

3機の無人航空機を用いた ユーザ三次元位置検出手法の特性評価

日本大学

○深谷泰良 石川博康

目次

◆研究の目的・背景

◆測位原理

◆シミュレーションモデル

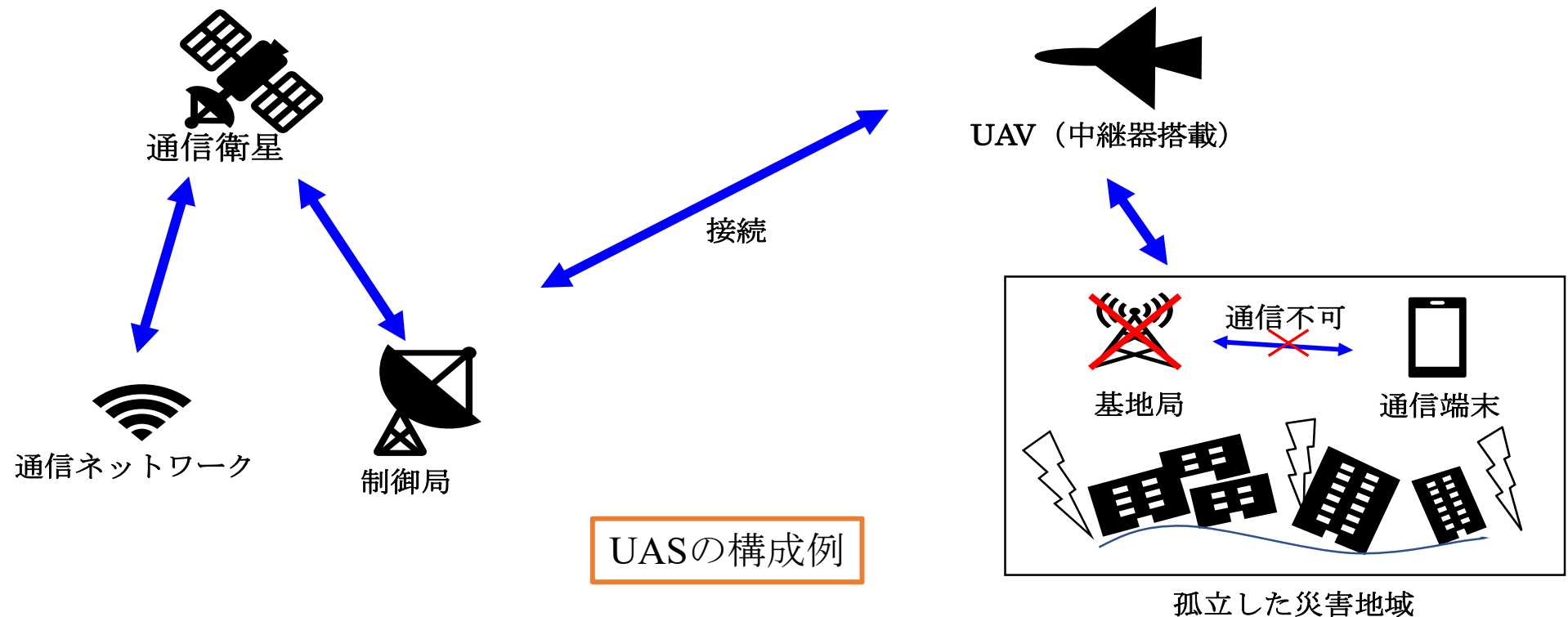
◆シミュレーション結果

◆まとめ

研究の目的・背景

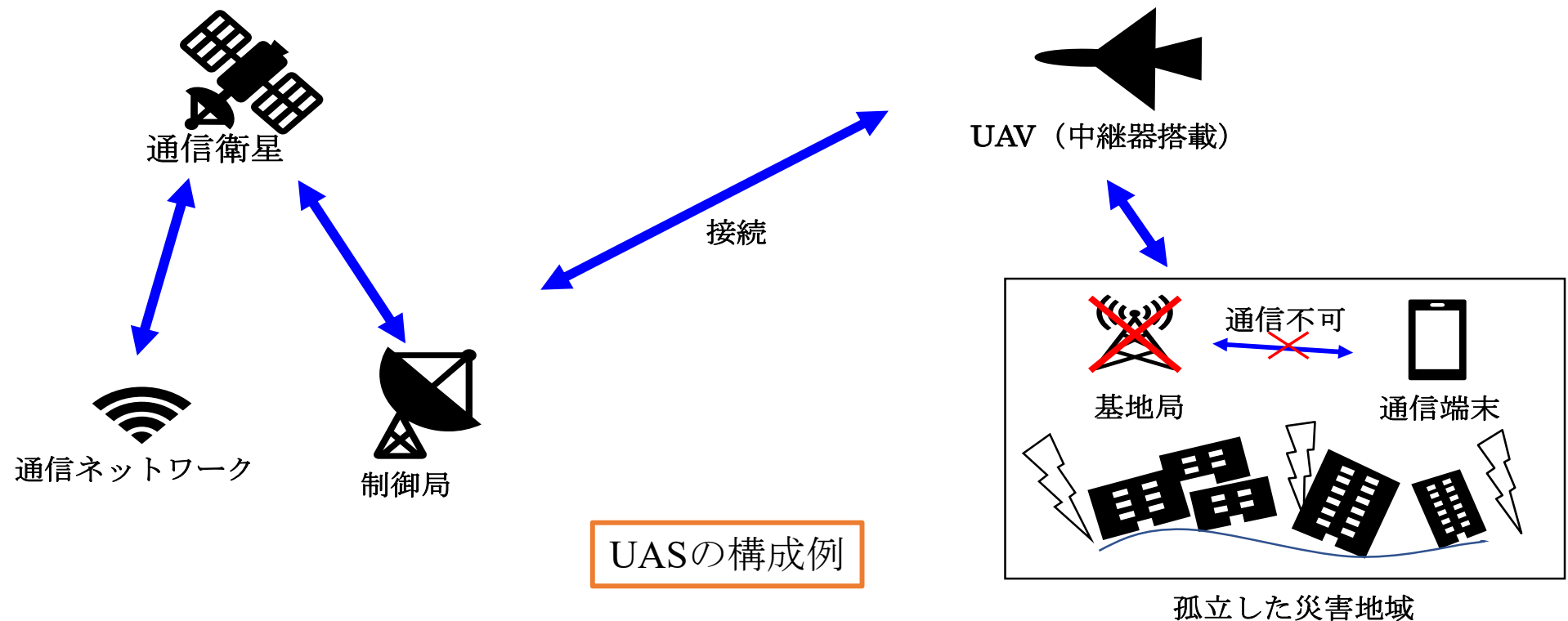
研究の背景

- 大規模災害等発生時には、携帯電話等の公的な通信手段の提供が困難
- 安否確認や情報収集のために迅速な通信ネットワークの提供が必要
- 無線中継機能を有する無人航空機(UAV)を用いた無人航空機システム(UAS)の活用が注目



研究の背景

- UASではUAVが上空を旋回飛行することを想定
- 地上端末ーUAV間の送受信信号の搬送波周波数にドップラーシフトが発生
- このドップラーシフトを観測することによりユーザ位置の検出が可能



研究の目的

●従来研究では

- 複数のUAVを介して観測されるドップラーシフトを用いた
最小二乗法によるユーザ位置検出手法の提案
- UASを前提としてUAVが円周回飛行・8の字飛行・直線飛行等
を行うモデルでのシミュレーション評価を実施
⇒XY平面のみを考えた二次元測位での評価

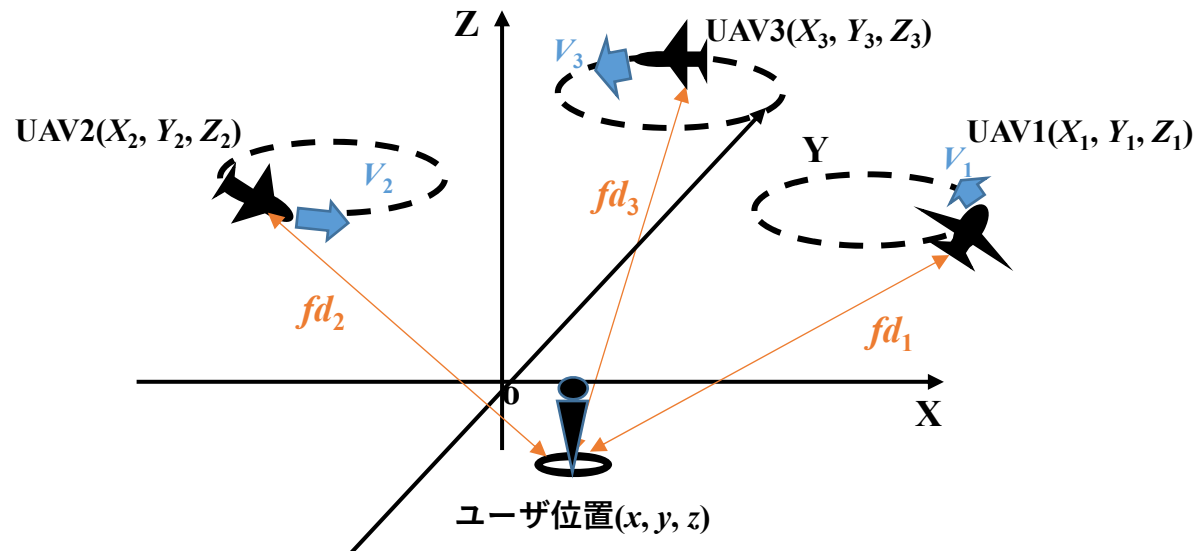
●本研究では

- 3機のUAVが円周回飛行をするシミュレーションモデルを想定
- Z軸方向を追加した三次元測位と従来の二次元測位の位置検出
特性を比較・評価

測位原理

測位原理

- ユーザが所有する地上端末から一定周波数のトーン信号（CW信号）を送信
- 上空を高速飛行するUAVを中継して地上制御局で受信
- 地上端末－UAV間の送受信信号の搬送波周波数にドップラーシフトが発生
- 観測されたドップラーシフトから最小二乗法を利用してユーザの位置検出



3機のUAVによるユーザ位置検出システム

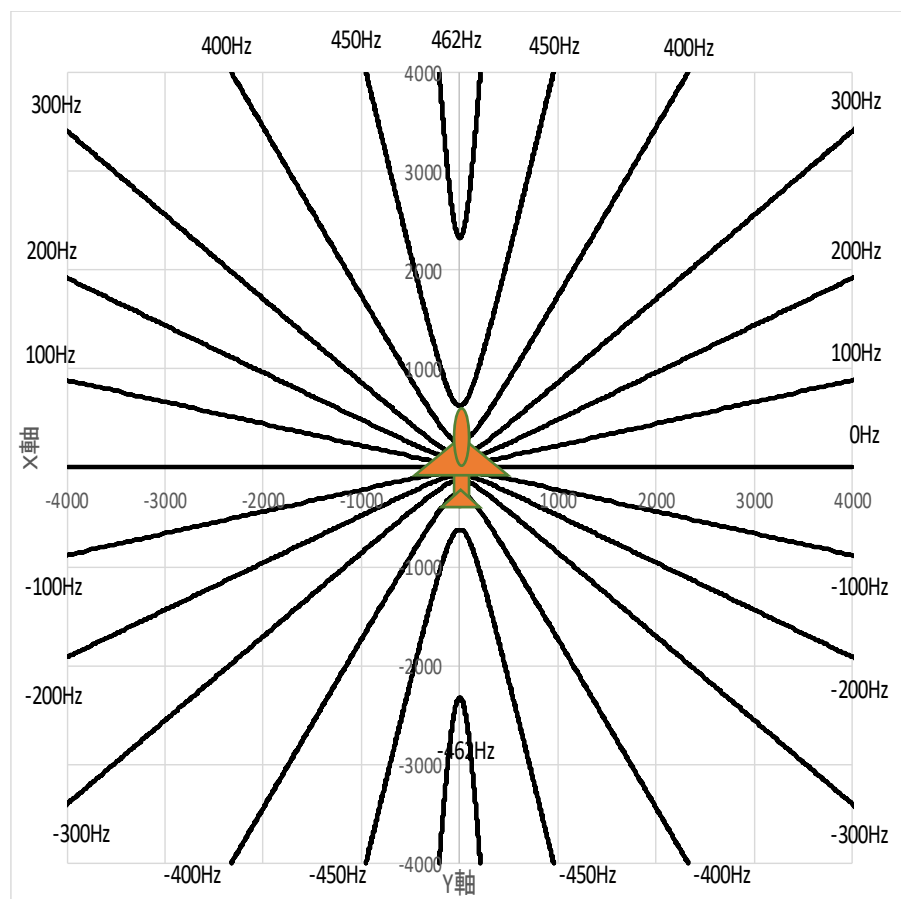
ドップラーシフトについて

- 地上のユーザ位置(x, y, z)
- 時刻 t で i 番目($i=1, 2, 3$)のUAV飛行位置($X_i(t), Y_i(t), Z_i(t)$)
- 各UAVの速度ベクトル $V_i(t) = (V_{xi}(t), V_{yi}(t), V_{zi}(t))$
- このとき, 時刻 t に観測したユーザと i 番目のUAV間に生じるドップラーシフト $fd_i(t)$ は次式となる

$$fd_i(t) = -\frac{V_{xi}(t)(X_i(t) - x) + V_{yi}(t)(Y_i(t) - y) + V_{zi}(t)(Z_i(t) - z)}{\lambda\sqrt{(X_i(t) - x)^2 + (Y_i(t) - y)^2 + (Z_i(t) - z)^2}}$$

- λ は搬送波周波数の波長

UAVによる ドップラーシフト分布



ドップラーシフト量を観測するとユーザ位置は双曲面上に分布



これを1機のUAVで複数回または
複数のUAVで1回測定観測
⇒ユーザ位置を双曲面の交点として検出可能

測位原理

- **最小二乗法**により，各UAVに対して次式のような関係式が得られる

$$\Delta f d_i(t) = \frac{\partial f d_i(t)}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f d_i(t)}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial f d_i(t)}{\partial z} \Delta z$$

- この関係式からなる連立方程式を解くため，各UAVにおけるドップラーシフトに関する偏微分方程式を行列式G，ユーザ位置の変化量($\Delta x, \Delta y, \Delta z$)を転置行列Uとして導出

$$G = \begin{bmatrix} \frac{\partial f d_1(t)}{\partial x} & \frac{\partial f d_1(t)}{\partial y} & \frac{\partial f d_1(t)}{\partial z} \\ \frac{\partial f d_2(t)}{\partial x} & \frac{\partial f d_2(t)}{\partial y} & \frac{\partial f d_2(t)}{\partial z} \\ \frac{\partial f d_3(t)}{\partial x} & \frac{\partial f d_3(t)}{\partial y} & \frac{\partial f d_3(t)}{\partial z} \end{bmatrix} \quad U = [\Delta x \quad \Delta y \quad \Delta z]^T$$

また， $[\Delta f d_1(t) \quad \Delta f d_2(t) \quad \Delta f d_3(t)]^T = F^T = GU$ から

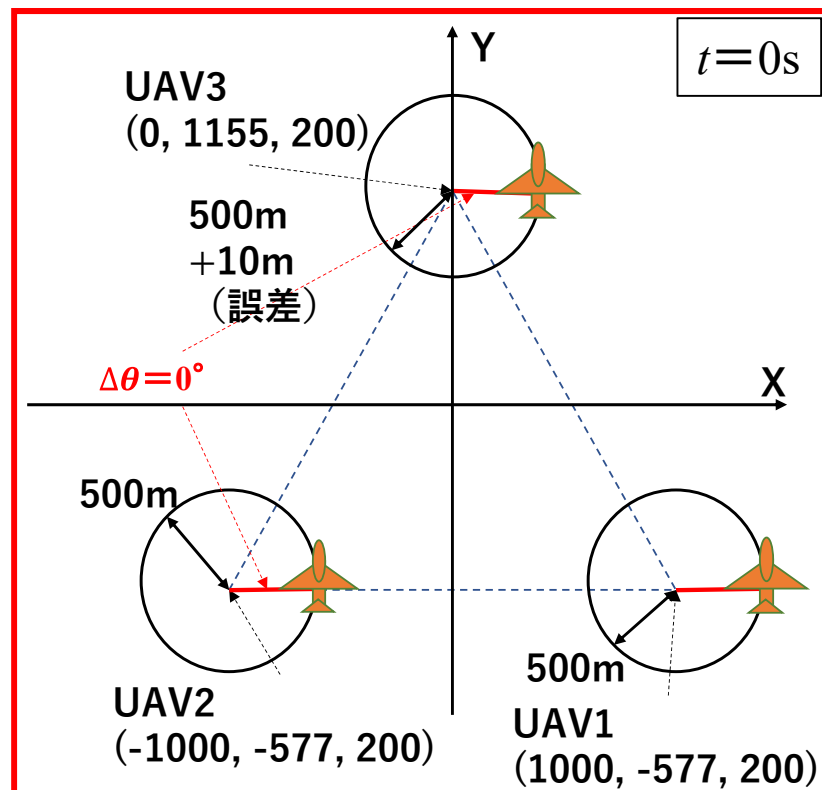
$$U = (G^T G)^{-1} G^T F^T$$

- ユーザ位置の変化量が十分に小さくなるまで更新していくことでユーザ位置推定
- 本研究では**最小二乗法に基づく位置検出手法**を採用
- **三次元測位**を行うため，**3機のUAV**を使用
(二次元測位では高度情報を既知として扱う)

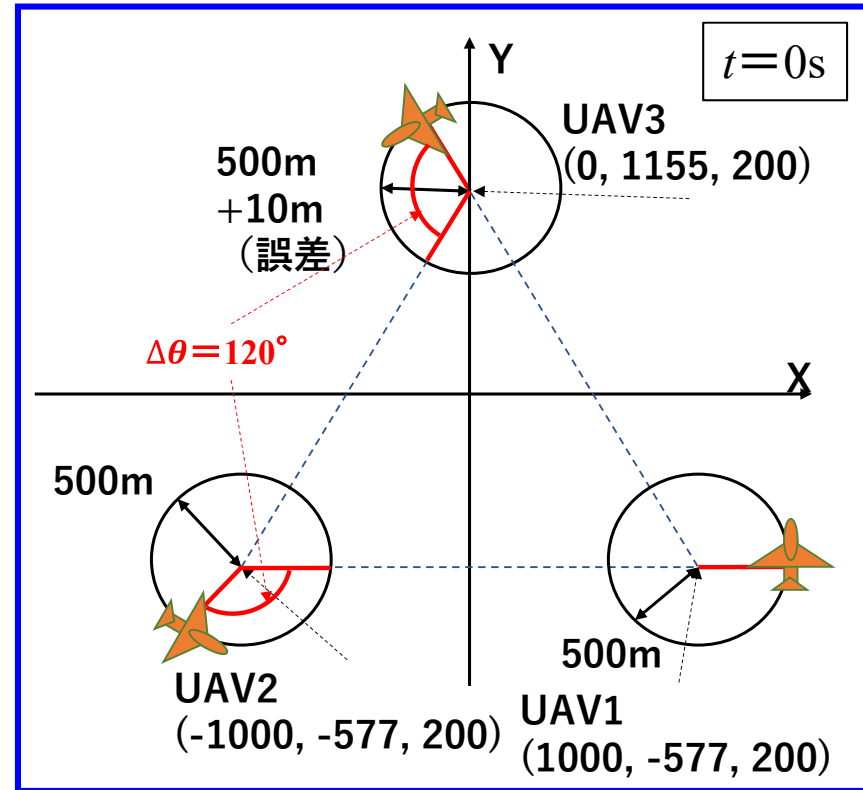
シミュレーションモデル

シミュレーションモデル

- 飛行速度 : $v=100\text{km/h}$
- 飛行誤差 : UAV3の回転半径に+10m
- 搬送波周波数 : $f_c=5\text{GHz}$
- UAV高度 : $Z=200\text{m}$
- 評価対象エリア : 8km四方 (中心をXY平面の原点に設定)
- ユーザ位置高度 : $z=0\text{m}$
- 回転半径 : $r=500\text{m}$
- 初期位相差 : $\Delta\theta=0^\circ, 120^\circ$
- 測定時刻 : $t=0\text{s}\sim 113\text{s}$



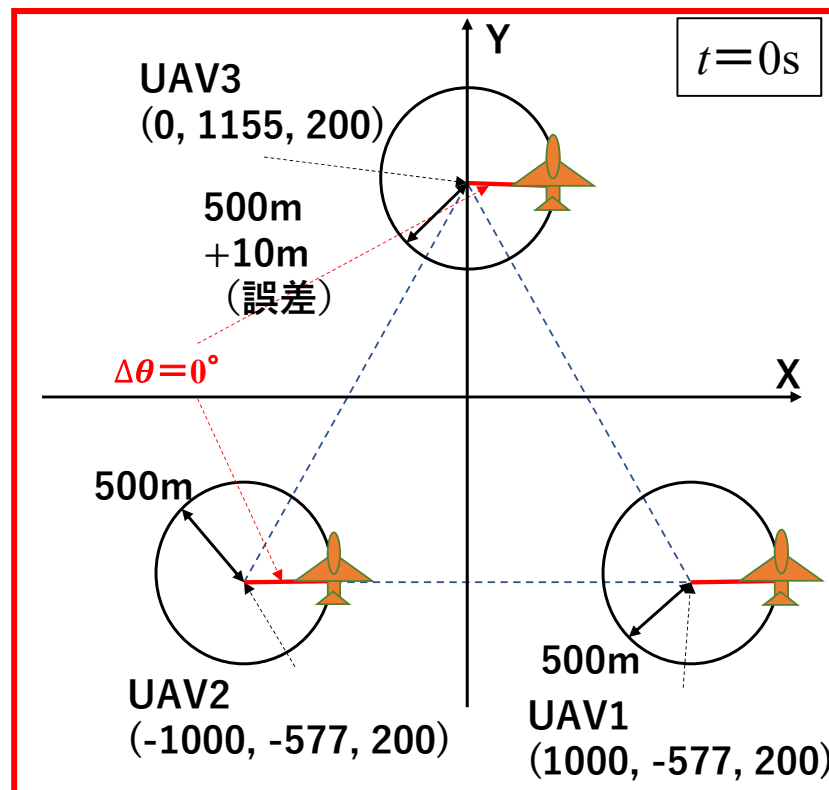
(a)各UAVの位相差 0° の場合



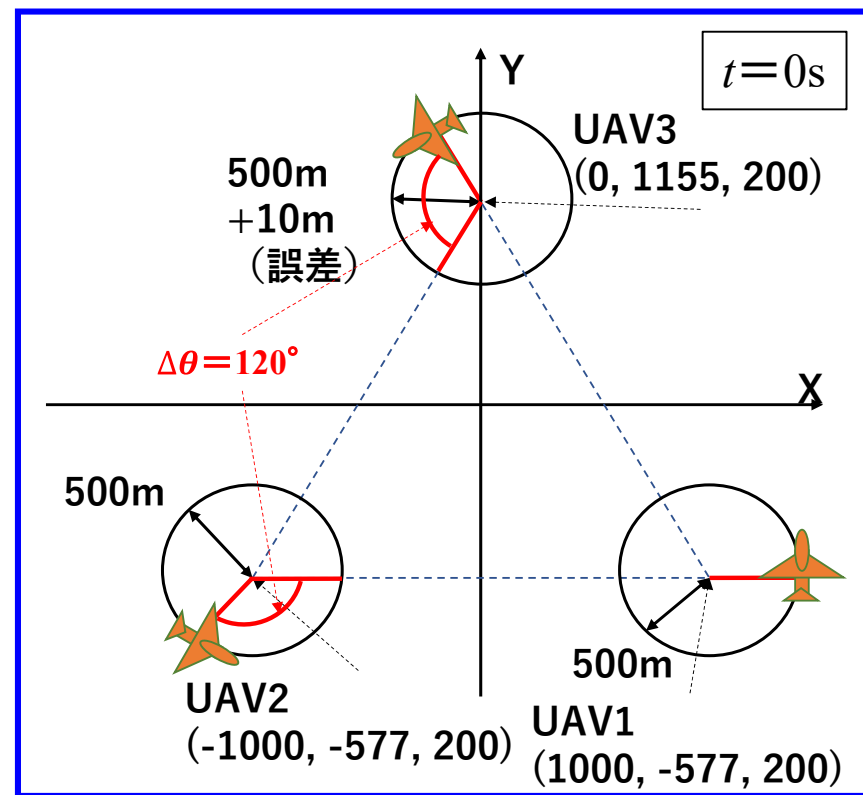
(b)各UAVの位相差 120° の場合

シミュレーションモデル

測定時間 $t=0\text{s}\sim 113\text{s}$ において初期位相差を $\Delta\theta=0^\circ, 120^\circ$ としたときの
 二次元測位を行う**二次元測位モデル**，三次元測位を行う**三次元測位モデル**の
4通りのシミュレーションモデルについてXY平面で評価



(a)各UAVの初期位相差 0° の場合



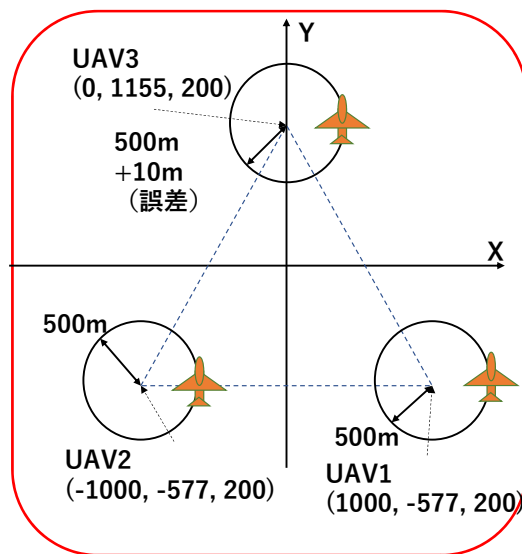
(b)各UAVの初期位相差 120° の場合

シミュレーション結果

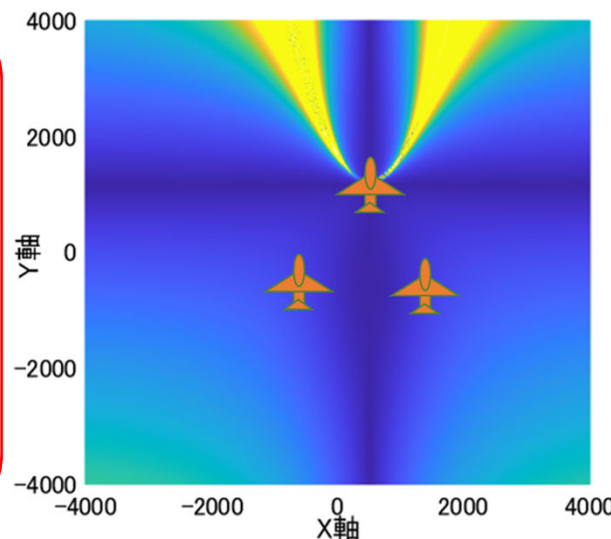
位置検出誤差の面的分布特性① ($t=0s$)

青色のエリアほど位置検出誤差が0mに近く精度が**良好**
 黄色のエリアほど位置検出誤差が100m($\geq 100m$)に近く精度が**劣化**

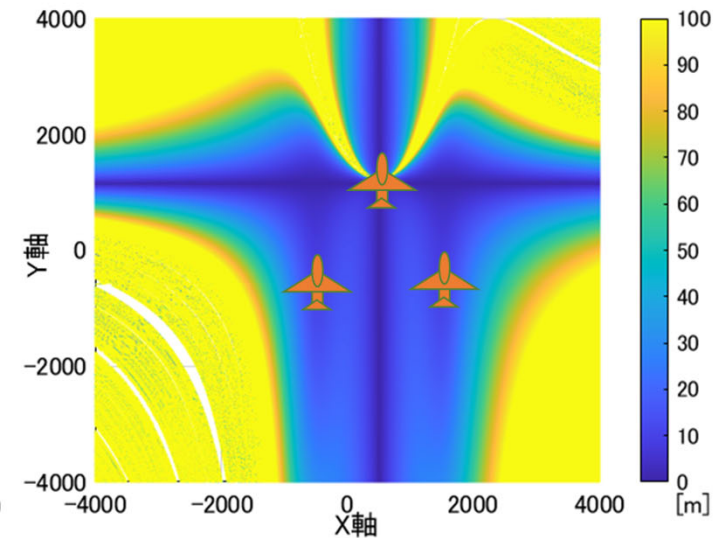
- 初期位相差を与えない場合 ($\Delta\theta = 0^\circ$)
 $\Rightarrow$ 三次元測位モデルの測位精度が**大きく劣化**
- Z軸方向の影響による測位精度は**劣化傾向**



$\Delta\theta = 0^\circ$



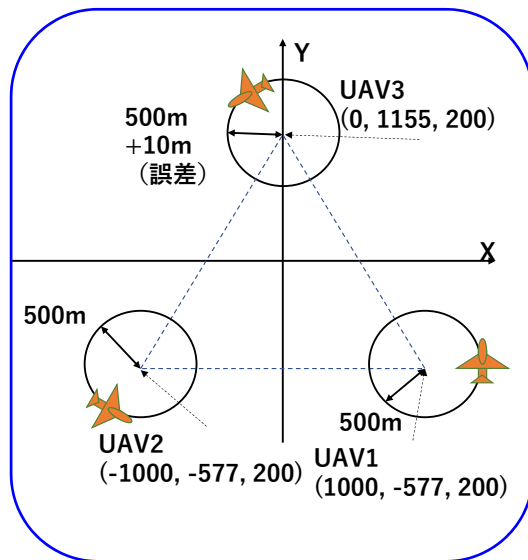
(a) 二次元測位モデル ($\Delta\theta = 0^\circ$)



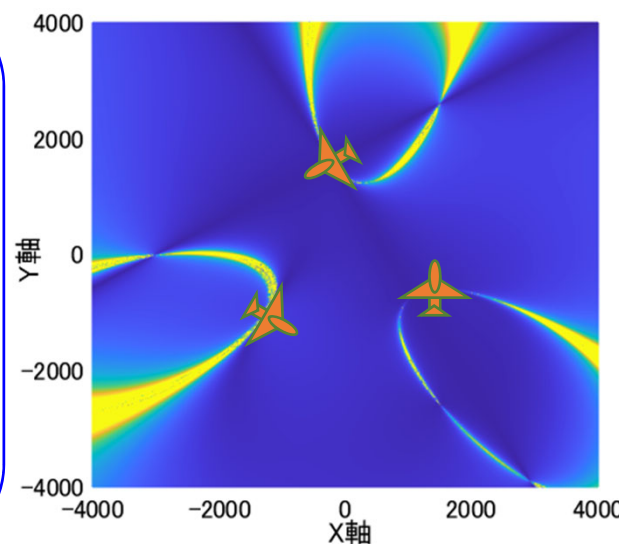
(b) 三次元測位モデル ($\Delta\theta = 0^\circ$)

位置検出誤差の面的分布特性② ($t=0s$)

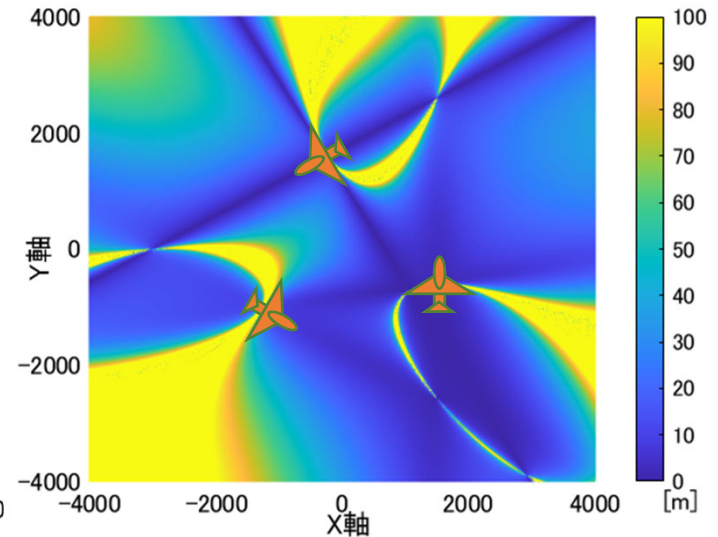
- 初期位相差を 120° 与えた場合 ($\Delta\theta = 120^\circ$)
 - $\Rightarrow$ 三次元測位モデルの測位精度は**劣化傾向**
 - $\Rightarrow$ 二次元測位モデル, 三次元測位モデルのいずれの場合も
初期位相差を与えることで**測位精度良好**
- 特に三次元測位モデルでは大幅に測位精度の**改善**を確認
 - $\Rightarrow$ 累積確率分布による特性評価でより詳細に比較検討



$$\Delta\theta = 120^\circ$$



(c) 二次元測位モデル ($\Delta\theta = 120^\circ$)



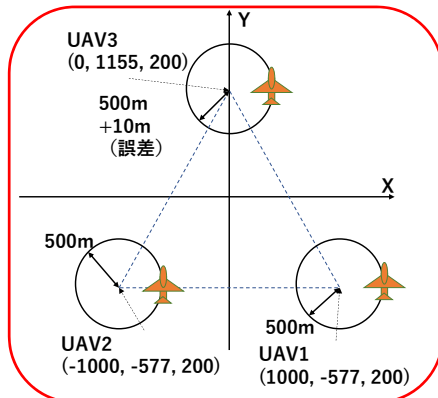
(d) 三次元測位モデル ($\Delta\theta = 120^\circ$)

位置検出推定誤差の累積分布特性① ($t=0s$)

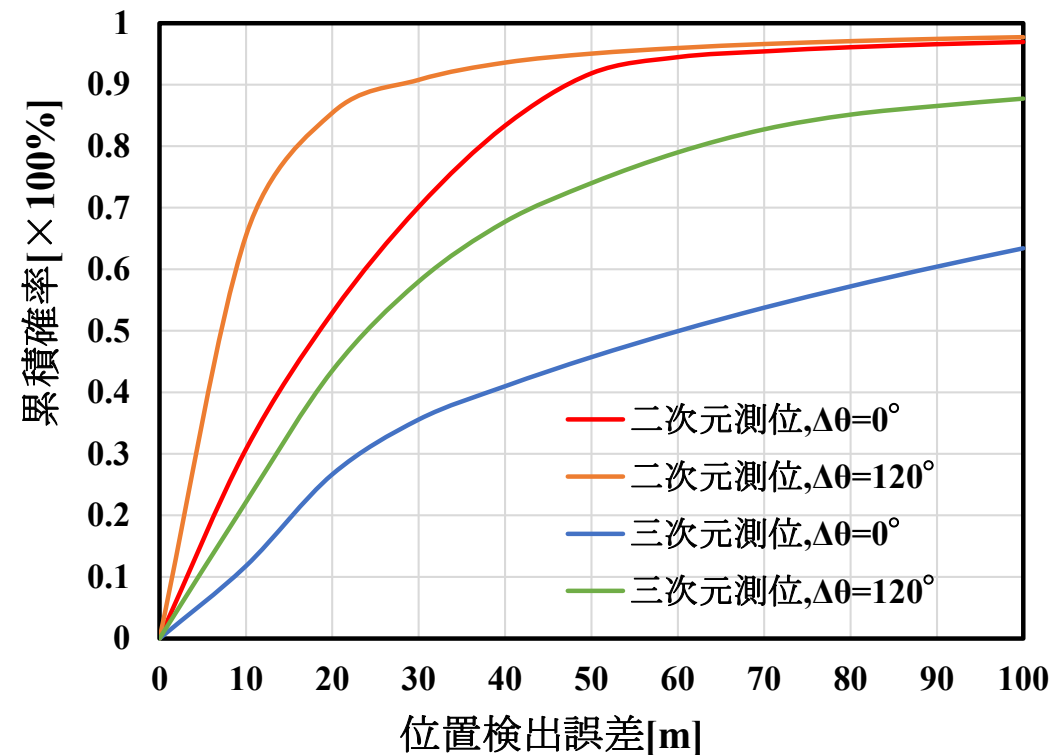
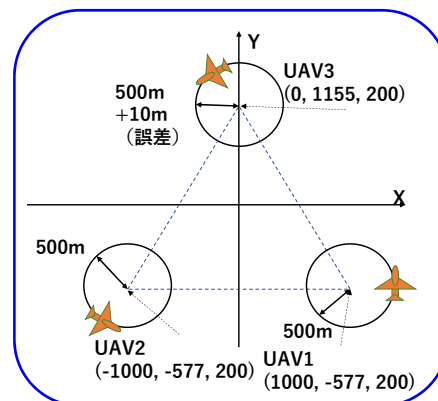
位置検出誤差の値が小さい→測位精度が良好

- 三次元測位では測位精度劣化
- 初期位相差を与えることで測位精度改善
- 累積確率50%値では
三次元測位は位置検出誤差が約35m改善

$\Delta\theta = 0^\circ$



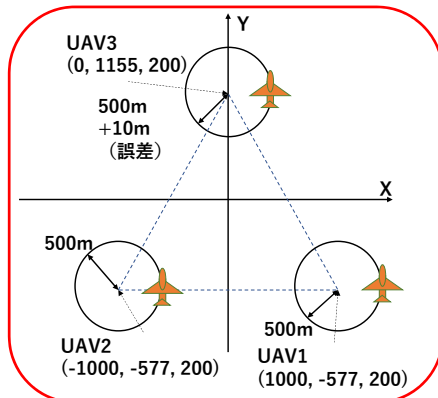
$\Delta\theta = 120^\circ$



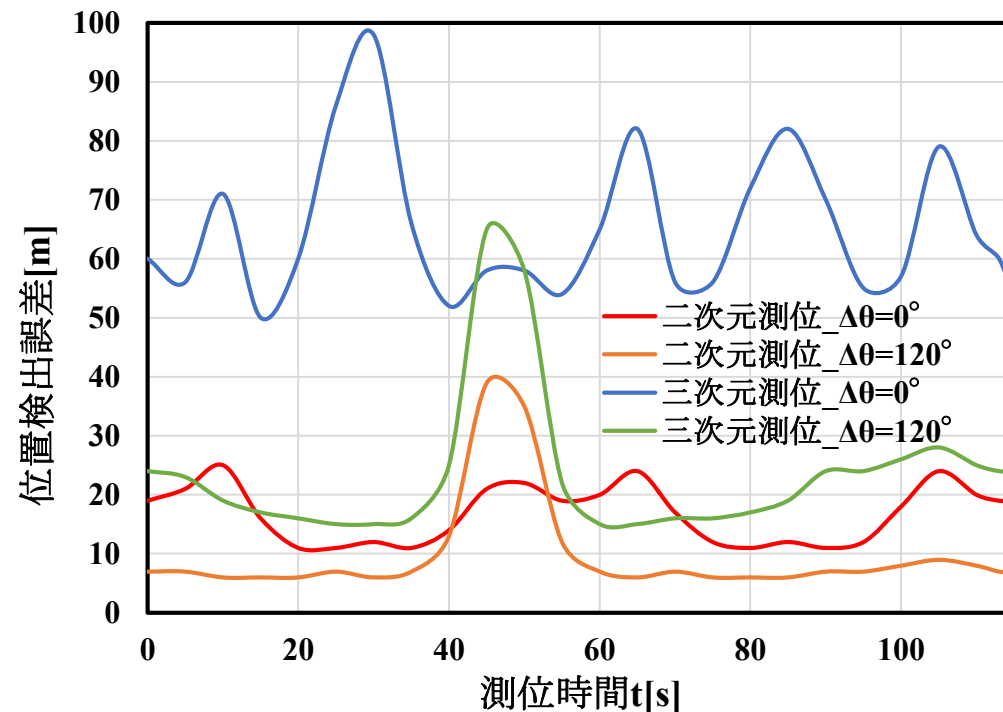
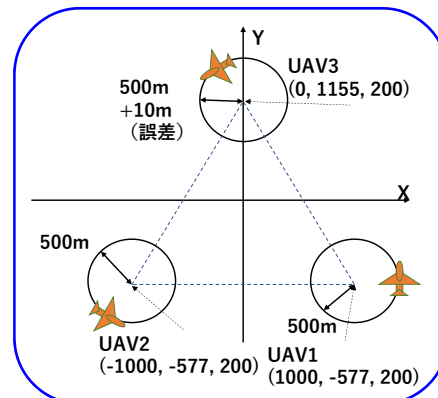
位置検出推定誤差の時間変化特性① (累積確率50%値)

- 三次元測位は測位精度劣化
 - 初期位相差を与えることで測位精度改善
- ⇒三次元測位では最大で約80m改善($t=30s$)
- $\Delta\theta=120^\circ$ の場合, $t=45s$ 付近で測位精度は大きく劣化
- ⇒UAVの位置関係が最接近

$\Delta\theta=0^\circ$

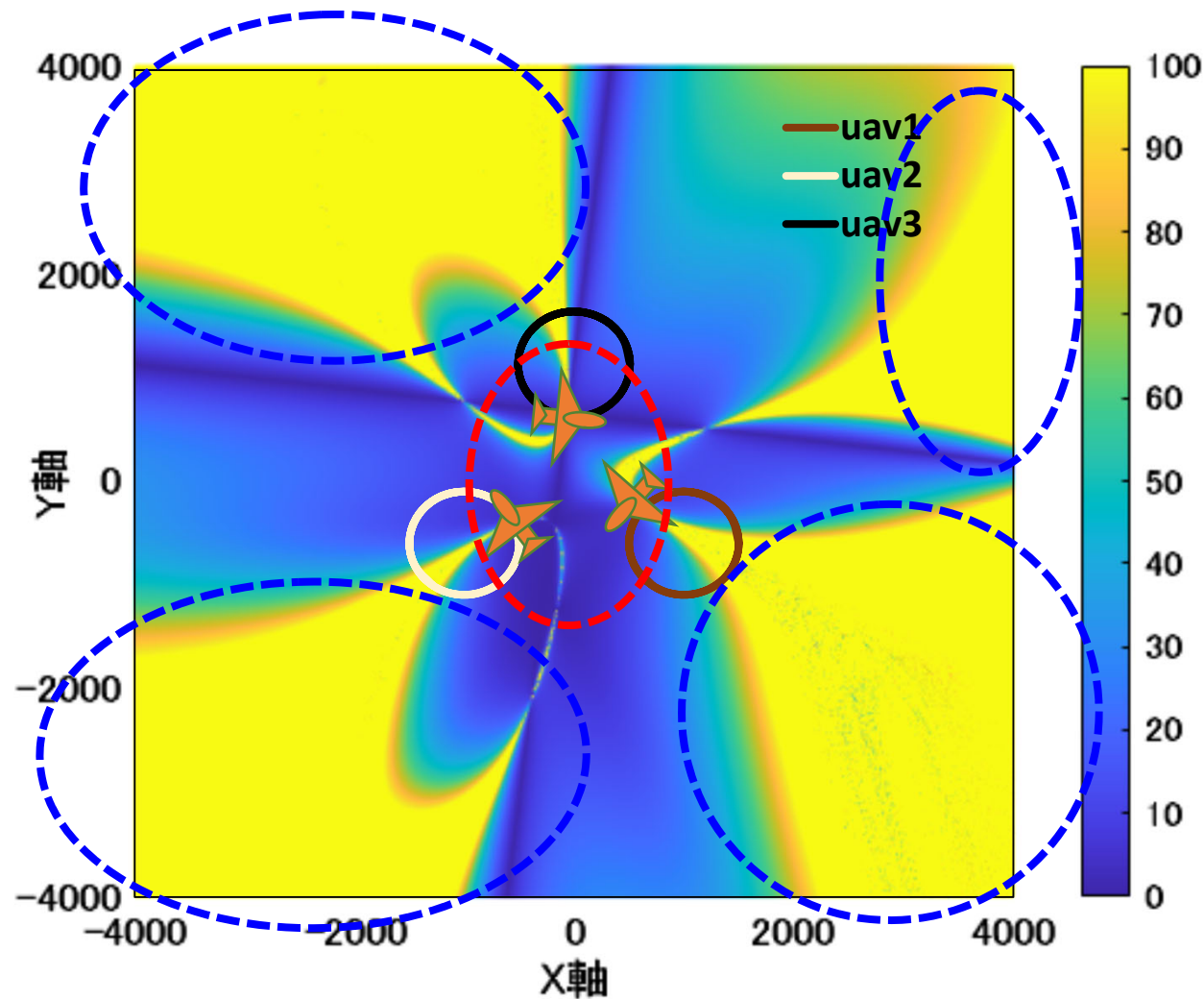


$\Delta\theta=120^\circ$



UAVの位置的関係

$t=45[s]$ における初期位相差 $\Delta\theta=120^\circ$ の面的分布（三次元測位）

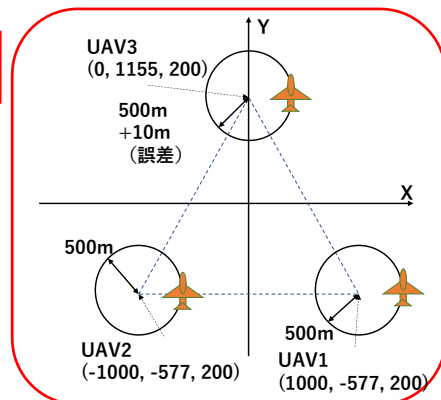


UAV同士の距離が
最接近
⇒交点が得られに
くい領域が発生

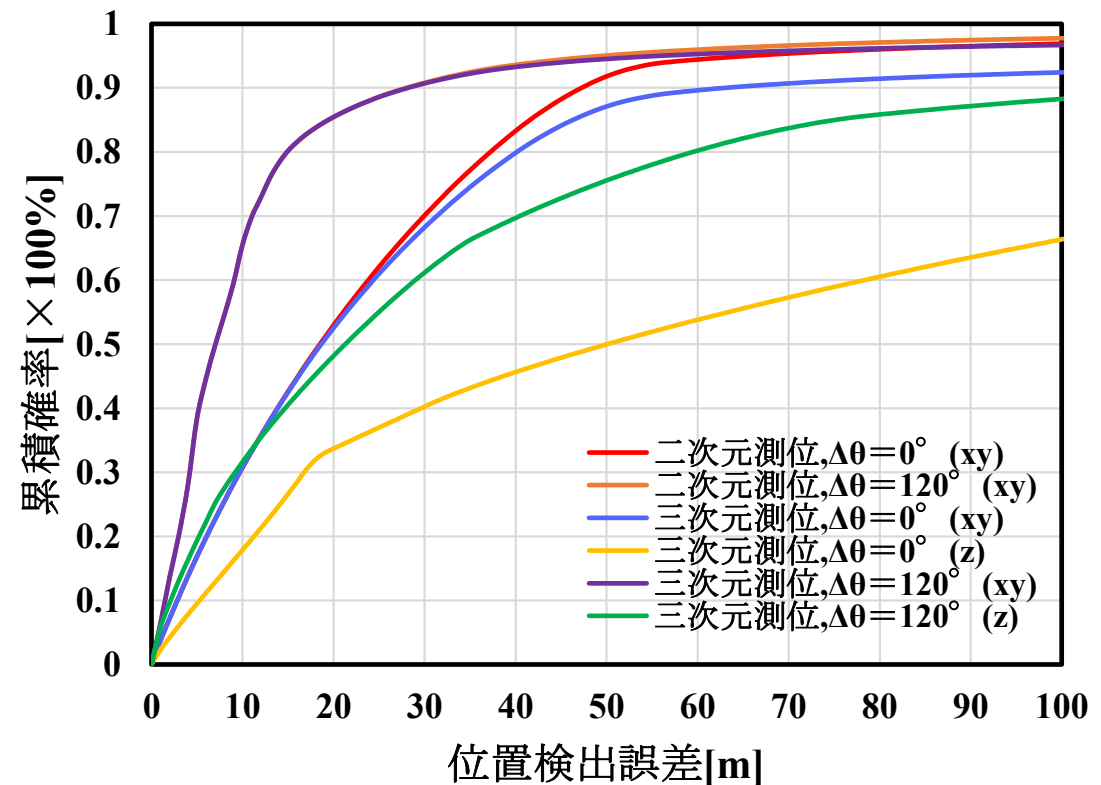
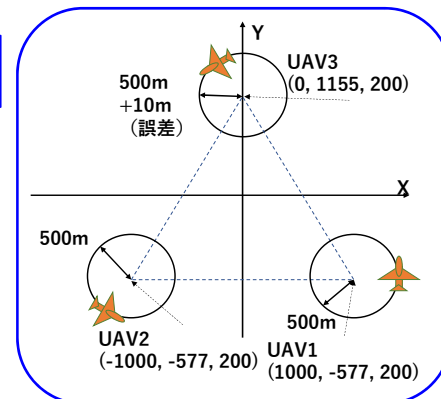
位置検出推定誤差の累積分布特性② ($t=0s$)

- 三次元測位のXY平面と二次元測位の測位精度がほぼ一致
 $\Rightarrow$ 三次元測位はZ軸方向の測位誤差が支配的
- 初期位相差を与えることでZ軸方向の測位精度も改善
 $\Rightarrow$ 測位精度は約30m改善 (累積確率50%値)

$\Delta\theta = 0^\circ$



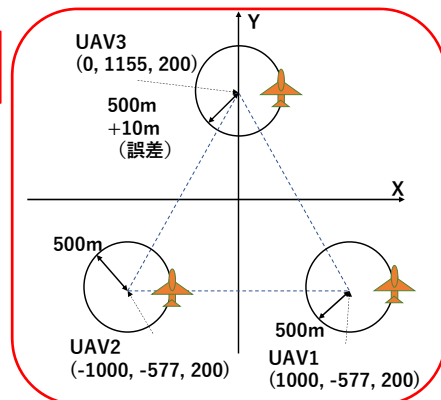
$\Delta\theta = 120^\circ$



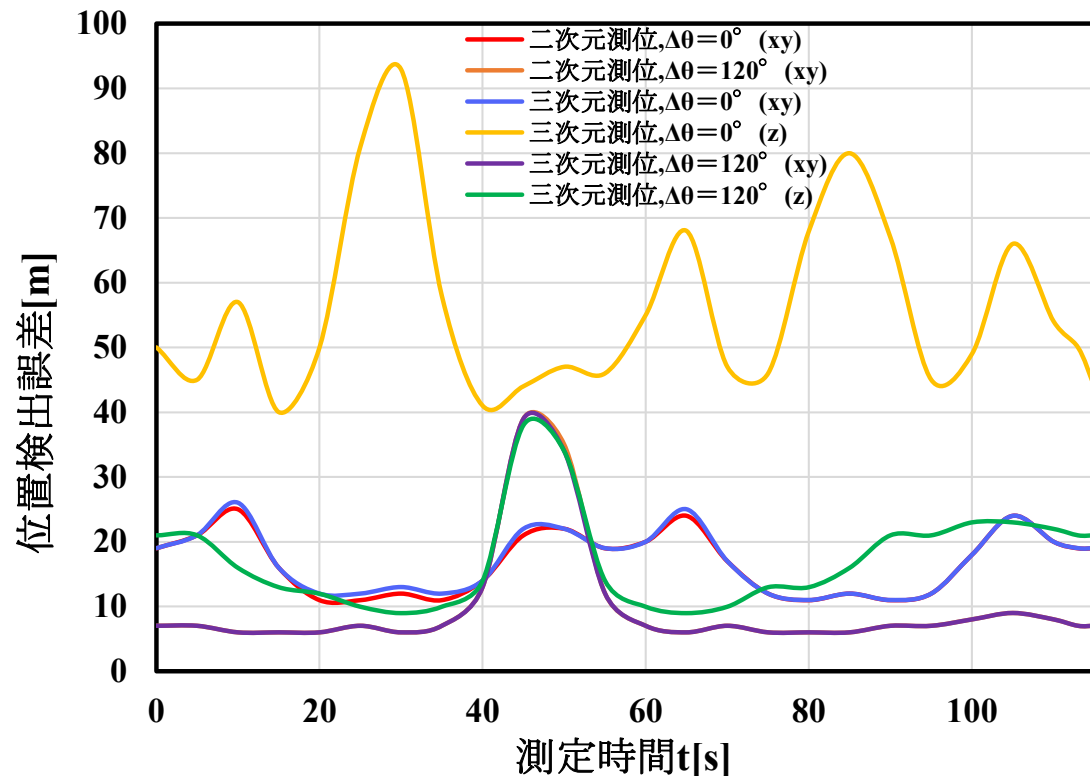
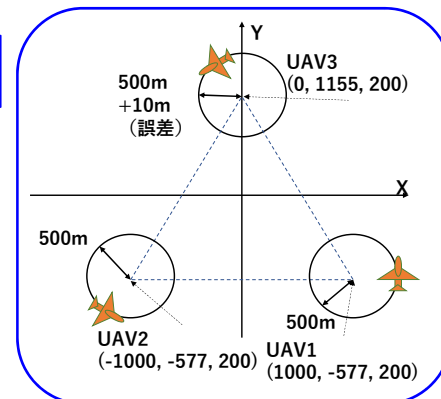
位置検出推定誤差の時間変化特性② (累積確率50%値)

- $\Delta\theta = 0^\circ$ の場合, 全時間において三次元測位のXY平面と二次元測位の測位精度がほぼ一致
- ⇒ 三次元測位はZ軸方向の測位誤差が支配的
- $\Delta\theta = 120^\circ$ の場合, $t=45\text{s}$ 付近でのみ三次元測位と二次元測位の特性がほぼ一致

$\Delta\theta = 0^\circ$



$\Delta\theta = 120^\circ$



まとめ

まとめ

●本研究

ユーザの高度情報を加えた三次元位置検出手法を対象としてZ軸方向が測位精度に与える影響を評価

- 3機のUAVが円周回飛行をするモデル
- 最小二乗法を用いたシミュレーション
- 二次元測位と三次元測位の位置検出誤差の比較評価を実施

●結果

- Z軸方向を追加することで測位精度は劣化傾向
- 三次元測位でも初期位相差を与えることで測位精度が大幅に改善

●今後の課題

- 同モデルでのUAVの最適初期配置の検討
- UAVの初期配置や飛行経路による高さ方向の測位精度への影響の解析
- ユーザ三次元位置検出時の測位精度を定性的に推定する手法の提案

謝辞

本研究はJSPS科研費
19K04380の助成を受けたものであり、
その支援に深く感謝いたします。

ご清聴ありがとうございました。