

令和6年3月6日
総合大会 衛星通信 [B-3-21]

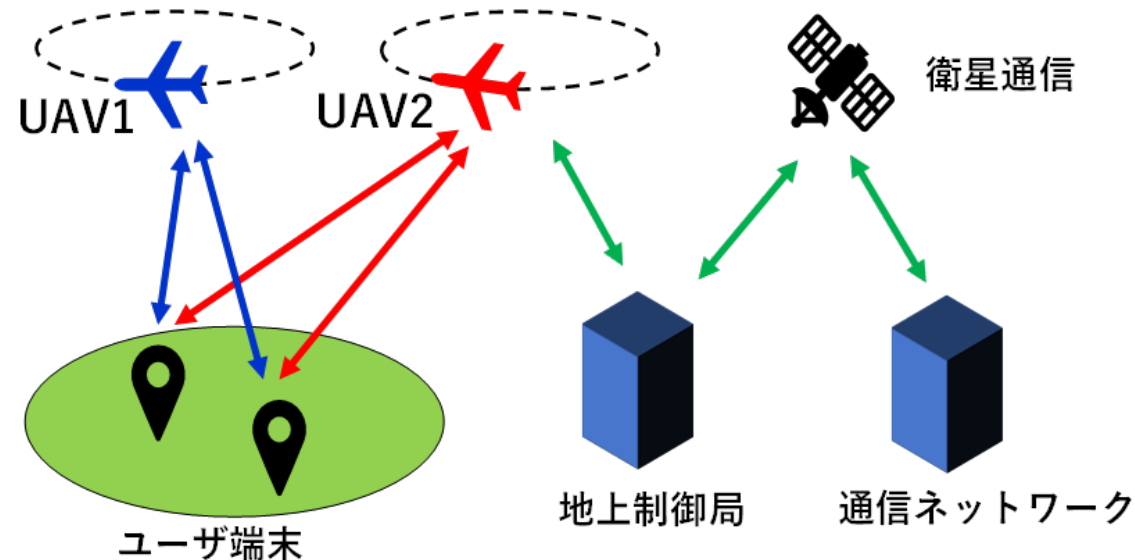
無人航空機を用いた位置検出システムにおける ドップラーシフト複数観測時の移動ユーザ位置推 定精度特性

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

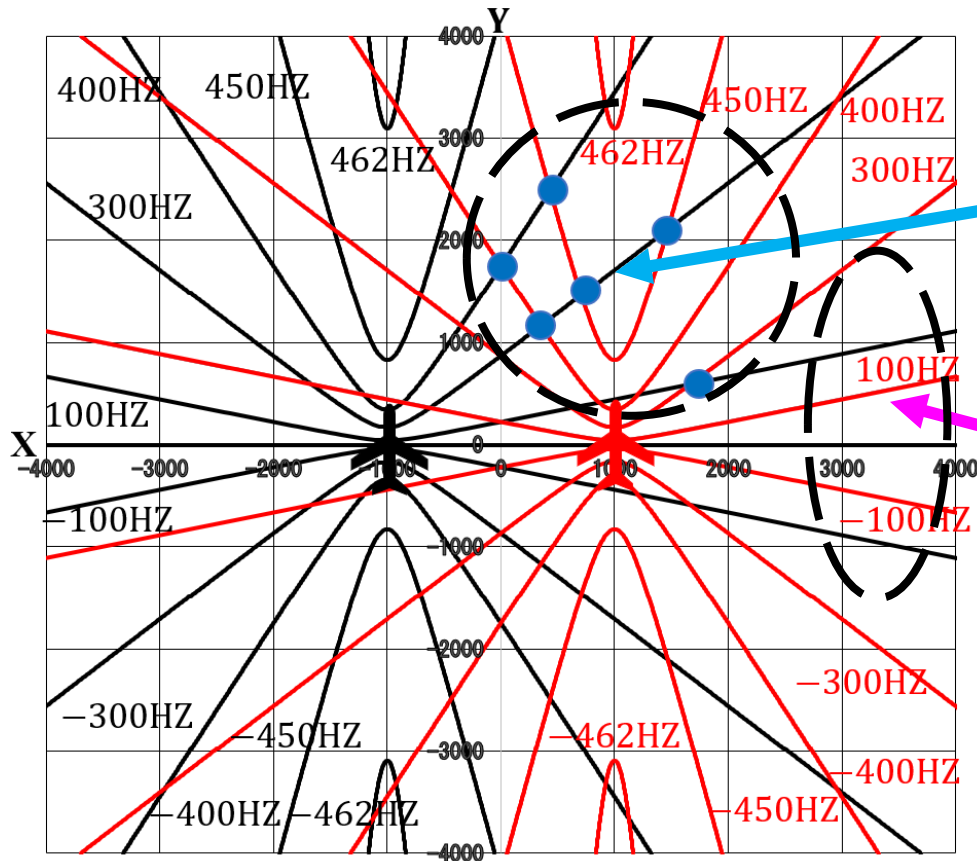
- ユーザが静止した状態を前提とし、様々な飛行モデルやUAVの機数をパラメータとして観測されるドップラーシフトを用いて最小二乗法に基づきユーザ位置検出を行う手法の特性評価を実施
 - ⇒ ドップラーシフトの観測回数とUAVの機数を増やすことにより位置検出精度が改善できることを確認
 - ⇒ ユーザが移動する場合は位置検出精度が劣化することが課題
- 基礎検討として、ユーザが特定方向に等速移動するモデルを対象とし、最小二乗法により移動後のユーザ位置を推定する手法を提案（2023年ソサイエティ大会）

➤ 本研究

- 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

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

$$fd_i(t_j) = \frac{\mathbf{R}_i(t_j) / |\mathbf{R}_i(t_j)| \cdot \mathbf{V}_i(t_j)}{\lambda}$$

$$\mathbf{R}_i(t_j) = (X_i(t_j) - x(t_j), Y_i(t_j) - y(t_j), Z_i(t_j) - z(t_j))$$

$\mathbf{V}_i(t_j)$: 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: Δt [s]

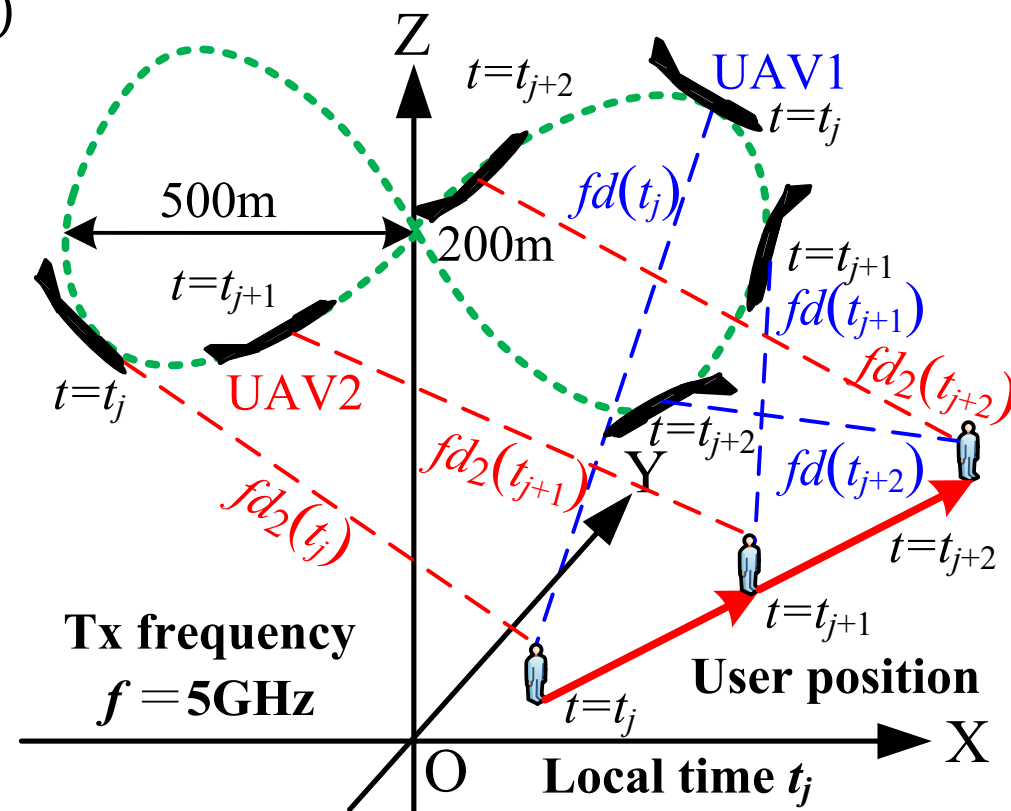
$$(x(t_{j+1}), y(t_{j+1})) = (x(t_j) + dm_x, y(t_j) + dm_y)$$

⋮

$$(x(t_{j+N-1}), y(t_{j+N-1}))$$

$$= (x(t_j) + (N-1)dm_x, y(t_j) + (N-1)dm_y)$$

- 初期位置 $(x(t_j), y(t_j))$ 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+1} におけるユーザ位置 $(x(t_{j+N-1}), y(t_{j+N-1}))$ 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)

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

⋮

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

- 時刻 t_j の **ユーザ位置** と観測時間間隔 Δt [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+N-1} における **ドップラーシフト量の推定式**

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

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

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

- 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

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

(dm_x, dm_y) : ユーザの観測時間間隔当りの移動量

(x, y, z) : ユーザの初期位置

$\lambda = \frac{c}{f}$: 搬送波周波数の波長

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

$(X_i(t_j), Y_i(t_j), Z_i(t_j))$: 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

$j = 1$
の場合

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

2回観測

N 回観測

- 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

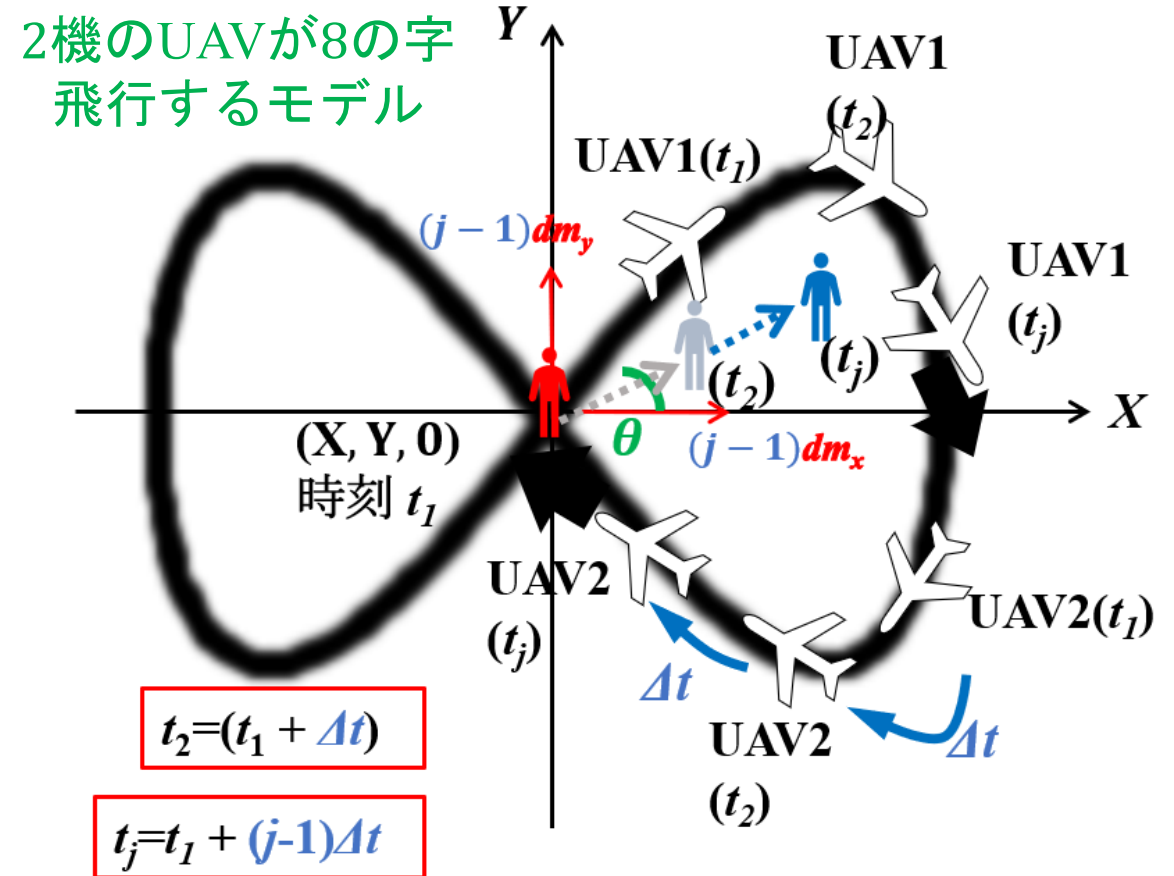
$$U = [\Delta x \ \Delta y \ \Delta d m_x \ \Delta d m_y]^T$$

$$[\Delta f d_i(t_j)]^T = F^T = G U$$

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

シミュレーション条件

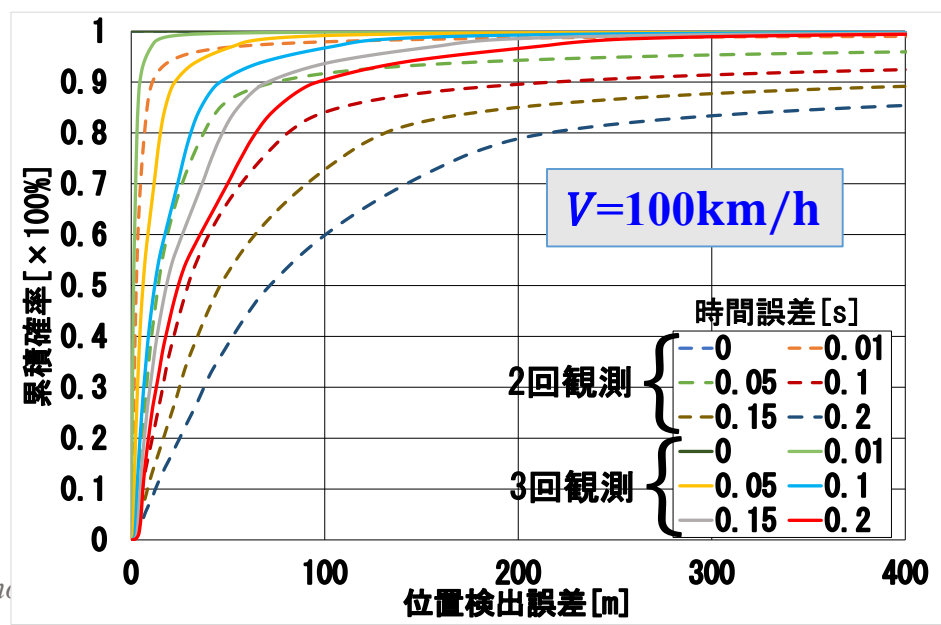
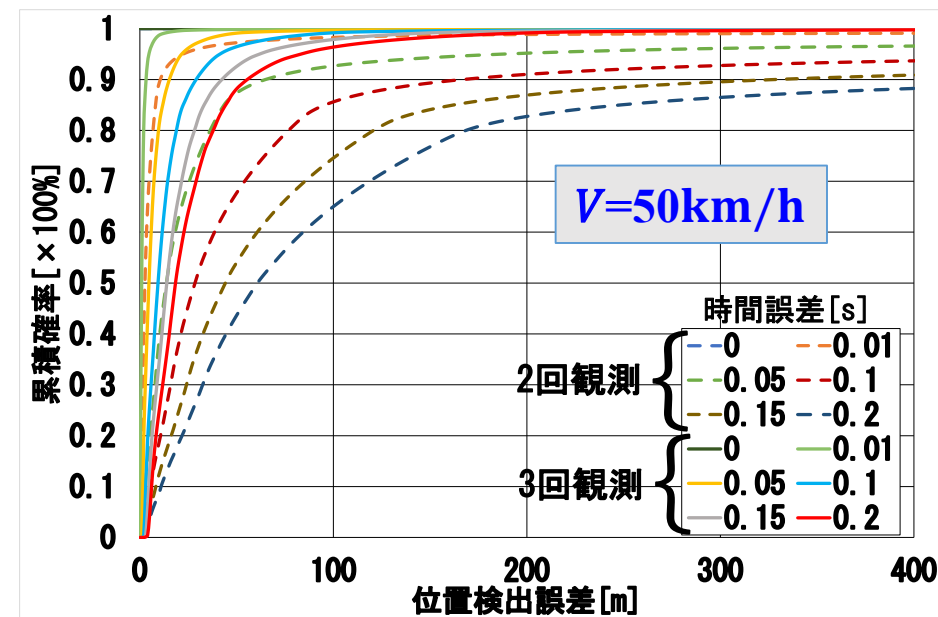
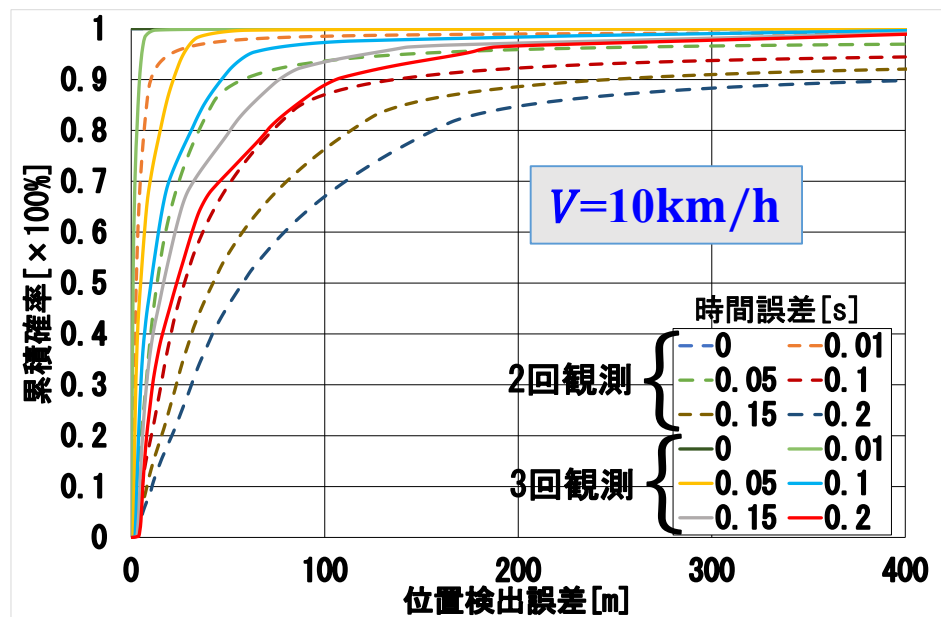
- 搬送波周波数 : $f_c = 5\text{GHz}$
- UAV高度 : $h = 200\text{m}$
- 回転半径 : $r = 500\text{m}$
- 時間誤差 : $t_{error} = 0 \sim 0.2\text{s}$
- ユーザ移動速度 :
 $V = 10, 50, 100 \text{ km/h}$
- ユーザ移動方向 : $\theta = 45^\circ$ 固定
- 評価対象エリア : 8km四方
- 評価地点 : 10m間隔のメッシュ状の
交点 (約64万地点)
- $t = 0\text{s} \sim 113.6\text{s}$ を16分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



XY平面上空から俯瞰して見た場合のユーザ端末とUAV
の位置関係

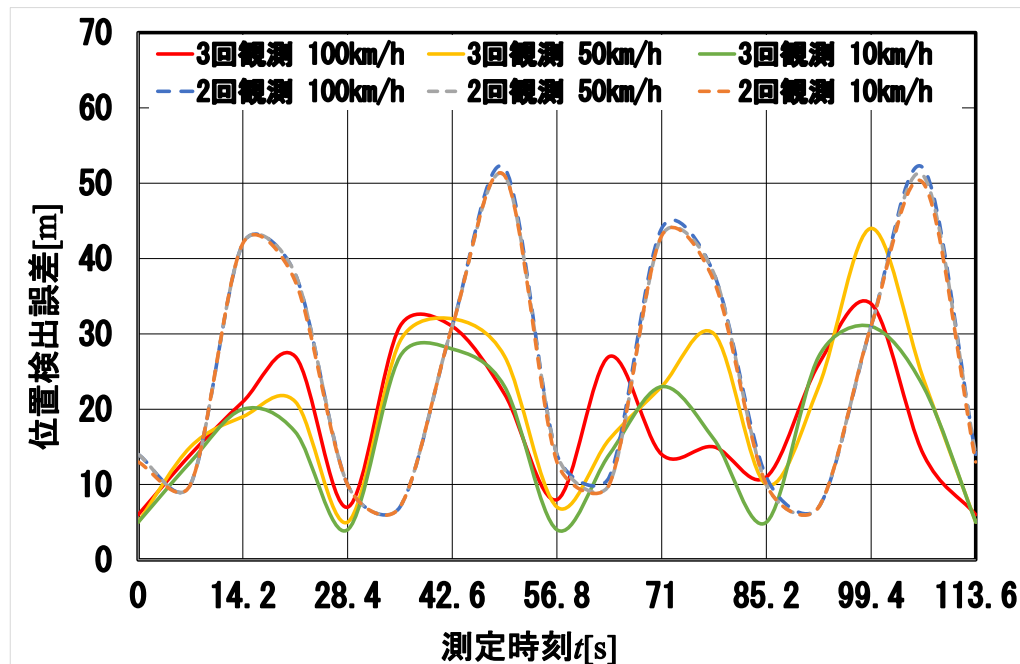
※UAV1は原点上、UAV2は1/4周分進んだ位置から飛行
開始

ユーザ位置検出誤差の累積分布特性

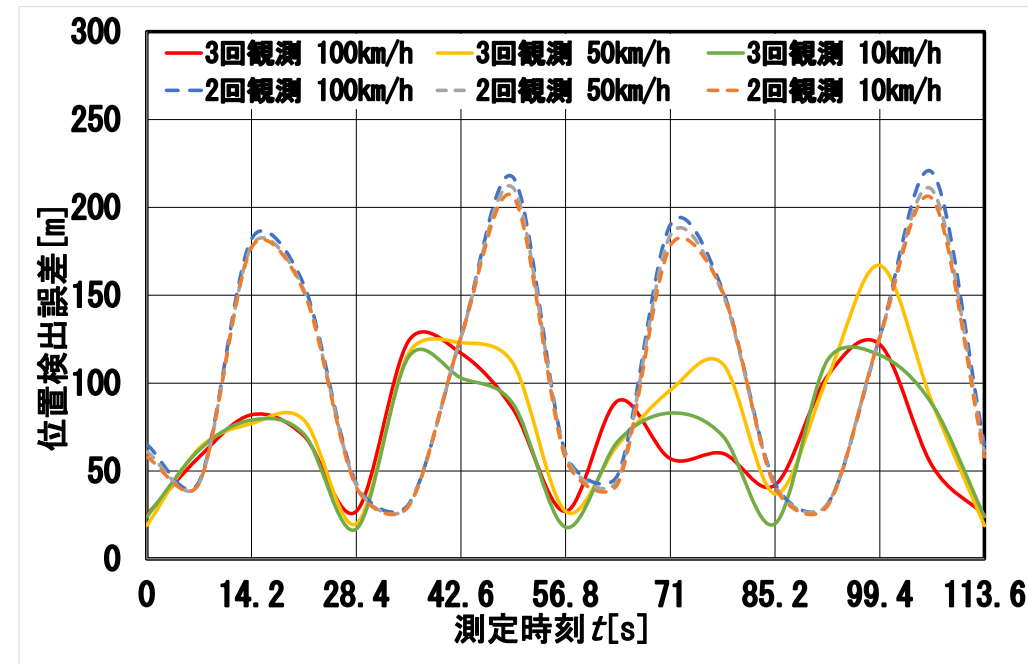


- 観測回数を2回から3回に増やすことにより、**位置検出誤差が減少**
- ユーザ移動速度と位置検出誤差特性に**相関は見られず**
- 時間誤差の影響については**ほぼ比例関係**
- **ユーザ位置とUAVの配置関係に基づく測位精度の変化が影響**

位置検出誤差の累積確率50%値の時間変化特性



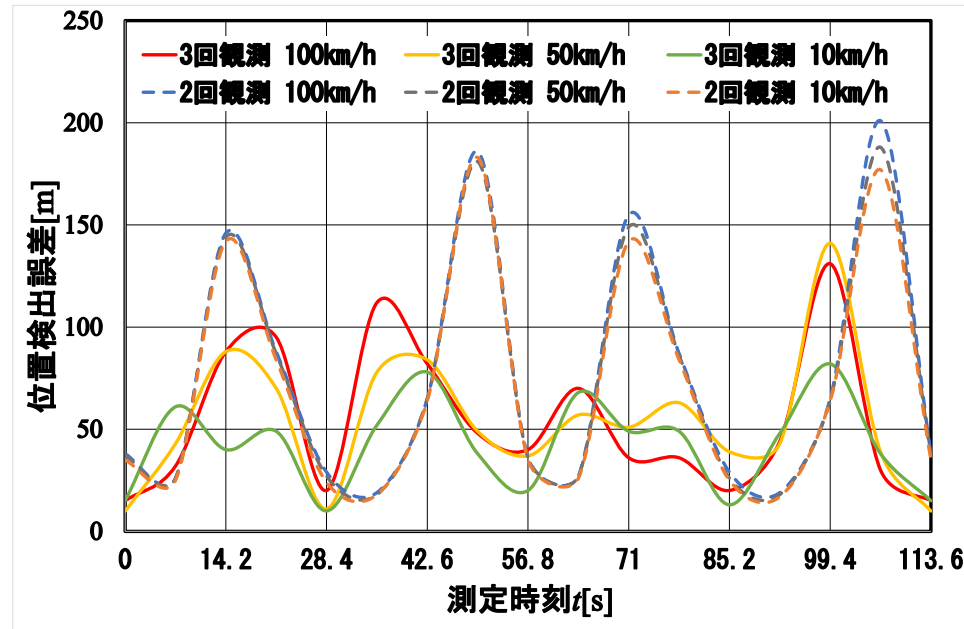
$$t_{error} = 0.05s$$



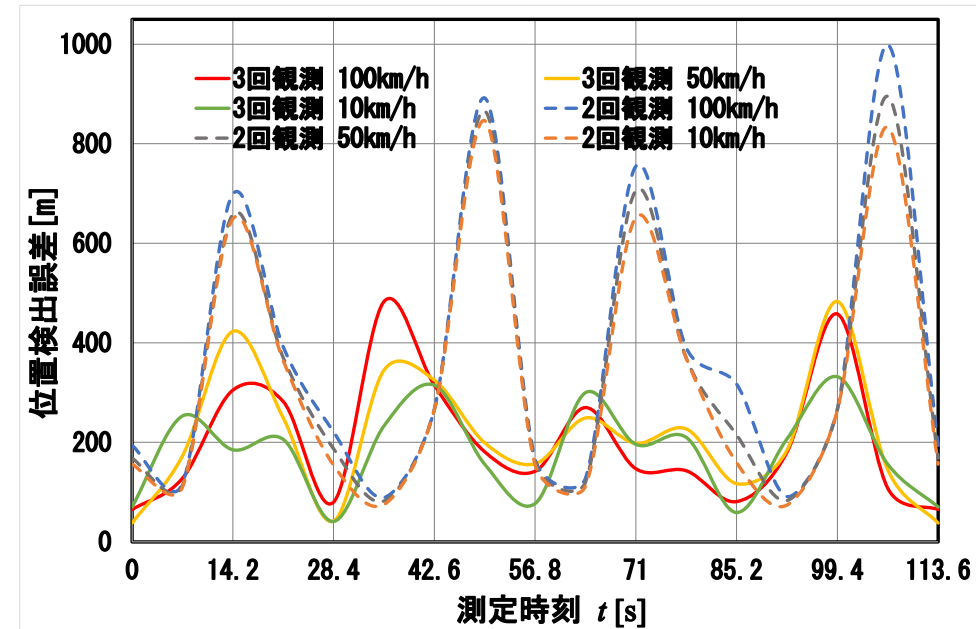
$$t_{error} = 0.2s$$

- 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
- 一部の区間を除いて3回観測の位置検出誤差が全時刻で移動速度によらず約5~30m ($t_{error} = 0.05s$)と約20~120m ($t_{error} = 0.2s$)に収まっており、2回観測より測位精度が良好
- 2回観測では測定開始時刻と移動速度によらず類似した時間変化特性を示すが、3回観測では移動速度によって測位精度のバラつきが発生

位置検出誤差の累積確率80%値の時間変化特性



$$t_{error} = 0.05s$$



$$t_{error} = 0.2s$$

- 3回観測の位置検出誤差がほぼ約20~140m($t_{error} = 0.05s$)と約50~500m($t_{error} = 0.2s$)に収まっており、2回観測より測位精度が良好
- 2回観測では測定開始時刻と移動速度によらず類似した時間変化特性を示すが、3回観測では高速移動時の測位精度が悪くなる傾向を確認
- $v = 100 \text{ km/h}$ では、 $\Delta t \times 2 = 20s$ の時間経過に伴いUAVの周回経路直下から約560mのユーザ位置のずれが生じ、位置関係が悪化することに起因

平均位置検出誤差特性

移動速度		$V = 100\text{km/h}$		$V = 50\text{km/h}$		$V = 10\text{km/h}$	
N [回]	累積確率	50%値[m]	80%値[m]	50%値[m]	80%値[m]	50%値[m]	80%値[m]
2	$t_{error} = 0.05\text{s}$	25.1	73.8	24.8	71.5	24.4	69.4
	$t_{error} = 0.2\text{s}$	68.7	201.9	77.8	211.3	68.1	180.4
3	$t_{error} = 0.05\text{s}$	18.5	53.8	19.7	53.7	16.8	42.6
	$t_{error} = 0.2\text{s}$	105.9	363.4	103.1	334.8	101.4	317.4
改善率[%]	$t_{error} = 0.05\text{s}$	26.3	27.1	20.4	24.9	31.3	38.6
	$t_{error} = 0.2\text{s}$	35.1	44.4	24.5	36.9	32.8	43.2

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2回から3回に拡張することにより、位置検出精度を**約20~30%改善可能**
- ユーザ移動速度が速くなるに連れて位置検出精度が劣化傾向
- **時間誤差 t_{error}** が大きいほど、3回観測による改善量が増加
- t_{error} の大きさにもよるが、**位置検出精度としては不十分**



ドップラーシフトの観測回数を更に増やす等の対策が必要

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。