

# 周波数オフセット補償機能を有する無人 航空機を用いたユーザ位置検出システム における測位精度の改善効果

---

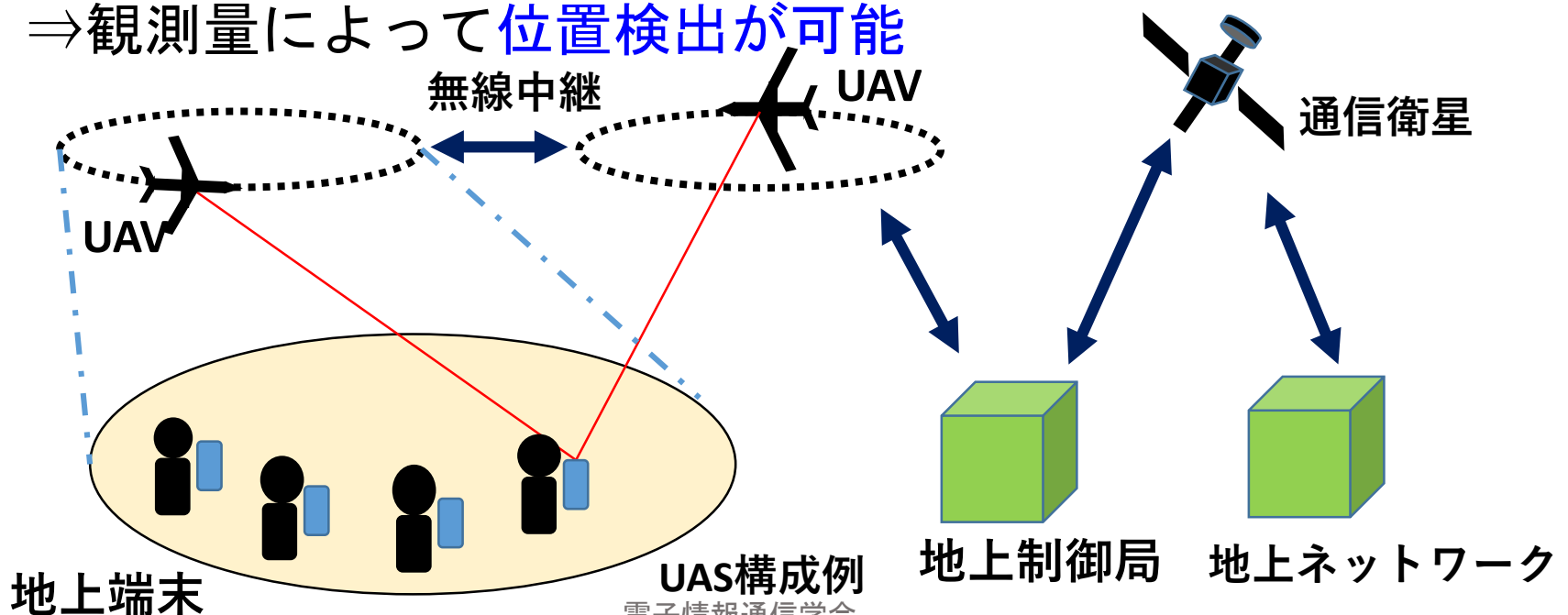
日本大学

○山中英 石川博康

# 研究背景及び目的

# 研究の背景

- 大規模災害時に無線通信基地局が機能停止する恐れ  
⇒ 一時的に無線ネットワークを提供する必要
- 無人航空機(UAV)を用いた無人航空機システム(UAS)の実用化が期待
- UAV—ユーザ端末間の周波数にドップラーシフトが発生  
⇒ 観測量によって位置検出が可能



UAS構成例

電子情報通信学会  
ソサイエティ大会

# 研究の目的

## ●従来研究

- 最小二乗法によりユーザ位置検出と周波数オフセットの推定・補償を同時に行う位置検出システムの提案  
(2021信学総大, B-3-34 )
- 位置検出精度と周波数オフセット推定精度の関係性の評価  
(2021SAT-RCS研究会, SAT1-(12) )

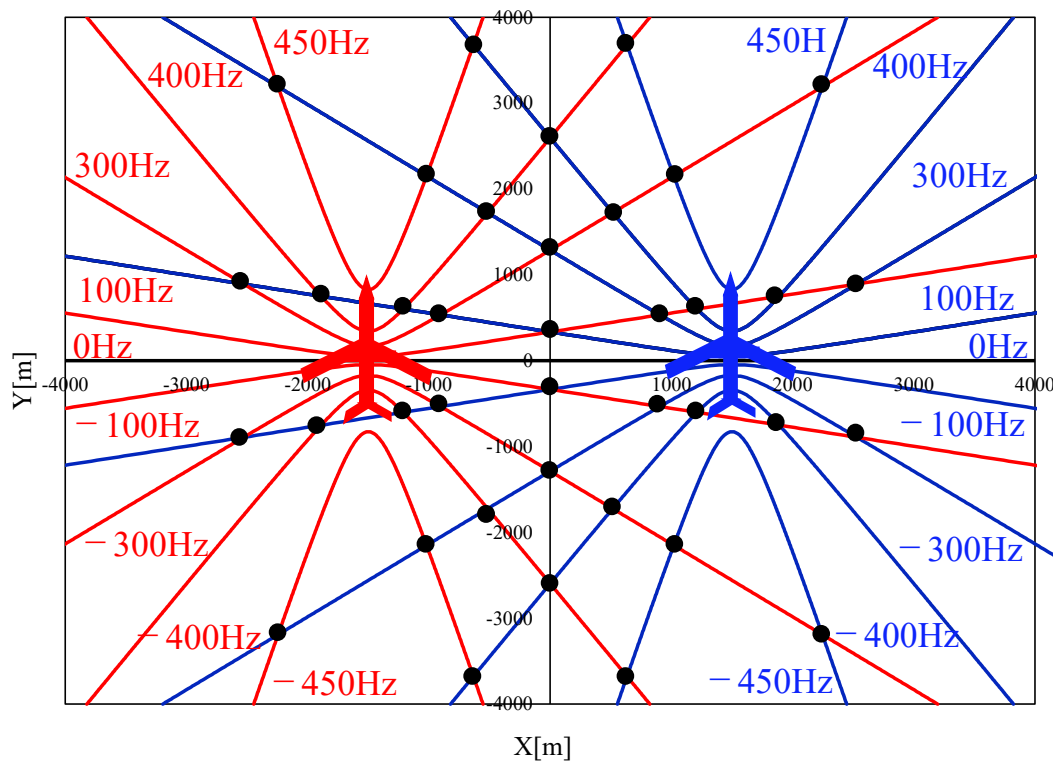
## ●本研究

- 3機のUAVを用いた位置検出システム
- ドップラーシフトを2回測定した場合の特性評価
- 測定回数1回のみでの測定結果（従来の飛行モデル）との特性比較

# 測位原理

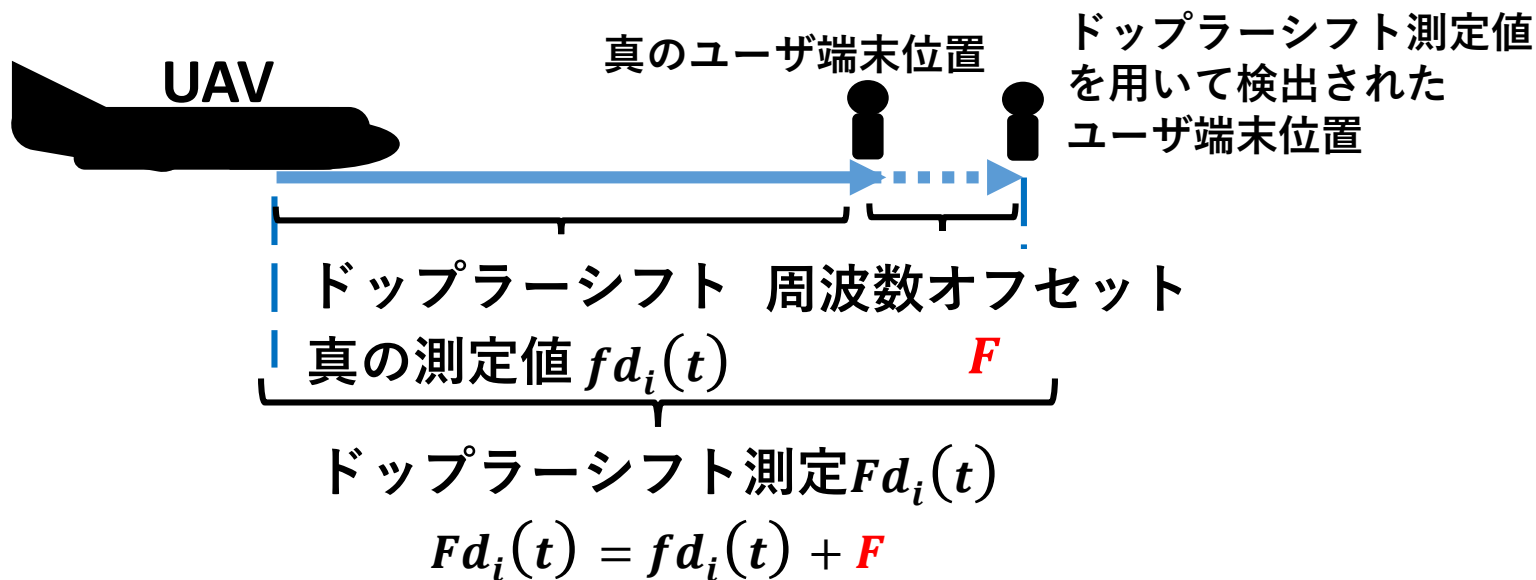
# ドップラーシフト分布

- UAV—ユーザ端末間に生じるドップラーシフトを観測
- 観測値によって得られるユーザ位置は双曲線上に分布
- 複数のUAVで観測、又は1機のUAVで複数回観測し、ユーザ位置を双曲線上の交点として検出可能



# 周波数オフセット推定・補償

- 本研究では**周波数発振器**はユーザ端末に対し**独立している**と仮定
- ユーザ端末内の**周波数発振器**の精度の安定性によって誤差が生じる（**周波数オフセット**）
- 周波数オフセットとしてドップラーシフト量に**加算または減算され位置検出に影響**
- **最小二乗法**を利用してユーザ位置及び周波数オフセットを推定・補償



# 最小二乗法を用いた位置検出

- UAV-地上端末間で得られるドップラーシフトの式

$$fd_i(t) = -\frac{V_{xi}(t)(X_i(t) - x) + V_{yi}(t)(Y_i(t) - y) + V_{zi}(t)(Z_i - z)}{\lambda\sqrt{(X_i(t) - x)^2 + (Y_i(t) - y)^2 + (Z_i - z)^2}} + F \quad \dots (1)$$

- ユーザ端末z座標を固定した場合の初期値( $x^0, y^0, F^0$ )を想定した場合のドップラーシフトの式

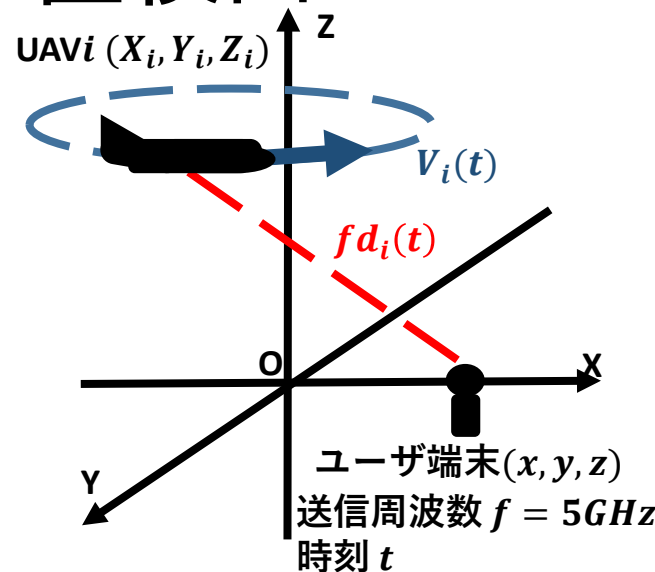
$$fd_i^0(t) = -\frac{V_{xi}(t)(X_i(t) - x^0) + V_{yi}(t)(Y_i(t) - y^0) + V_{zi}(t)(Z_i - z)}{\lambda\sqrt{(X_i(t) - x^0)^2 + (Y_i(t) - y^0)^2 + (Z_i - z)^2}} + F^0 \quad \dots (2)$$

- 観測されるドップラーシフトの真の値  $fd_{mi}(t)$  に対して  $fd_i(t)$  との差である測定残差成分  $\Delta fd_i^0(t)$  との関係

$$\Delta fd_i(t) = fd_{mi}(t) - \Delta fd_i^0(t) \quad \dots (3)$$

- 初期値からの変化量( $\Delta x, \Delta y, \Delta F$ )とし、以下の方程式を得る

$$\Delta fd_i(t) = \frac{\partial fd_i(t)}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial fd_i(t)}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial fd_i(t)}{\partial F} \Delta F \quad \dots (4)$$



$$G = \begin{bmatrix} \frac{\partial fd_1(t)}{\partial x} & \frac{\partial fd_1(t)}{\partial y} & 1 \\ \frac{\partial fd_2(t)}{\partial x} & \frac{\partial fd_2(t)}{\partial y} & 1 \\ \frac{\partial fd_3(t)}{\partial x} & \frac{\partial fd_3(t)}{\partial y} & 1 \end{bmatrix} \quad \dots (5)$$

$$U = [\Delta x \quad \Delta y \quad \Delta F]^T \quad \dots (6)$$

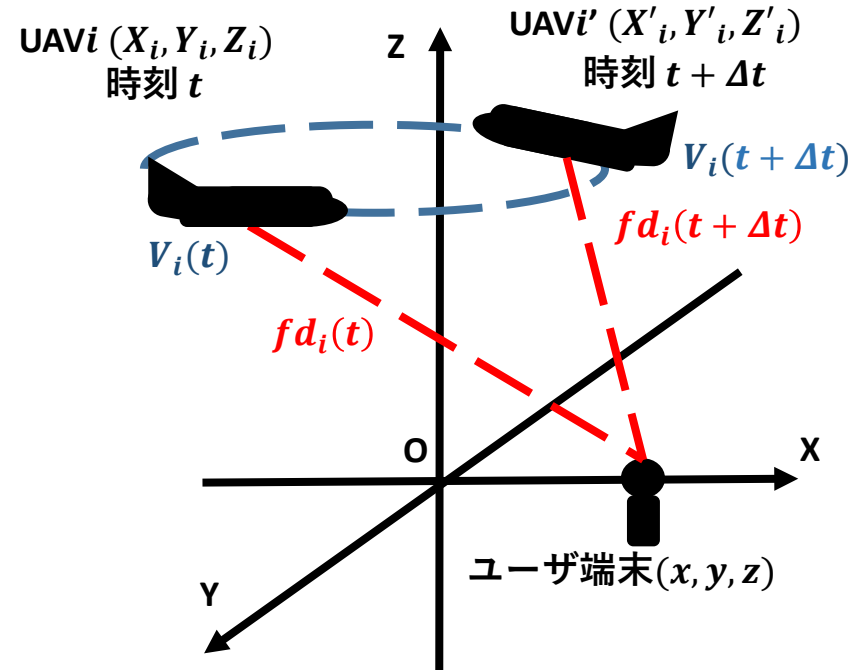
$$[\Delta fd_1(t) \quad \Delta fd_2(t) \quad \Delta fd_3(t)]^T = R^T \quad \dots (7)$$



# 最小二乗法を用いた位置検出 (2回測定)

前述した最小二乗法における計算処理に  
2回目の測定  $t' = (t + \Delta t)$  を追加  
⇒ 2回測定に応じた  $6 \times 3$  行列に拡張

$$G' = \begin{bmatrix} \frac{\partial fd_1(t)}{\partial x} & \frac{\partial fd_1(t)}{\partial y} & 1 \\ \frac{\partial fd_2(t)}{\partial x} & \frac{\partial fd_2(t)}{\partial y} & 1 \\ \frac{\partial fd_3(t)}{\partial x} & \frac{\partial fd_3(t)}{\partial y} & 1 \\ \frac{\partial fd_1(t + \Delta t)}{\partial x} & \frac{\partial fd_1(t + \Delta t)}{\partial y} & 1 \\ \frac{\partial fd_2(t + \Delta t)}{\partial x} & \frac{\partial fd_2(t + \Delta t)}{\partial y} & 1 \\ \frac{\partial fd_3(t + \Delta t)}{\partial x} & \frac{\partial fd_3(t + \Delta t)}{\partial y} & 1 \end{bmatrix} \dots (8)$$

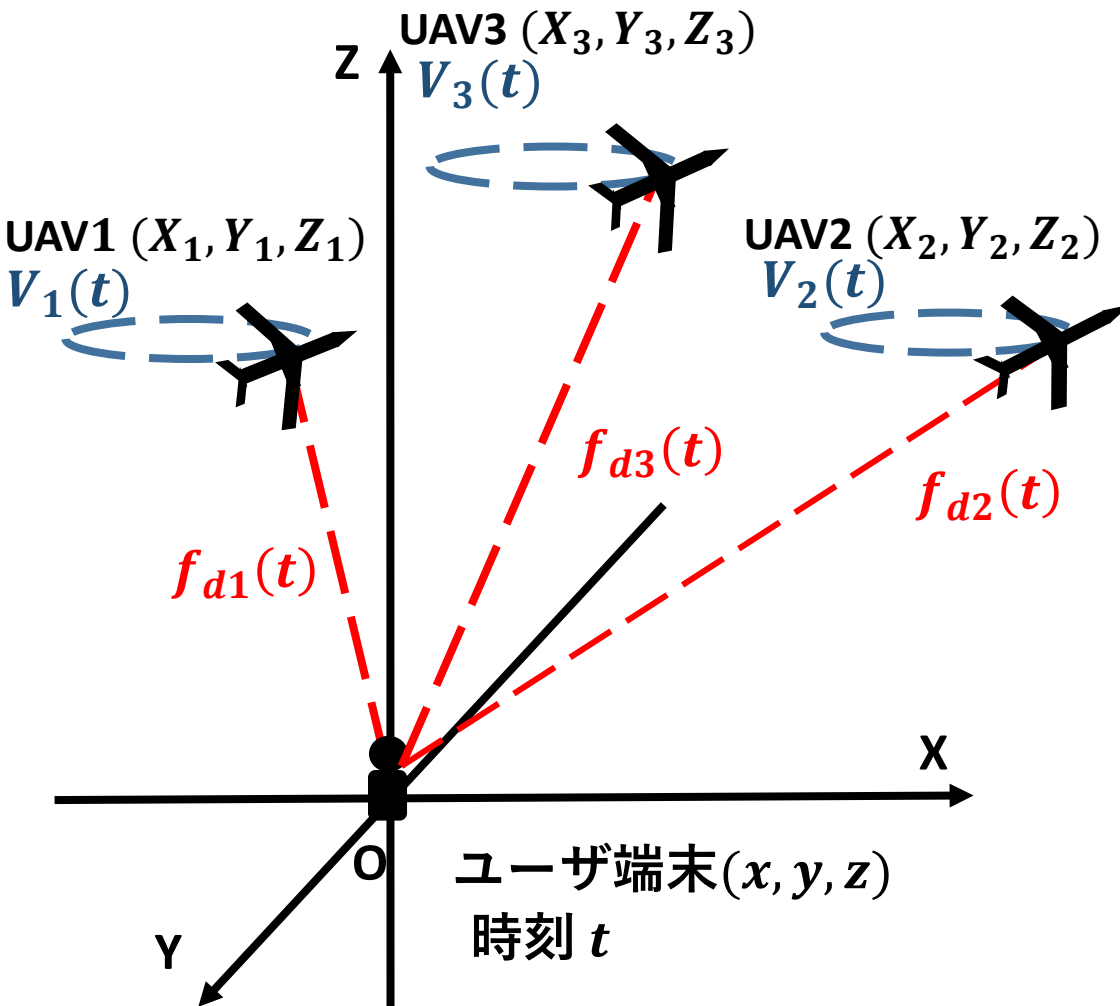


推定するパラメータより方程式が多いため  
(9)により解を求める

$$U = (G^T G)^{-1} G^T R^T \dots (9)$$

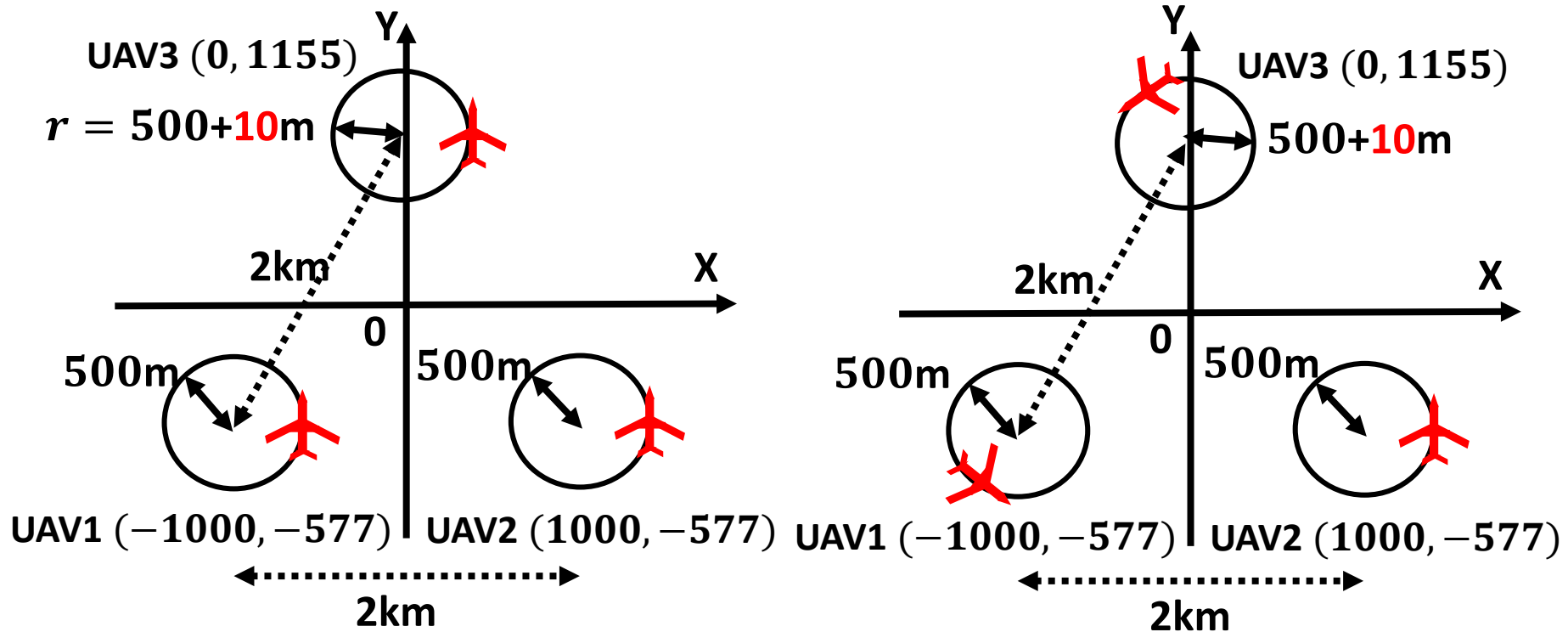
# シミュレーションモデル

# シミュレーションモデル



シミュレーション条件	
パラメータ	設定値
搬送波周波数	5GHz
飛行速度	100km/h
UAV高度	200m
ユーザ高度	0m
測位対象エリア	8km四方
周波数オフセット	1kHz

# シミュレーションモデル (1回測定)

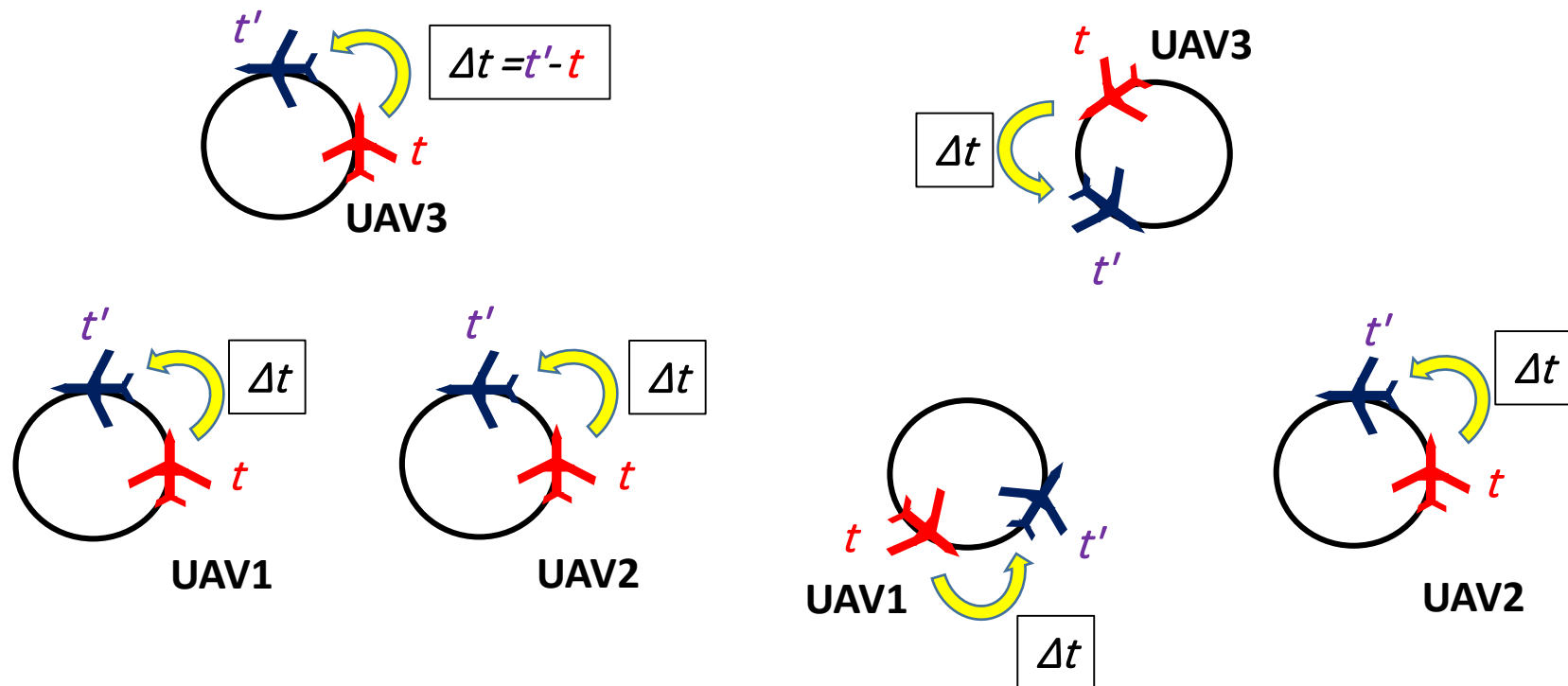


・ 各UAVの初期位相  $\theta=0^\circ$

・ UAV1: $\theta=240^\circ$  UAV2: $\theta=0^\circ$  UAV3: $\theta=120^\circ$

- ・ UAV3のみに( $r_e=$ )10mの誤差を人工的に付与
- ・ 各モデルを時刻  $t=0\sim 110\text{s}$ まで10秒毎のシミュレーション

# シミュレーションモデル（2回測定）



・ 各UAVの初期位相  $\theta=0^\circ$

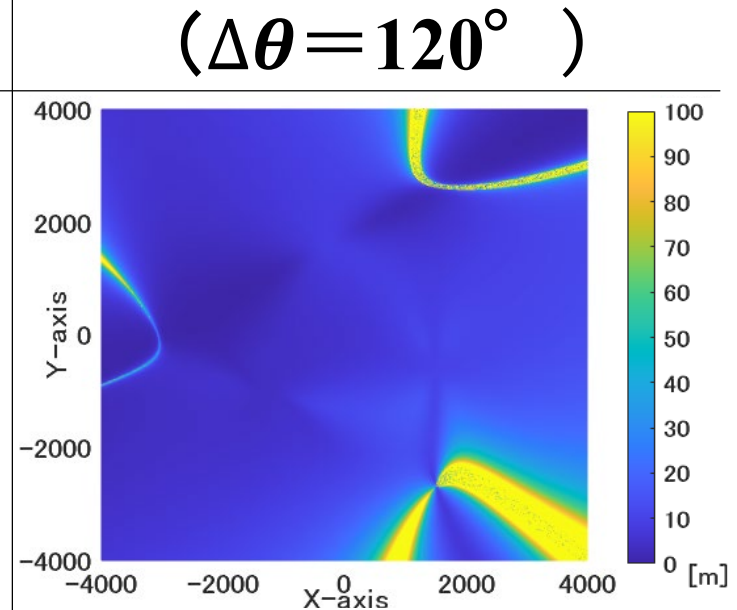
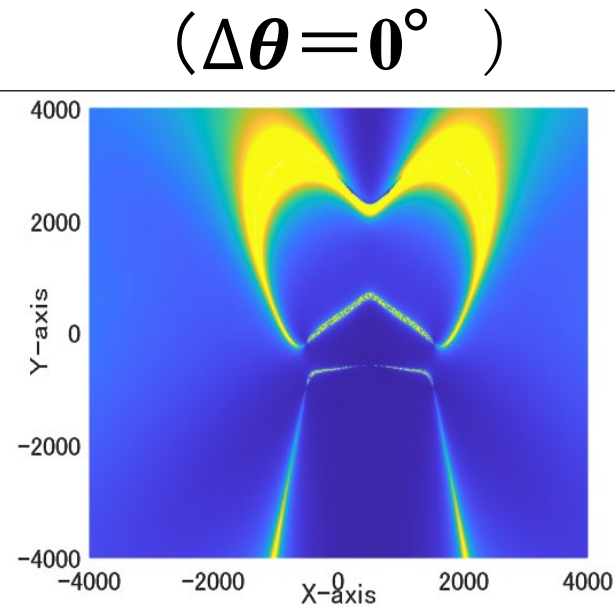
・ UAV1: $\theta=240^\circ$  UAV2: $\theta=0^\circ$  UAV3: $\theta=120^\circ$

- ・ UAV3のみに( $r_e=$ )10mの誤差を人工的に付与
- ・ 両モデルとも測定時刻  $t$  を0秒に固定
- ・ 両モデルとも時間間隔 $\Delta t=7.1\sim 113.6s$ まで7.1秒毎にシミュレーションを実施

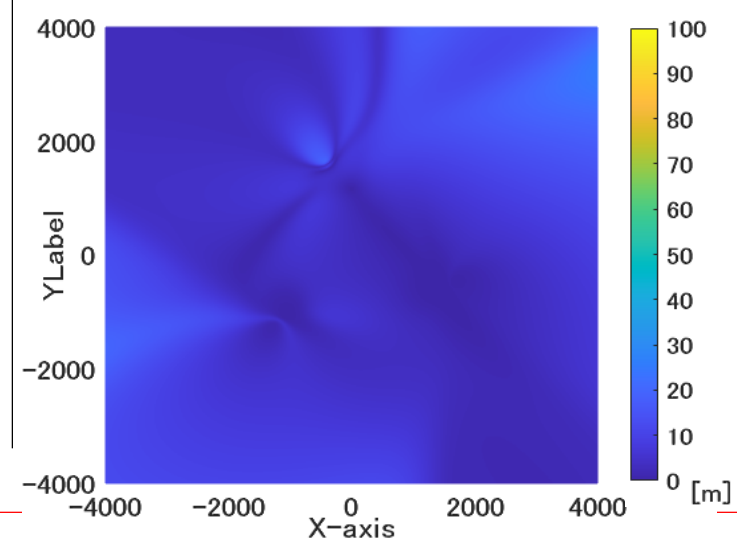
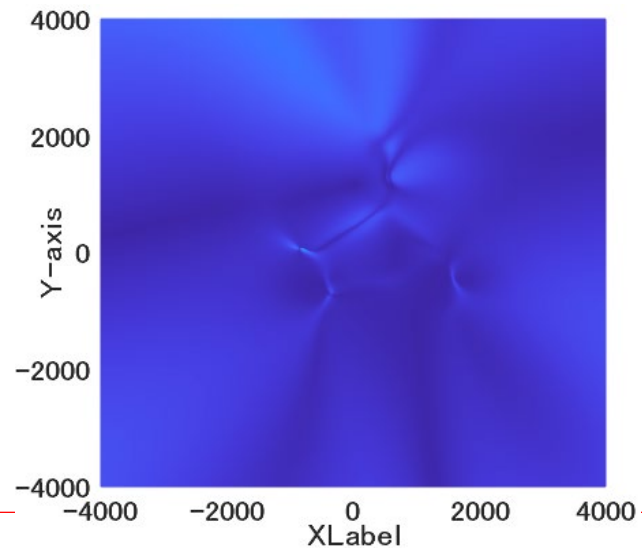
# シミュレーション結果

# 位置検出誤差分布特性比較

1回測定の場合  
( $t = 0s$ )



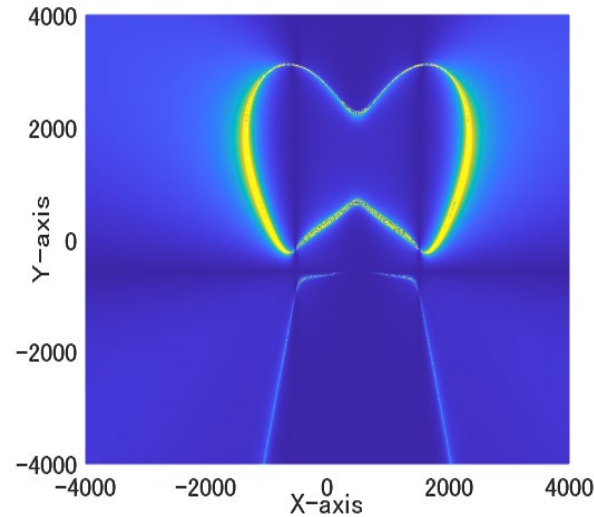
2回測定の場合  
( $\Delta t = 7.1s$ )



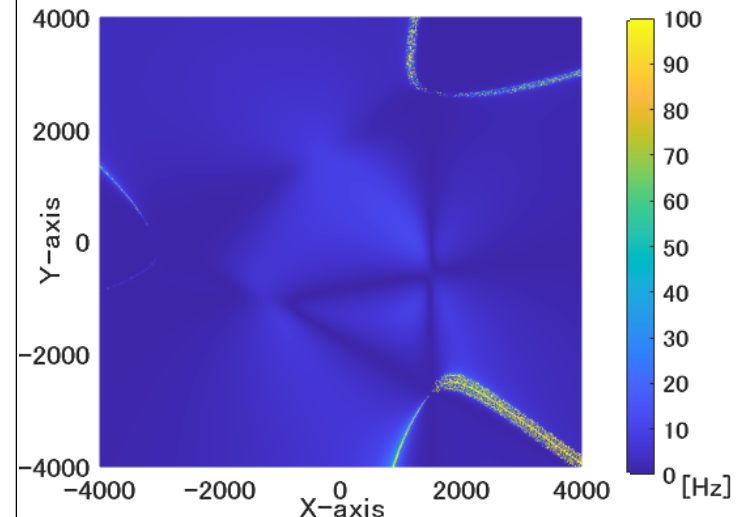
# 周波数オフセット推定誤差分布比較

1回測定の場合  
( $t = 0s$ )

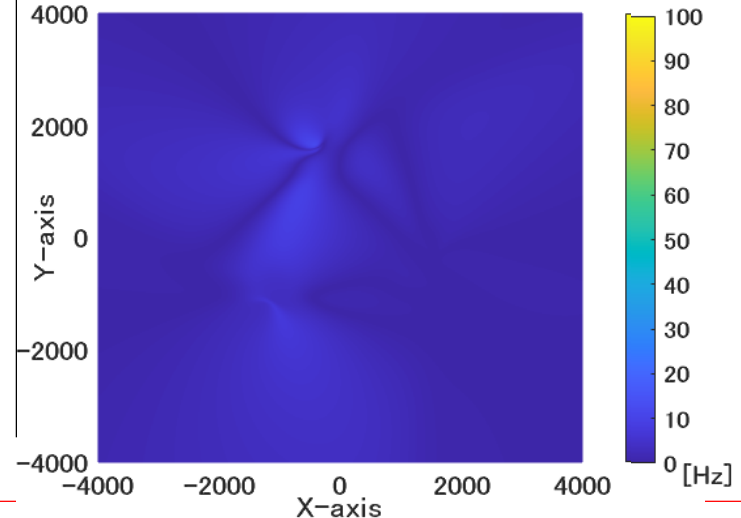
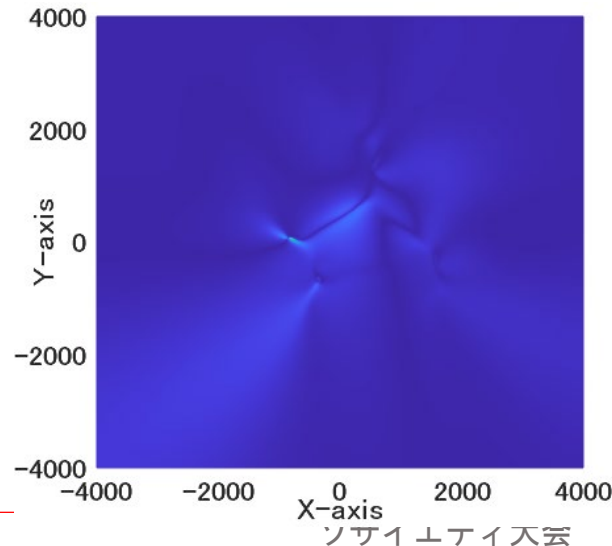
( $\Delta\theta = 0^\circ$ )



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

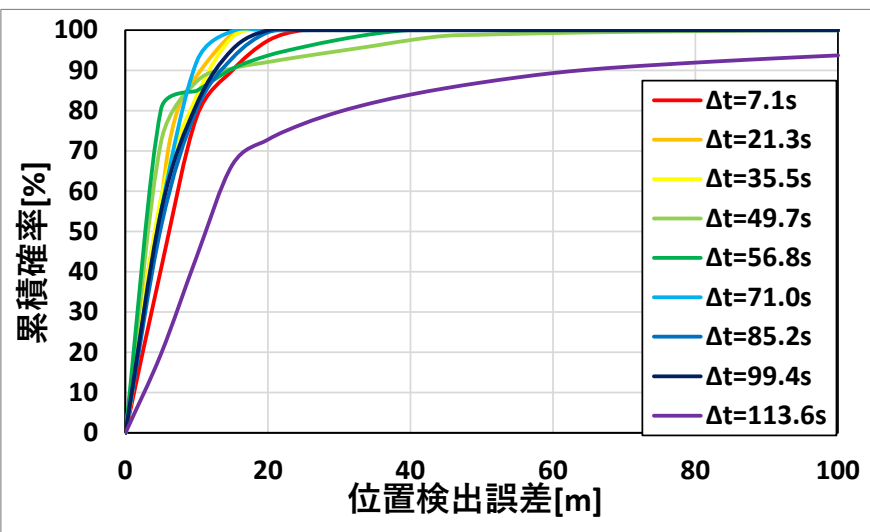


2回測定の場合  
( $\Delta t = 7.1s$ )

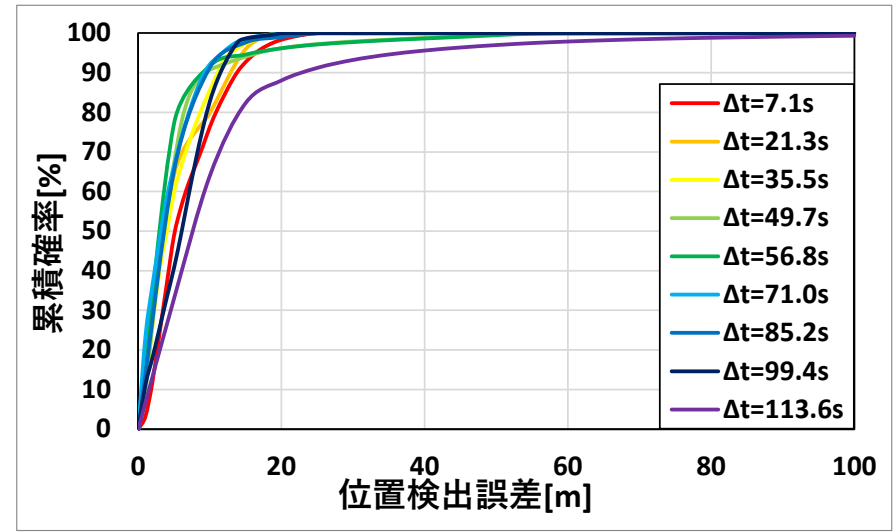




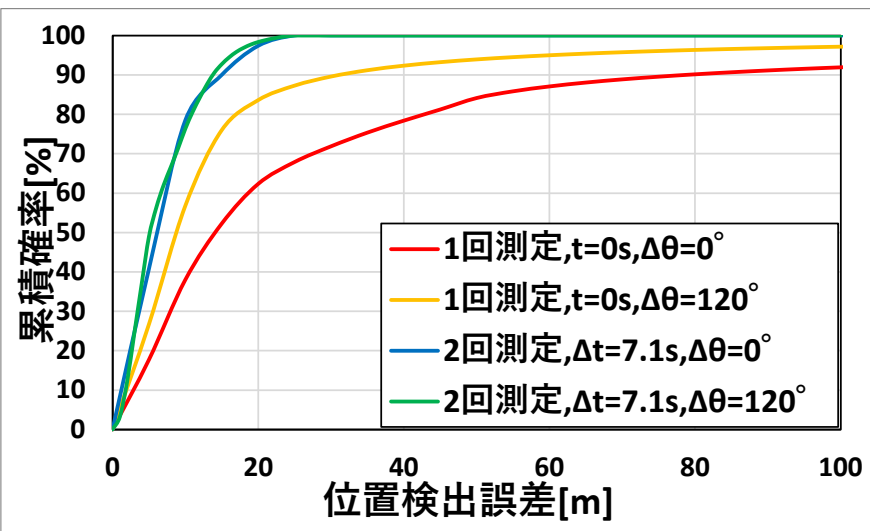
# 位置検出誤差累積分布特性（2回測定）



$\Delta\theta = 0^\circ$  ( $t = 0s$ ) の場合



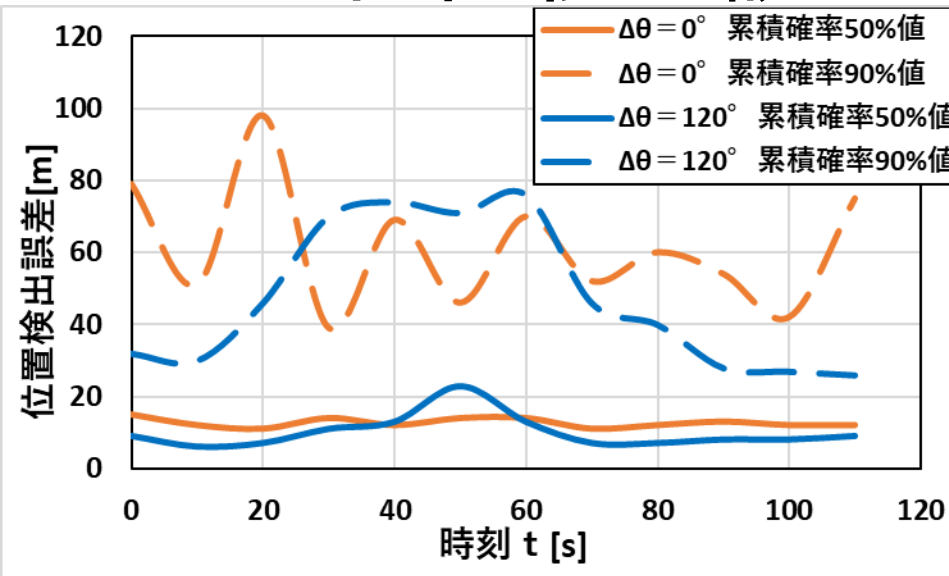
$\Delta\theta = 120^\circ$  ( $t = 0s$ ) の場合



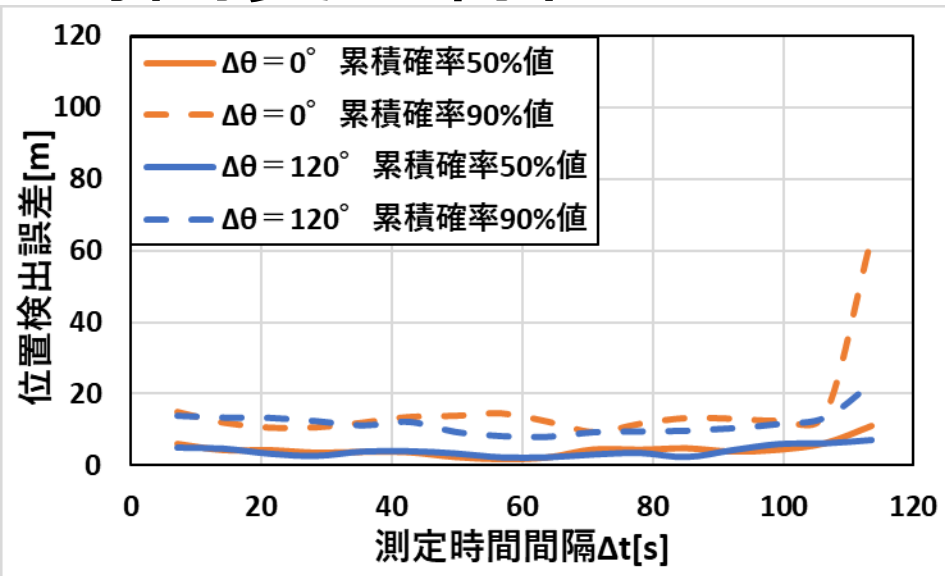
特性比較（一例）

- 両初期配置とも2回測定の精度が**良好**
- 1回測定  $\Rightarrow \Delta\theta = 120^\circ$  の方が精度が**良好**
- 2回測定  $\Rightarrow$  両モデルともほぼ同等の精度  
 $\Rightarrow$  初期配置による影響は小さい

# 位置検出誤差の時間変化特性



1回測定の場合



2回測定の場合

- 累積確率50%値 **最良値**, **最悪値**はそれぞれ**約8m**, **20m**の改善
- 累積確率90%値 **最良値**, **最悪値**はそれぞれ**約28m**, **24m**の改善
- 2回測定 $\Delta t=113.6s$ において**極端な精度の劣化**

⇒UAVの測定位置が重なる瞬間

# まとめ・今後の課題

# まとめ

- 最小二乗法によりユーザ位置検出と周波数オフセットの推定・補償を同時に行う位置検出システム
  - 3機のUAVが円旋回する飛行モデル
  - 測定時間間隔を用いた新たに2回測定の特性評価
  - 従来の1回観測との特性比較を実施
- UAVが重なる瞬間を除き測定時間間隔に依らず安定した測位精度の改善が確認
- 周波数オフセットもほぼ誤差0Hzで推定可能且つ従来と比較して推定値の改善が確認

# 今後の課題

- **測定時刻を変化させた場合におけるユーザ位置検出精度の特性評価**
- **複数回測定した際の周波数オフセットと位置検出誤差との関係性を詳細に検討**

# 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。