

3機の無人航空機を用いた ユーザ三次元位置検出システム における測位精度改善効果

日本大学

深谷泰良 ○石川博康

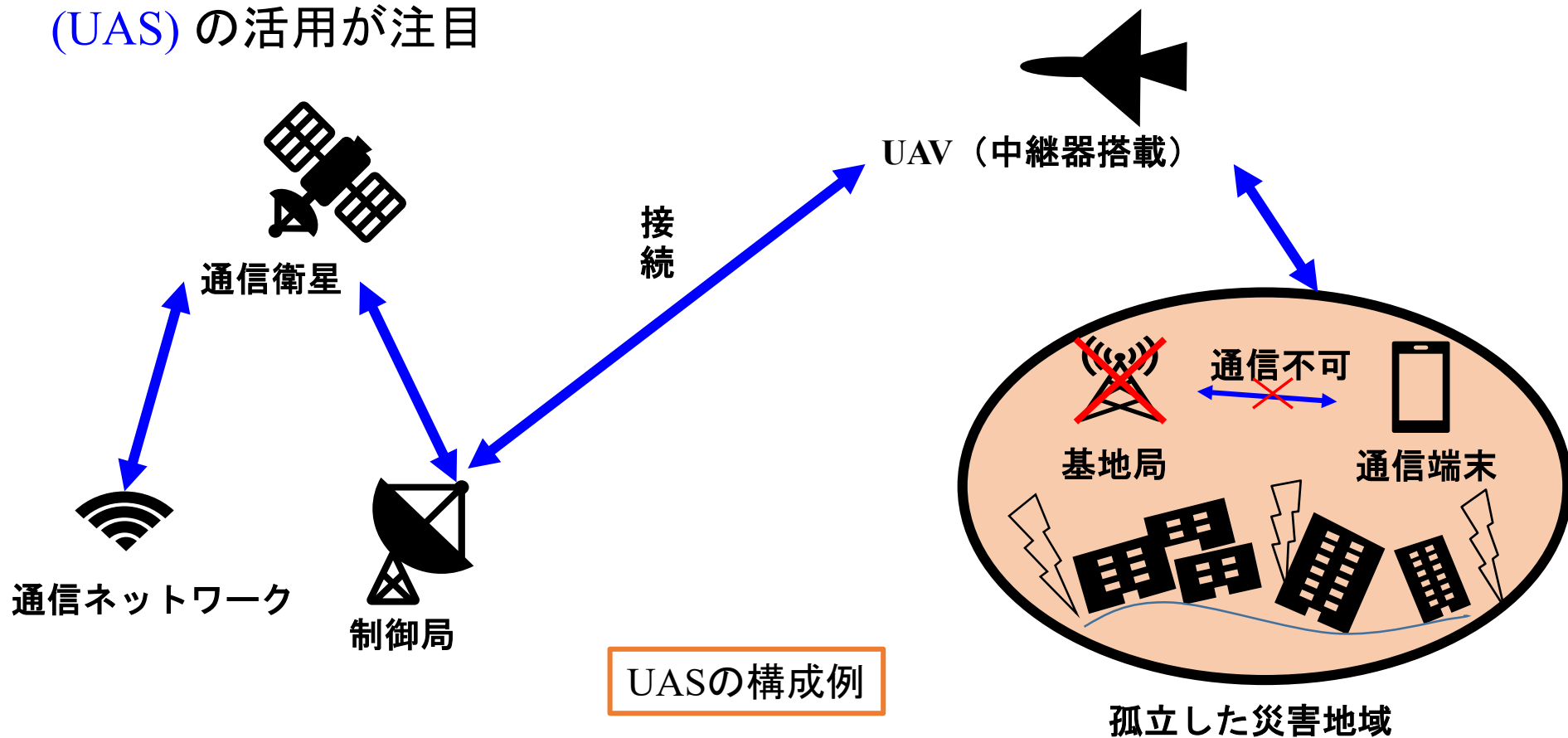
目次

- ◆研究の目的・背景
- ◆測位原理
- ◆三次元測位の位置検出精度の改善手法
- ◆シミュレーション結果
- ◆まとめ

研究の目的・背景

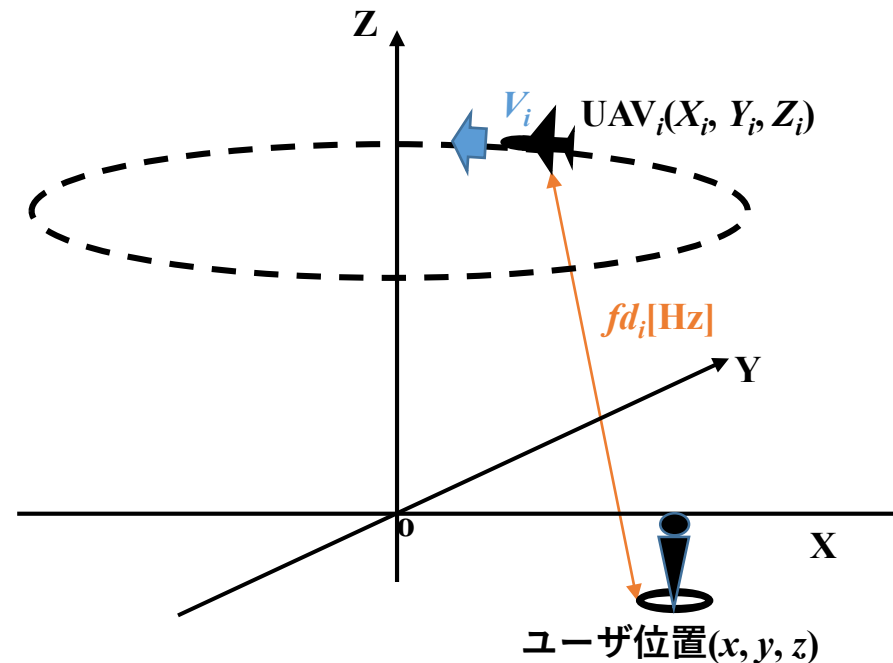
研究の背景

- 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確保が困難
- 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-UAV間の送受信信号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し、UAVの位置情報を用いることによりユーザ位置の検出が可能



ユーザ位置検出システムの構成例

研究の目的

●従来研究

- 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
ユーザ位置検出手法の提案
- UAVが円周回飛行・8の字飛行・直線飛行等を行うモデル
二次元位置検出手法（二次元測位）で実施

- ⇒従来はユーザが地表面上（XY平面）に静止していると仮定して特性評価を実施
- ⇒山岳地帯や高層ビル等ではユーザの高度情報（Z軸方向）の位置情報も必要

研究の目的

●2021年7月SAT研究会での発表内容（SAT2021-22）

二次元測位をユーザ高度情報まで含む**三次元測位に拡張**

- **三次元測位の有効性**をドップラーシフトの測定回数1回（**1回測定手法**）で検証
- 二次元測位と三次元測位の位置検出誤差の特性を比較・評価
- **高度方向の位置検出誤差の影響が顕著**

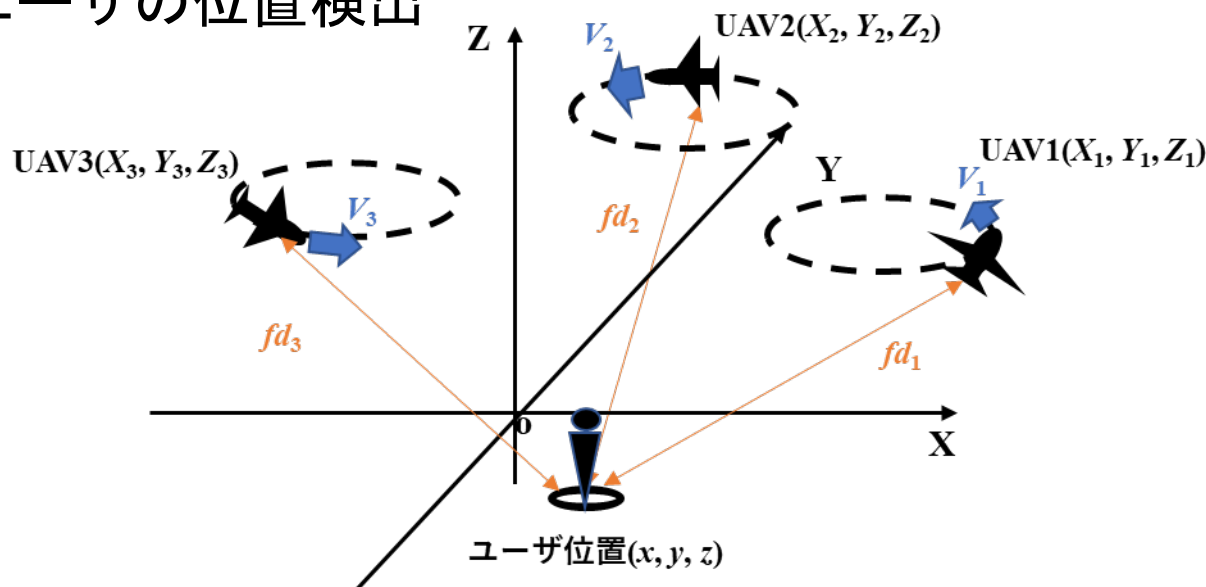
●本発表では

- 新たに**測定回数を2回に拡張する手法を導入**（**2回測定手法**）
- ドップラーシフトの測定回数を複数回に拡張することにより、三次元測位における**測位精度の改善効果**を検討
- 3機のUAVの円周回飛行モデル

測位原理

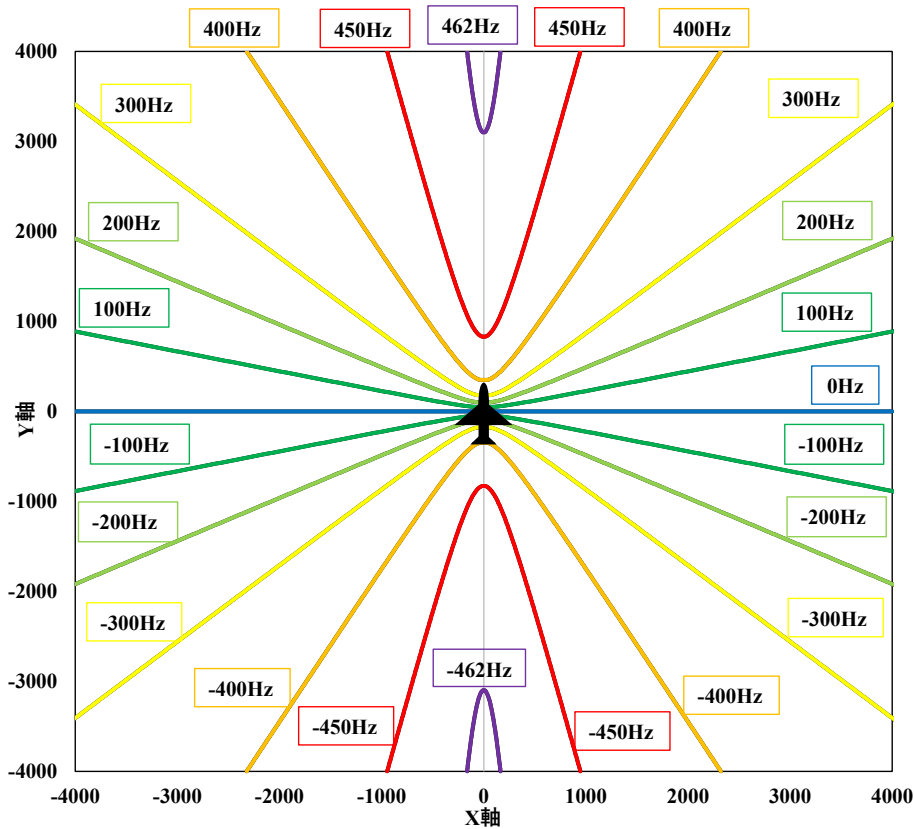
測位原理

- ユーザが所有する通信端末から一定周波数のトーン信号（CW信号）を送信
- 上空を飛行する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とUAVの位置情報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

UAVによる ドップラーシフト分布 (UAV高度200m)



ドップラーシフトを観測すると
ユーザ位置は**双曲面上**に分布



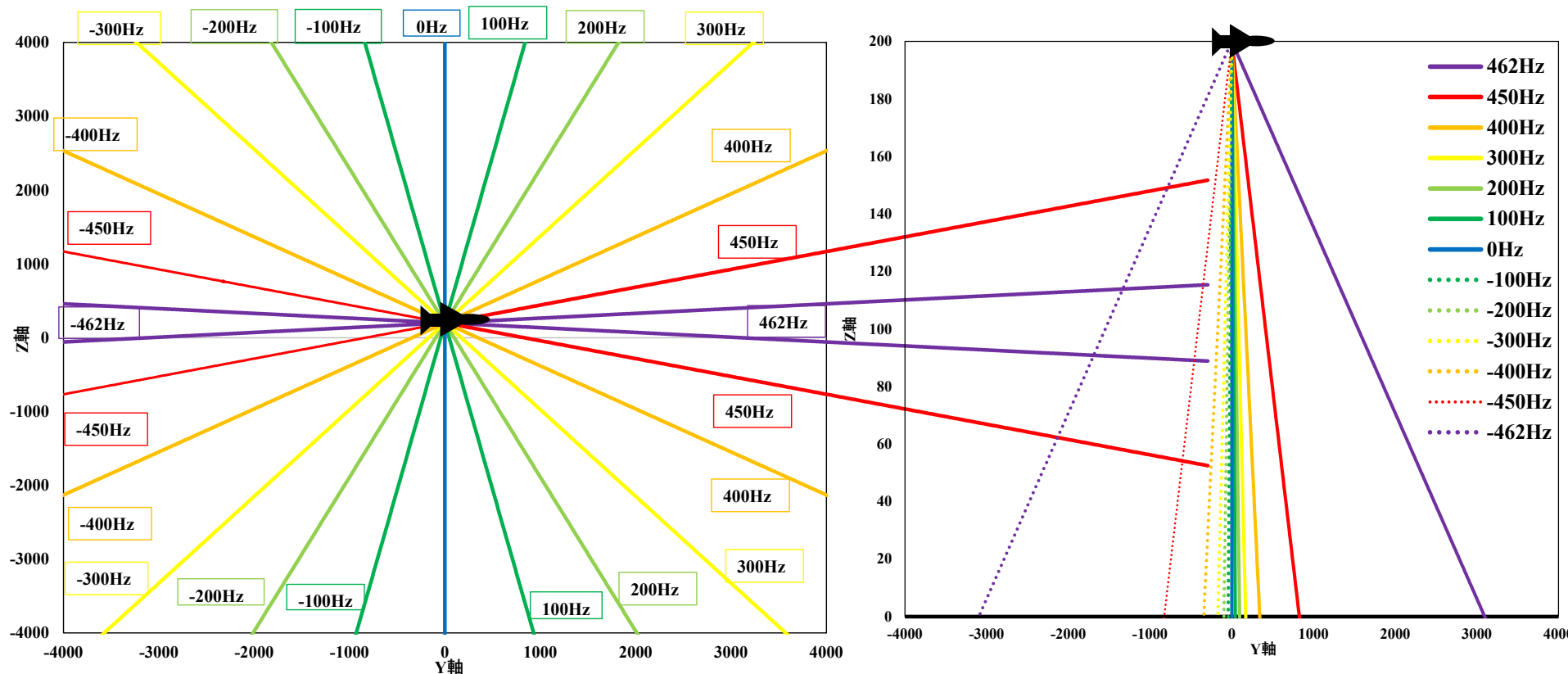
1機のUAVまたは複数のUAVで
複数回測定観測

⇒双曲面の交点として
ユーザ位置を検出可能

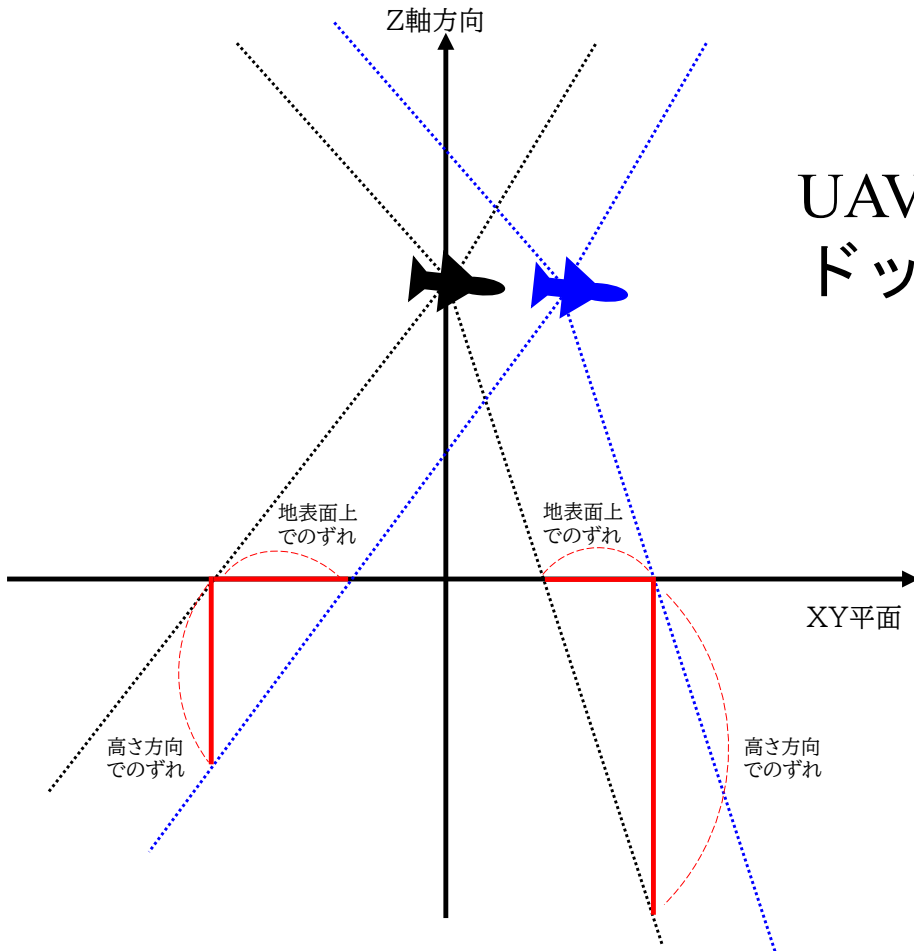
$$\text{ドップラーシフト} : f d_i(t_j) = - \frac{V_{xi}(t_j)(X_i(t_j)-x) + V_{yi}(t_j)(Y_i(t_j)-y) + V_{zi}(t_j)(Z_i(t_j)-z)}{\lambda \sqrt{(X_i(t_j)-x)^2 + (Y_i(t_j)-y)^2 + (Z_i(t_j)-z)^2}}$$

UAVによる ドップラーシフト分布（Z軸方向）

高さ方向においてもドップラーシフトは双曲面上に分布
（直線的で傾きが急峻）



UAVによる ドップラーシフト分布（Z軸方向）



UAVの飛行位置に**誤差**が生じる場合
ドップラーシフトは平行移動した状態



ユーザ位置の検出誤差は
高さ方向が劣化

最小二乗法に基づく位置検出手法

- **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

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

- この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 として表現

$$G = \begin{bmatrix} \frac{\partial f d_1(t_1)}{\partial x} & \frac{\partial f d_1(t_1)}{\partial y} & \frac{\partial f d_1(t_1)}{\partial z} \\ \frac{\partial f d_2(t_1)}{\partial x} & \frac{\partial f d_2(t_1)}{\partial y} & \frac{\partial f d_2(t_1)}{\partial z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f d_i(t_j)}{\partial x} & \frac{\partial f d_i(t_j)}{\partial y} & \frac{\partial f d_i(t_j)}{\partial z} \end{bmatrix} \quad U = [\Delta x \quad \Delta y \quad \Delta z]^T$$

また、 $[\Delta f d_1(t_1) \quad \Delta f d_2(t_1) \quad \cdots \quad \Delta f d_i(t_j)]^T = F^T = GU$ から $U = (G^T G)^{-1} G^T F^T$

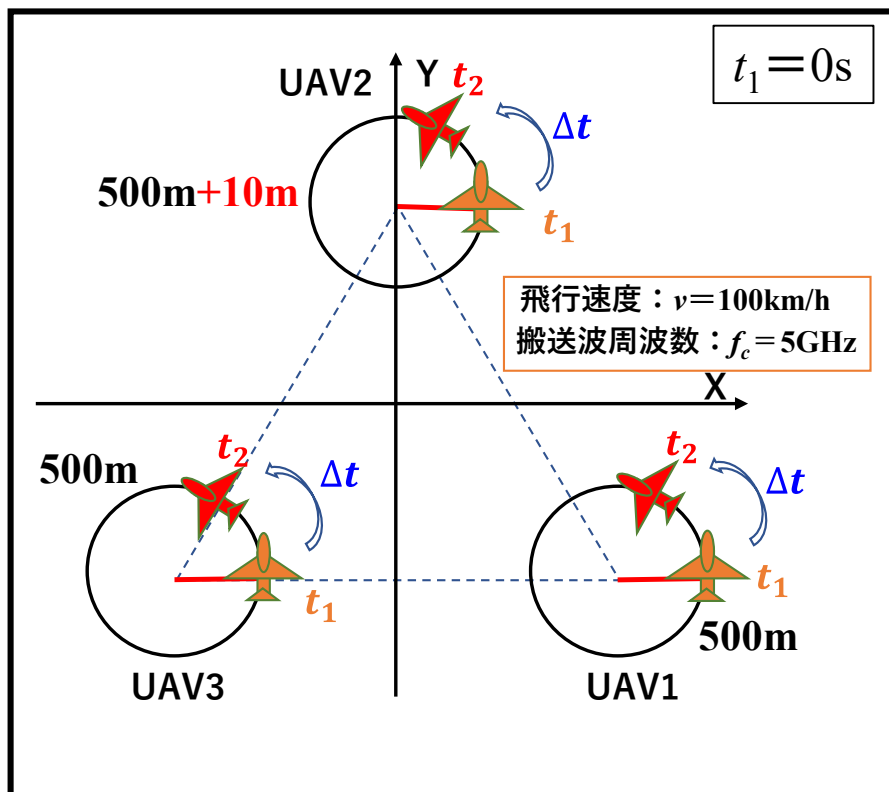
- U が十分に小さくなるまで更新 \Rightarrow ユーザ位置推定

- 時刻 t_j は1回測定手法では $j = 1$ のみ，2回測定手法では $j = 1, 2$ と設定
- 本研究では拡張性や実用性を考慮し，**最小二乗法に基づく位置検出手法**を採用

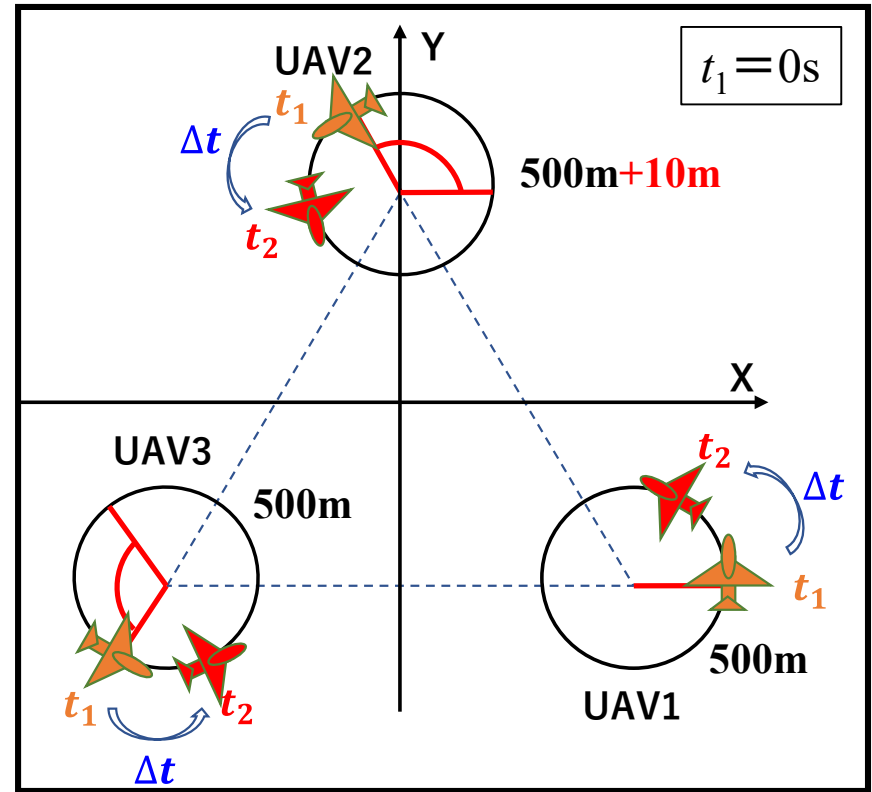
三次元測位における 位置検出精度の改善手法

シミュレーションモデル（2回測定手法）

- ドップラーシフトの測定回数2回（2回測定手法）に拡張
- 初期位相差 $\Delta\theta = 0^\circ, 120^\circ$ のUAV配置モデル2通り
- UAV2の周回半径500mに+10mの誤差を人工的に付加
- 1回目の測定時間 $t_1 = 0s \sim 113.6s$, 測定時間間隔 $\Delta t (= t_2 - t_1) = 0s \sim 110s$
- 8km四方の評価対象エリア内を10m間隔で区切った交点（641,601点）



(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

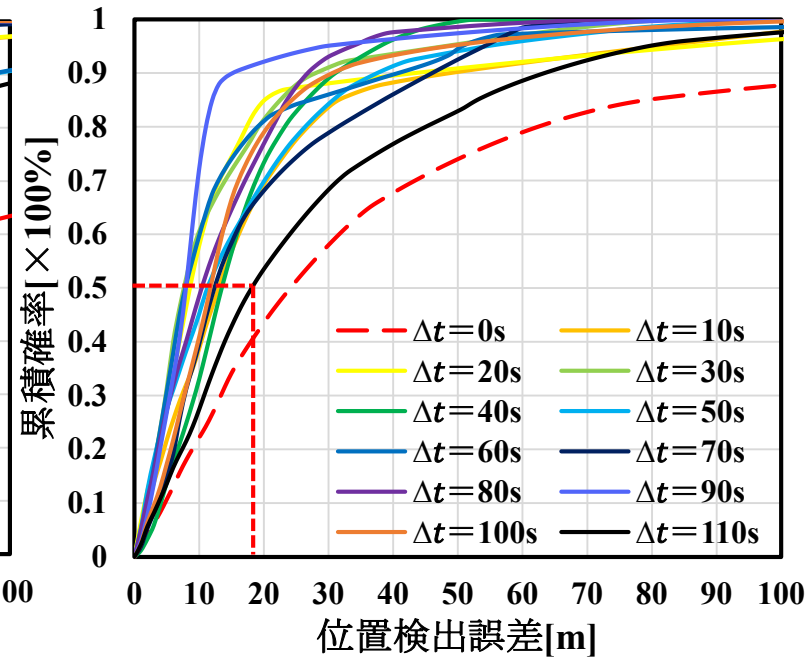
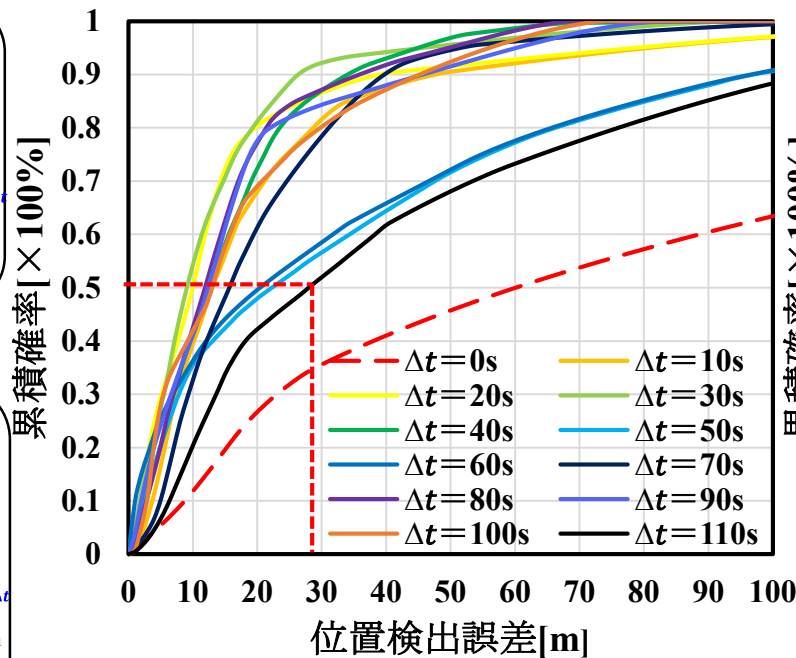
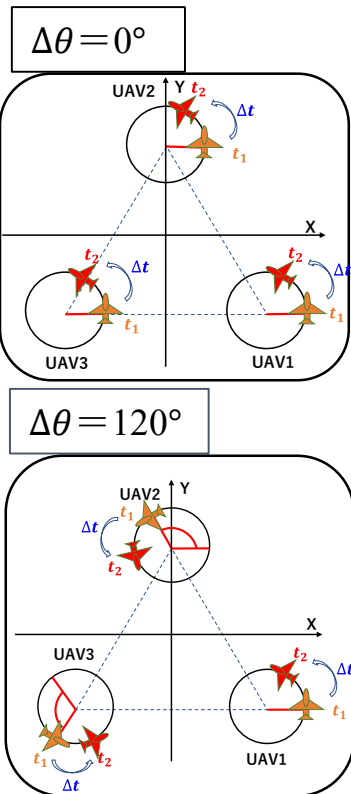
位置検出推定誤差の累積分布特性 ($t_1 = 0s$, 2回測定手法)

$\Delta t = 0s$ 以外

- $\Delta\theta = 0^\circ$: 位置検出誤差30m以下 (累積確率50%値)
- $\Delta\theta = 120^\circ$: 位置検出誤差20m以下 (累積確率50%値)

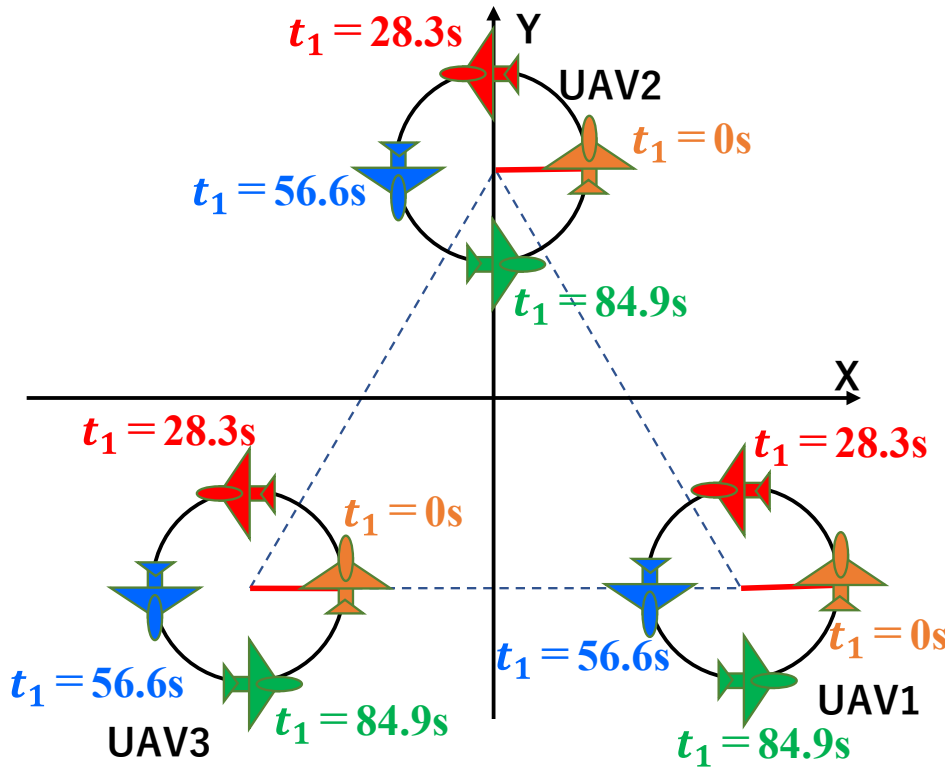
⇒2回測定手法では特に初期位相差 $\Delta\theta = 0^\circ$ の場合で測位精度が大幅に改善

ただし, 最適な測定時間間隔が存在

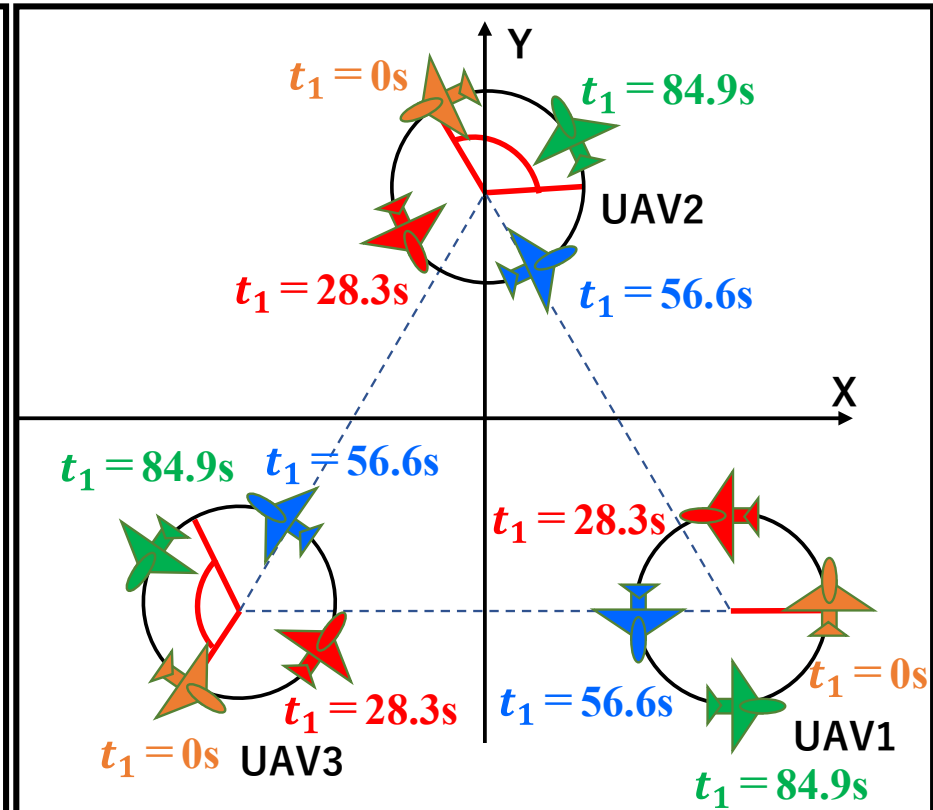


シミュレーションモデル（2回測定手法）

- 2回測定手法における最適な測定時間間隔を検討
- 円周上の異なる点から測定を開始
- 1回目の測定時間 $t_1 = 0s, 28.3s, 56.6s, 84.9s$ の4通りのUAV初期配置



(a)各UAVの初期位相差 $\Delta\theta = 0^\circ$ の場合



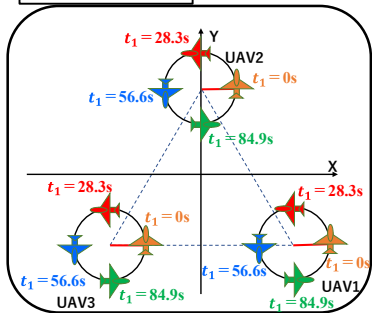
(b)各UAVの初期位相差 $\Delta\theta = 120^\circ$ の場合

位置検出推定誤差の測定時間間隔特性 ($t_1 = 0\text{s}, 28.3\text{s}, 56.6\text{s}, 84.9\text{s}$, 累積確率50%値)

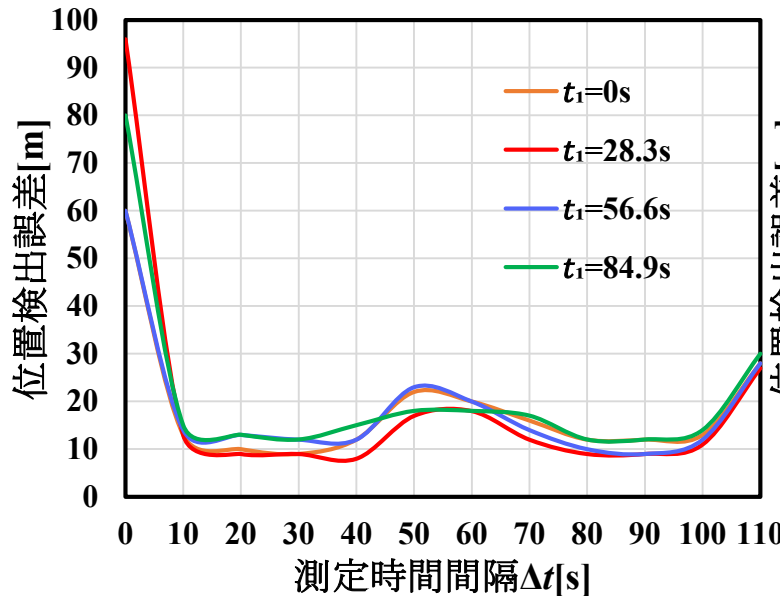
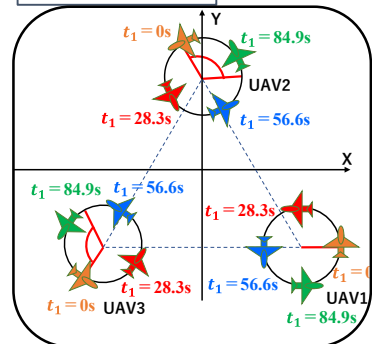
- $\Delta t = 0\text{s}$ 以外：測位精度は良好
($\Delta\theta = 0^\circ$ ：位置検出誤差30m以下, $\Delta\theta = 120^\circ$ ：20m以下)
- $\Delta t = 20\sim 30\text{s}$ ：位置検出誤差約10m
⇒ $\Delta t = 20\sim 30\text{s}$ 程度で十分な測位精度改善効果

⇒ 2回測定手法： $\Delta t = 20\text{s}, 30\text{s}$ に固定
1回測定手法と時間変化による特性差を詳細に比較

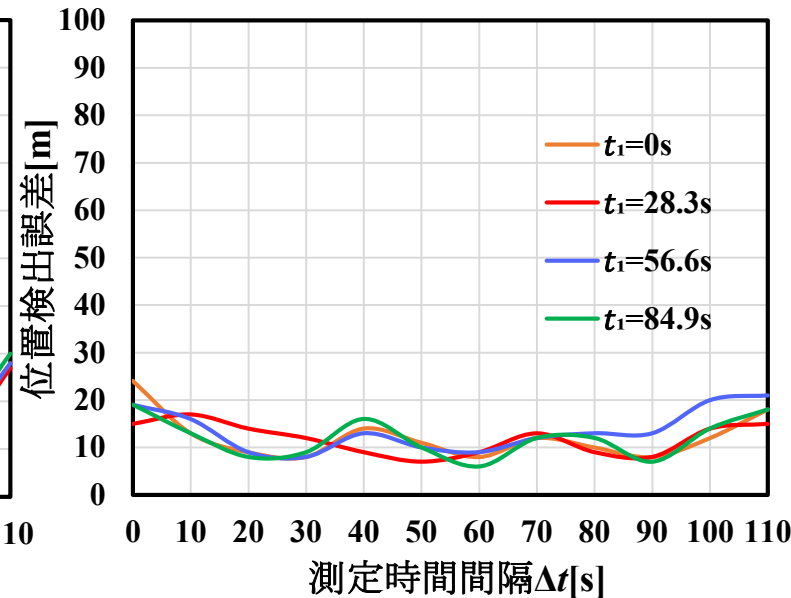
$\Delta\theta = 0^\circ$



$\Delta\theta = 120^\circ$



$\Delta\theta = 0^\circ$



$\Delta\theta = 120^\circ$

位置検出推定誤差の時間変化特性 ($\Delta\theta = 0^\circ$)

($\Delta t = 20\text{s}, 30\text{s}$ 固定, 累積確率50%値)

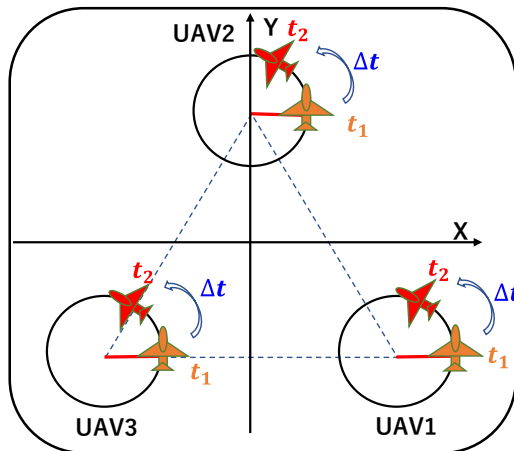
1回測定手法:

- 測位精度が**大きく劣化** (位置検出誤差約60m, **最大96m**)

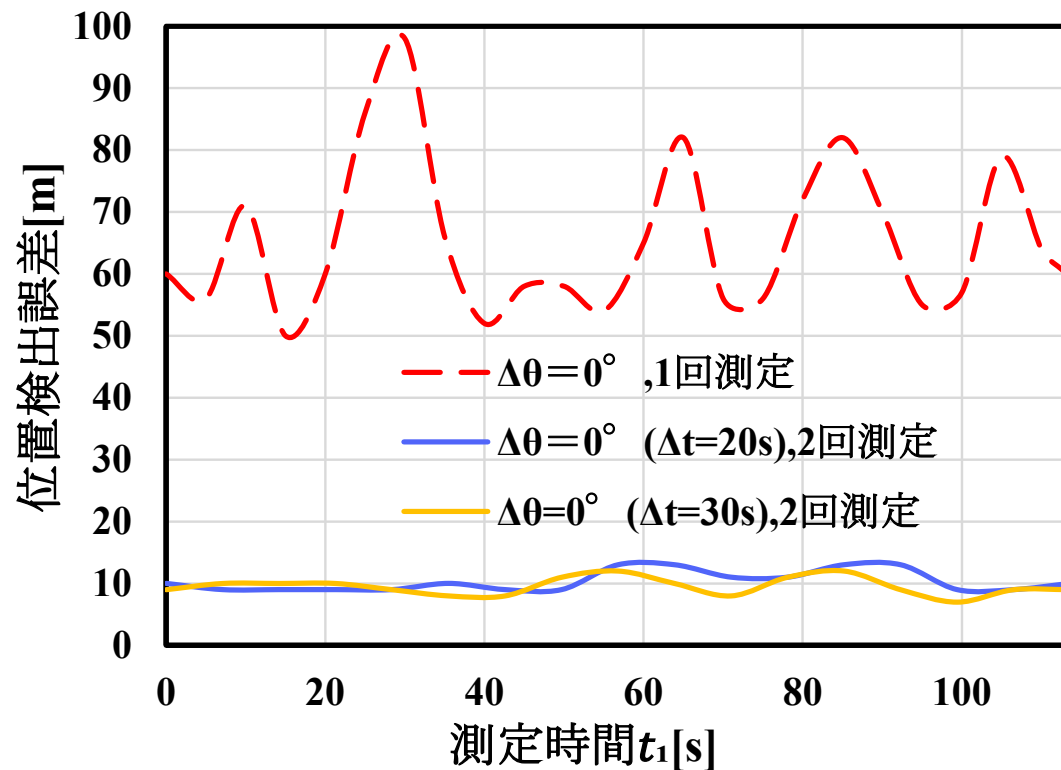
2回測定手法:

- $\Delta t = 20\text{s}, 30\text{s} \Rightarrow$ **位置検出誤差約10m**

\Rightarrow 2回測定手法における測位精度改善効果大 ($\Delta t = 20\text{s}$ で十分)



$$\Delta\theta = 0^\circ$$



位置検出推定誤差の時間変化特性 ($\Delta\theta = 120^\circ$)

($\Delta t = 20\text{s}, 30\text{s}$ 固定, 累積確率50%値)

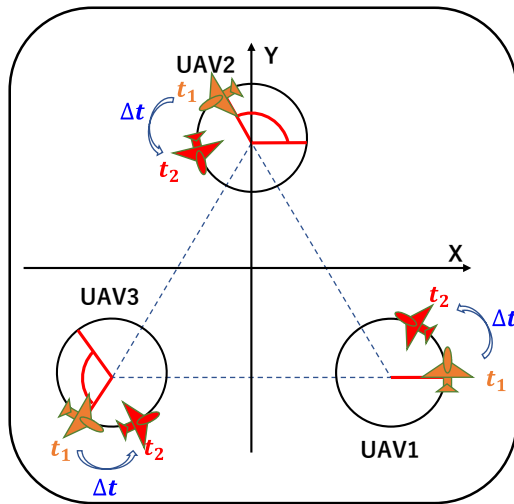
1回測定手法:

- 測位精度は比較的良好 (位置検出誤差約20m)
- $t_1 = 45\text{s}$ 付近で測位精度が劣化

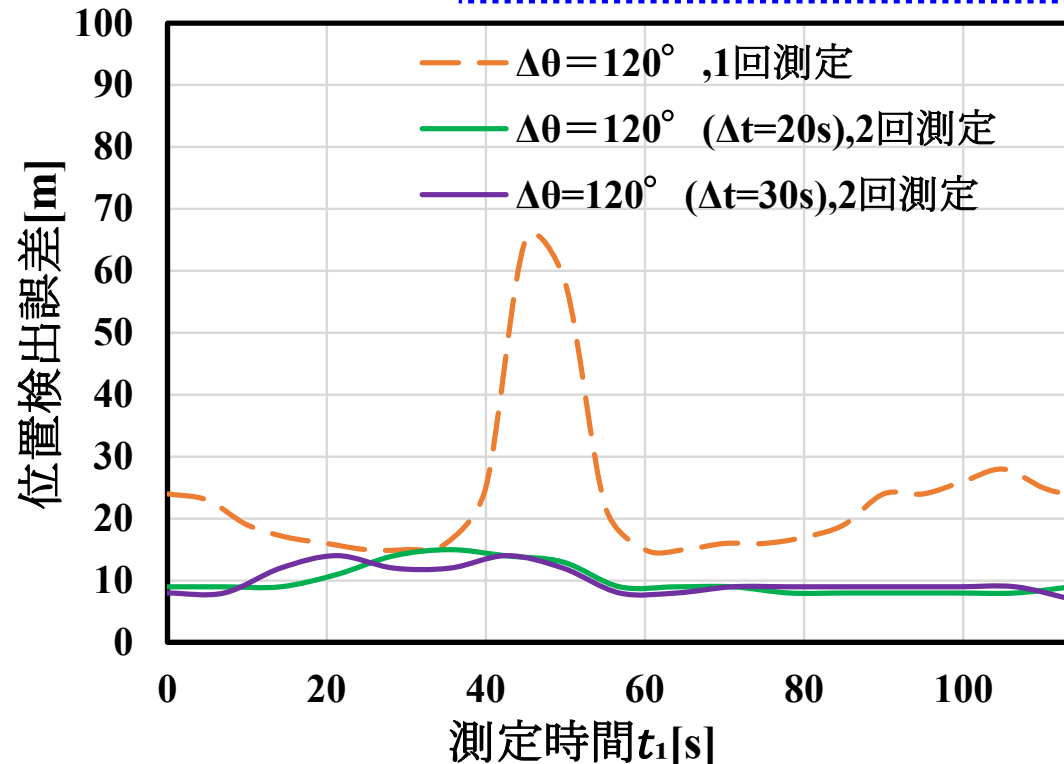
2回測定手法:

- $\Delta t = 20\text{s}, 30\text{s} \Rightarrow$ 位置検出誤差約10m

\Rightarrow 2回測定手法における測位精度改善効果小, 局所的な測位精度の劣化を改善



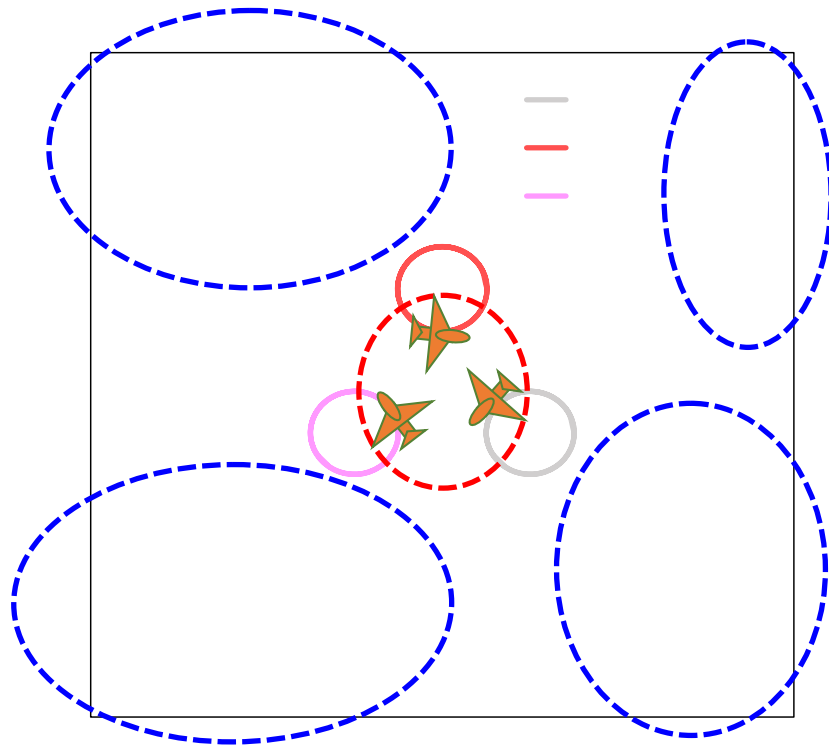
$$\Delta\theta = 120^\circ$$



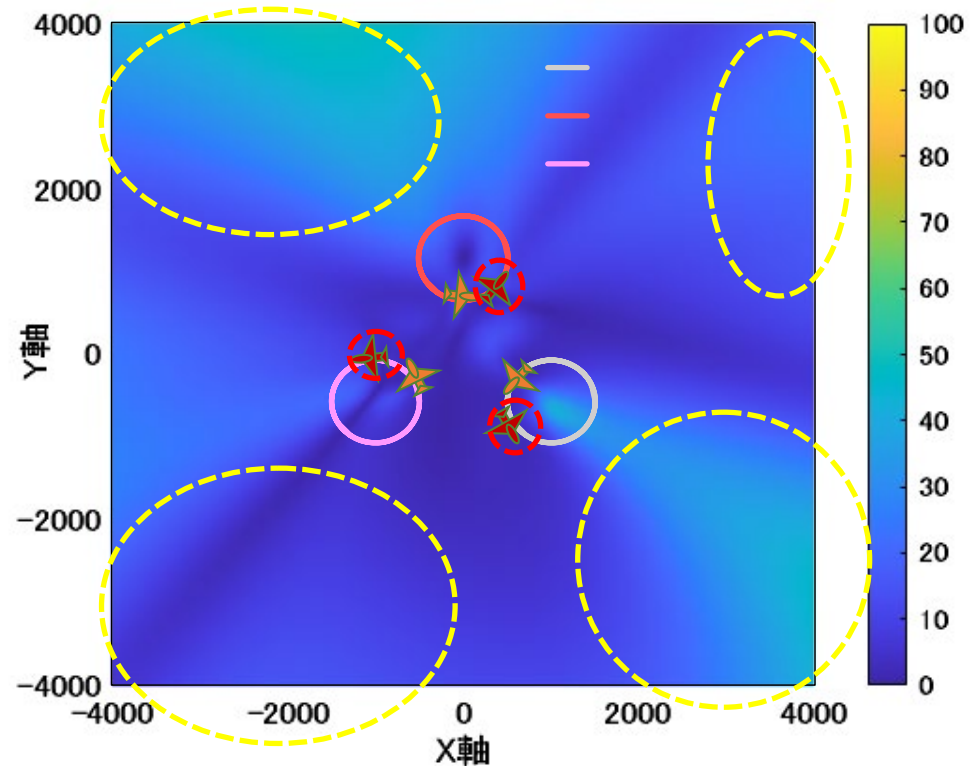
$t_1=45\text{s}$ におけるドップラーシフトの面的分布 (2回測定手法: $\Delta t = 20\text{s}$)

2回目の測定でUAVの配置関係改善及びドップラーシフトの双曲面増加
⇒交点として解が得られやすくなる

青色のエリア⇒測位精度良好
黄色のエリア⇒測位精度劣化



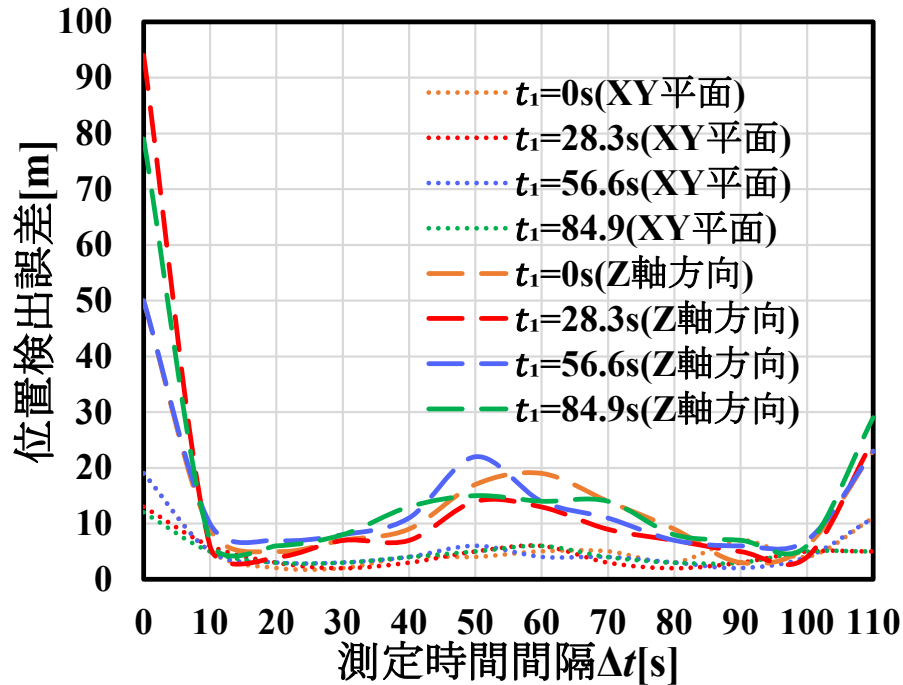
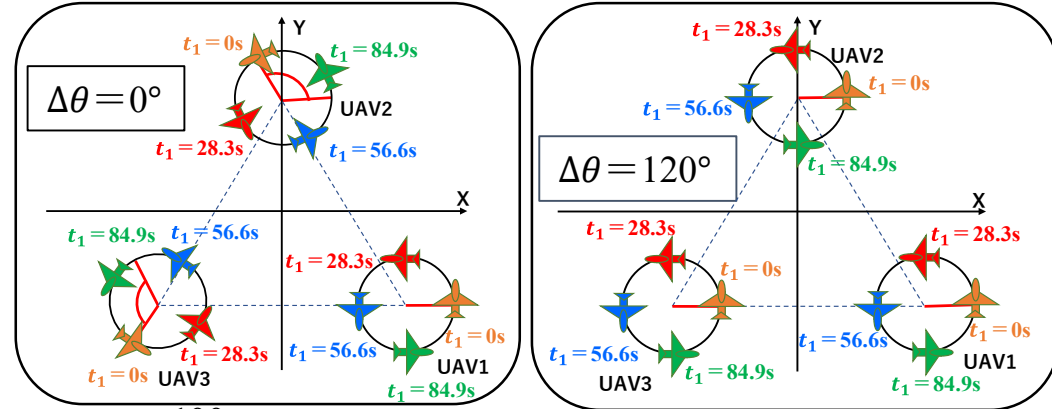
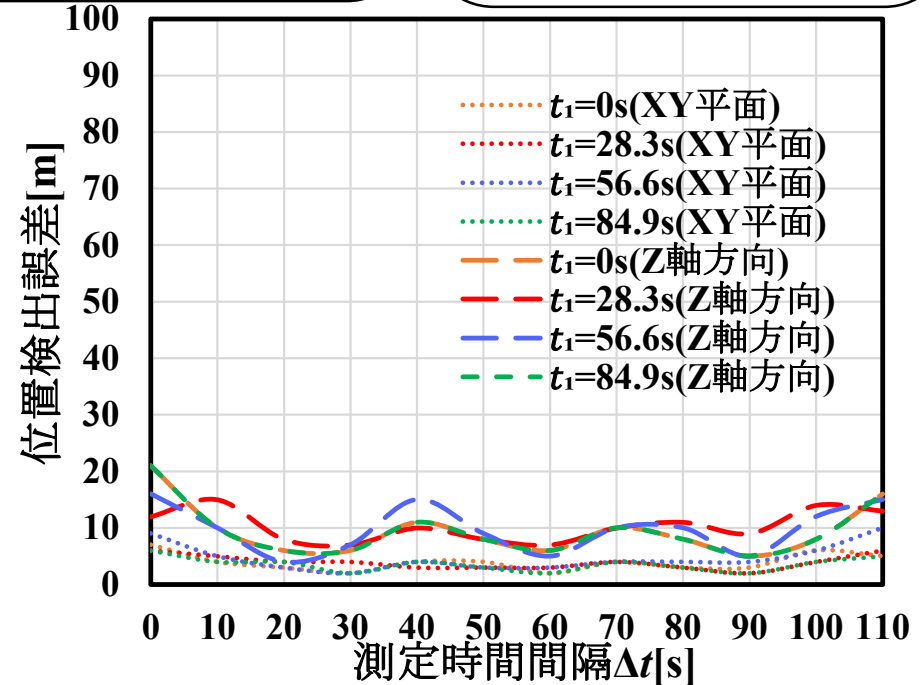
(a)1回測定時の面的分布



(b)2回測定時の面的分布

位置検出推定誤差の時間特性 (XY平面とZ軸方向の比較, 累積確率50%値)

- Z軸方向は三次元測位と同様の特性
⇒ Z軸方向の影響が支配的
- 初期位相差による特性差小


 $\Delta\theta = 0^\circ$

 $\Delta\theta = 120^\circ$

三次元測位の位置検出精度改善手法

●結果

ドップラーシフトの測定回数を拡張することで

- $\Delta\theta = 0^\circ$: 測位精度の改善効果**大**

(測定時間間隔 $\Delta t = 20s$ 程度で十分な測位精度改善)

- $\Delta\theta = 120^\circ$: 測位精度の改善効果**小**

局所的な測位精度の劣化が改善

(2回測定手法 : UAV配置による測位精度への直接的な影響を軽減)

まとめ

●本研究

◆三次元測位の測位精度改善を目的として、ドップラーシフトの測定回数を拡張した2回測定手法の測位精度改善効果についての評価

- 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

●結果

◆ユーザの高さ方向（Z軸方向）を含む三次元測位は

- 測位精度が大きく劣化
- UAVの配置関係の影響大

◆三次元測位はドップラーシフトの測定回数を拡張することで

- 測位精度は測定時間間隔 $\Delta t = 20\text{s}$ 程度で十分な改善効果
- UAV配置による測位精度への影響を軽減

今後の課題

- ドップラーシフトの測定回数を3回以上に拡張した場合の測位精度改善効果の検証
- 三次元測位における最適なUAV初期配置及び各パラメータの検討
- 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。