

携帯電波やLEO衛星等のGNSSに 依存しない測位に関する研究

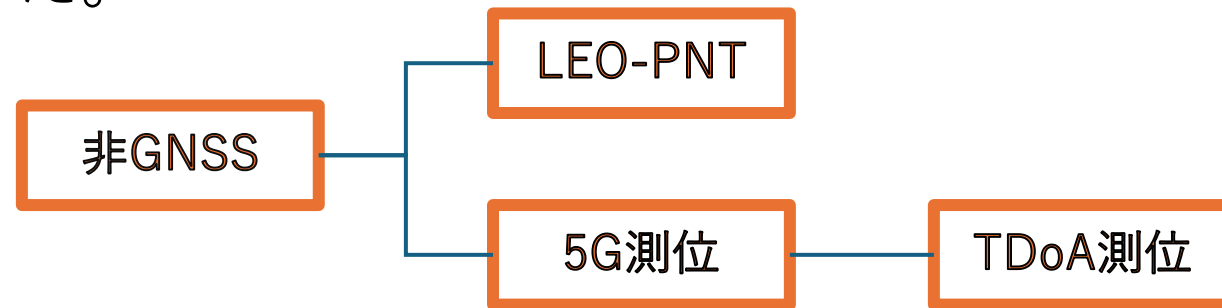
海事システム工学科
情報通信工学研究室 4年
2121058 山本誠人

目次

- 研究背景・目的
- TDoA測位概要
- 測位手法について
- シミュレーションシナリオ
- 結果
- まとめと今後の課題

研究背景・目的

- GNSS測位は高精度測位が可能である一方、都市部や屋内では建物遮蔽・マルチパスの影響により精度が低下し、測位不能となる場合がある。そのため、GNSSに依存しない測位手段の確立が重要である。
- 本研究ではTDoA測位の基礎を整理し、基地局配置（局数・幾何）および基地局の測定誤差が測位精度に与える影響をシミュレーションにより評価した。



TDoA測位の概要

- TDoA (Time Difference of Arrival) は1970年代から発展してきた古典的な測位原理であり、現在の無線測位・監視にも共通する基盤技術である。
- 過去には LORAN-C などの双曲線航法で利用され、現在では 航空機監視 (WAM) など、さまざまなシステムで応用されている。
- LTE (4G) でもセルラー測位は存在したが、5G では測位用参照信号・手順・評価が整備され、測位機能が体系化/強化されたので、携帯電波を使ったTDoA測位がしやすくなった

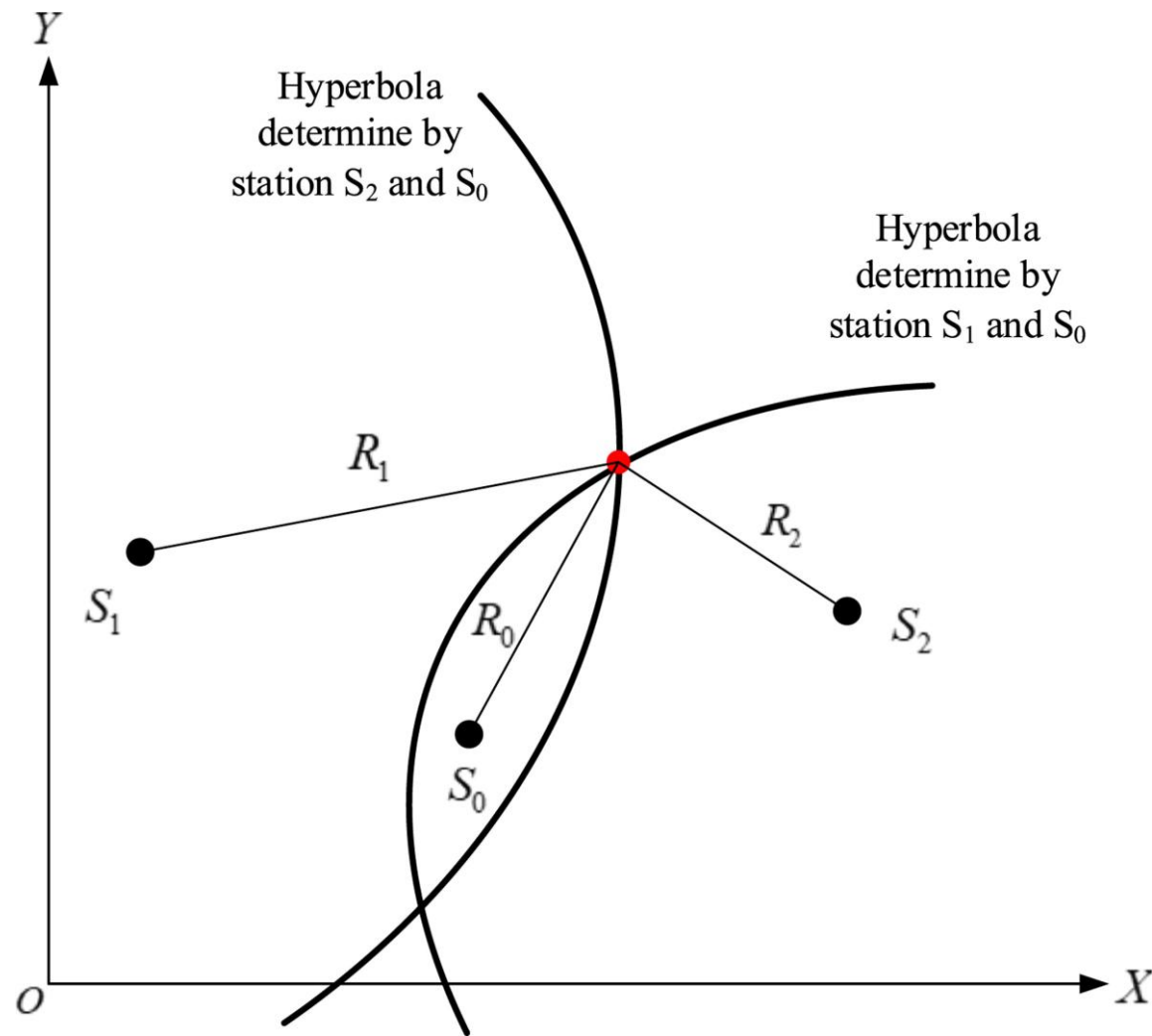
TDoA測位の原理1

- TDoAは、複数基地局で同一信号の到来時刻の差を測り、距離差からユーザー位置を推定する方式。
- TDoA測位の精度は主に
基地局配置（幾何）、時間測定誤差（ノイズ）、基地局間の同期ずれ、マルチパスによるバイアスに依存する。

TDoA測位の原理2

右の図に、2次元空間における目標のTDoA 測位例を示す。

この場合、 S_0 を基準局に定めると、基準局 と残り S_1 及び S_2 との電波 到来時刻差より距離差を取得して2 本の双曲線の交点からユーザー位置が推定できる。



TD0A測位手法

測位手法

- ユーザー位置 $\mathbf{x} = (x, y, z)^T$ を推定する。
- 基地局 i の既知位置を $B_i = (x_i, y_i, z_i)^T$ ($i = 0, 1, \dots, N$) とする。
- ユーザー位置-基地局間の幾何距離は次式で表される。

$$R_i(\mathbf{x}) = \|\mathbf{x} - B_i\| = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}$$

観測量

- 基準局 0 を置き、 $h_i(\mathbf{x})$ にノイズを付加する。
- 距離差 (m) としてまとめた観測量 v_i とする

$$v_i = h_i(\mathbf{x}) + w_i$$

$$w_i = c(\varepsilon_i - \varepsilon_0), \quad h_i(\mathbf{x}) = R_i(\mathbf{x}) - R_0(\mathbf{x})$$

c : 電波速度(m/s)

ε_i : ノイズ(s)

$h_i(\mathbf{x})$: ユーザー位置から見たときの局 i と基準局 0 までの幾何学的な距離差

シミュレーションでは正しい距離にノイズ入れて観測量にしている

テイラー展開による線形化

- 観測モデル $v_i = h_i(\mathbf{x}) + w_i$ は非線形である。

$$(h_i(\mathbf{x}) = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} - \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} \text{ が非線形})$$

- 反復ステップ k の推定値 $\mathbf{x}^{(k)}$ の周りで $h_i(\mathbf{x})$ を一次近似し、線形問題として解ける形にする。

$$h_i(\mathbf{x}) \approx h_i(\mathbf{x}^{(k)}) + (u_i^{(k)} - u_0^{(k)})^T \delta \mathbf{x}$$
$$\delta \mathbf{x} = \mathbf{x} - \mathbf{x}^{(k)}$$

$u^{(k)}$: 反復 k 回目の推定位置 $\mathbf{x}^{(k)}$ から見た 基地局方向の単位ベクトル

残差ベクトルの定義と重み付き最小二乗法更新

- 線形化後、観測式

$$\underset{\text{観測量}}{v_i} \approx \underset{\text{予測値}}{h_i(\mathbf{x}^{(k)})} + \underset{\text{残差}}{(u_i^{(k)} - u_0^{(k)})^T} \delta x + w_i$$

となる。

- ここで 既知量である $h_i(\mathbf{x}^{(k)})$ を左辺へ移し、残差（観測－予測）を定義する。
- この残差を全観測分まとめたものが残差ベクトル \mathbf{o} であり、重み付き最小二乗法で $\delta \mathbf{x}$ を求める

$$\mathbf{o}_i = v_i - h_i(\mathbf{x}^{(k)})$$

\mathbf{o}_i ：反復ステップ k における「観測－予測」の残差

行列表現と重み付き最小二乗法の解

- 線形化された観測方程式は

$$\mathbf{o} = H\delta\mathbf{x} + \mathbf{w}$$

- 観測誤差の共分散行列 \mathbf{V} を用いて、重み付き最小二乗法で $\delta\mathbf{x}$ を推定する。
- 得られた補正量で位置を更新し、収束するまで繰り返す。

$$\mathbf{o} = \begin{bmatrix} o_1 \\ \vdots \\ o_i \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} (u_1^{(k)} - u_0^{(k)})^T \\ \vdots \\ (u_i^{(k)} - u_0^{(k)})^T \end{bmatrix}, \quad \mathbf{w} = \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_i \end{bmatrix}$$

- 最適解:

$$\widehat{\delta\mathbf{x}} = (H^T \mathbf{V}^{-1} H)^{-1} H^T \mathbf{V}^{-1} \mathbf{v}$$

- 推定位置の更新:

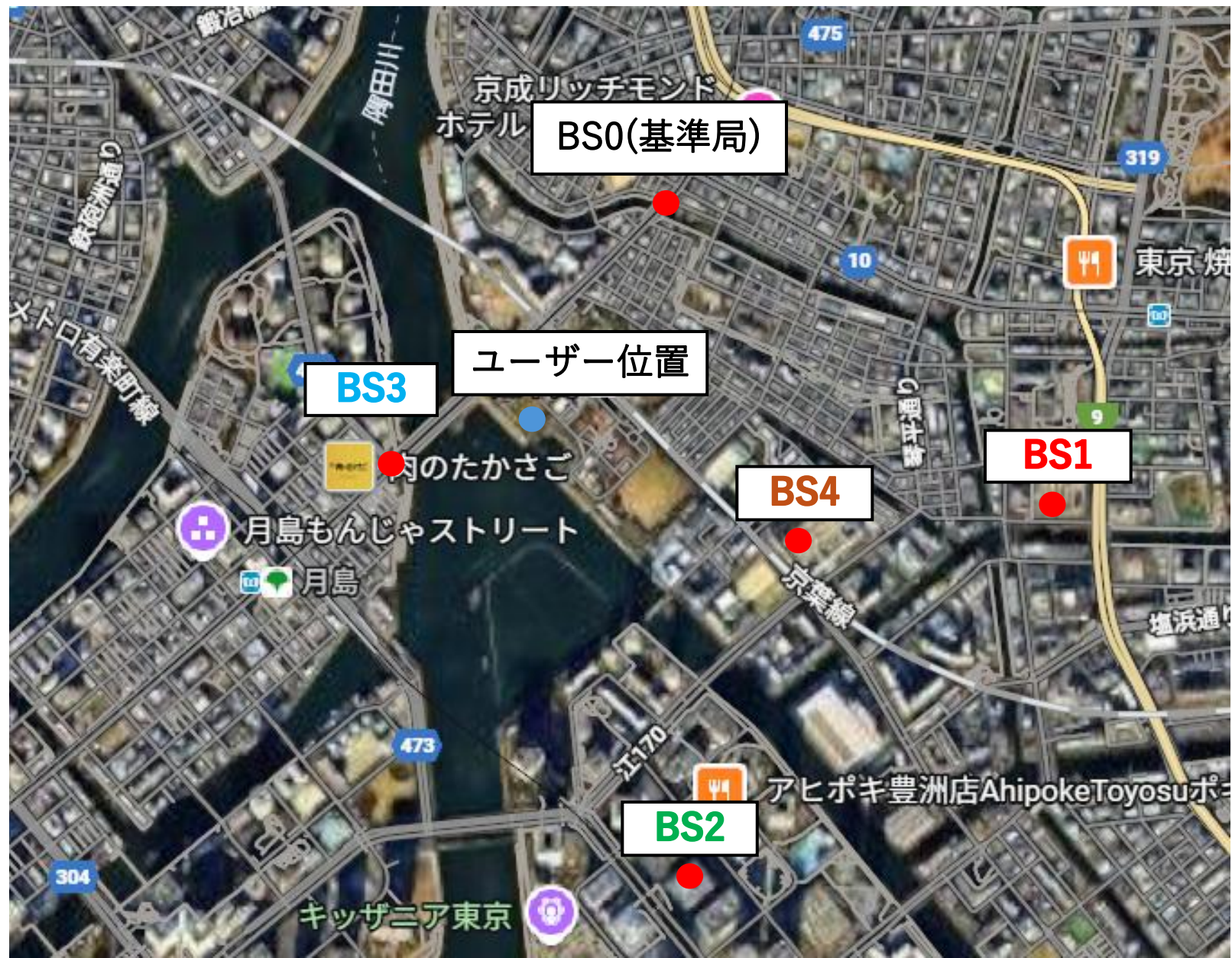
$$\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} + \widehat{\delta\mathbf{x}}$$

シミュレーション

シミュレーションシナリオ

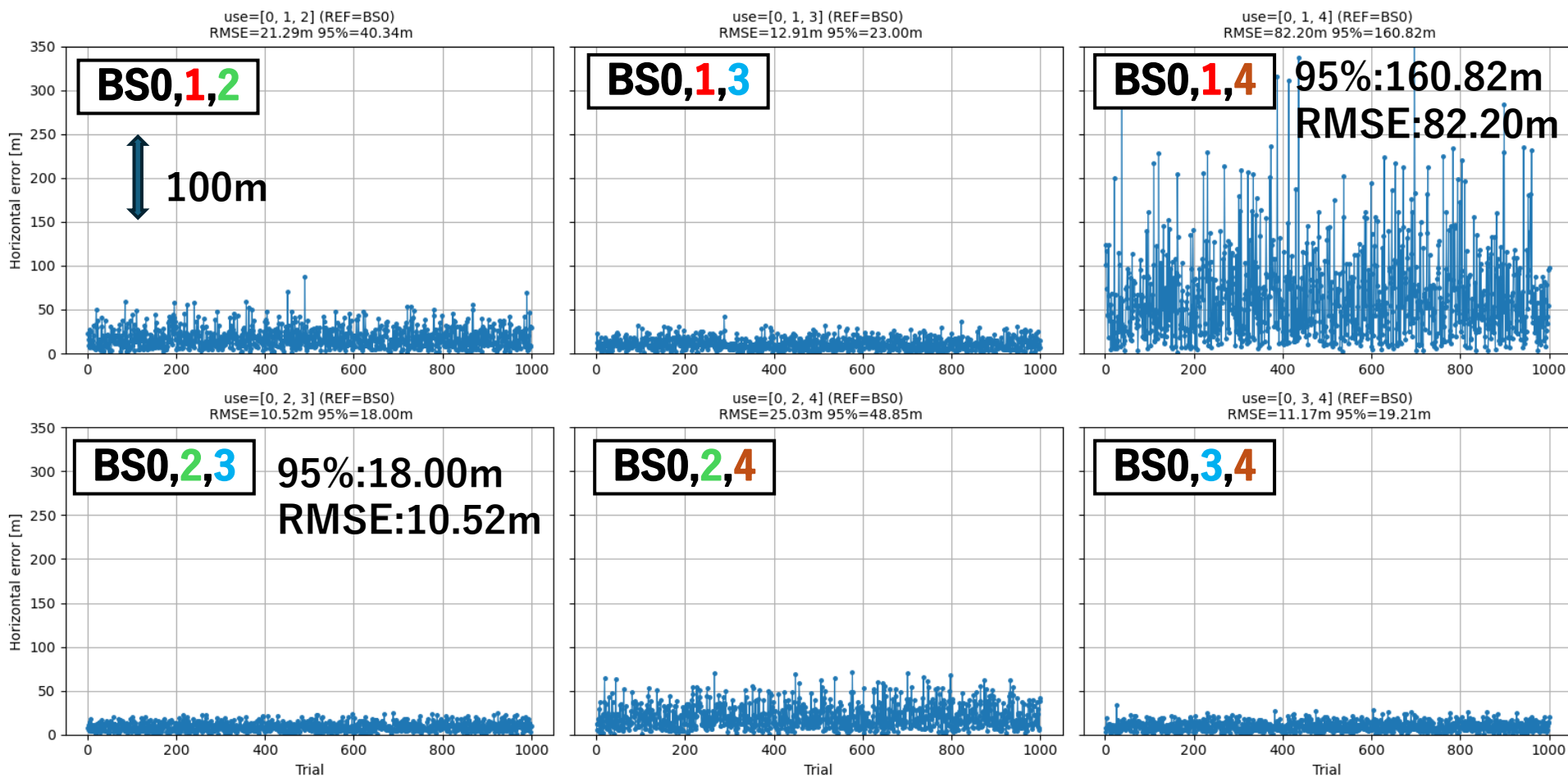
- 目的：越中島キャンパス付近に基地局があると仮定し、使用局数（3 / 4 / 5基）と観測ノイズ30 nsを与えたとき2次元TDoA測位の水平精度に与える影響を比較する。
- 座標：3Dマップから取得した平面座標（縮尺が一致するローカル座標系）を用いる
- 推定法：テイラー展開と重み付き最小二乗法
- 評価方法：ユーザー位置を1点に固定し、1000回試行で得られた推定位置から水平距離誤差の分布（RMSE・95%タイル）を比較する。

基地局の配置

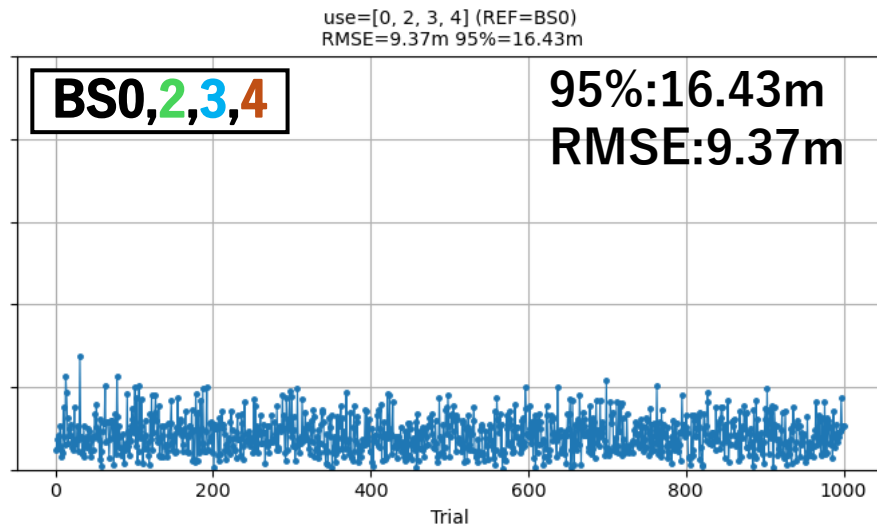
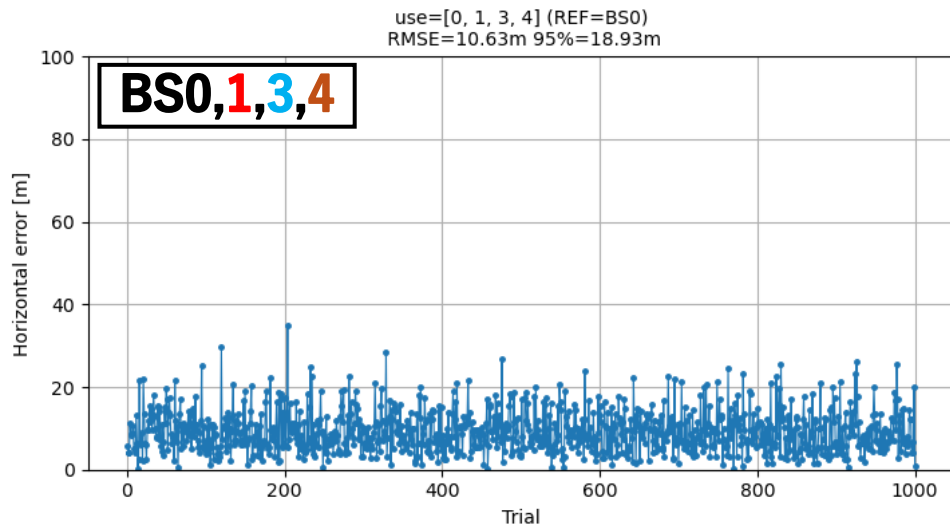
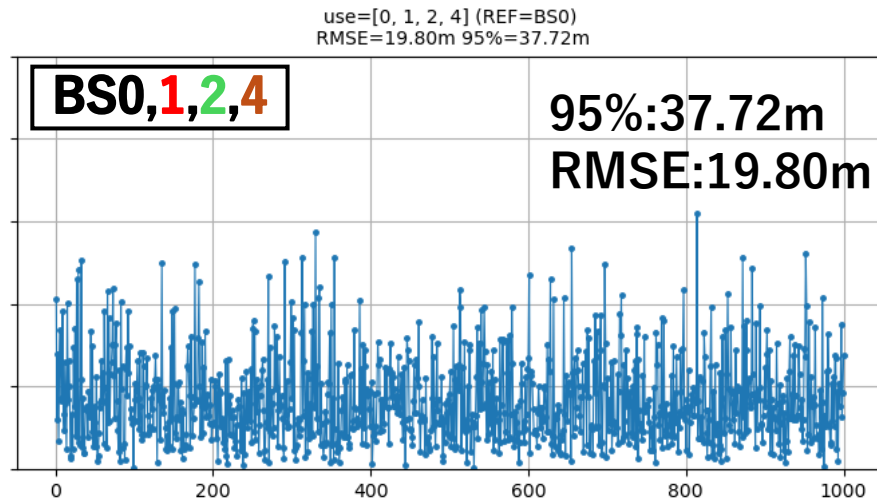
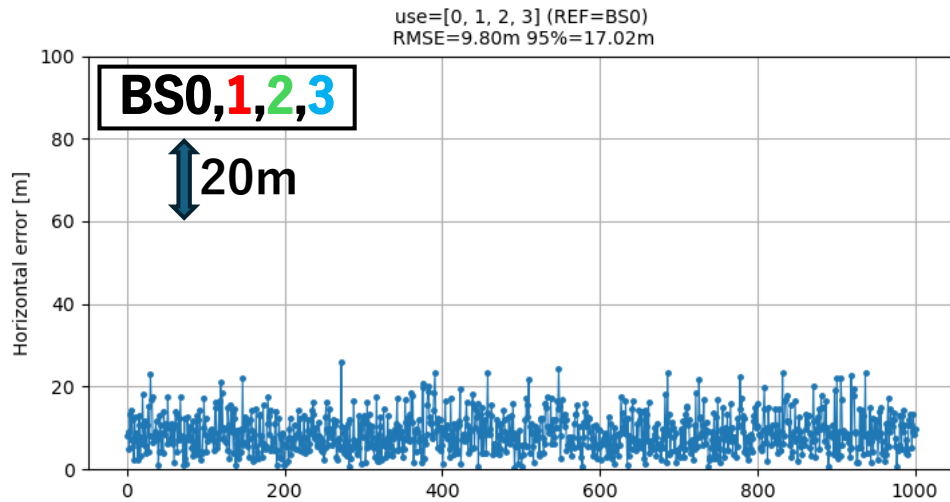


シミュレーション結果

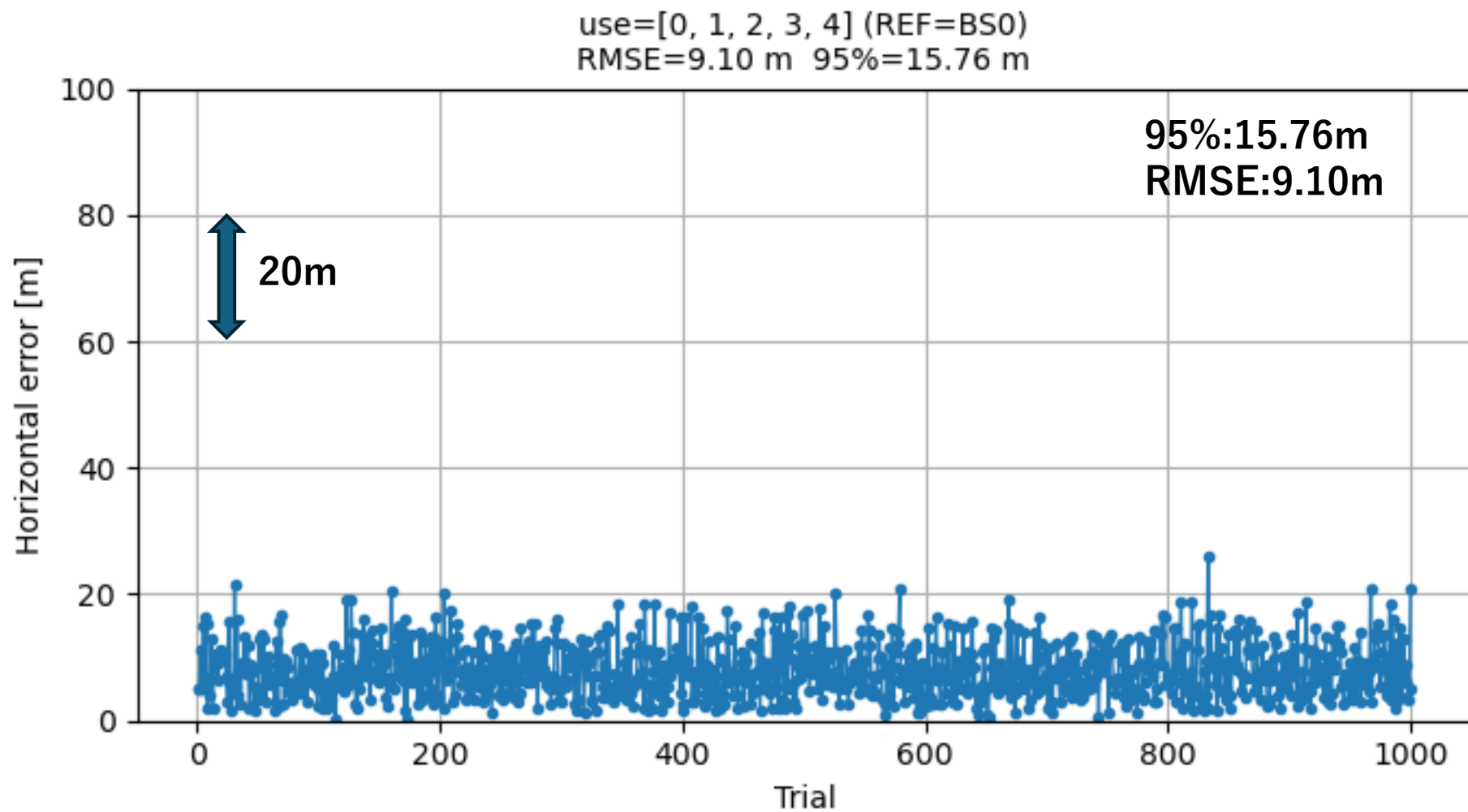
3基の水平誤差の結果



4基の結果



5基の結果



結果まとめ

- 3、4、5基でシミュレーションした結果、局数と基地局の選び方で大きく精度が変わることがわかった。
- 同じノイズ条件でも、基準局0に対して組み合わせを変えると、精度がいい組み合わせと悪い組み合わせで誤差が約7.5倍変わることがわかった。
- 次に同じ基地局配置で9点の場所でシミュレーションし、場所によって精度が変わるかどうか比較する

シミュレーションシナリオ

越中島キャンパスの9か所に端末があると仮定し、3基の基地局を使ってシミュレーションをした。

座標や推定モデル、誤差は前のシミュレーションと同条件にした。

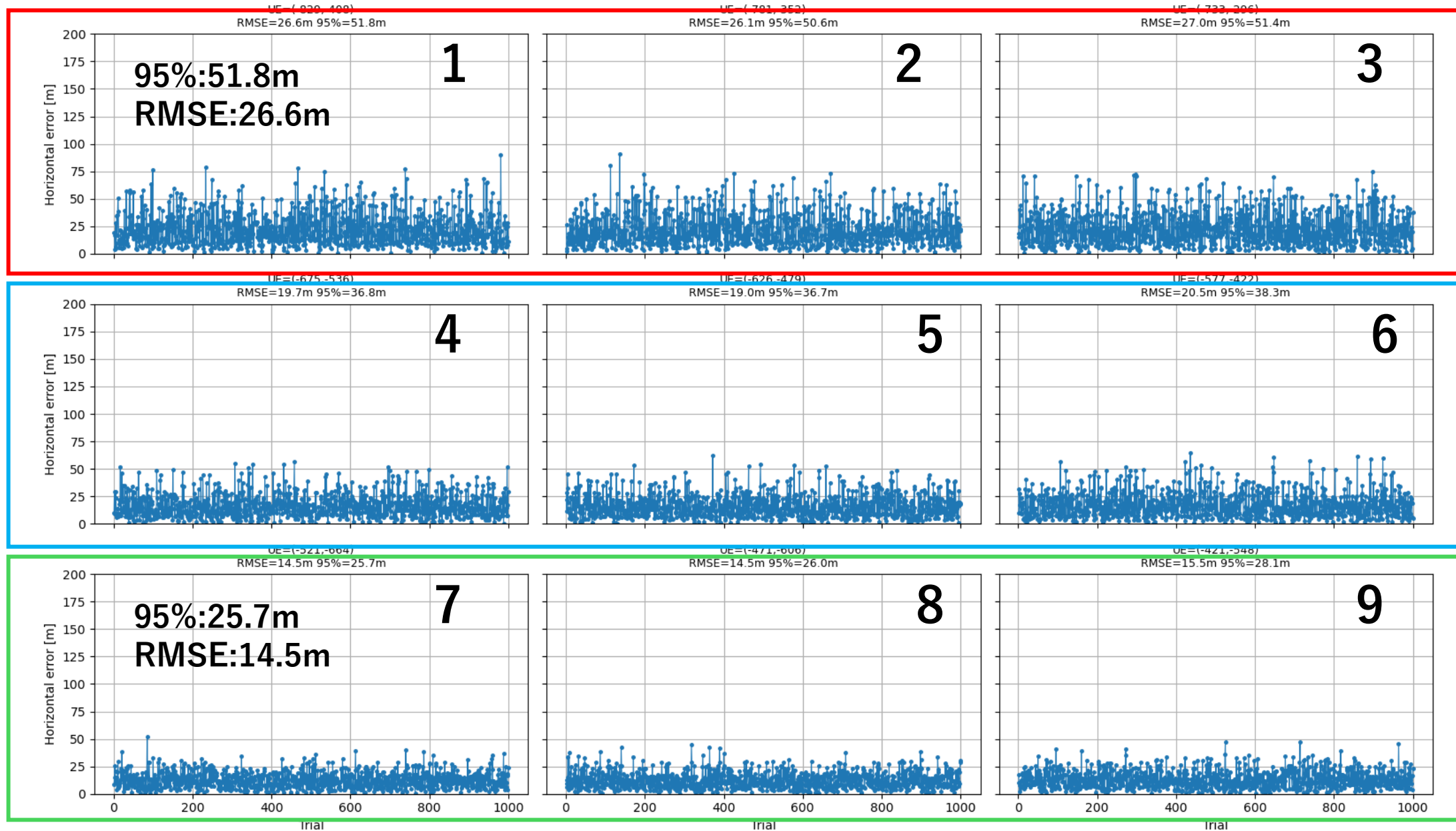
評価方法: 9点を1000回試行で得られた推定位置から水平距離誤差の分布（平均・RMSE・95%タイルでシミュレーション結果を比較した。

基地局の配置



シミュレーション結果

sigma=30 ns, USE=[0, 4, 2]



結果

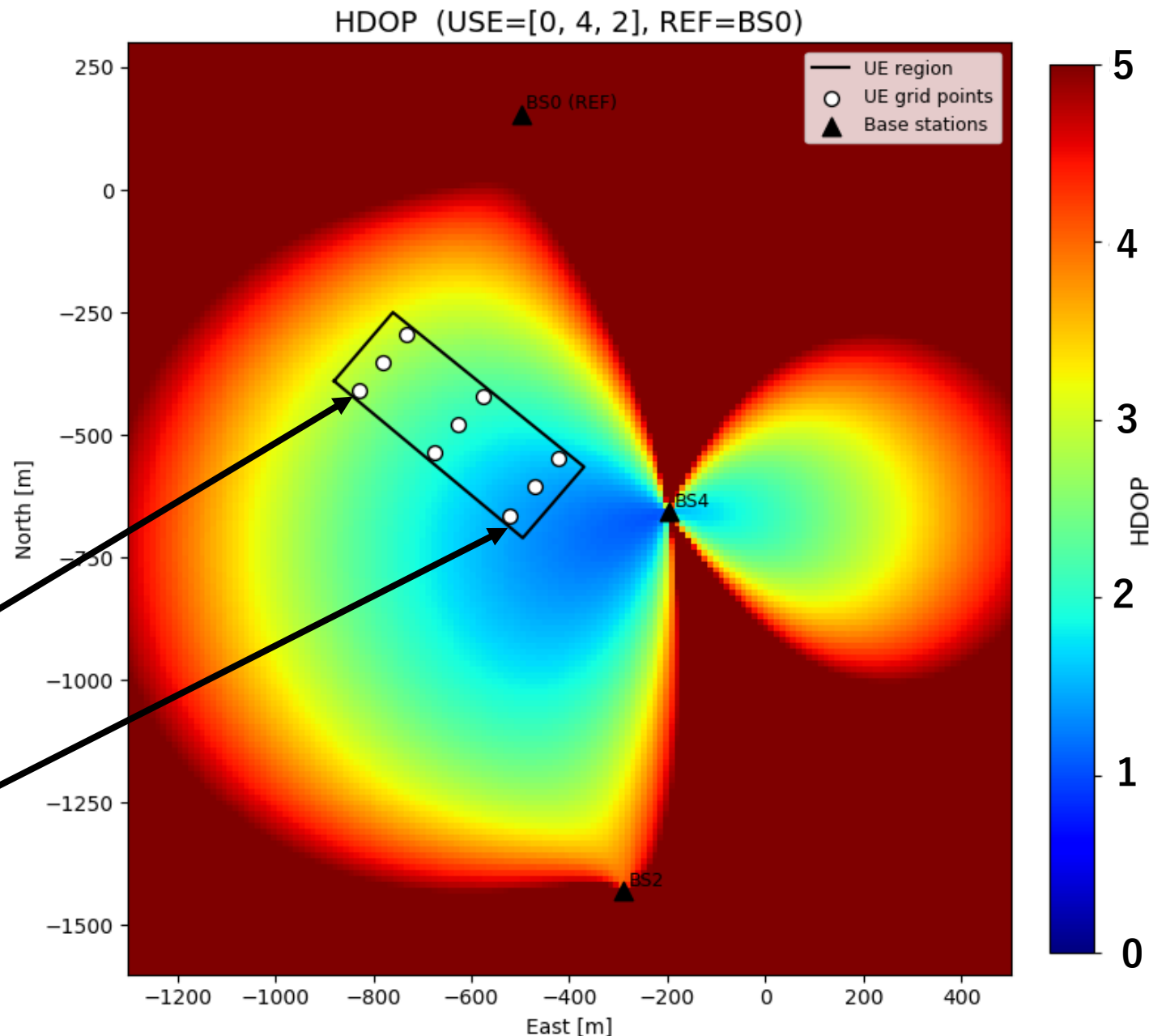
同じ局配置でも場所を変えるだけで精度がいいところと悪いところで約2倍の測位誤差が出た。

今回のシミュレーションにより、TDoA測位では基地局数と基地局配置、基地局の幾何が測位精度に大きく影響することがわかった。

基地局の幾何による、精度の劣化係数(HDOP)の数字が大きいほど精度が悪化する

95%:51.8m
RMSE:26.6m

95%:25.7m
RMSE:14.5m



まとめと今後の課題

- シミュレーションの結果、同じノイズ条件でも基地局の「数」と「配置」を変えるだけで、水平誤差の大きさが大きく変化することが分かった。
- また、基地局配置が同じでも ユーザー位置によって誤差が最大で約2倍程度変化し、HDOP が大きい場所ほど測位精度が悪化することを確認した。
- 基地局間の同期ずれや NLOS/マルチパスの影響を無視したが、実際の都市環境ではこれらの影響が大きいと考えられる。
- そのため、3D モデルを使って遮蔽や反射を含めた LOS / NLOS やマルチパスを考慮したTDoA シミュレーションへ拡張する。