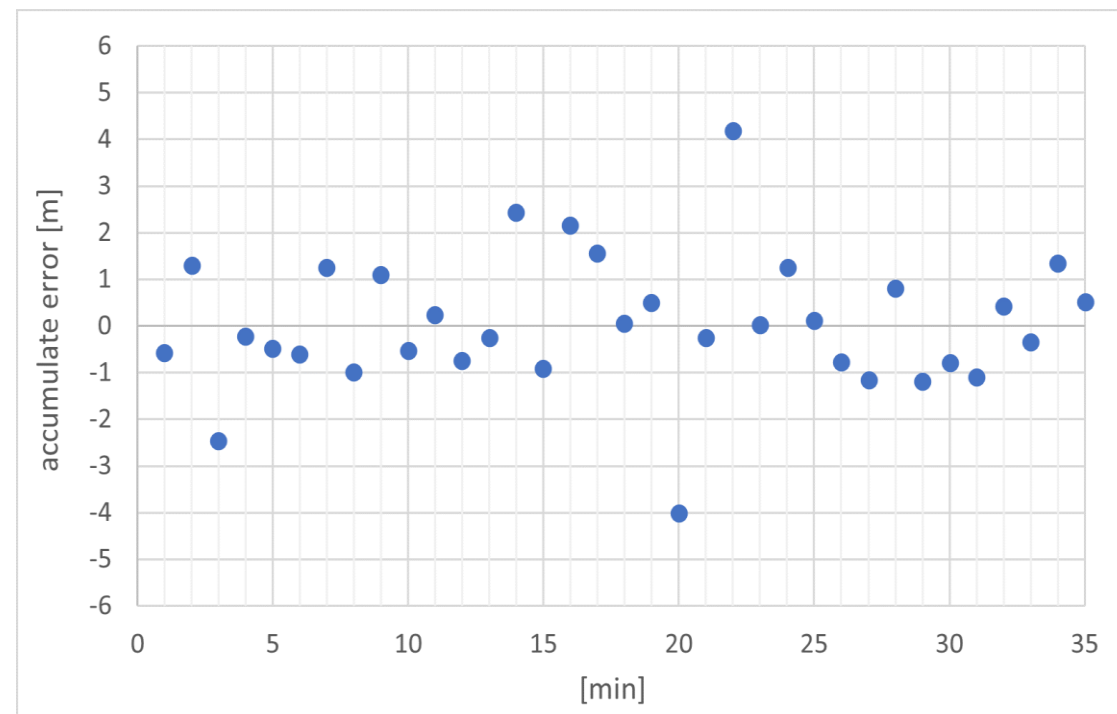


以下プロット図より、
更新ステップで求めた水平位置とRTKの水平位置を比較し、**6[m]以上**の差分がある時、ミスFIXと判断する

緯度方向



経度方向



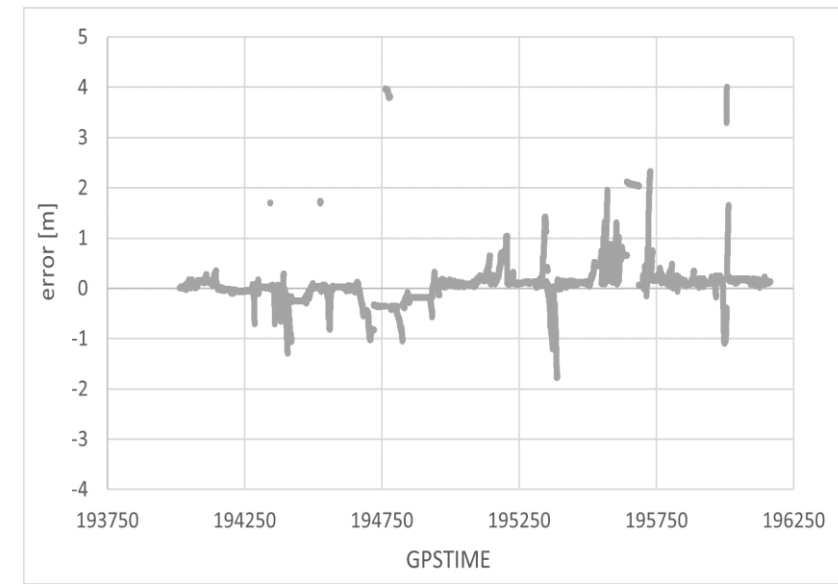
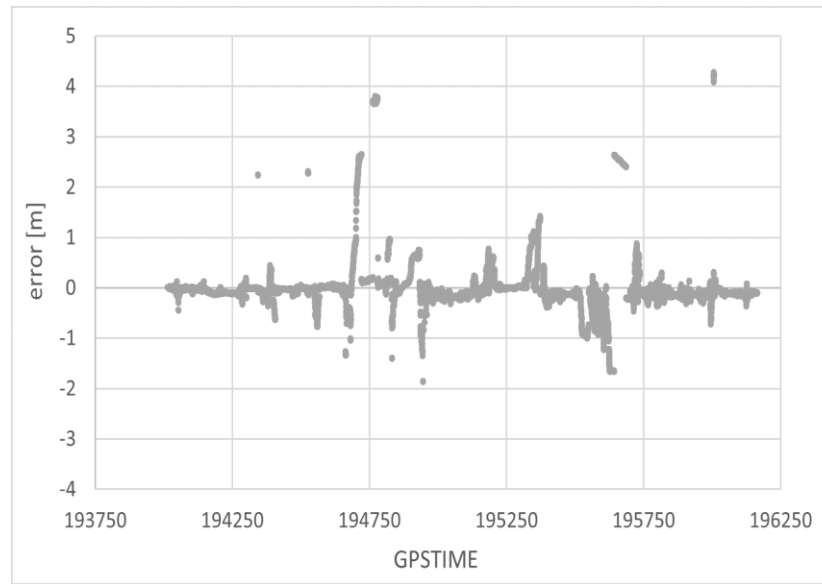
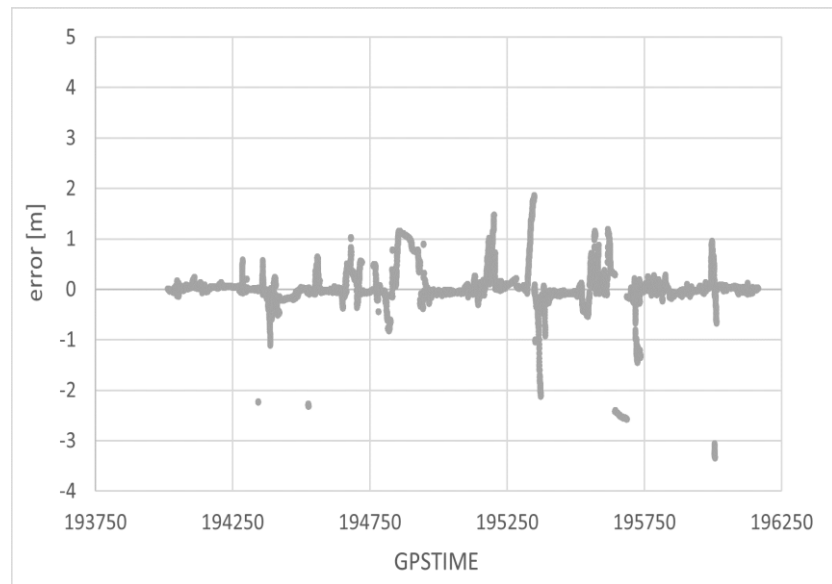
TC実行結果 (RTK利用)

POSLVを真値とした場合の位置誤差 (ECEF座標系)

X

Y

Z



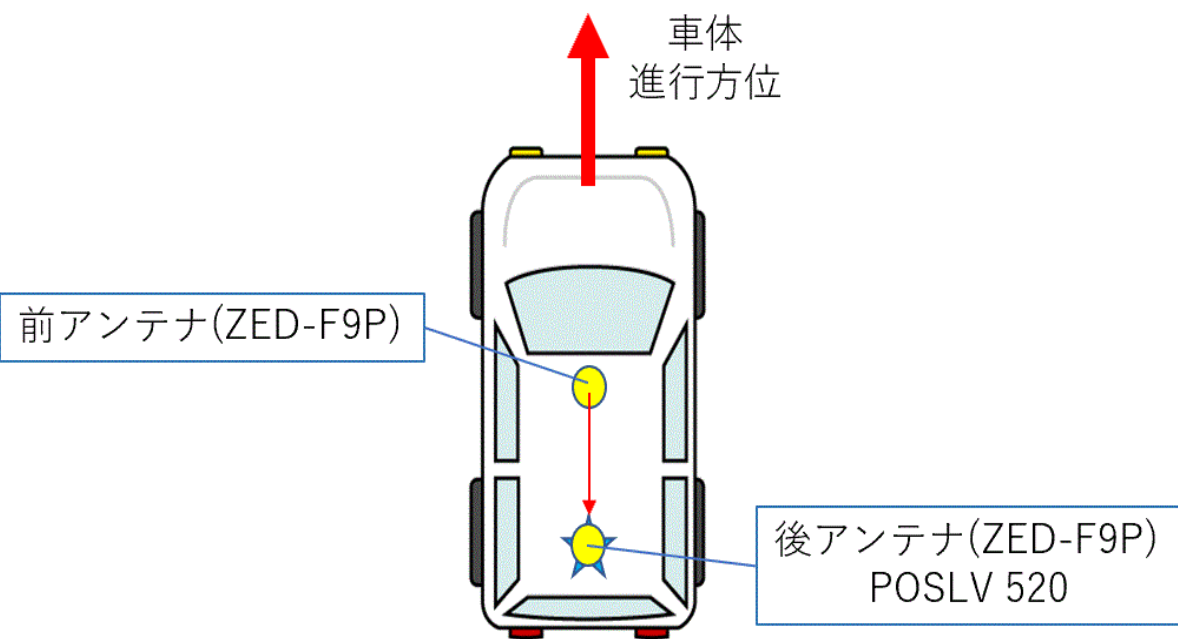
MAX : 3.3[m]
RMS : 0.5[m]

MAX : 4.3[m]
RMS : 0.6[m]

MAX : 4.0[m]
RMS : 0.6[m]

実験2 概要

2022年6月24日 40分程度



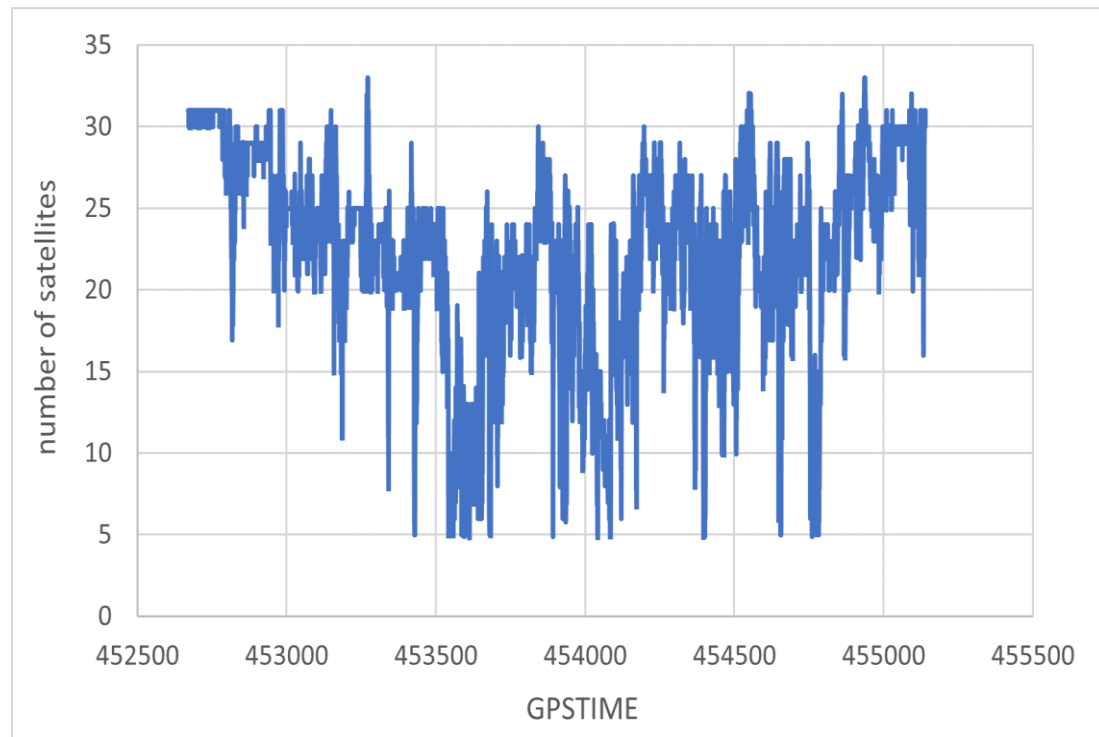
IMUはSTMicro社製の廉価品 (6軸MEMSセンサ)
(別途Speedセンサを搭載)



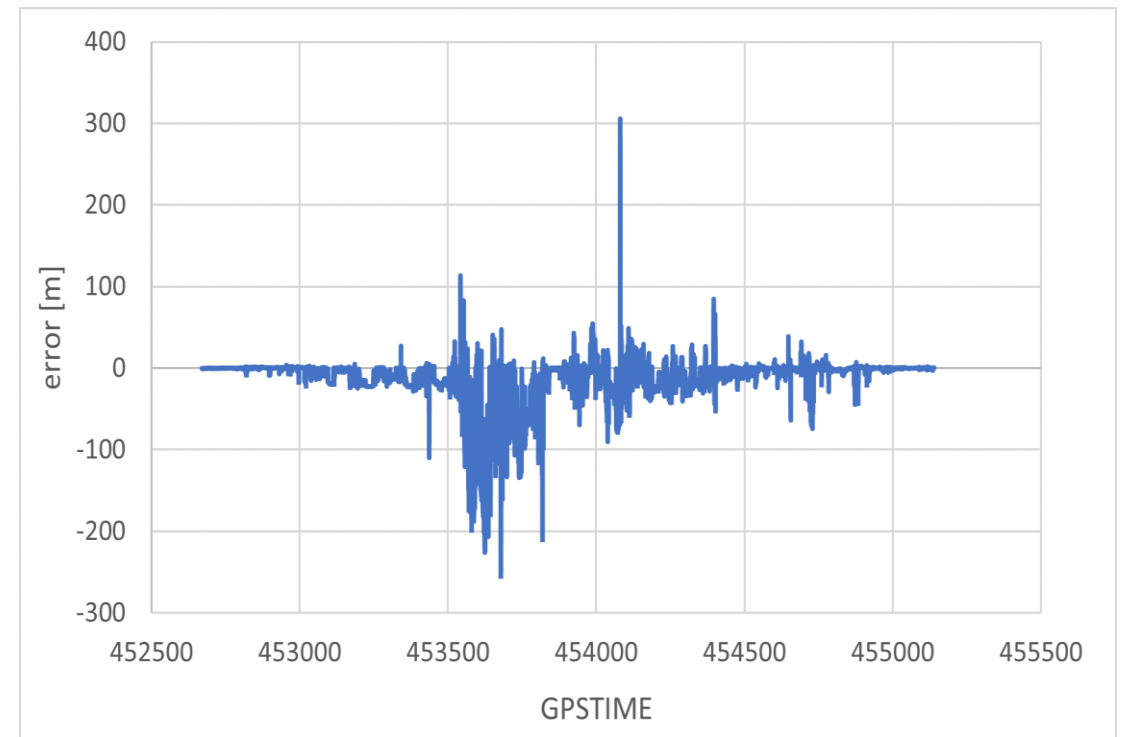
DGNSS測位結果

衛星数の少ない区間が多く、厳しい測位環境であると言える

衛星数



DGNSS誤差 (ECEF-X)



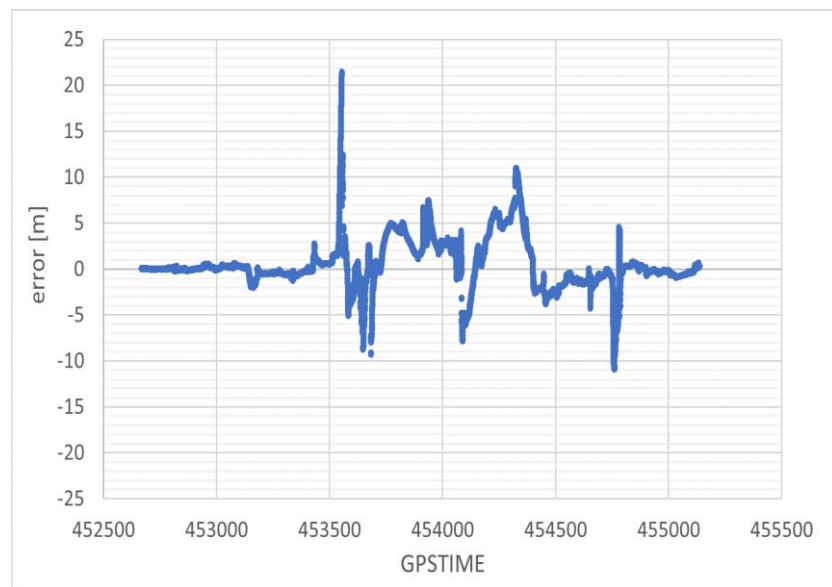
TC実行結果 (GNSS観測値とIMUのみ)

POSLVを真値とした場合の位置誤差 (ECEF座標系)

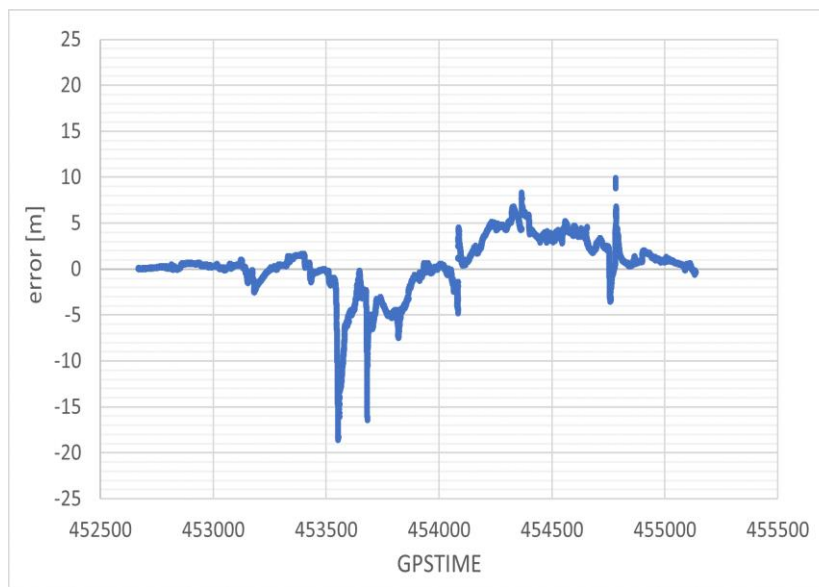
X

Y

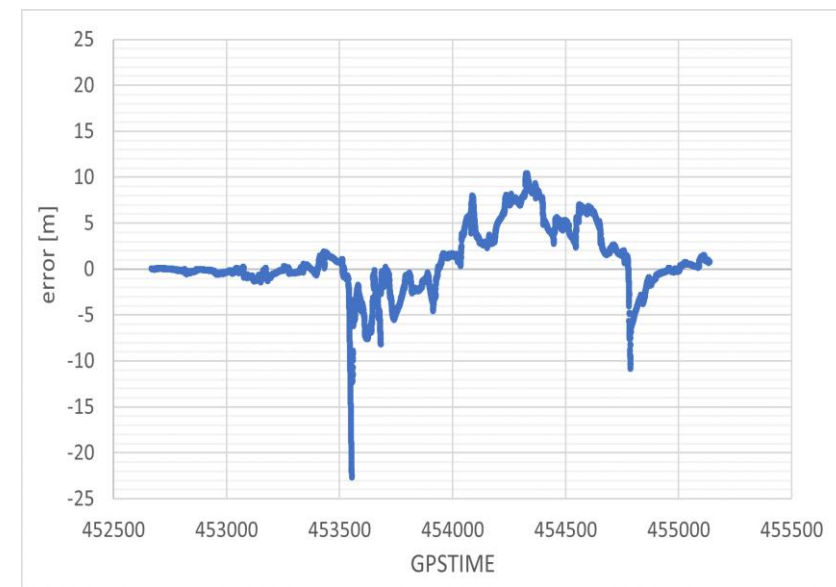
Z



MAX : 21.4[m]
RMS : 2.8[m]



MAX : 18.6[m]
RMS : 3.1[m]



MAX : 22.7[m]
RMS : 3.6[m]

ZUPT+ドップラー補正

ZUPT

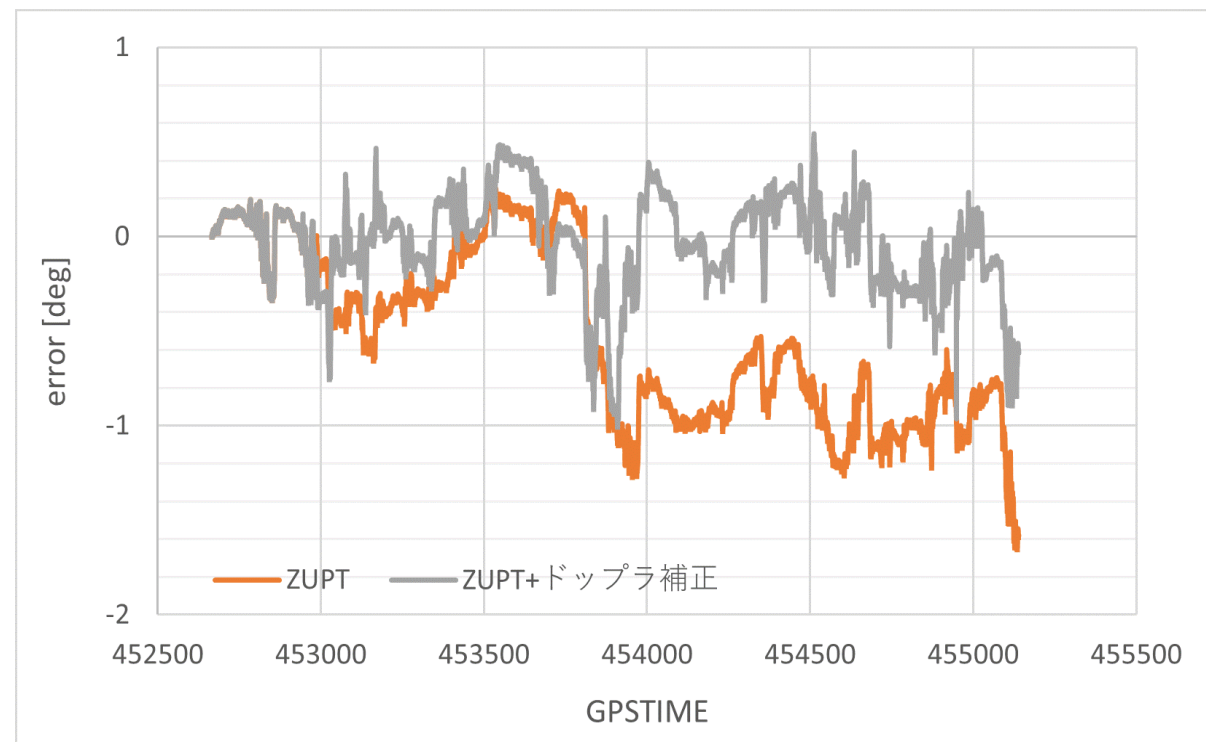
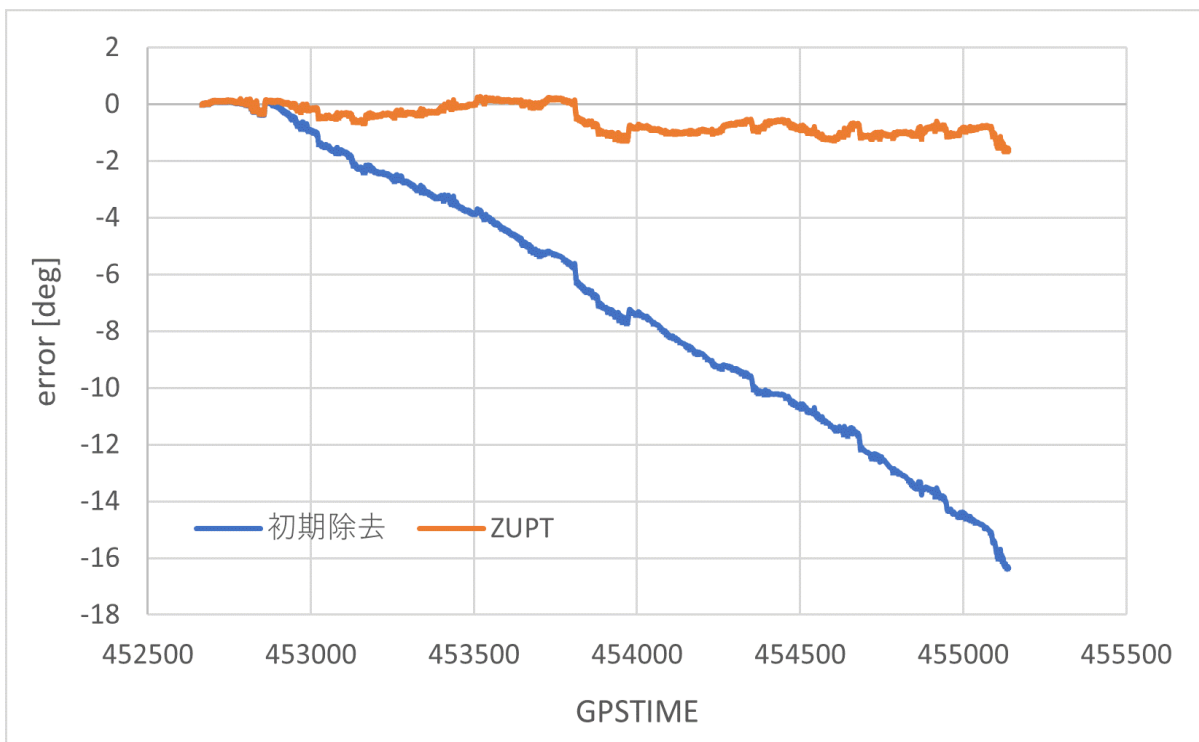
z軸角速度が $0.16[\text{deg/s}]$ 以下の時、車両が停止中または直進中と判断

10[s]以上の停止または直進で、その時間帯の出力値をバイアスとして取り除く

ドップラー補正

GNSS速度が $5[\text{m/s}]$ 以上の時、ドップラー方位とZUPT方位の差分を取り、ZUPT方位を補正していく

POSLVとの方位誤差



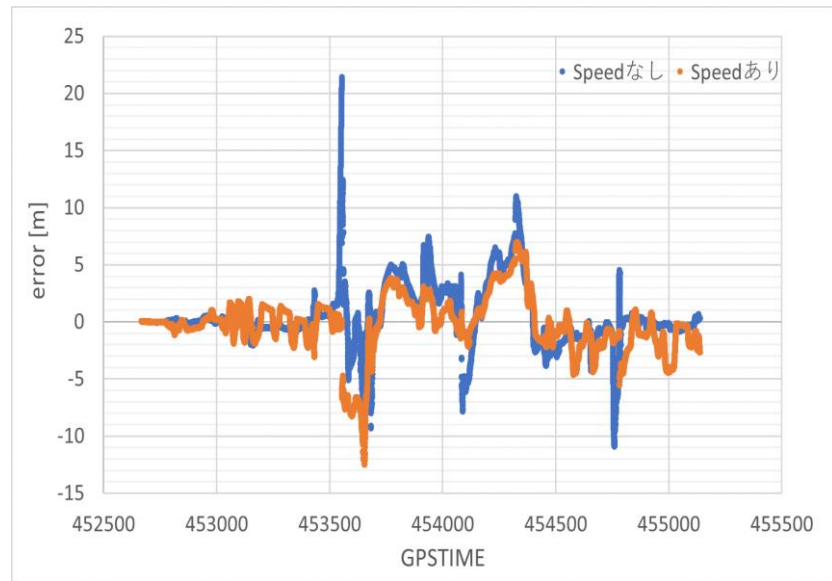
TC実行結果 (Speed利用)

POSLVを真値とした場合の位置誤差 (ECEF座標系)

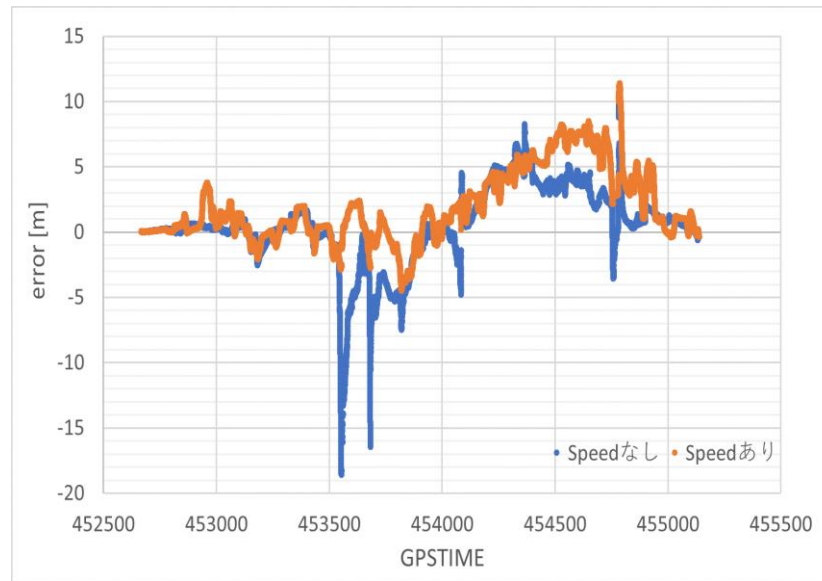
X

Y

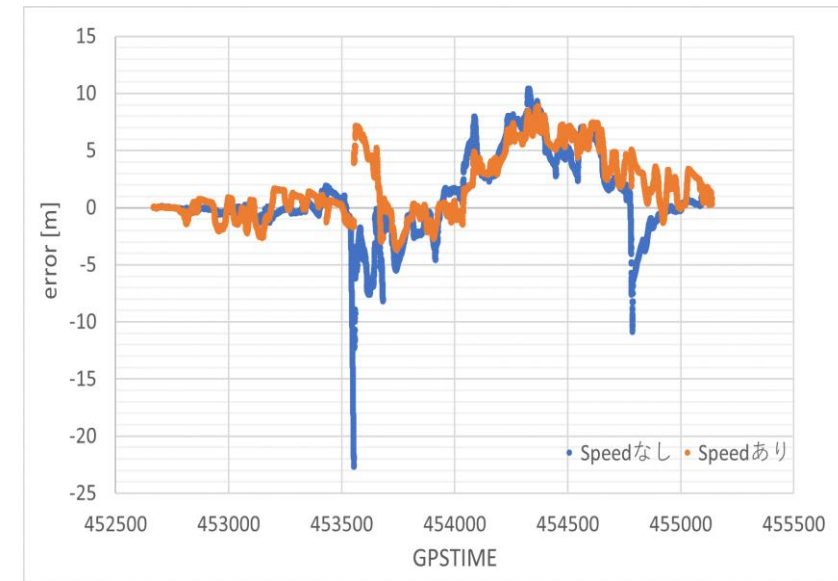
Z



MAX : 12.5[m]
RMS : 2.6[m]



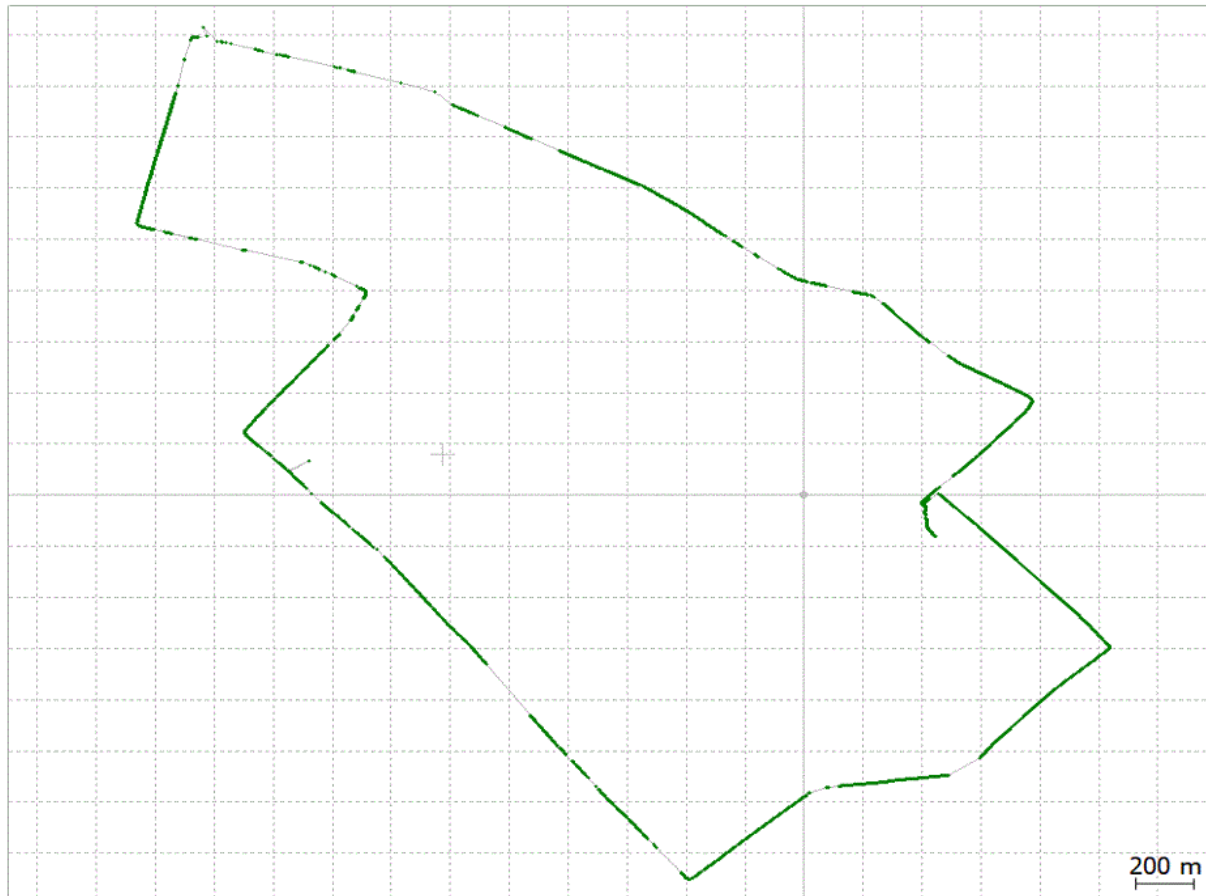
MAX : 11.3[m]
RMS : 3.3[m]



MAX : 8.8[m]
RMS : 3.4[m]

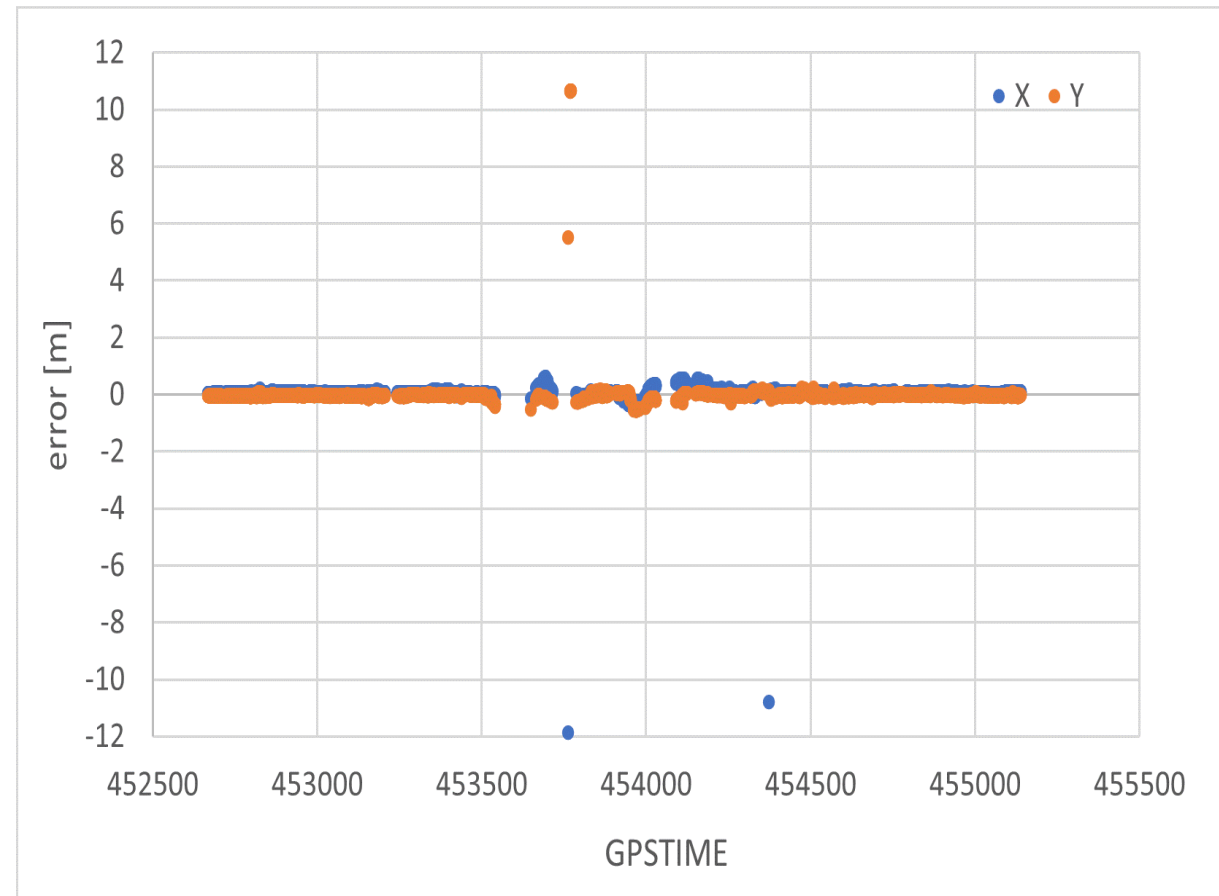
RTK利用

RTKプロット



FIX率 64%

POSLVとの位置誤差 (FIX解のみ)



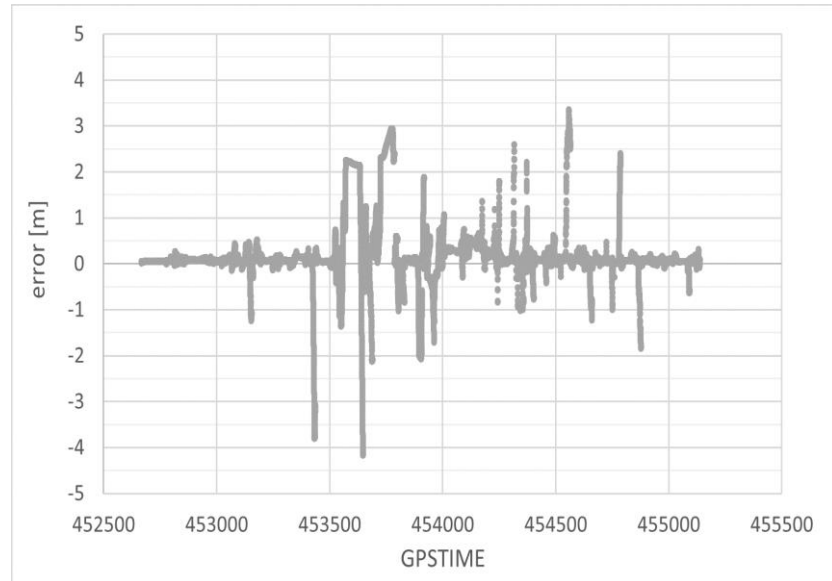
TC実行結果 (RTK利用)

POSLVを真値とした場合の位置誤差 (ECEF座標系)

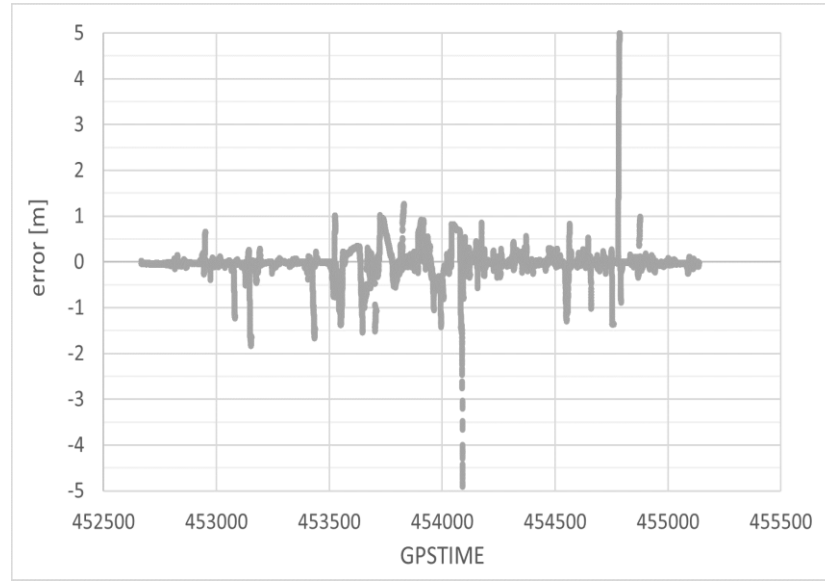
X

Y

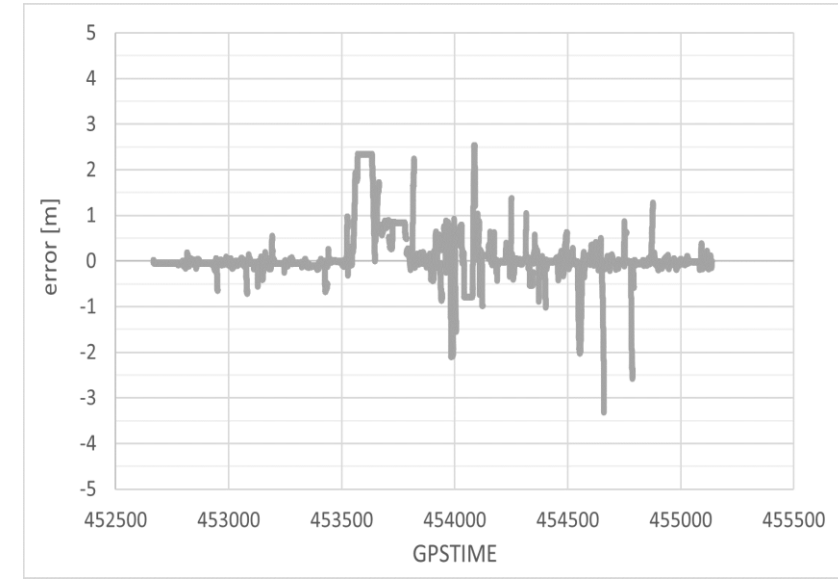
Z



MAX : 4.2[m]
RMS : 0.7[m]



MAX : 4.9[m]
RMS : 0.4[m]



MAX : 3.3[m]
RMS : 0.6[m]

まとめ

- 都市部高層ビル街において、RTK-GNSS/IMU/Speedのタイトカップリングの評価を行った
 - 状態方程式や観測方程式、ノイズの分散の設定値が統合の効果を得るために重要である
 - Speedセンサの活用により、GNSS測位不可の環境であっても蓄積誤差を抑えることができる
 - 信頼できるRTKの測位解を利用することで、統合測位の精度が向上する
- IMU側のバイアス推定やミスFIX検知手法の改善が今後の課題である