

# 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特性評価

---

日本大学

○出口 泰河 石川 博康

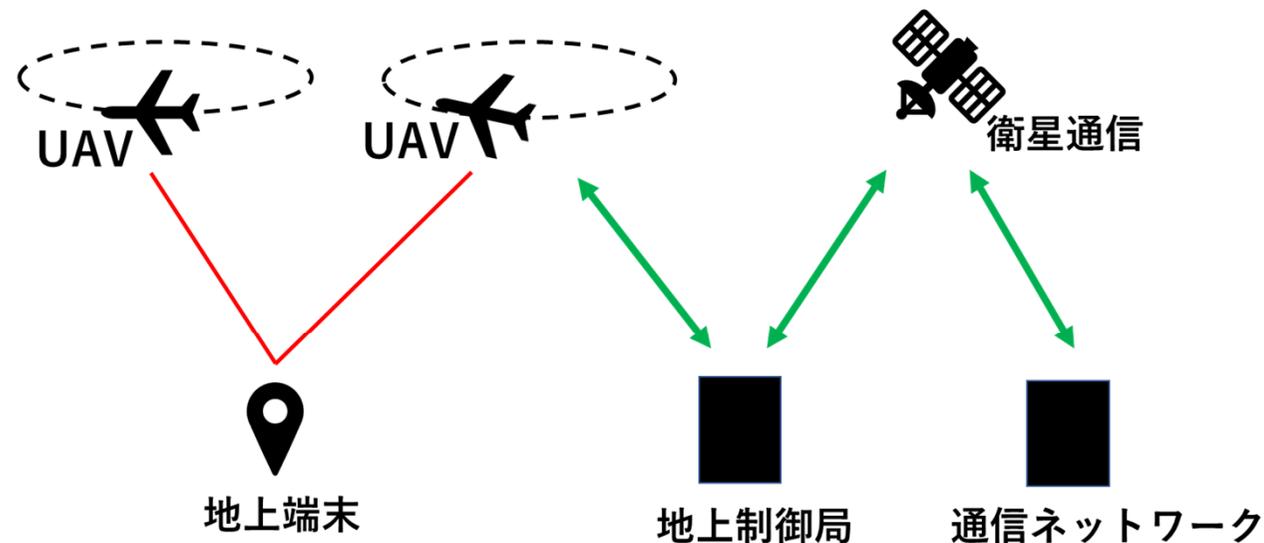
# 目次

- 研究背景及び目的
- 測位原理
- シミュレーションによる特性比較
- まとめ

# 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
- **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

- 1機のUAVにより異なる時刻に2回, もしくは, 2~3機のUAVにより同一時刻に1回で観測されるドップラーシフト群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提案・特性評価

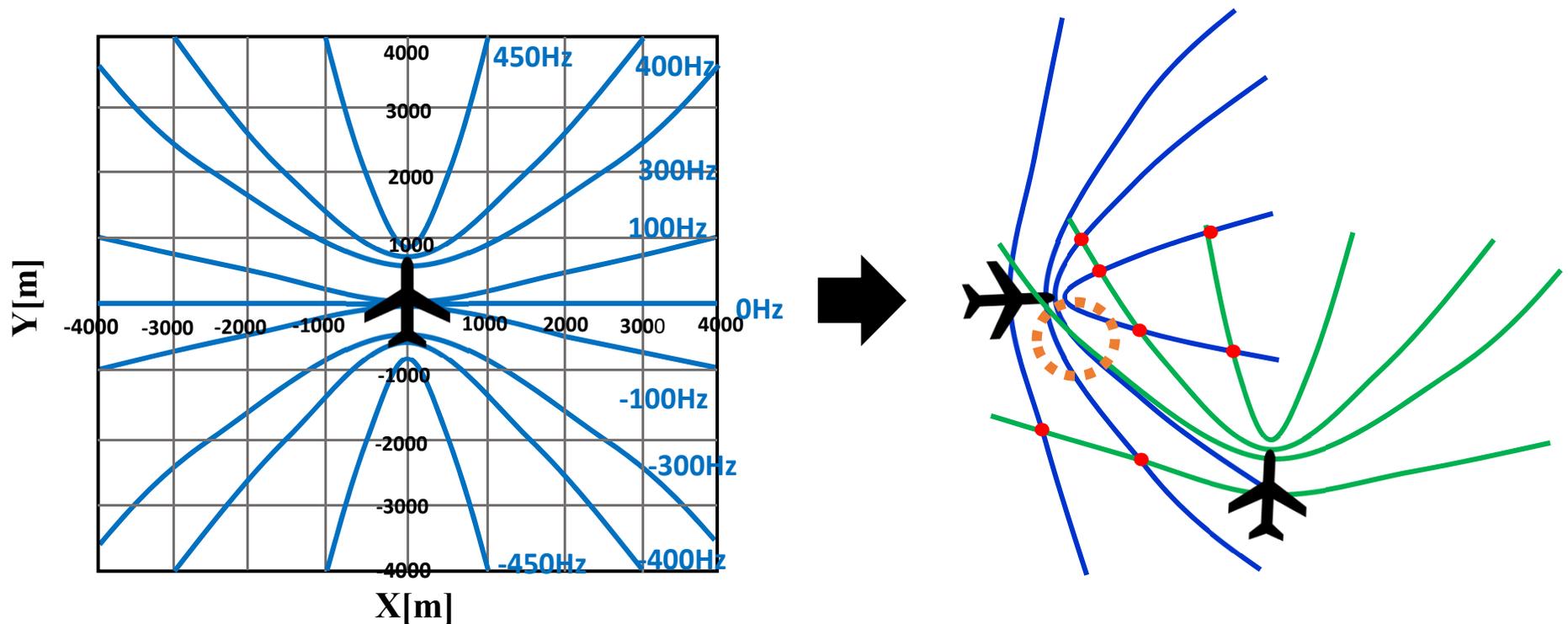
## ➤ 本研究

- 従来システムの位置検出精度の改善を目的
- 2機のUAVを用いて異なる時刻に2回ドップラーシフトを観測し, 最小二乗法を拡張する手法を適用
- 2機のUAVが8の字飛行するシミュレーションモデルを対象

# 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、双曲線上に分布
- 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

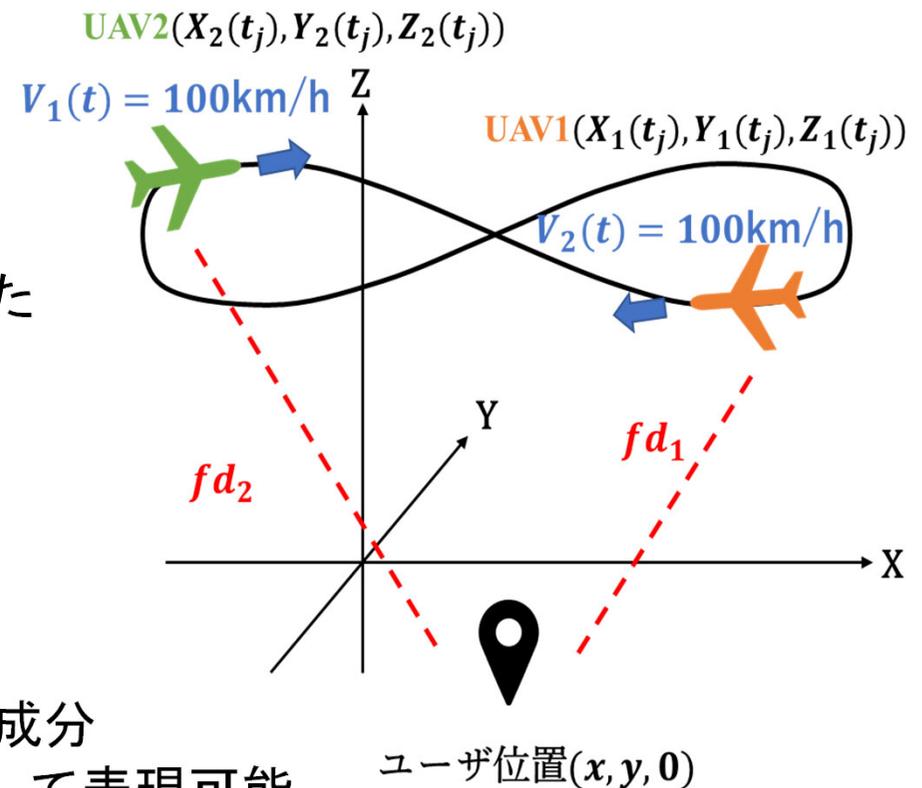
$$fd_i(t_j) = -\frac{V_{xi}(t_j)(X_i(t_j)-x)+V_{yi}(t_j)(Y_i(t_j)-y)}{\lambda\sqrt{(X_i(t_j)-x)^2+(Y_i(t_j)-y)^2+(Z_i)^2}} \quad (1)$$

- 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

$$\Delta fd_i(t_j) = fd_i(t_j) - fd_i^0(t_j) \quad (2)$$

- 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

$$\Delta fd_i(t_j) = \frac{\partial fd_i(t_j)}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial fd_i(t_j)}{\partial y} \Delta y \quad (3)$$



# 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

$$G = \begin{bmatrix} \frac{\partial f d_1(t_1)}{\partial x} & \frac{\partial f d_1(t_1)}{\partial y} \\ \frac{\partial f d_2(t_1)}{\partial x} & \frac{\partial f d_2(t_1)}{\partial y} \\ \frac{\partial f d_1(t_2)}{\partial x} & \frac{\partial f d_1(t_2)}{\partial y} \\ \frac{\partial f d_2(t_2)}{\partial x} & \frac{\partial f d_2(t_2)}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (4) \quad U = [\Delta x \quad \Delta y]^T \quad (5)$$

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

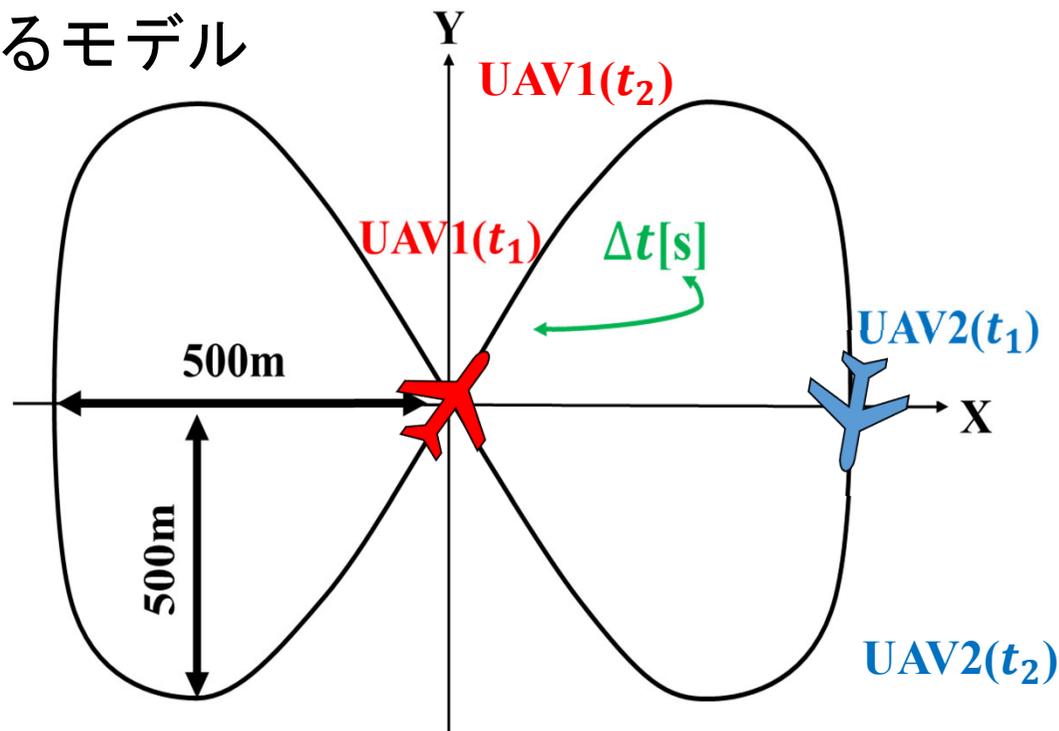
# シミュレーションによる 特性比較

# 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

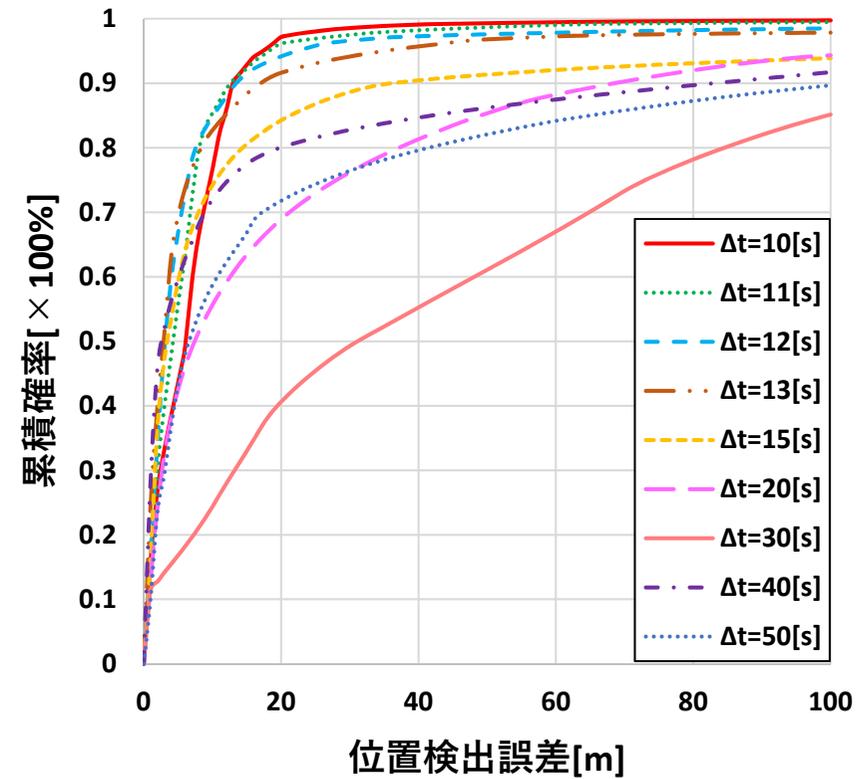
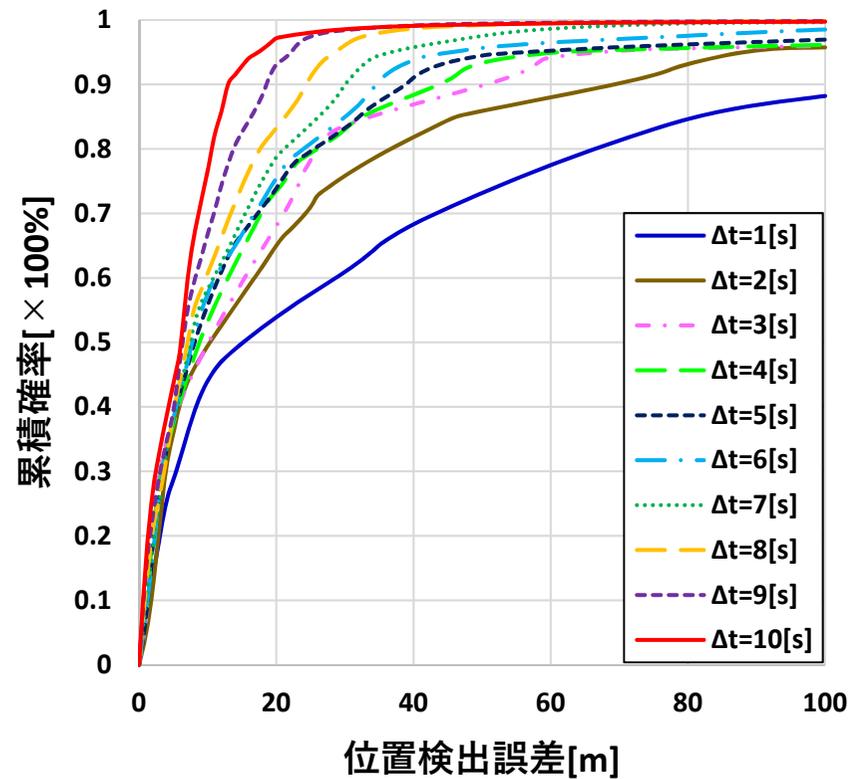
測定条件

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** $\Delta t$ を**1s~15s**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

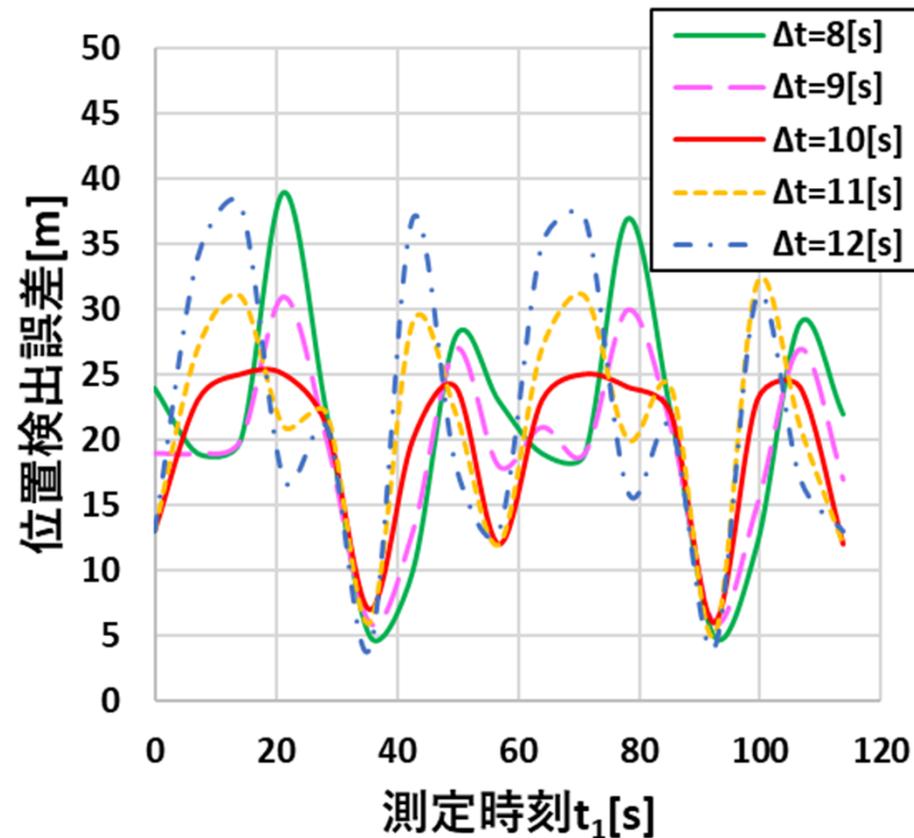
# 位置検出誤差の累積分布特性 (2回測定 $t_1 = 0s$ の場合)



- $\Delta t = 8s \sim 12s$ のとき位置検出誤差が25m未満と良好
- $\Delta t = 15s$ 以降 徐々に精度が劣化し  $\Delta t = 30s$ で最悪値
- ➔ 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 時間変化特性

(累積確率90%値 :  $\Delta t = 8s \sim 12s$ の場合)



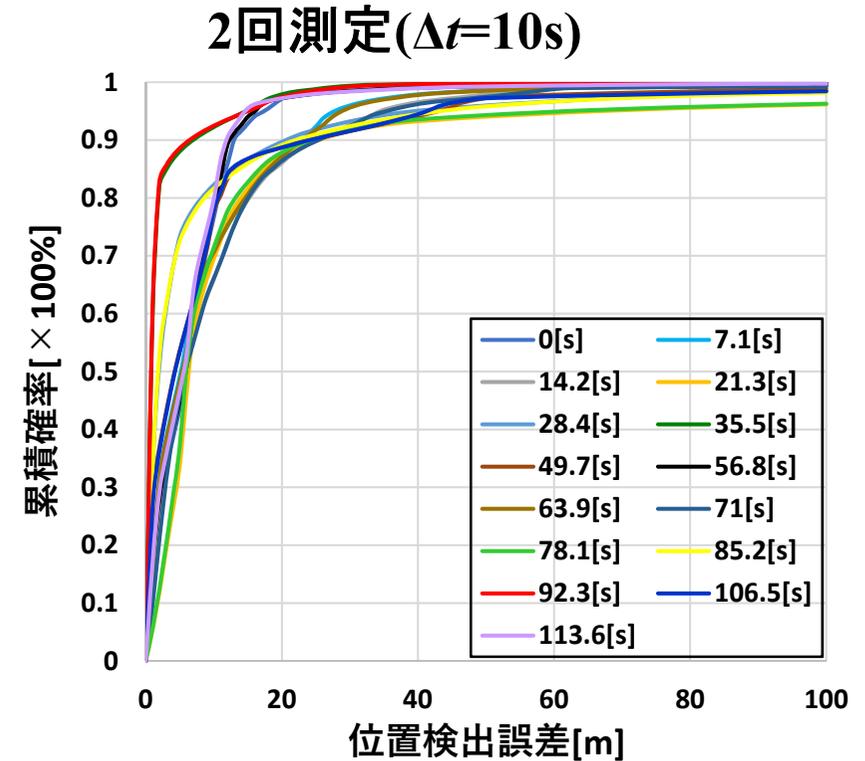
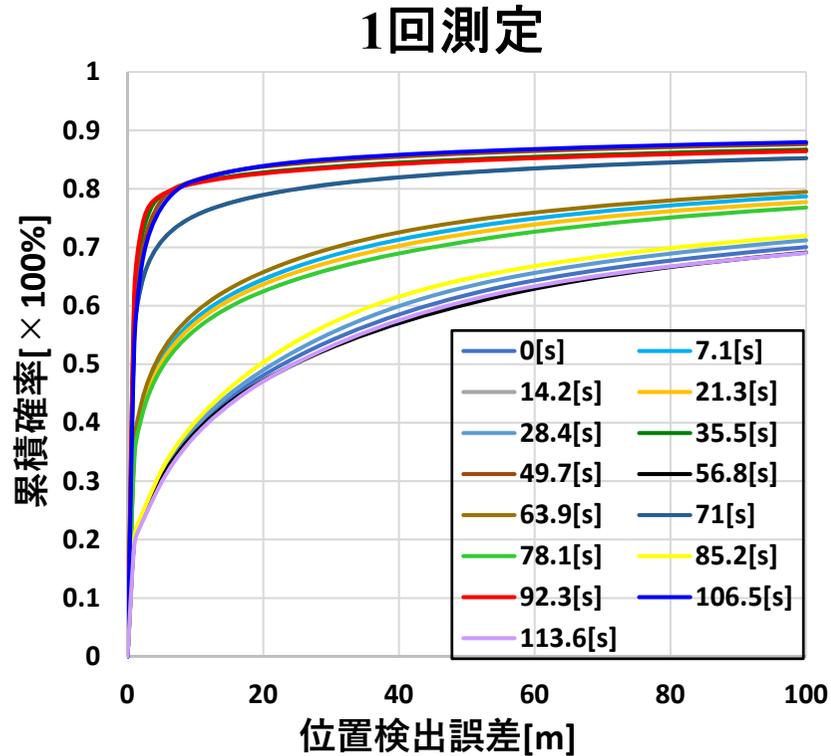
- $\Delta t = 8s, 12s$ の場合, 測定時刻に応じて位置検出誤差が顕著に劣化

## 累積確率90%値の最大値・最小値・平均値

$\Delta t$ (s)	8	9	10	11	12
最大値(m)	39	31	25	32	38
最小値(m)	5	6	6	5	4
平均値(m)	20.9	19.4	19.4	20.9	21.7

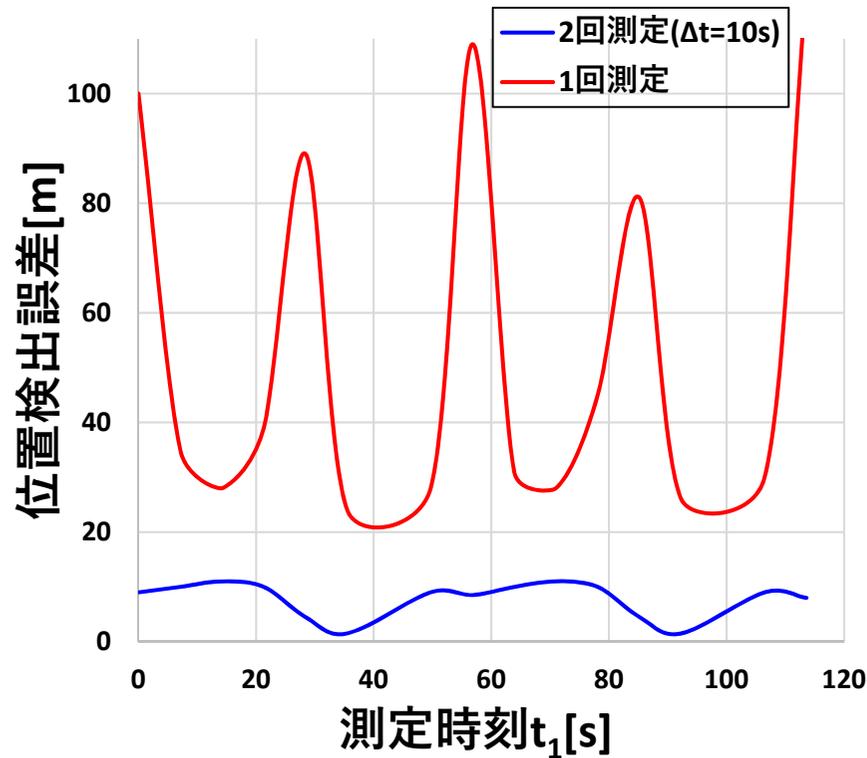
- 位置検出誤差の平均値は $\Delta t = 9s, 10s$ のとき**最小**
- 最大値は $\Delta t = 10s$ のとき**最小**
- ドップラーシフトの**測定時間間隔**は $\Delta t = 10s$ 付近で**最良**

# 1回測定と2回測定の特性比較



- 1回測定の場合，累積確率90%時は位置検出誤差100m以上
- 2回測定ではすべての時刻で誤差25m未満と改善

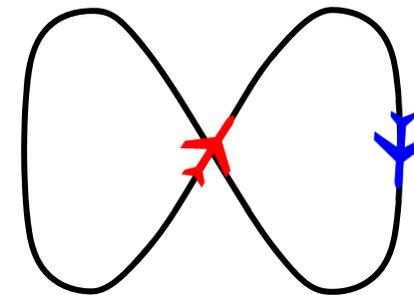
# 位置検出誤差 時間変化特性 (累積確率70%値)



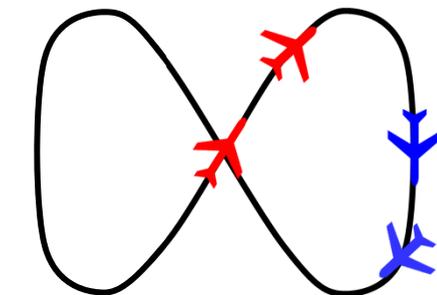
1回測定において精度の劣化する時刻



2回測定時に精度が良好となる



1回測定



2回測定 ( $\Delta t=10s$ )

測定時間間隔  $\Delta t=10s$

- UAVの配置関係が改善
- ドップラーシフトの双曲面の数が2倍  
 ➡ 交点として解が得られやすく測位精度が良好

# 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1回から2回に増加
- 2機のUAVが8の字飛行するモデル
- 測定時間間隔 $\Delta t$ を変化させ、特性比較を実施
- 2機のUAVの初期位置を1/4周分ずらした場合、測定時間間隔 $\Delta t$ は8s~12sで測位精度が良好  
⇒平均的には $\Delta t = 10s$ が最良
- 位置検出誤差は平均で20m未満を達成

## 今後の課題

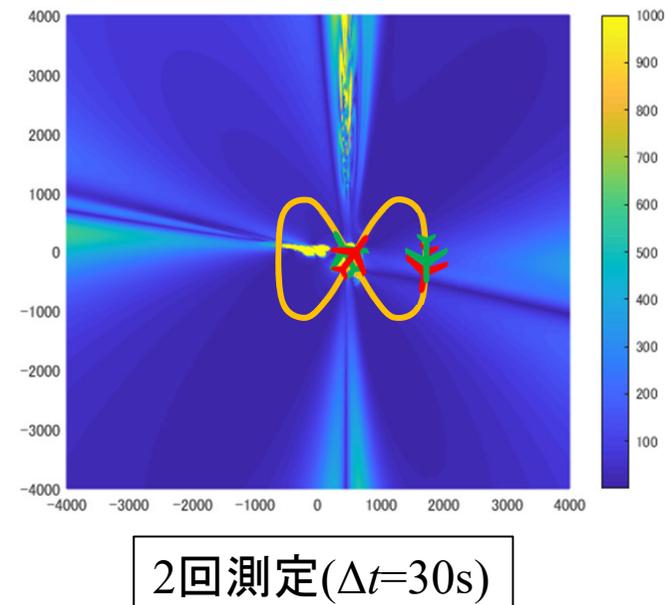
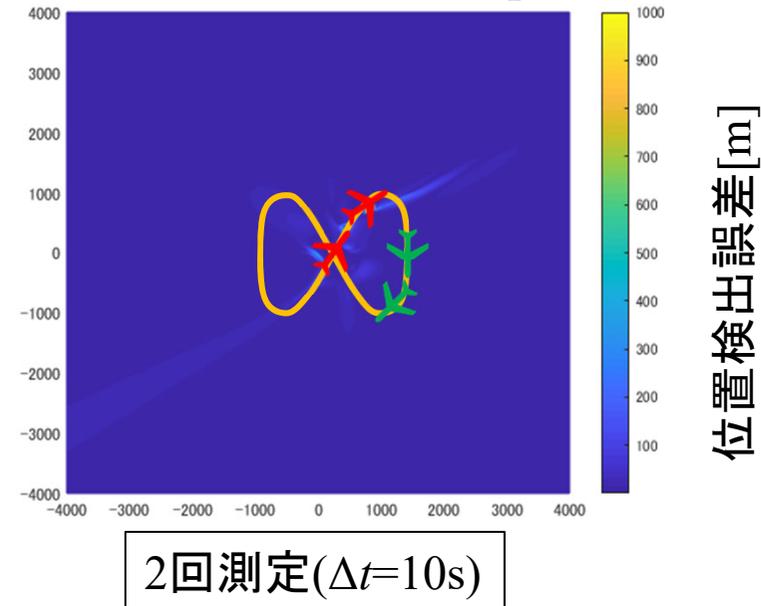
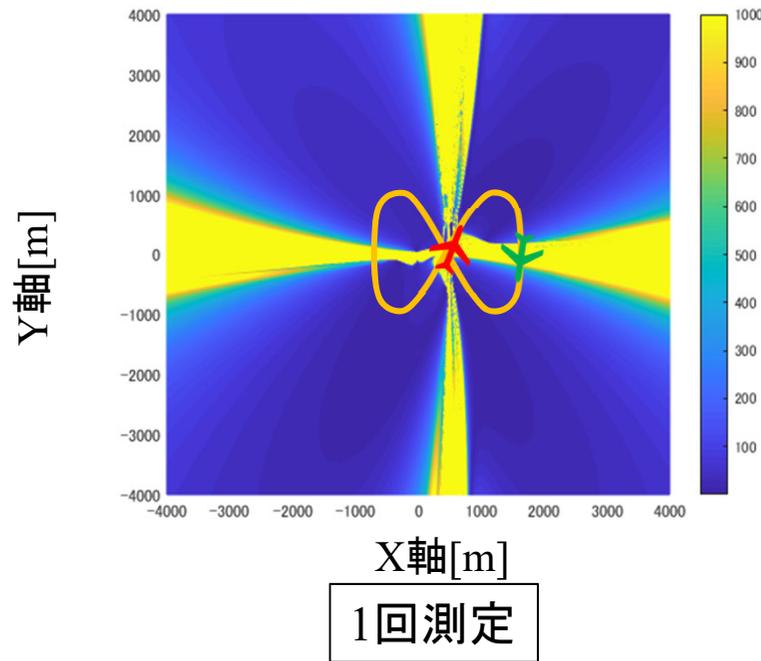
- $N$ 機のUAVを用いてドップラーシフトの測定回数を3回以上に拡張した場合の測位精度改善効果の検討
- 各UAVの初期配置, 回転半径などのパラメータを変化させた際に, 本研究において精度が劣化した時刻との比較・特性評価
- 適切な飛行モデル・飛行条件や最良となるドップラーシフトの測定時間間隔の検討

# 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。

# ドップラーシフトの面的分布特性( $t_1=0\text{s}$ )



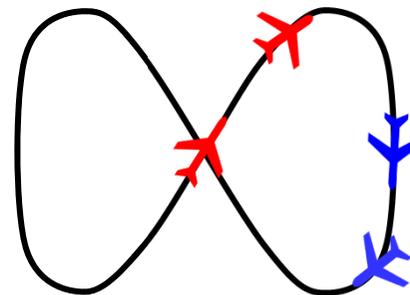
- 青色のエリア測位精度良好
- 初期位置1/4周分=28.4s

# 測定時間間隔 $\Delta t$ と測定時刻 $t_1$ の関係 (累積確率90%値で比較)

測定時間 間隔 $\Delta t$ [s]	位置検出誤差[m]									
	測定時刻 $t_1$ [s]									
	0	7.1	14.2	21.3	28.4	35.5	42.6	49.7	56.8	
1	179	45	36	139	426	251	5	197	170	
2	69	43	33	99	109	59	4	123	67	
3	51	40	26	81	45	26	4	73	50	
4	44	33	22	70	28	12	4	46	43	
5	39	26	24	61	22	7	5	35	39	
6	35	22	26	54	22	5	6	31	34	
7	30	21	23	46	22	4	8	30	29	
8	24	19	20	39	22	5	10	28	23	
9	19	19	20	31	20	6	13	27	18	
10	13	23	25	25	21	7	20	24	12	
11	13	27	31	21	22	6	29	21	12	
12	13	34	38	17	20	4	37	18	13	
13	17	50	36	14	21	4	34	14	18	
15	36	125	68	9	30	6	56	10	39	
20	69	134	12	4	36	32	6	5	78	
30	196	97	66	154	78	129	10	521	201	
40	83	35	77	24	27	15	216	42	92	
50	103	149	19	16	52	102	12	12	119	

- $\Delta t = 3s, 10s, 20s$ 付近で精度が良好  
(3s, 20s付近は極端に精度が劣化する時刻が存在)

$\Delta t = 10s$ における  
位置関係の例



$\Delta t = 3s, 20s$ における  
位置関係の例

