

令和6年3月13日

ワイドバンドシステム研究会

# 無人航空機を用いた測位システムにおける ドップラーシフト多重観測適用時の 移動ユーザ位置推定精度

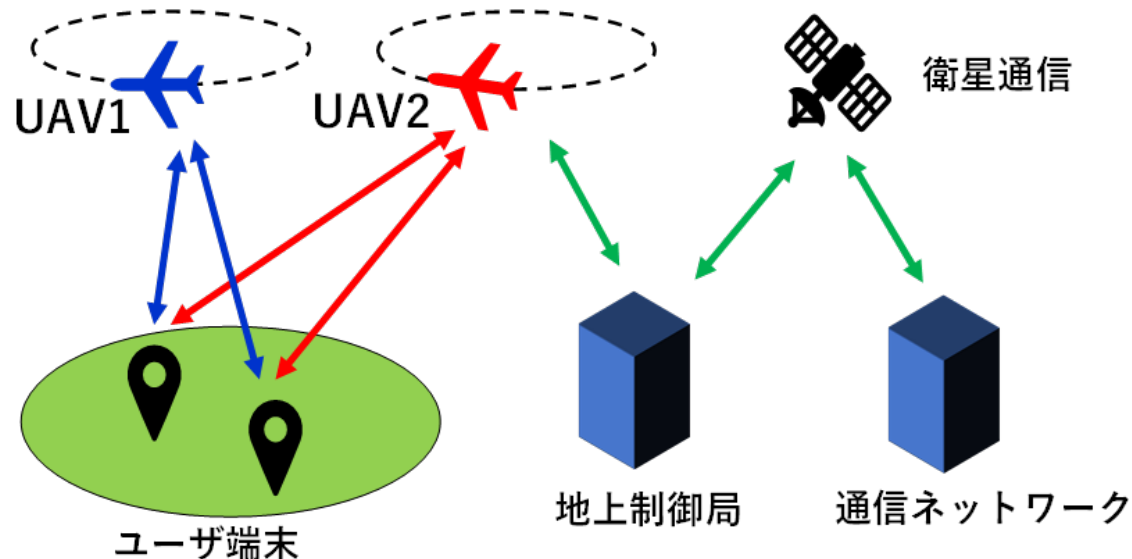
---

日本大学

伊藤 秀晃 ○石川 博康

# 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，ユーザ端末－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



無人航空機システム (UAS) モデルの一例

# 研究目的

## ➤ 従来研究

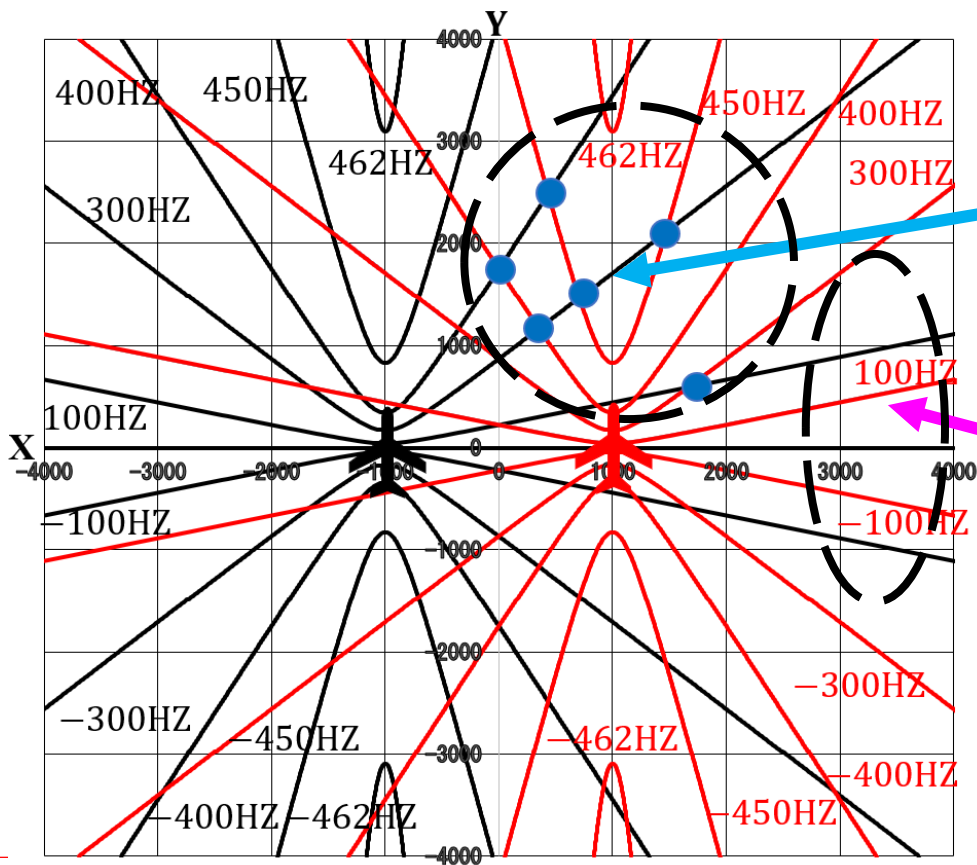
- ユーザが静止した状態を前提とし、様々な飛行モデルやUAVの機数をパラメータとして観測されるドップラーシフトを用いて最小二乗法に基づきユーザ位置検出を行う手法の特性評価を実施
- ⇒ ユーザが移動する場合は位置検出精度が劣化することが課題
- 基礎検討として、ユーザが特定方向に等速移動するモデルを対象とし、最小二乗法により移動後のユーザ位置を推定する手法を提案
- ドップラーシフトの観測回数を3回に拡張した場合の測位精度改善効果を評価（2023年12月WBS研究会において報告）

## ➤ 本研究

- ドップラーシフトの観測回数を更に増やし、最大6回まで拡張した場合の測位精度改善効果を評価・比較

# ドップラーシフト分布

- ドップラーシフトはUAVの飛行方向に対して**双曲線状に分布**
- ユーザ位置は**双曲線上のいずれかの地点**
- 2機のUAVで観測した場合、ユーザの位置は**双曲線の交点**として**位置検出が可能**



双曲線の交差

→ 交点でユーザ位置検出

双曲線が平行状態

→ ユーザ位置検出が困難

# 最小二乗法による移動ユーザ位置推定手法

- 地上端末-UAV間に生じる  
ドップラーシフト

$$fd_i(t_j) = \frac{R_i(t_j)/|R_i(t_j)| \cdot V_i(t_j)}{\lambda}$$

$$R_i(t_j) = (X_i(t_j) - x(t_j), Y_i(t_j) - y(t_j), Z_i(t_j) - z(t_j))$$

$V_i(t_j)$ :  $i$ 番目のUAVの時刻 $t_j$ における速度ベクトル

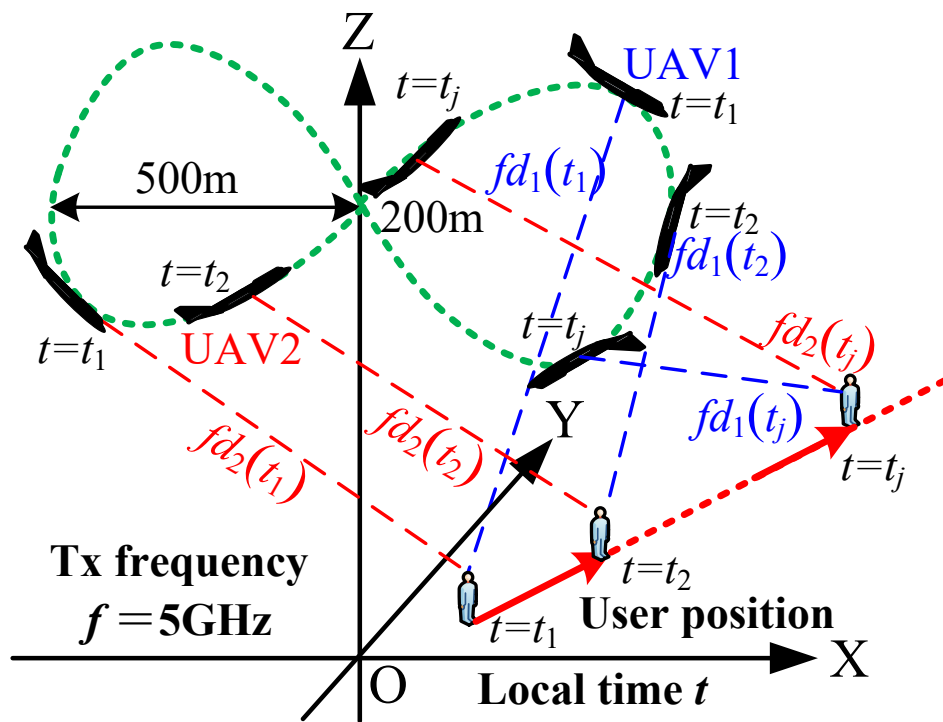
- ユーザが地上(XY平面上)を一定方向  
に**等速移動**することを改定
- ドップラーシフトの観測時間間隔:  $\Delta t$ [s]

$$(x_2, y_2) = (x_1 + dm_x, y_1 + dm_y)$$

⋮

$$(x_j, y_j) = (x_1 + (j-1)dm_x, y_1 + (j-1)dm_y)$$

- 時刻 $t_1$ におけるユーザ初期位置  
 $(x_1, y_1)$ と移動距離 $(dm_x, dm_y)$ を**最小2乗法**で**同時推定**することにより, 時刻 $t_j$ におけるユーザ位置 $(x_j, y_j)$ を推定



移動ユーザの位置推定モデル

# 最小二乗法を用いた位置検出

- 地上端末-UAV間のドップラーシフト量 (真値)

$$fd_i(t_1) = - \frac{V_{xi}(t_1)(X_i(t_1) - x) + V_{yi}(t_1)(Y_i(t_1) - y)}{\lambda \sqrt{(X_i(t_1) - x)^2 + (Y_i(t_1) - y)^2 + Z_i^2(t_1)}}$$

※ここでは便宜上  
ユーザ初期位置  
を $(x, y, z)$ で表記

⋮

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

$(j = 2, \dots, N)$

- 時刻 $t_1$ のユーザ位置と観測時間間隔 $\Delta t[s]$ 当りの移動距離の初期値 $(x^0, y^0, dm_x^0, dm_y^0)$ を想定した場合の時刻 $t_j$ におけるドップラーシフト量の推定式

$$fd_i^0(t_j) = - \frac{V_{xi}(t_j)\{X_i(t_j) - x^0 - (j-1)dm_x^0\} + V_{yi}(t_j)\{Y_i(t_j) - y^0 - (j-1)dm_y^0\}}{\lambda \sqrt{\{X_i(t_j) - x^0 - (j-1)dm_x^0\}^2 + \{Y_i(t_j) - y^0 - (j-1)dm_y^0\}^2 + Z_i^2(t_j)}}$$

# 最小二乗法を用いた位置検出

- 未知のユーザ位置  $(x, y, dm_x, dm_y)$  の初期値を  $(x^0, y^0, dm_x^0, dm_y^0)$  とした場合に導いたドップラーシフト量との測定残差成分

$$\Delta f d_i(t_j) = f d_i(t_j) - f d_i^0(t_j)$$

- 初期値  $(x^0, y^0, dm_x^0, dm_y^0)$  の変化量を  $(\Delta x, \Delta y, \Delta dm_x, \Delta dm_y)$  と仮定すると各UAVに対して次の偏微分方程式が成り立つ

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

$(dm_x, dm_y)$  : ユーザの観測時間間隔当りの移動量  $(j = 1, \dots, N)$

$(x, y, z)$  : ユーザの初期位置 (時刻  $t_1$ )

$\lambda = \frac{c}{f}$  : 搬送波周波数の波長

$(V_{xi}(t_j), V_{yi}(t_j), V_{zi}(t_j))$  : 時刻  $t_j$  におけるUAVの速度ベクトル

$(X_i(t_j), Y_i(t_j), Z_i(t_j))$  : 時刻  $t_j$  におけるUAVの飛行位置

# ドップラーシフト多重観測における最小二乗法

$$G = \begin{bmatrix} \frac{\partial f d_1(t_1)}{\partial x} & \frac{\partial f d_1(t_1)}{\partial y} & \frac{\partial f d_1(t_1)}{\partial d m_x} & \frac{\partial f d_1(t_1)}{\partial d m_y} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f d_i(t_1)}{\partial x} & \frac{\partial f d_i(t_1)}{\partial y} & \frac{\partial f d_i(t_1)}{\partial d m_x} & \frac{\partial f d_i(t_1)}{\partial d m_y} \\ \frac{\partial f d_1(t_2)}{\partial x} & \frac{\partial f d_1(t_2)}{\partial y} & \frac{\partial f d_1(t_2)}{\partial d m_x} & \frac{\partial f d_1(t_2)}{\partial d m_y} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f d_i(t_2)}{\partial x} & \frac{\partial f d_i(t_2)}{\partial y} & \frac{\partial f d_i(t_2)}{\partial d m_x} & \frac{\partial f d_i(t_2)}{\partial d m_y} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f d_1(t_N)}{\partial x} & \frac{\partial f d_1(t_N)}{\partial y} & \frac{\partial f d_1(t_N)}{\partial d m_x} & \frac{\partial f d_1(t_N)}{\partial d m_y} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f d_i(t_N)}{\partial x} & \frac{\partial f d_i(t_N)}{\partial y} & \frac{\partial f d_i(t_N)}{\partial d m_x} & \frac{\partial f d_i(t_N)}{\partial d m_y} \end{bmatrix}$$

- 連立方程式を解くためドップラーシフトに関する偏微分方程式を行列  $G$  で表し, 変化量  $(\Delta x, \Delta y, \Delta d m_x, \Delta d m_y)$  を転置行列  $U$  とする
- 任意の測定回数で扱うことから, 測定回数  $N$  回目の時刻  $t_N$  までの偏微分方程式に応じて拡張した行列

$$U = [\Delta x \ \Delta y \ \Delta d m_x \ \Delta d m_y]^T$$

2回観測

$$[\Delta f d_i(t_N)]^T = F^T = GU$$

- $U = (G^T G)^{-1} G^T F^T$  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推定可能

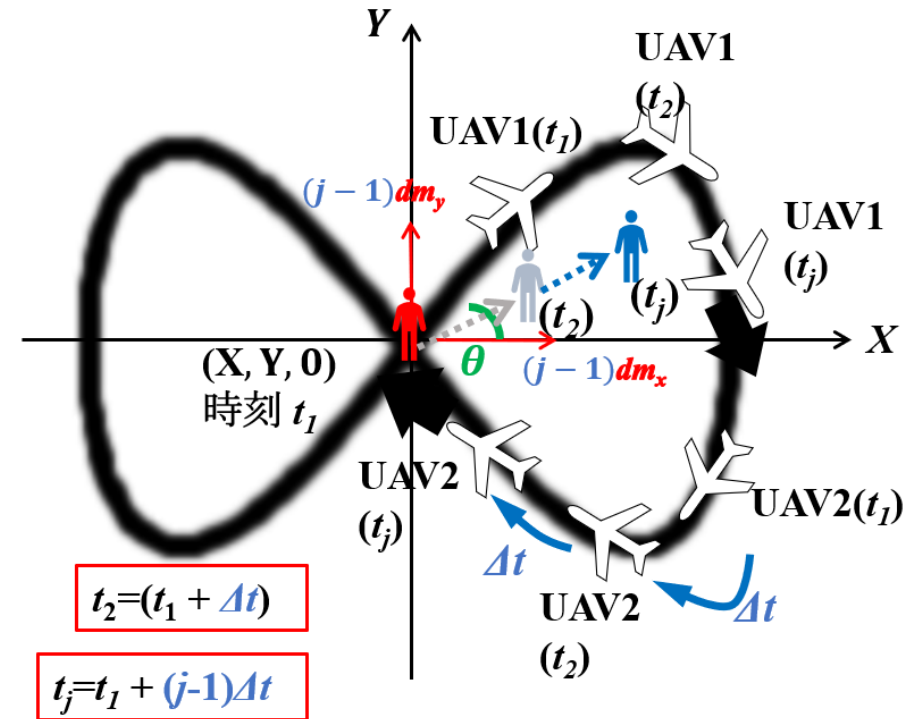
$N$ 回観測



# シミュレーション条件

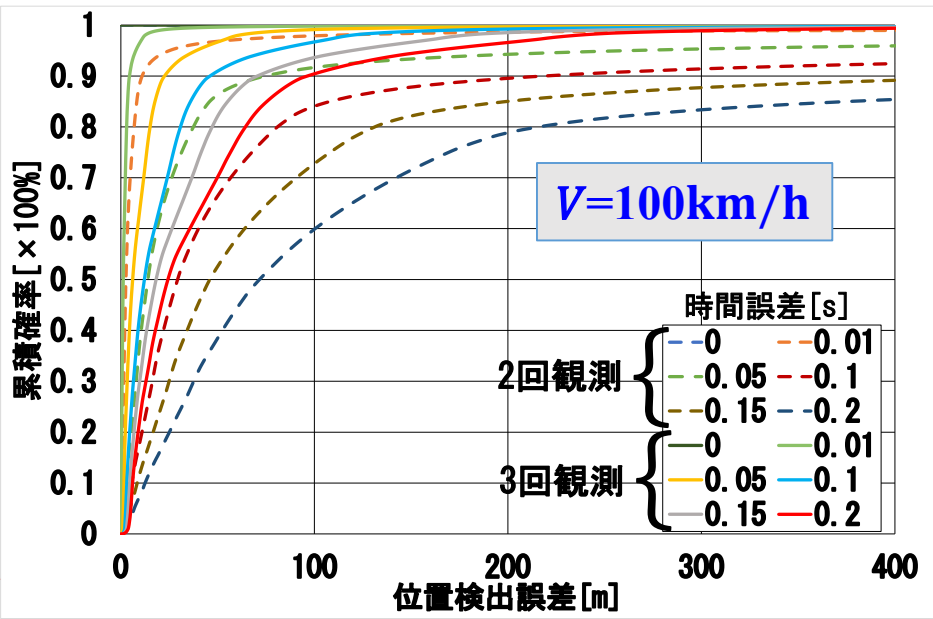
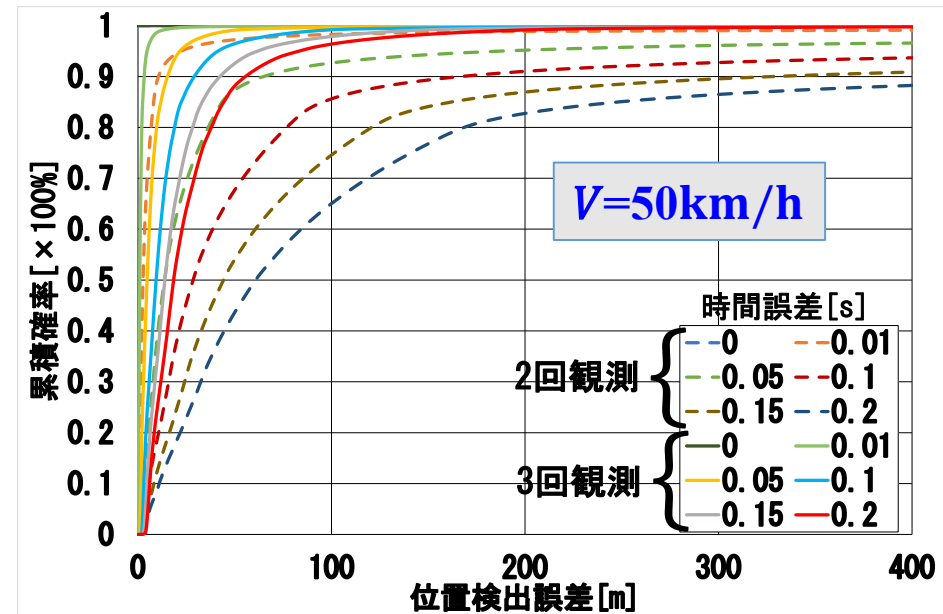
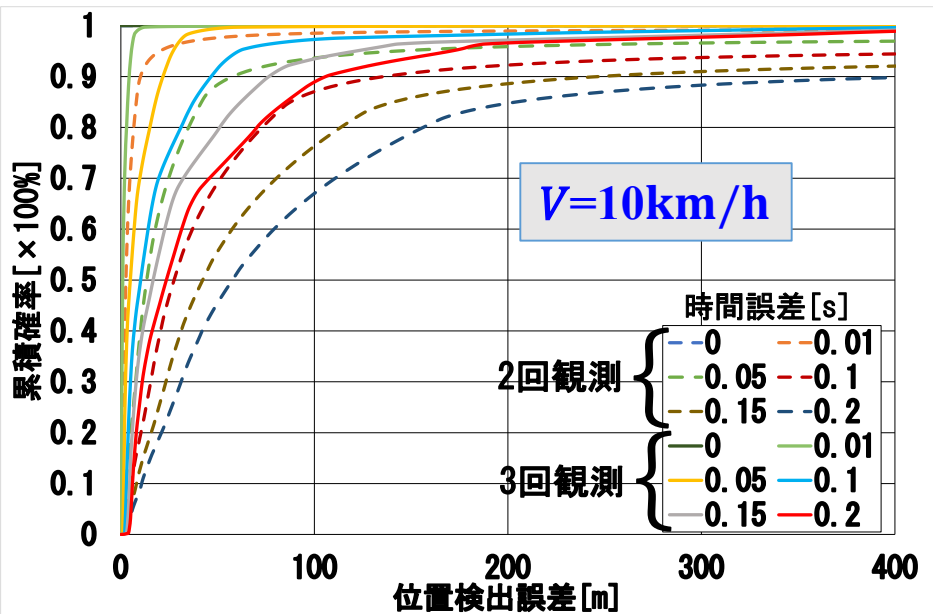
- 搬送波周波数 :  $f_c = 5\text{GHz}$
- UAV高度 :  $h = 200\text{m}$
- 回転半径 :  $r = 500\text{m}$
- **時間誤差** :  $t_{error} = 0 \sim 0.2\text{s}$
- ユーザ移動速度 :  
 $V = 10, 50, 100 \text{ km/h}$
- ユーザ移動方向 :  $\theta = 45^\circ$  固定
- 評価対象エリア : 8km四方
- 評価地点 : 10m間隔のメッシュ状の交点 (約64万地点)
- $t = 0\text{s} \sim 113.6\text{s}$ を16分割し,  
 $7.1\text{s}$ 毎に評価
- ドップラーシフト観測時間間隔 :  $\Delta t = 10\text{s}$

## 2機のUAVが8の字飛行するモデル



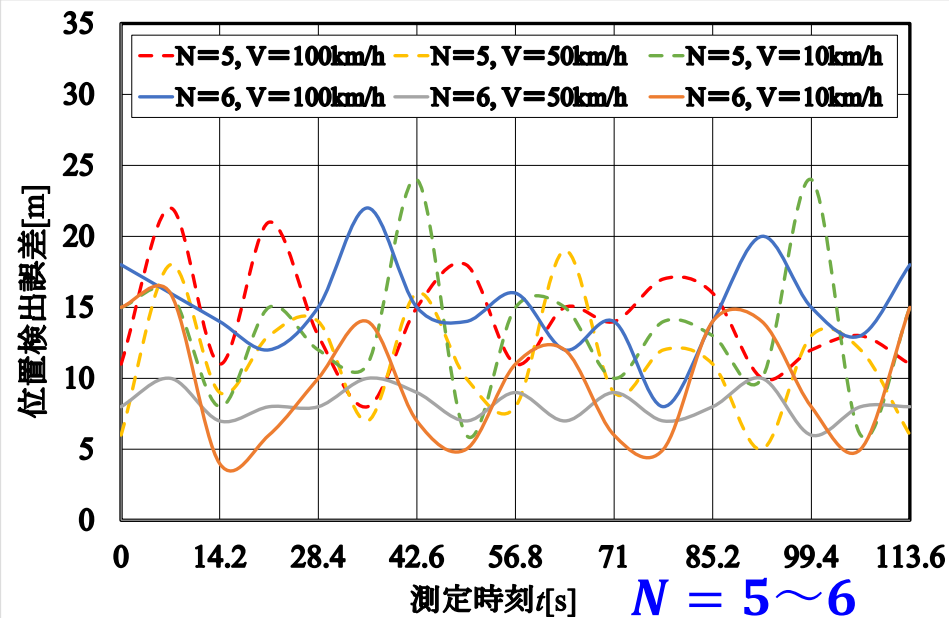
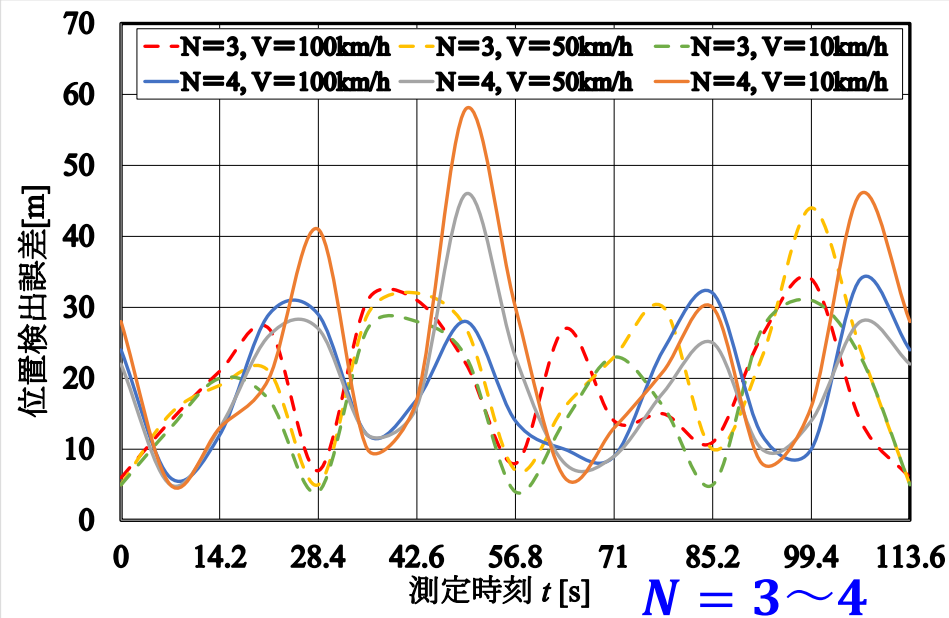
XY平面上空から俯瞰して見た場合のユーザー端末とUAVの位置関係 (UAV1は原点上、UAV2は1/4周分進んだ位置から飛行開始)

# ユーザ位置検出誤差の累積分布特性



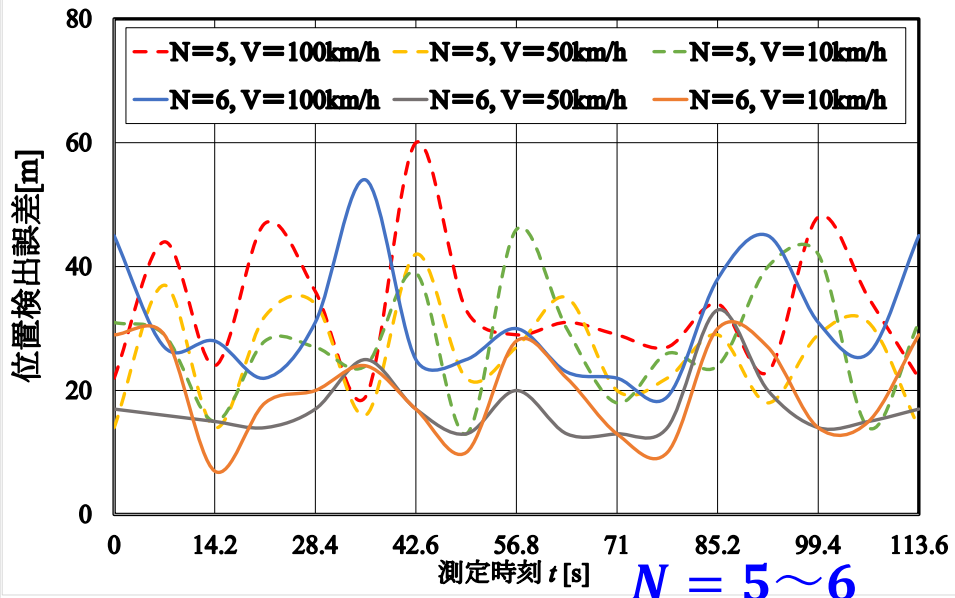
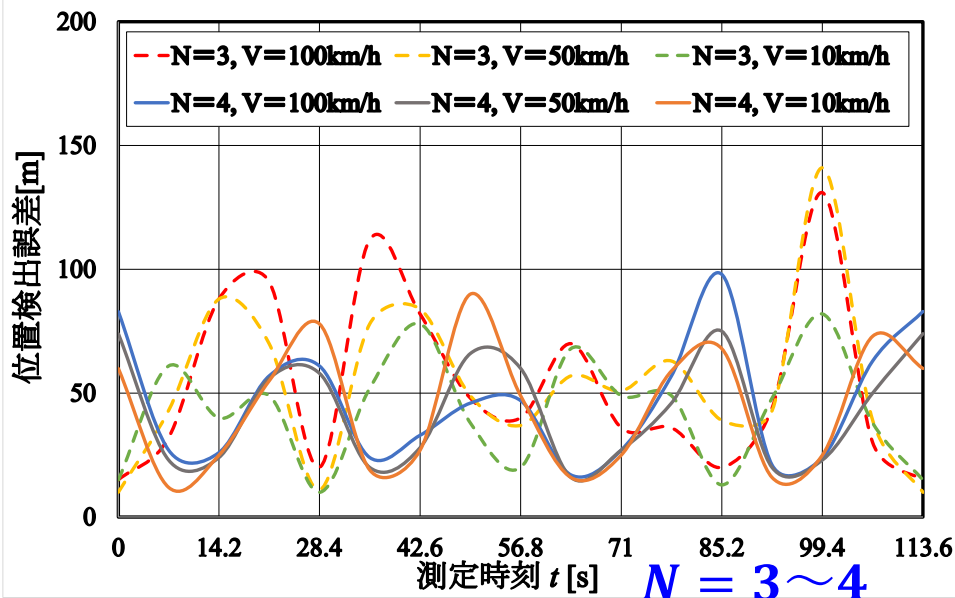
- 観測回数を2回から3回に増やすことにより、**位置検出誤差が減少**
- ユーザ移動速度と位置検出誤差特性に**相関は見られず**
- 時間誤差の影響については**ほぼ比例関係**
- ユーザ位置とUAVの配置関係に基づく測位精度の変化が影響**

# 位置検出誤差50%値の時間変化特性( $t_{error} = 0.05s$ )



- UAVの8の字飛行に伴う観測開始時刻に応じた周期的な特性が発生
- $N = 3$ の場合：移動速度によらず全時刻で位置検出誤差はほぼ30m以内
- $N = 4$ の場合： $t = 50$ s付近で60m程度まで劣化し、 $N = 3$ より悪い結果  
⇒ UAVの配置が特異的に悪くなり、双曲線の重なりが平行関係となるユーザ位置がエリアとして生じたものと考えられる
- $V = 10, 50$ km/hの場合： $N = 5$ で位置検出誤差が約10~20mの範囲、 $N = 6$ の場合は約5~15mの範囲で推移

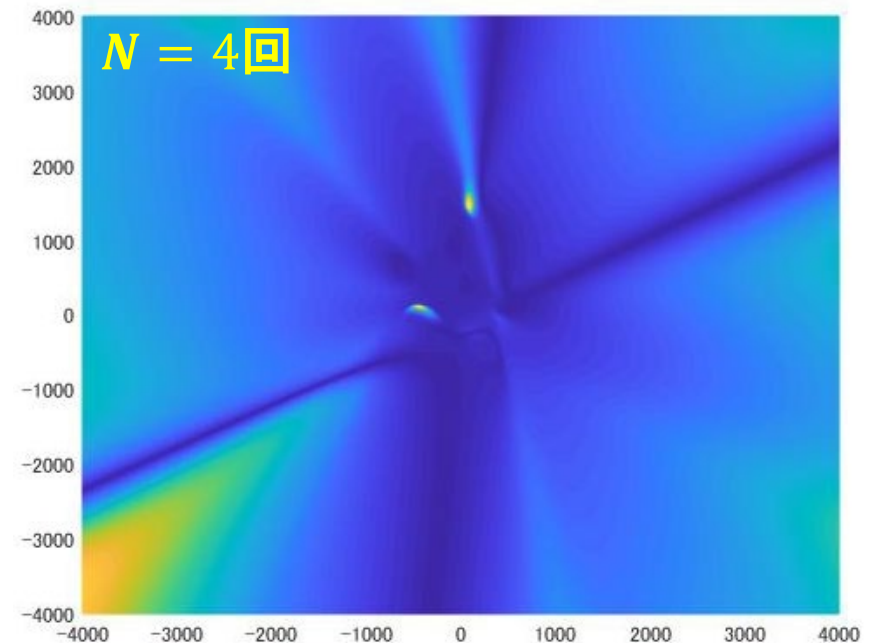
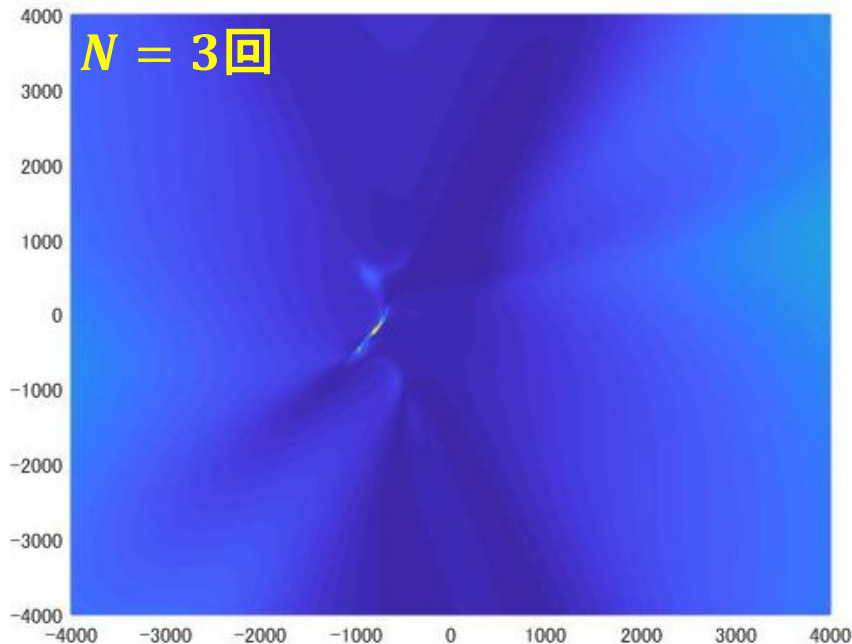
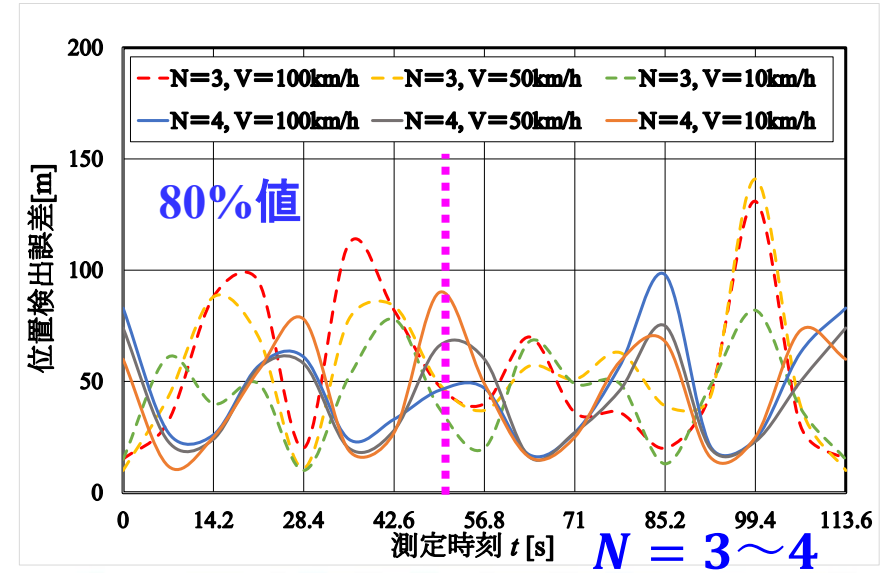
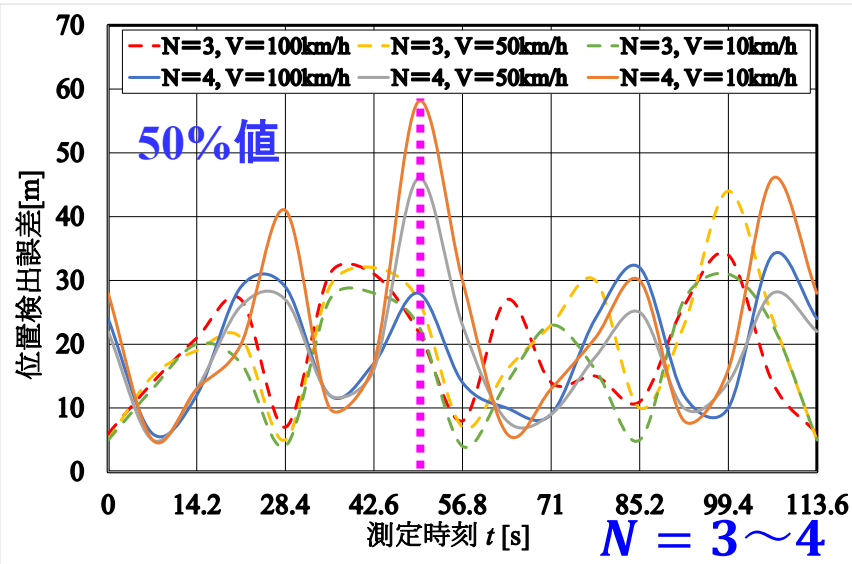
# 位置検出誤差80%値の時間変化特性( $t_{error} = 0.05s$ )



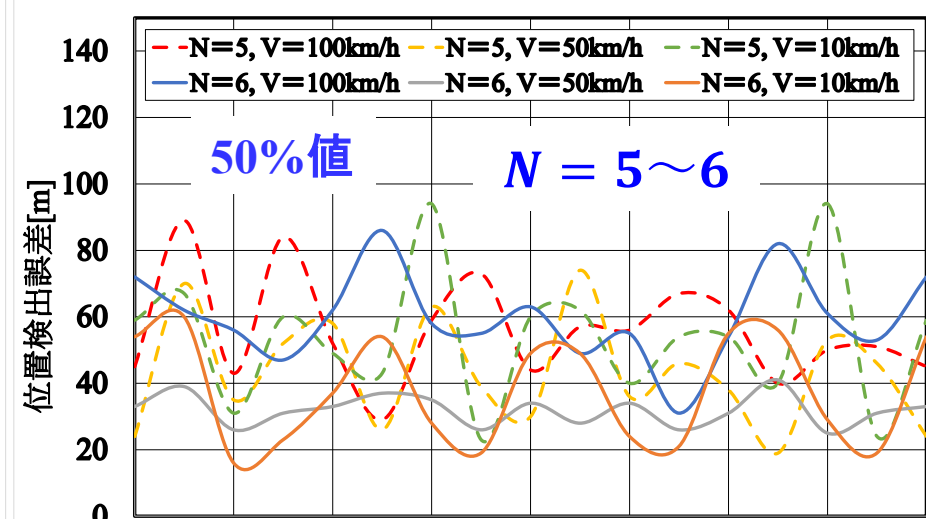
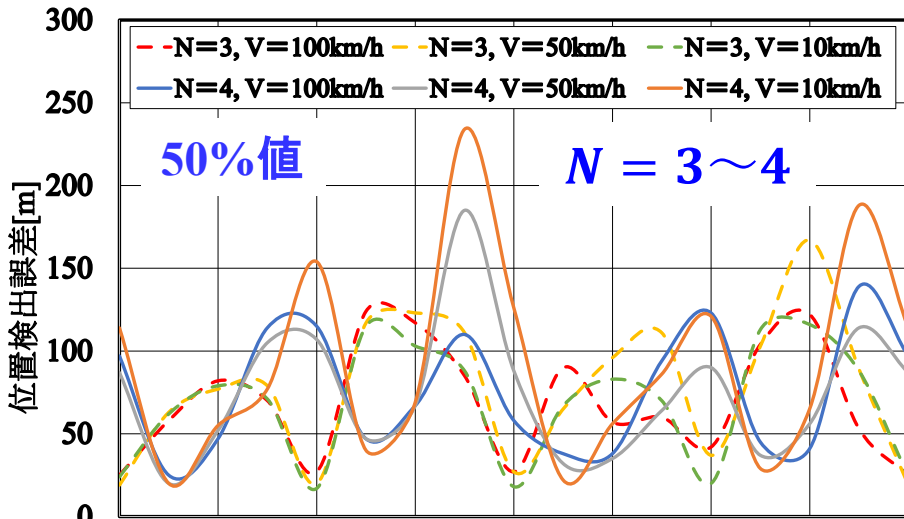
- UAVの8の字飛行に伴う測定開始時刻に応じた周期的な特性が発生
- $N = 4$ の場合：50%値で見られた顕著な劣化は見られず
- $V = 10, 50$  km/hの場合： $N = 3 \sim 6$ の順で位置検出誤差は約10~140m, 約10~90m, 約15~45m, 約8~30mの範囲内に収まり、ドップラーシフトの観測回数を増やすことで測位精度が向上することを確認

# 位置検出誤差の3-4回測定の間時間変化特性

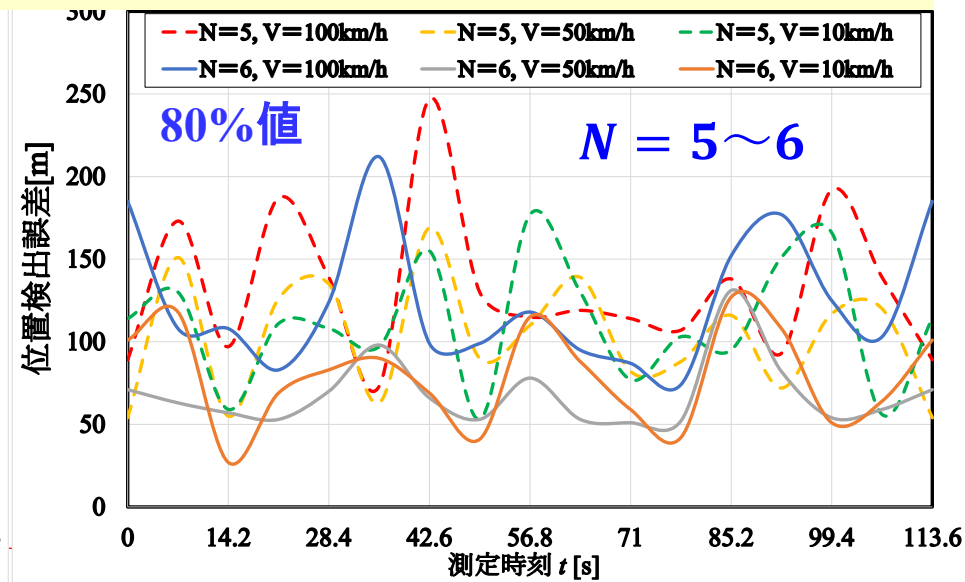
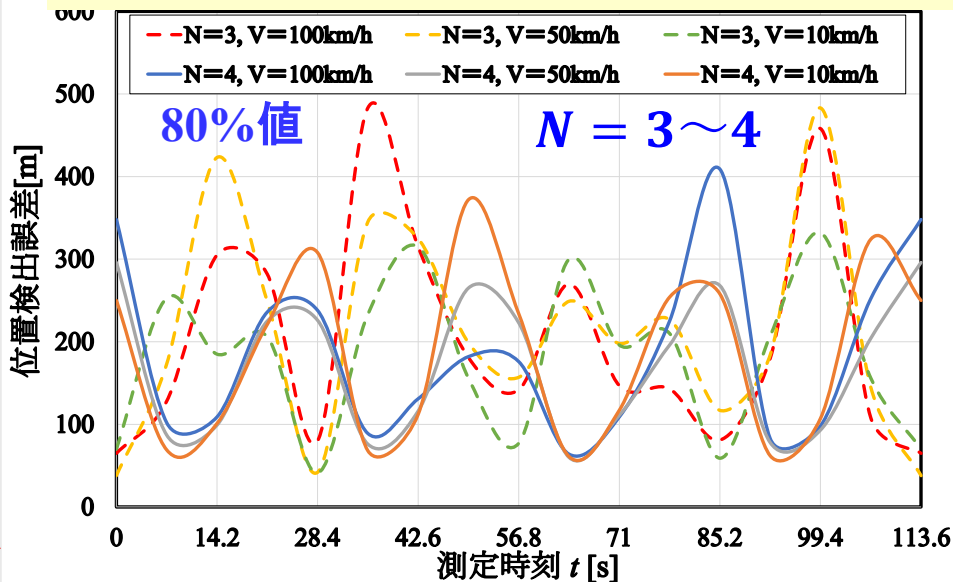
( $t = 49.7s$ ,  $V = 10km/h$ ,  $t_{error} = 0.05s$ )



# 位置検出誤差の時間変化特性( $t_{error} = 0.2s$ )



- $t_{error} = 0.05s$  のケースとほぼ類似した時間変化特性を示すが、UAVの配置の影響により、一部異なる特性を示すケースも存在

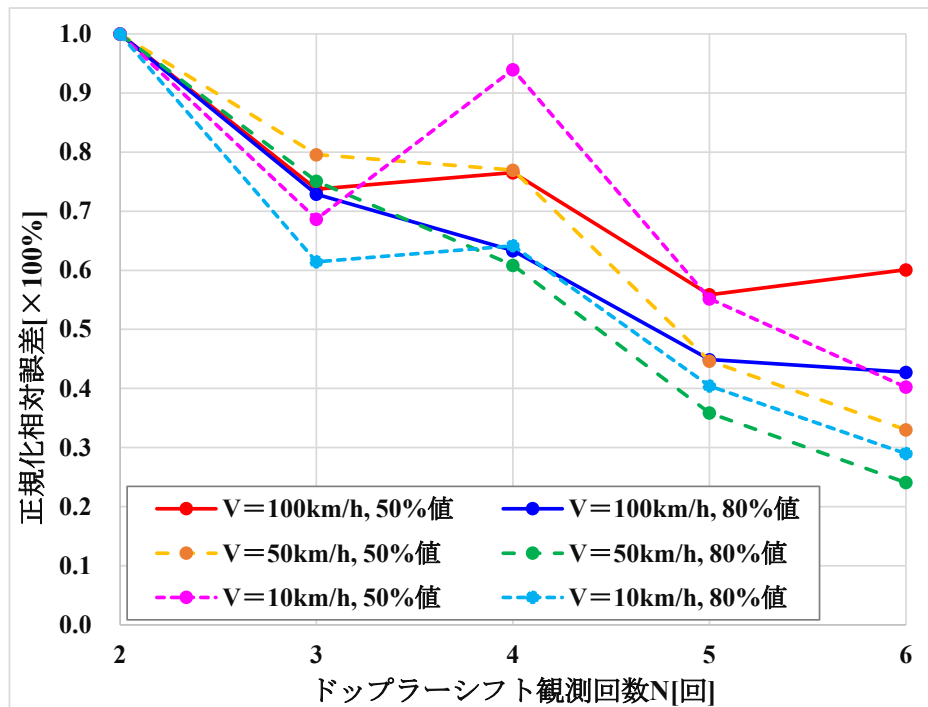


# 平均位置検出誤差特性

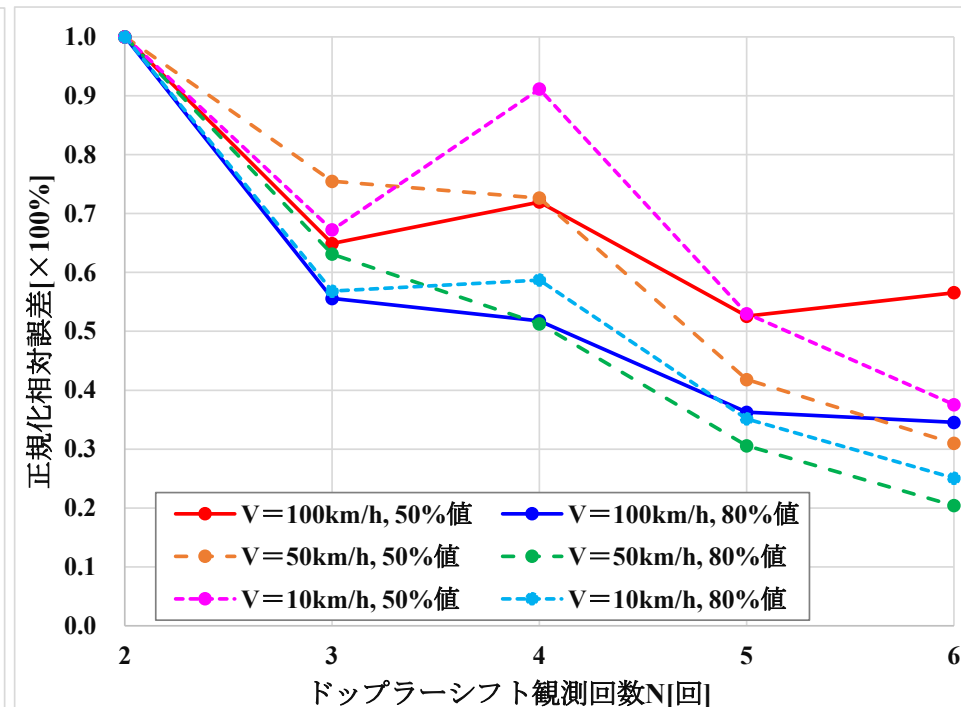
時間 誤差	$t_{\text{error}} = 0.05\text{s}$						$t_{\text{error}} = 0.2\text{s}$					
	100km/h		50km/h		10km/h		100km/h		50km/h		10km/h	
移動 速度	50% 値[m]	80% 値[m]	50% 値[m]	80% 値[m]	50% 値[m]	80% 値[m]	50% 値[m]	80% 値[m]	50% 値[m]	80% 値[m]	50% 値[m]	80% 値[m]
N [回]												
2	25.1	73.8	24.8	71.5	24.4	69.4	105.9	363.4	103.1	334.8	101.4	317.4
3	18.5	53.8	19.7	53.7	16.8	42.6	68.7	201.9	77.8	211.3	68.1	180.4
4	19.2	46.7	19.1	43.5	22.9	44.5	76.2	188.2	74.9	171.7	92.4	186.4
5	14.0	33.1	11.1	25.6	13.5	28.1	55.6	131.8	43.1	102.4	53.7	111.5
6	15.1	31.5	8.2	17.2	9.8	20.1	59.9	125.5	31.9	68.4	38.1	79.6

- **平均位置検出誤差** :  $t = 0 \sim 113.6\text{s}$ の間(7.1s毎) の位置検出誤差の平均値
- $N = 4$  : **50%値の場合のみ**, 平均誤差が減少せずに**逆転現象が発生**
- 観測回数を $N = 6$ まで順次増やすことにより平均誤差が減少傾向
- $N = 2$  : 移動速度が遅いほど特性が良好となる傾向
- $N \geq 3$  : 結果にばらつきが生じており, 一概に低速移動時の位置検出精度が良いとは言えない⇒**平均化処理を行うサンプル数が少ないことも影響**

# 観測回数と位置検出誤差の正規化相対誤差の関係



$$t_{error} = 0.05s$$



$$t_{error} = 0.2s$$

- $N = 2$ 回の平均位置検出誤差を基準(100%)として、観測回数ごとの相対的な誤差量をグラフ化
- 基本的に観測回数の増加に応じて位置検出精度が一次関数的に減少
- 移動速度によらず50%値より80%値の改善量が10~20%良好となる傾向
- 時間誤差が大きいほど、多重観測による改善量が5~10%程度良好



# まとめ

- 本研究では、ユーザが特定方向に等速移動するモデルを想定し、最小二乗法によるユーザ位置推定手法の特性評価を実施
- ドップラーシフトの観測回数を最大6回まで拡張することにより、位置検出精度を約60～80%改善可能
- ユーザ移動速度との関連性はほとんど見られず
- 50%値より80%値の改善量が10～20%良好  
⇒ UAVの配置が悪いエリアにおいて、ドップラーシフトの多重観測により得られる改善効果がより顕著
- 時間誤差 $t_{\text{error}}$ が大きいほど、多重観測による改善量が増加

## ● 今後の課題

ユーザが任意の方向に任意の速度で移動する場合において、高精度の位置検出を可能とする手法の検討

ご清聴ありがとうございました

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。