

# 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測位精度改善

---

日本大学

○深谷泰良 石川博康

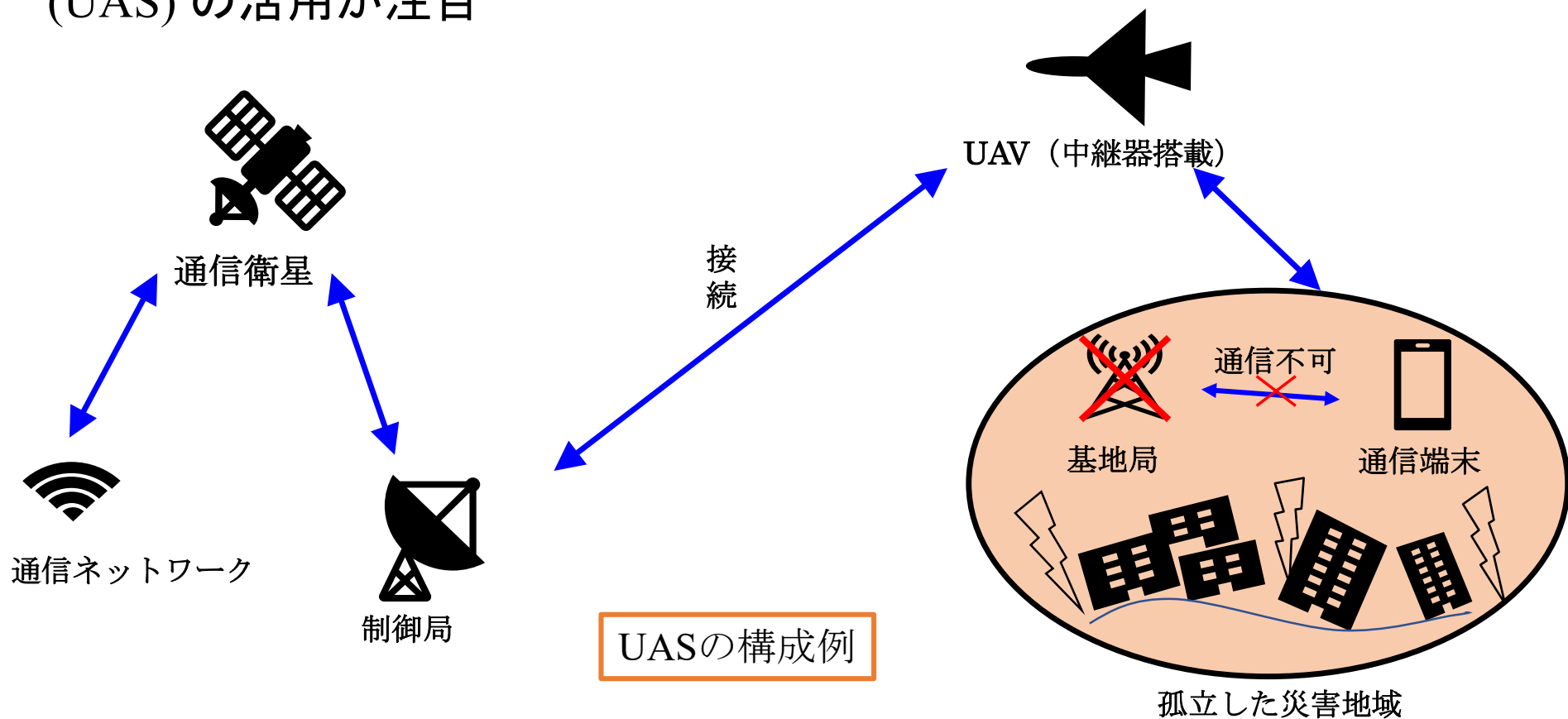
# 目次

- ◆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

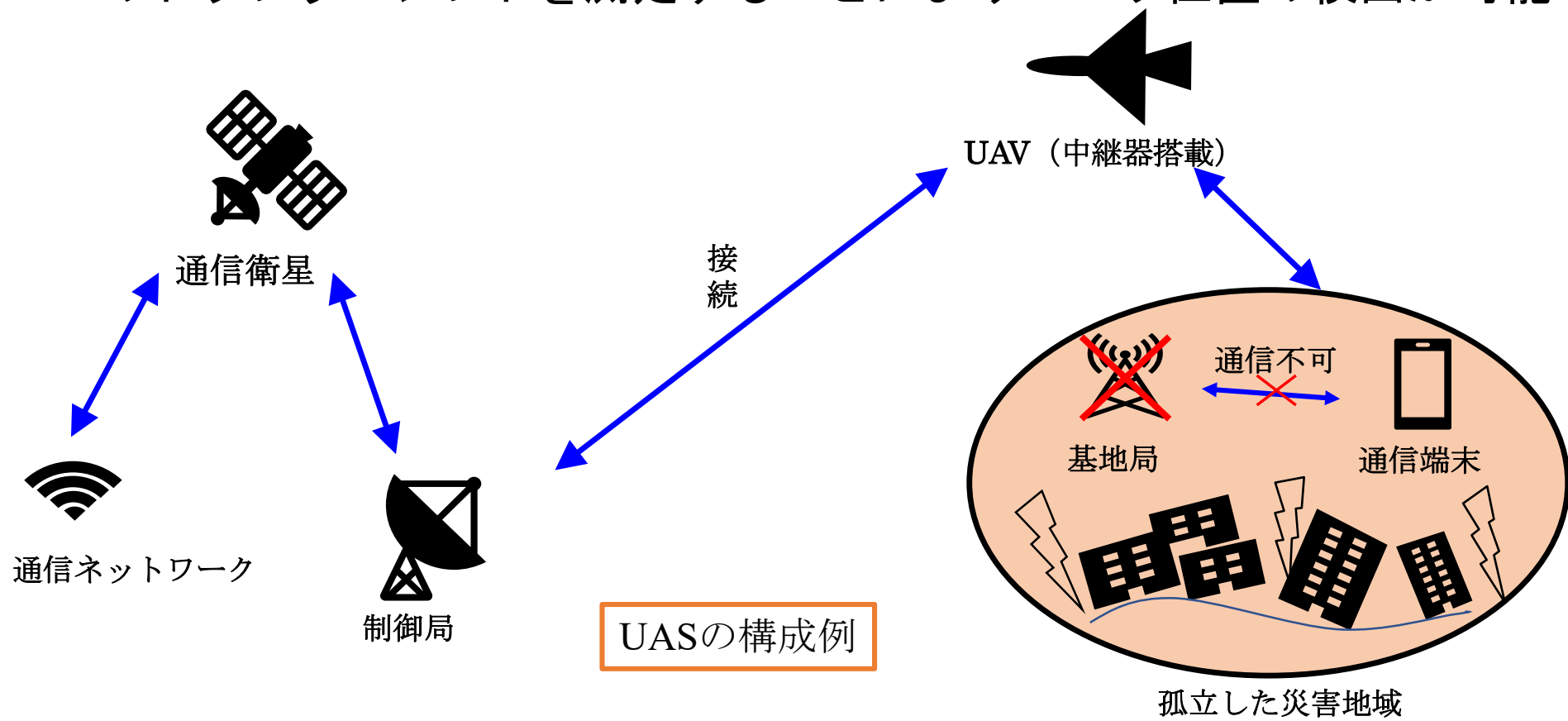
# 研究の背景

- 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測定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を介して生じ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二次元測位で実施
- 二次元位置検出手法をユーザ高度情報まで含む三次元位置検出手法に拡張（SAT研7月，SAT2021-22）

⇒三次元測位では測位精度劣化

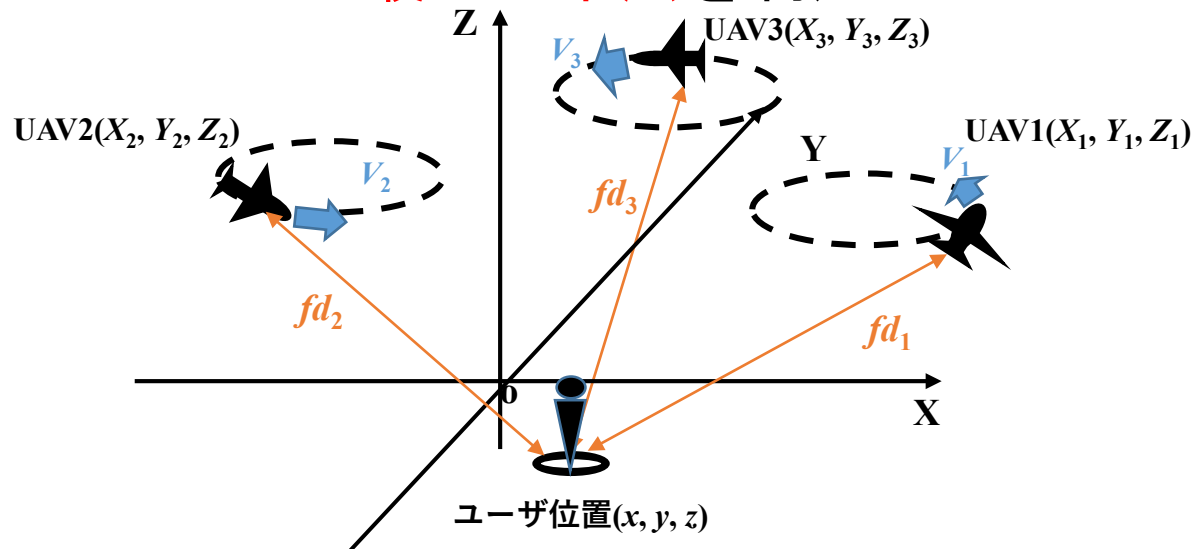
## ●本研究では

- 3機のUAVが円周回飛行をするシミュレーションモデル
- 三次元位置検出手法において測定回数を2回に拡張して特性評価

# 測位原理

# 測位原理

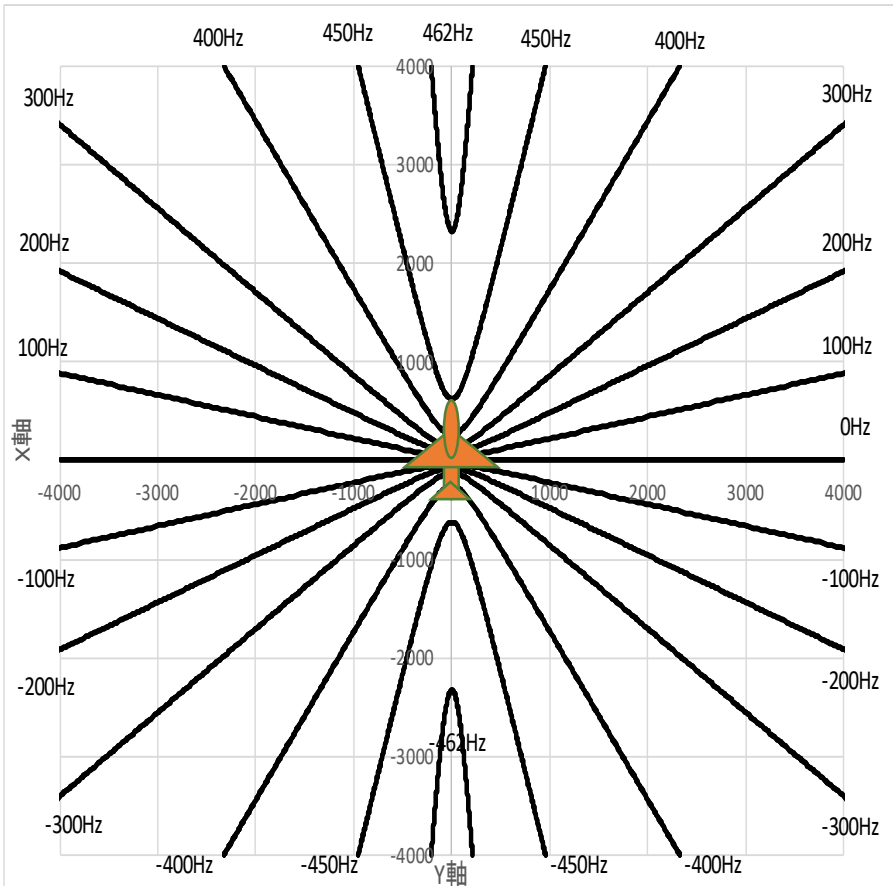
- ユーザが所有する地上端末から一定周波数のトーン信号（CW信号）を送信
- 上空を飛行するUAVを中継して地上制御局で受信
- 地上端末-UAV間の送受信信号の搬送波周波数にドップラーシフトが発生
- ドップラーシフトから最小二乗法を利用してユーザの位置検出



3機のUAVによるユーザ位置検出システム



# UAVによる ドップラーシフト分布



ドップラーシフトを測定すると  
ユーザ位置は**双曲面上に分布**



1機のUAVで  
ドップラーシフト複数回測定  
または

複数のUAVで  
ドップラーシフト測定

⇒ **双曲面の交点**として  
ユーザ位置を検出可能

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

# 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

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

- 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

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

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

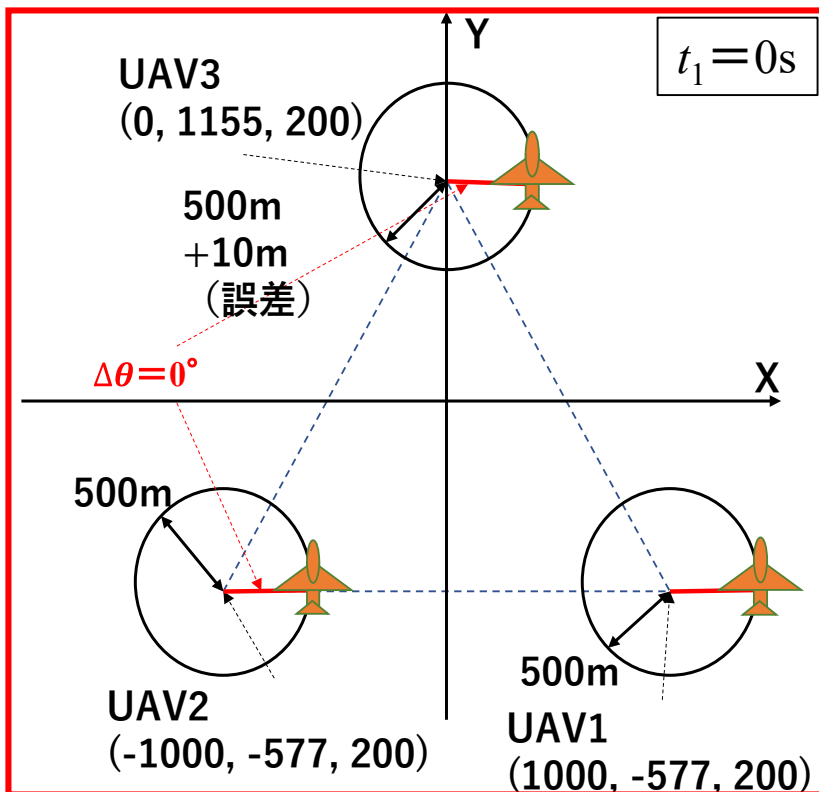
- $U$ が十分に小さくなるまで更新  $\Rightarrow$  ユーザ位置推定

- 本研究では**最小二乗法に基づく位置検出手法**を採用
- 3機のUAV**を使用して，**三次元測位**で測定回数を2回に**拡張**

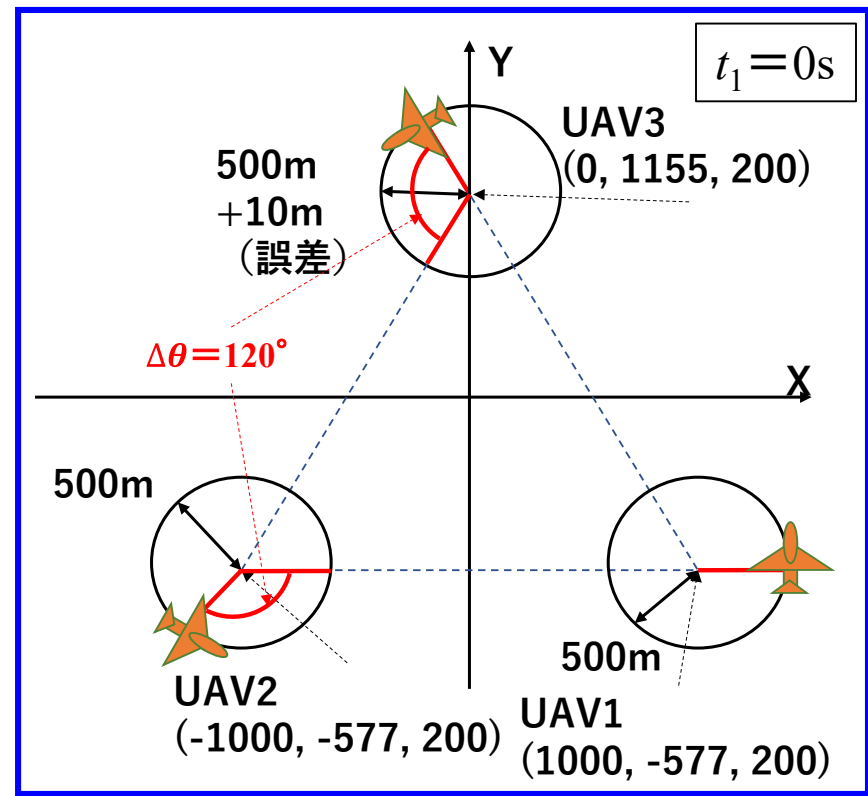
# シミュレーションモデル

# 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 :  $Z=200\text{m}$
- 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 :  $t_1=0\text{s}\sim 113.6\text{s}$
- 測定時間間隔 :  $\Delta t=0\text{s}\sim 113.6\text{s}$
- 評価対象エリア : 8km四方



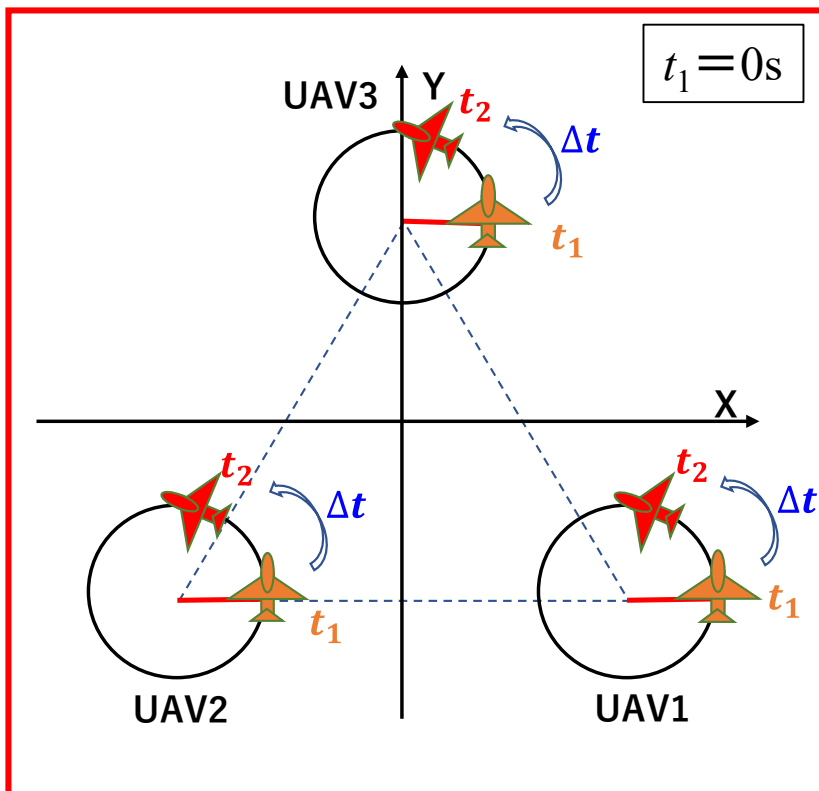
(a)各UAVの位相差 $0^\circ$ の場合



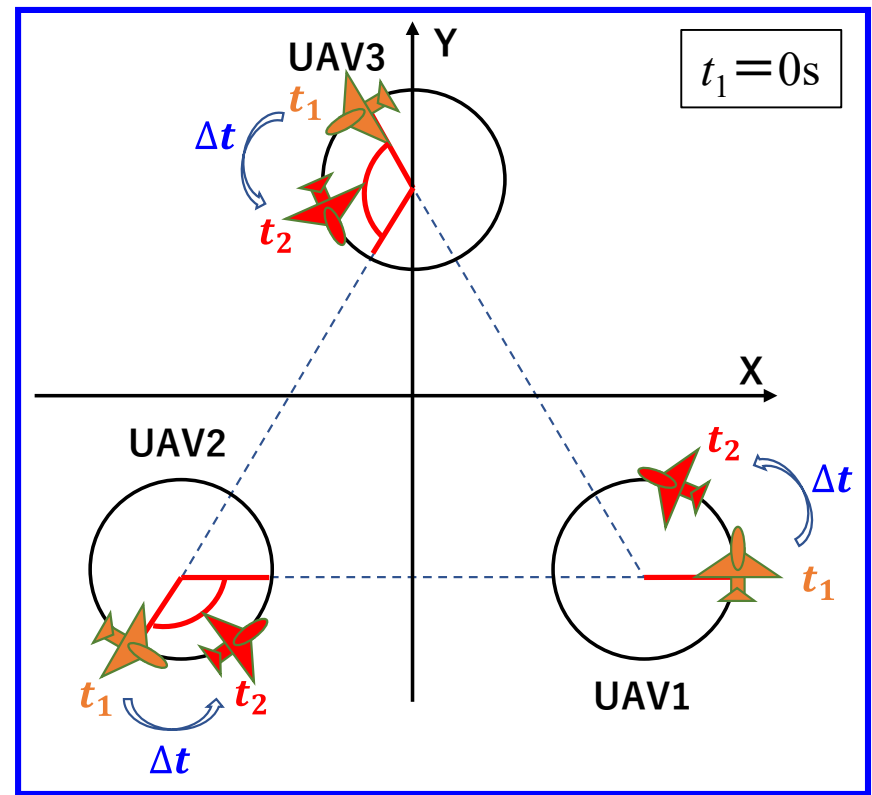
(b)各UAVの位相差 $120^\circ$ の場合

# シミュレーションモデル

測定時間 $t_1=0\text{s}\sim 113\text{s}$ において初期位相差を $\Delta\theta=0^\circ, 120^\circ$ としたときの  
 三次元測位を行うシミュレーションモデルについて  
 測定時間間隔を $\Delta t(=t_2-t_1)=0\text{s}\sim 113\text{s}$ とした2回測定をXY平面上で評価



(a)各UAVの初期位相差 $0^\circ$ の場合



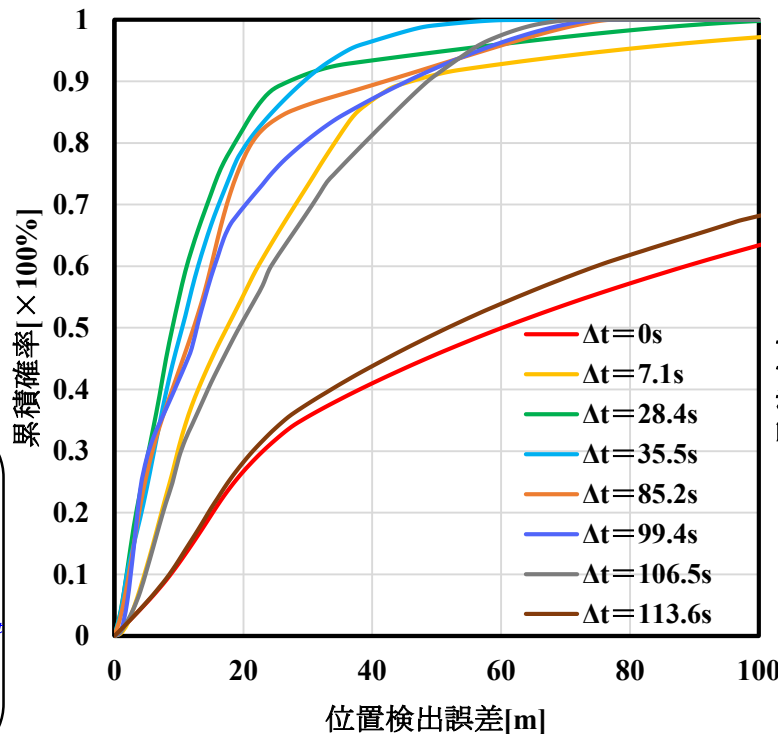
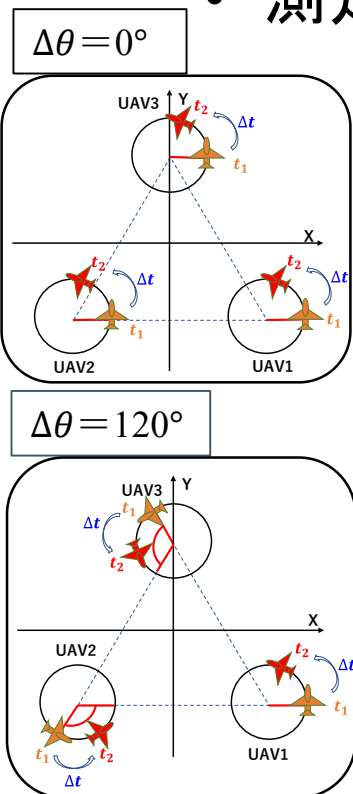
(b)各UAVの初期位相差 $120^\circ$ の場合

# シミュレーション結果

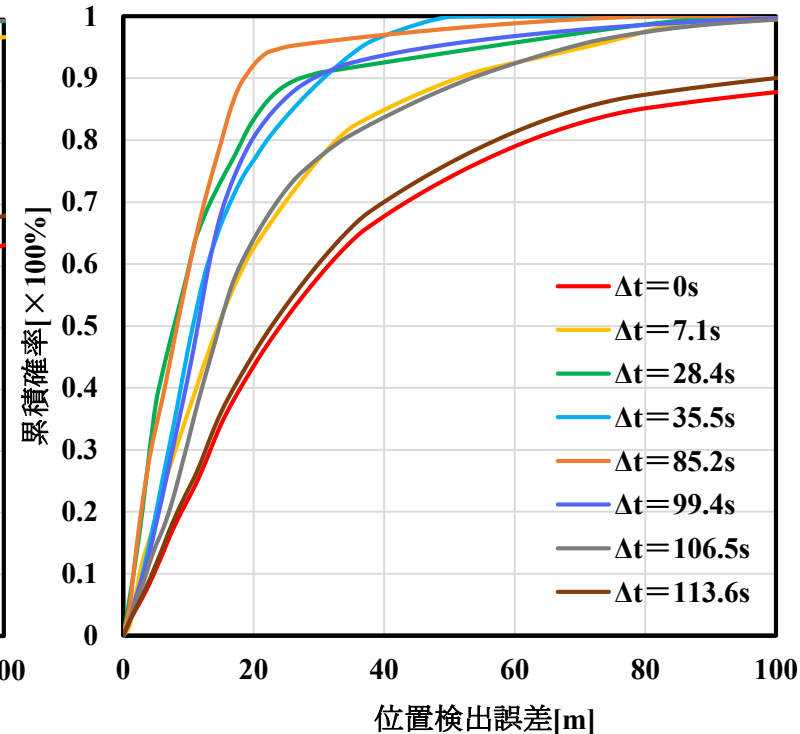
# 位置検出推定誤差の累積分布特性 ( $t_1 = 0\text{s}$ )

位置検出誤差の値が小さい→測位精度が良好

- 測定時間間隔 $\Delta t = 0\text{s}, 113.6\text{s}$ 以外では  
位置検出誤差**20m以下を達成**（累積確率50%値）  
⇒2回測定にすることで測位精度は**大幅に改善**
- 測定時間間隔 $\Delta t$ が**大きければ測位精度良好ではない**



$\Delta\theta = 0^\circ$



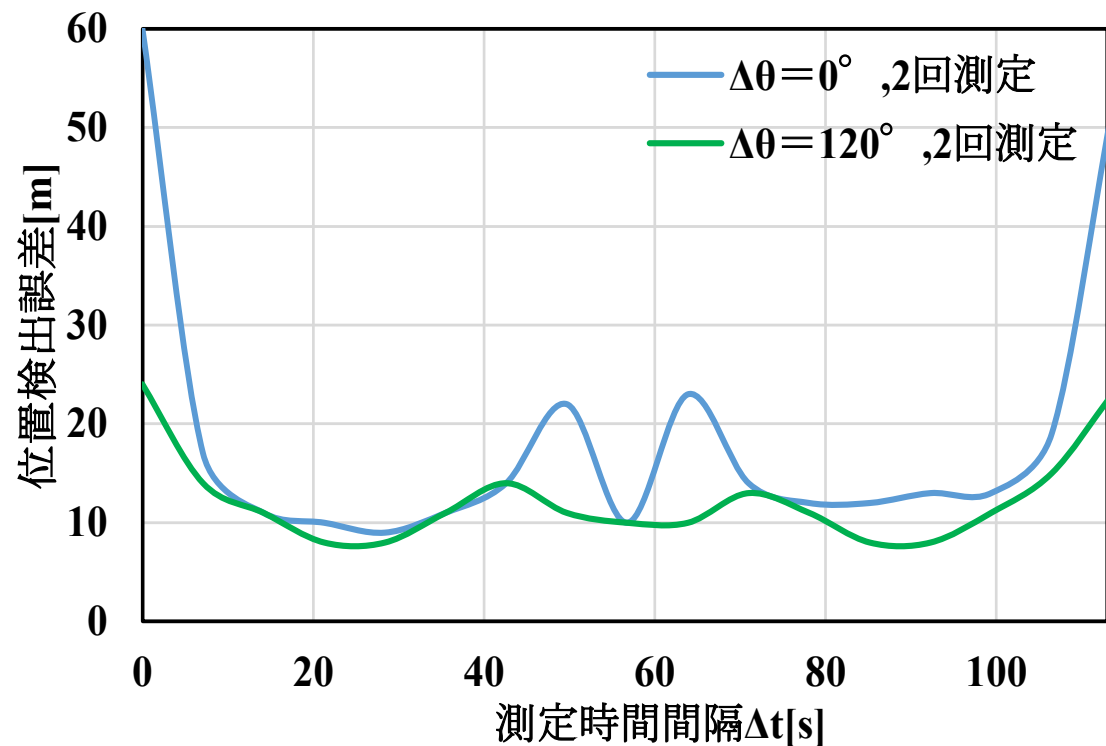
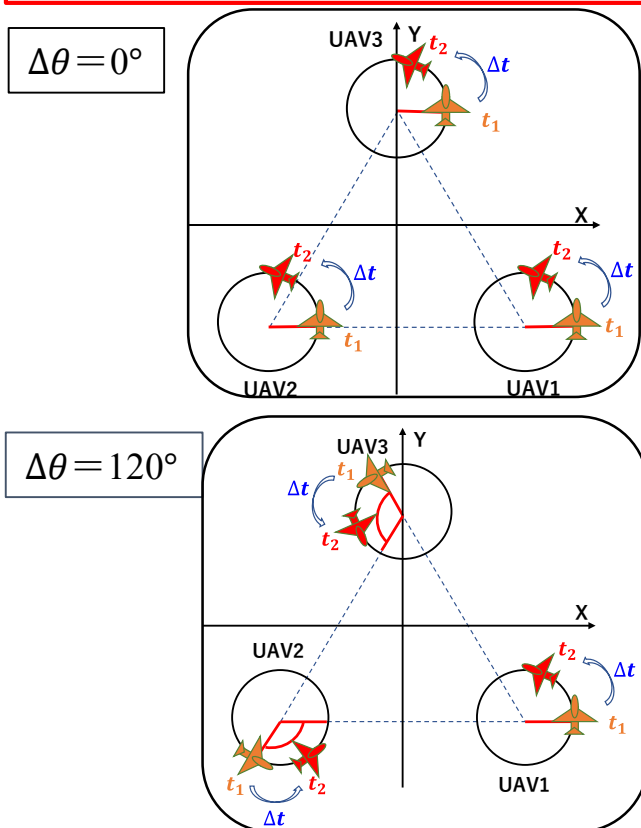
$\Delta\theta = 120^\circ$

# 位置検出推定誤差の時間特性

( $t_1 = 0\text{s}$ , 累積確率50%値)

- 初期位相差による特性差 **小**
- 測定時間間隔 $\Delta t = 21.3\text{s}$ のとき, 位置検出誤差10m以下  
 $\Rightarrow$ 測位精度は $\Delta t = 20\text{s}$ 程度で十分な改善

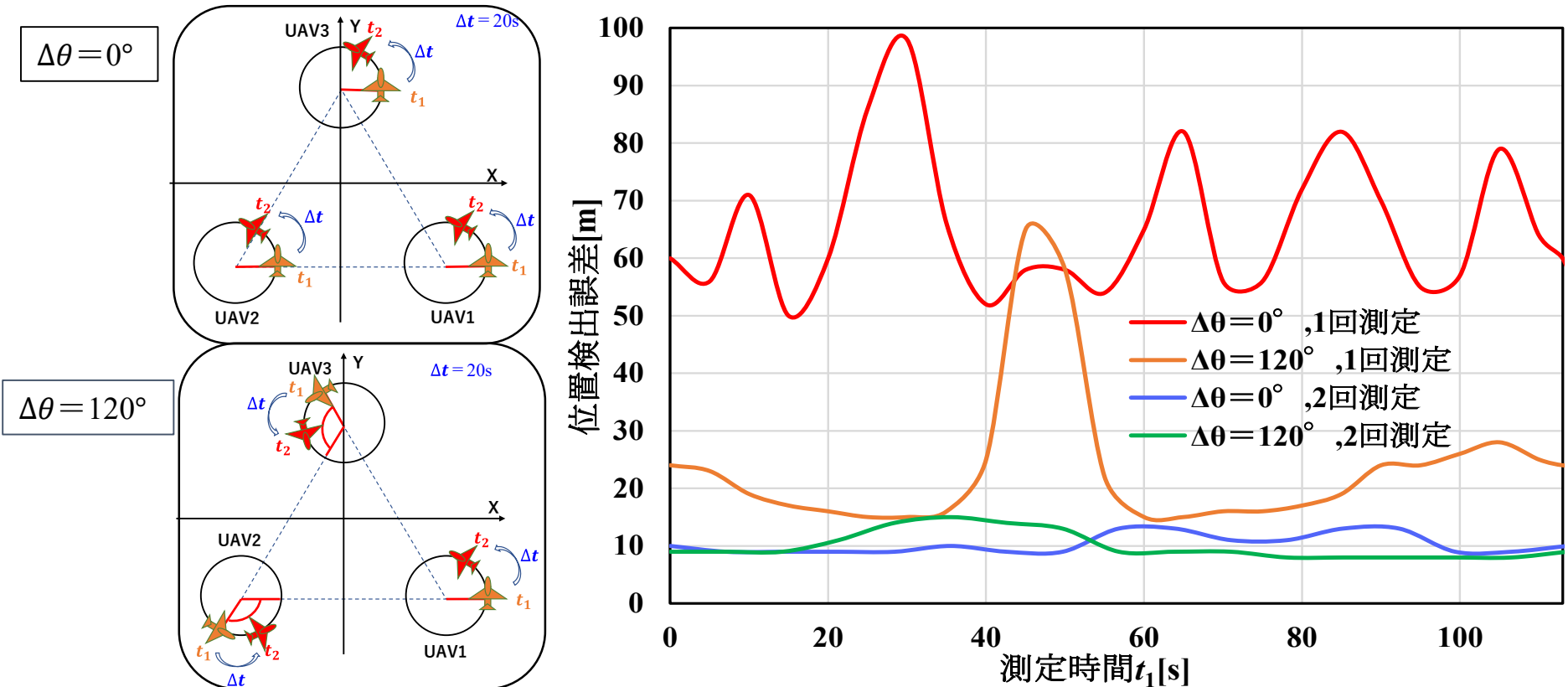
$\Rightarrow$ 2回測定で測定時間間隔 $\Delta t$ を20sに固定し, 1回目の測定時間 $t_1$ を変化させて1回測定と時間変化による特性差を詳細に比較





# 位置検出推定誤差の時間変化特性 ( $\Delta t = 20\text{s}$ 固定, 累積確率50%値)

- 2回測定の方が1回測定よりも測位精度良好
- $\Delta\theta = 120^\circ$ の場合, 1回測定では $t_1 = 45\text{s}$ 付近で測位精度劣化  
⇒ UAVの位置関係が**最接近**
- 1回測定と比較して2回測定は初期位相差による特性差 **小**  
⇒ 2回目の測定でUAVの配置関係が改善及び双曲面が互いに補完



まとめ

# まとめ

## ●本研究

三次元位置検出手法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2回に拡張**して位置検出誤差特性の評価を実施

- 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
- ドップラーシフトの測定回数が1回と2回の場合の位置検出特性の評価を実施

## ●結果

**測定回数を拡張**することで

- 測位精度は**大幅に改善**（測定時間間隔 $\Delta t = 20\text{s}$ 程度で十分な測位精度改善）
- UAVの**初期配置による特性差が小さくなる**

## ●今後の課題

- 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
- 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

## 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。