

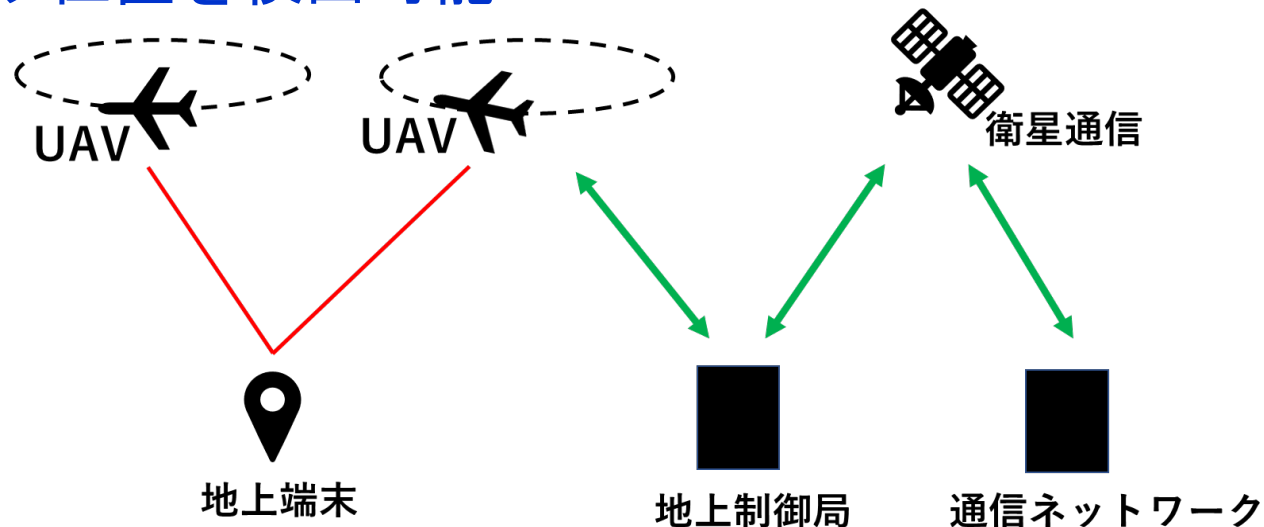
無人航空機を用いたユーザ位置検出システムにおけるドップラーシフト複数回観測時の測位精度改善効果

日本大学 大学院
○出口泰河 石川博康

研究背景及び目的

研究背景

- 大規模災害発生時は、公共の無線通信ネットワークの提供が困難
- **無人航空機(UAV)**を用いた**無人航空機システム(UAS)**が一時的な通信ネットワークを提供する一手段として期待
- UASでは、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
- UAVの飛行位置を用いた**ドップラーシフトの観測量**により**ユーザ位置を検出可能**



UAS構成例

研究目的

◆従来研究

- 8の字飛行するシミュレーションモデルを対象とし、**2機のUAV**により**異なる時刻に複数回**観測されるドップラーシフトを用いて**最小二乗法に基づきユーザ位置検出を行う手法**の特性評価
- **1回測定と比較して、2回測定では精度が大幅に改善することを確認**
(出口, 石川, “無人航空機を用いたユーザ出システムにおけるドップラーシフト複数回観測時の測位精度特性評価”, 信学ソ大B-3-24, 2022.)

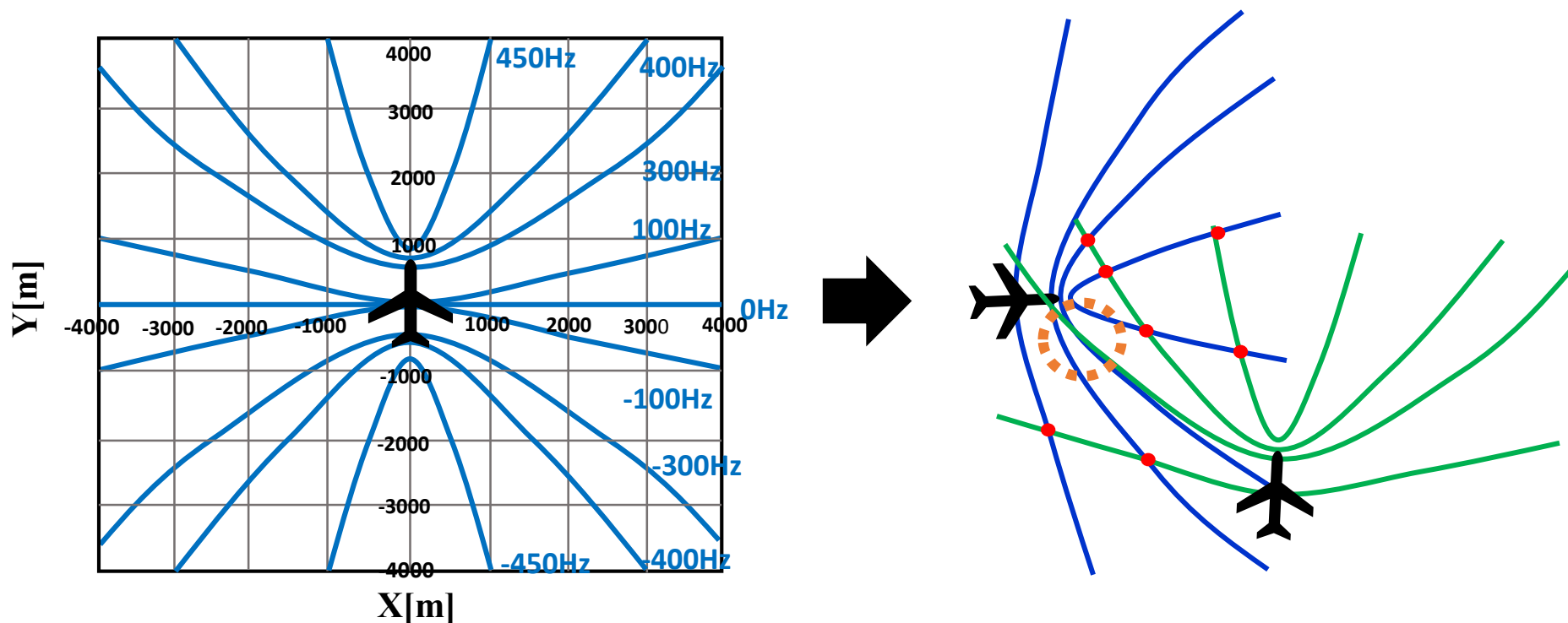
◆本研究

- 従来システムにおいて**位置検出精度のさらなる改善**を目的
- ドップラーシフトの**観測回数を増加**させ、**最小二乗法を拡張する手法**を適用

測位原理

ドップラーシフト分布

- 地上端末-UAV間に生じるドップラーシフトを観測
- 地上端末の位置は、双曲線状に分布
- UAVでドップラーシフトを複数回測定した場合、ユーザ位置は双曲線の交点として検出可能



最小二乗法による位置検出手法

- 地上端末-UAV間に生じるドップラーシフト

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

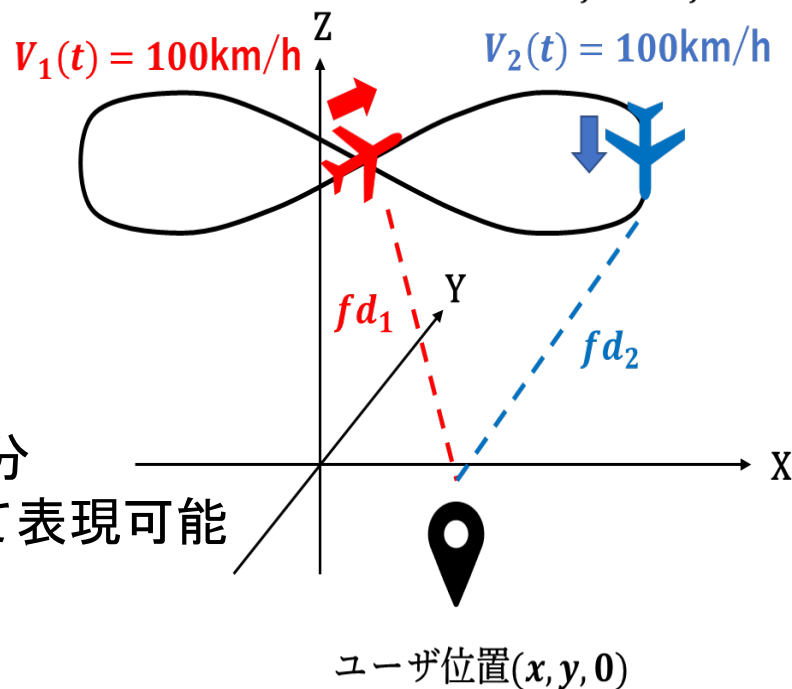
- 地上端末の初期値 $(x^0, y^0, 0)$ から導出したドップラーシフト量との測定残差成分

$$\Delta fd_i(t_j) = fd_i(t_j) - fd_i^0(t_j)$$

- ドップラーシフトの変化量と測定残差成分により、各UAVに対して次の関係式として表現可能

$$\Delta fd_i(t_j) = \frac{\partial fd_i(t_j)}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial fd_i(t_j)}{\partial y} \Delta y$$

UAV1($X_1(t_j), Y_1(t_j), Z_1(t_j)$) UAV2($X_2(t_j), Y_2(t_j), Z_2(t_j)$)



最小二乗法による位置検出手法

- ドップラーシフトの変化量と残差成分の関係式からなる連立方程式を、偏微分項である**行列式** G とユーザ位置の変化量 $(\Delta x, \Delta y)$ である**転置行列** U を用いて次式のように表現

$G =$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial fd_1(t_1)}{\partial x} & \frac{\partial fd_1(t_1)}{\partial y} \\ \frac{\partial fd_2(t_1)}{\partial x} & \frac{\partial fd_2(t_1)}{\partial y} \\ \frac{\partial fd_1(t_2)}{\partial x} & \frac{\partial fd_1(t_2)}{\partial y} \\ \frac{\partial fd_2(t_2)}{\partial x} & \frac{\partial fd_2(t_2)}{\partial y} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial fd_i(t_j)}{\partial x} & \frac{\partial fd_i(t_j)}{\partial y} \end{bmatrix}$$

2回測定

1回測定

- $U = (G^T G)^{-1} G^T F^T$ で与えられる行列演算により、 U が十分に小さくなるまで繰り返し計算を更新することで**ユーザ位置を精度良く推定可能**

$$U = [\Delta x \quad \Delta y]^T$$

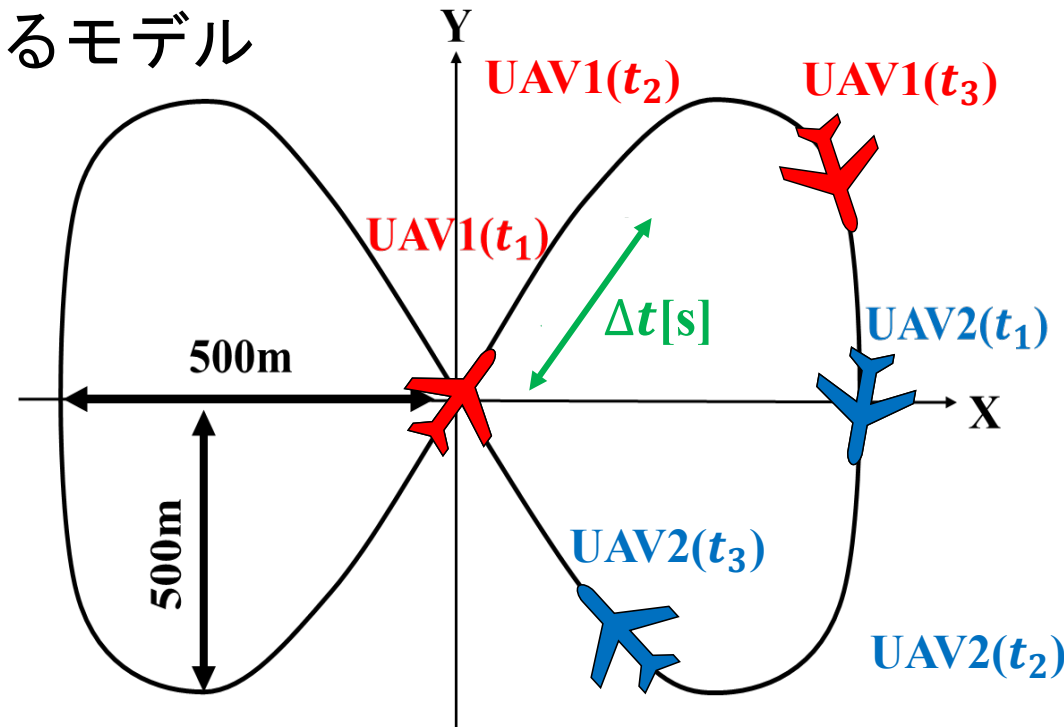
シミュレーションによる 特性比較

シミュレーションモデル

- 2機のUAVが8の字飛行するモデル

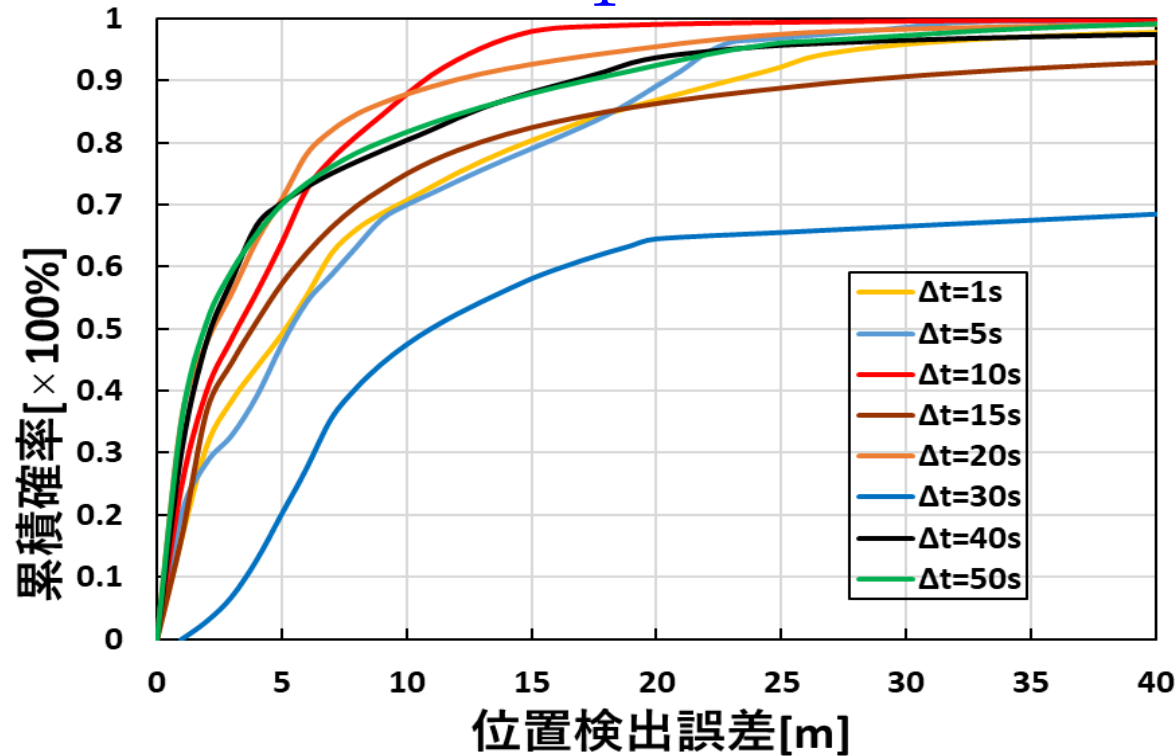
測定条件

飛行速度	100km/h
搬送波周波数	5GHz
UAV高度	200m
回転半径	500m
ユーザ位置高度	0m
飛行位置誤差	10m
評価対象エリア	8km四方
初期配置	1/4周分



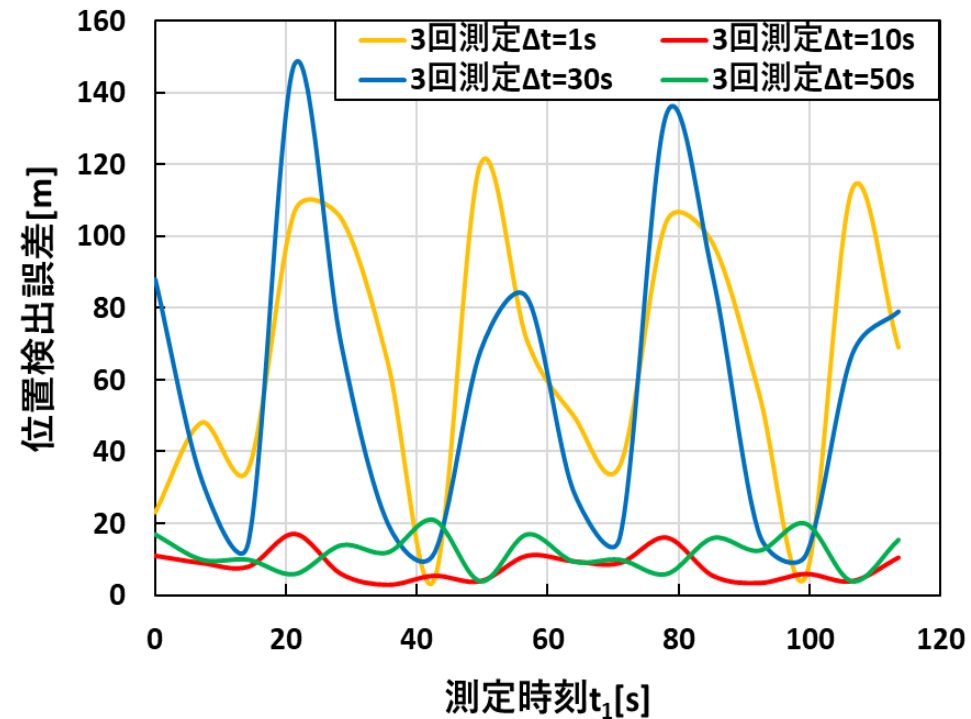
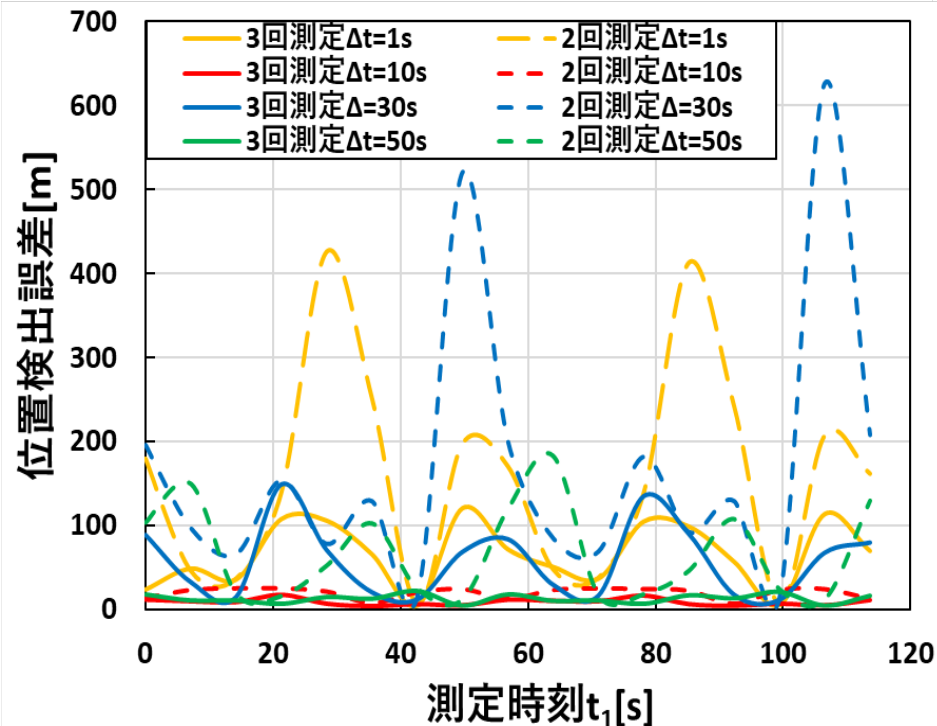
- 測定時刻を, 8の字周回軌道の1周分に相当する時間 ($t=0s \sim 113.6s$)を16分割し, **7.1s毎**に測定
- 複数回測定のため, **測定時間間隔** Δt を**1s**~**20s**では**1s間隔**で, **20s**~**50s**では**10s間隔**で変化させてシミュレーションを実施

位置検出誤差の累積分布特性 (3回測定 $t_1 = 0s$ の場合)



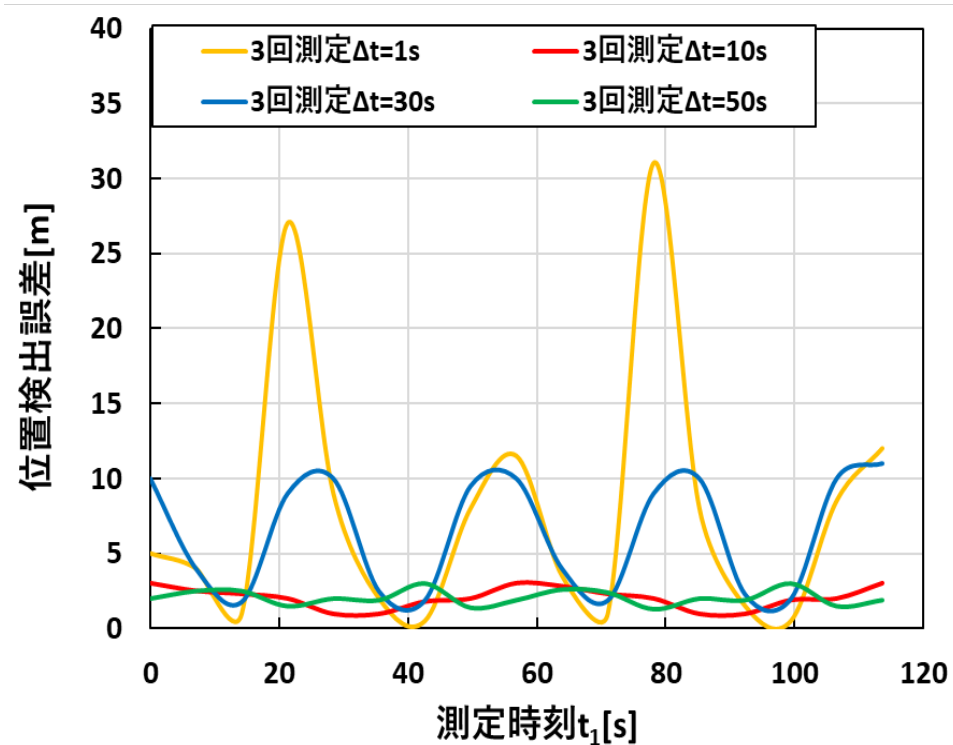
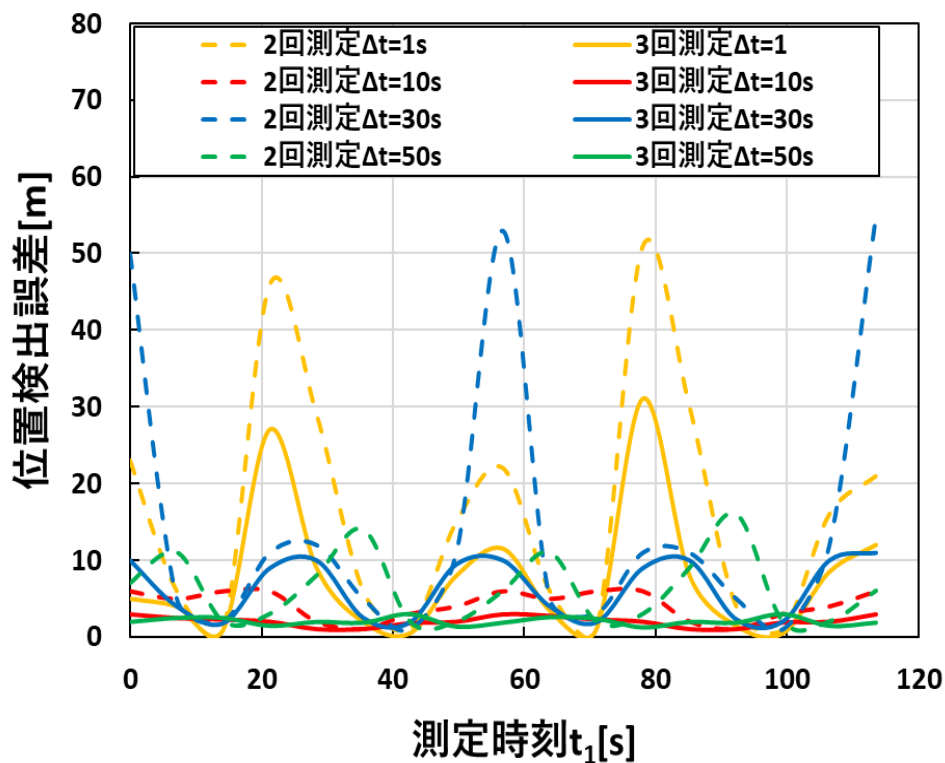
- $\Delta t = 10s, 20s$ のとき位置検出誤差がおよそ10mと良好
- Δt を変化させる \rightarrow 概ね20mの誤差, $\Delta t = 30s$ で最悪値
 - \rightarrow 2機のUAVの初期配置が1/4周分(28.4s)離れている
UAV1の2回目測定位置とUAV2の1回目測定位置が接近

位置検出誤差の時間変化特性（累積確率90%値）



- $\Delta t = 1s, 30s, 50s$ の場合，位置検出精度が大幅に改善
 - 3回測定では $\Delta t = 10s, 50s$ の場合，位置検出誤差20m未満
 - $\Delta t = 1s, 30s$ の場合，100m以上となる時刻が存在
- ➡ Δt が短いことにより交点が得られ難い
配置関係から時刻によって測定位置が接近

位置検出誤差の時間変化特性（累積確率50%値）



- $\Delta t = 1s$ で最悪値(累積確率90%では30sで最悪値)
- $\Delta t = 30s$ では位置検出誤差2~10mで観測
- ➡ 観測地点によっては良好
- $\Delta t = 10s, 50s$ の場合, いずれも良好

各測定回数における位置検出誤差 ($\Delta t = 10\text{s}$)

累積確率	1回測定	2回測定	3回測定
50%	130m	4m	2m
90%	550m	19m	8m

- 累積確率**50%**, 累積確率**90%**
1回⇒2回にすることで**大幅に改善**
2回⇒3回では**改善率は減少**

➡**3回測定は有効であることがわかる**

まとめ

まとめ

- 位置検出精度の改善を目的とし、ドップラーシフトの測定回数を複数回に拡張
- 2機のUAVが8の字飛行するモデル
- 測定時間間隔 Δt を1s~50sで変化させ、累積分布特性に基づく特性比較を実施
- 測定時間間隔 Δt は10sのとき最良
- 測定回数を1回⇒2回⇒3回と増やした場合、
累積確率50%値：130m⇒4m⇒2mと改善
累積確率90%値：550m⇒19m⇒8mと改善
ただし、改善率は測定回数を増加させる毎に減少

今後の課題

- ドップラーシフト測定回数をさらに増やした場合の測位精度改善効果の検討
- 必要となる位置検出時間と位置検出精度の
トレードオフの観点から、適切な測定回数及び
測定時間間隔 Δt の検討