



マルチパス環境下における無人航空機を用いた位置検出システムのドップラーシフト推定手法の基礎検討

日本大学

○毛塚 直哉 石川 博康

目次

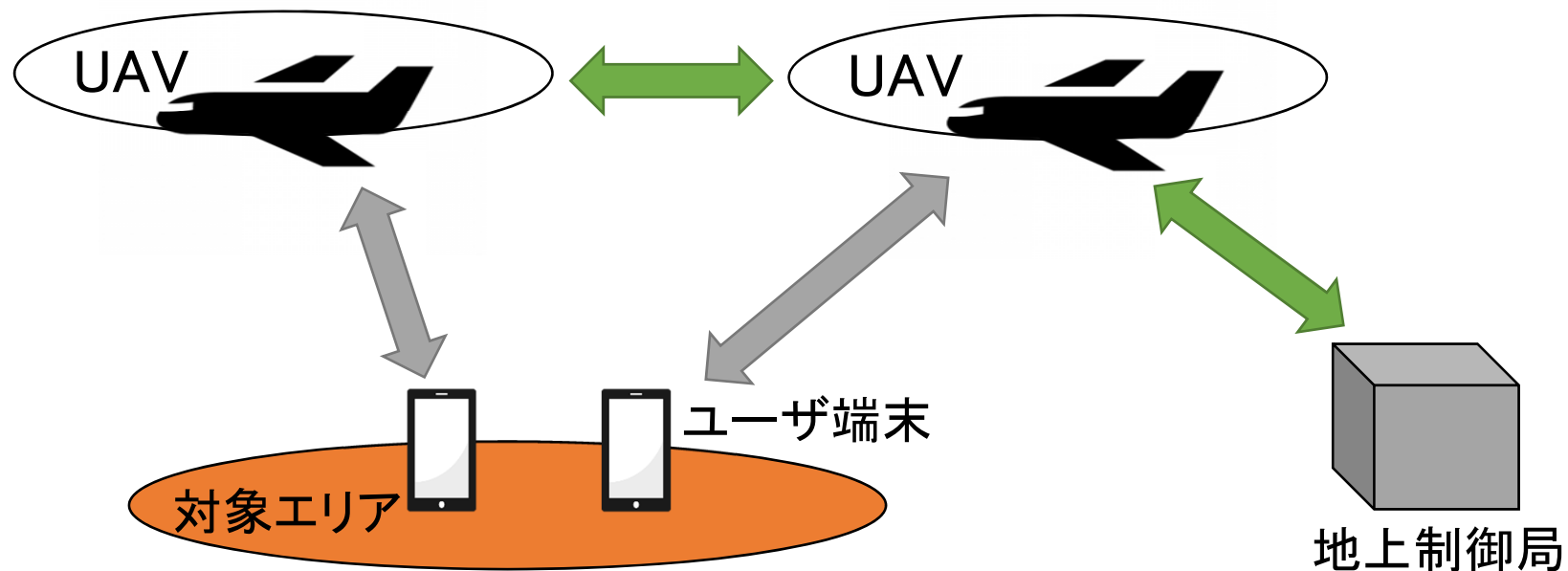
- 背景と目的
- マルチパスによる測位精度への影響
- ドップラーシフト量の推定手法
- ユーザ端末位置検出手法
- シミュレーション条件
- シミュレーション結果
- まとめ



研究の背景と目的

研究の背景

- 災害の影響で既存の通信インフラが利用できない場合の一時的措置として、**無人航空機システム(UAS)**の実用化が期待
- UASでは通信機能を有した**無人航空機(UAV)**が対象エリアの上空(高度150~1000m)を時速40~100kmで旋回
⇒UAVが中継局として機能



研究の背景

- **UAS**ではユーザ端末-UAVの位置関係が時々刻々変化
⇒無線区間の送受信信号にドップラーシフトが発生



- UASの構成要素である**UAV**を用いて対象者のユーザ端末から送信されるトーン信号(連続波)に含まれる**ドップラーシフト量[Hz]**を地上で観測

⇒**ユーザ端末の位置を検出**

- **応用例**：山での遭難者及び災害時の行方不明者の早期救助への貢献が期待

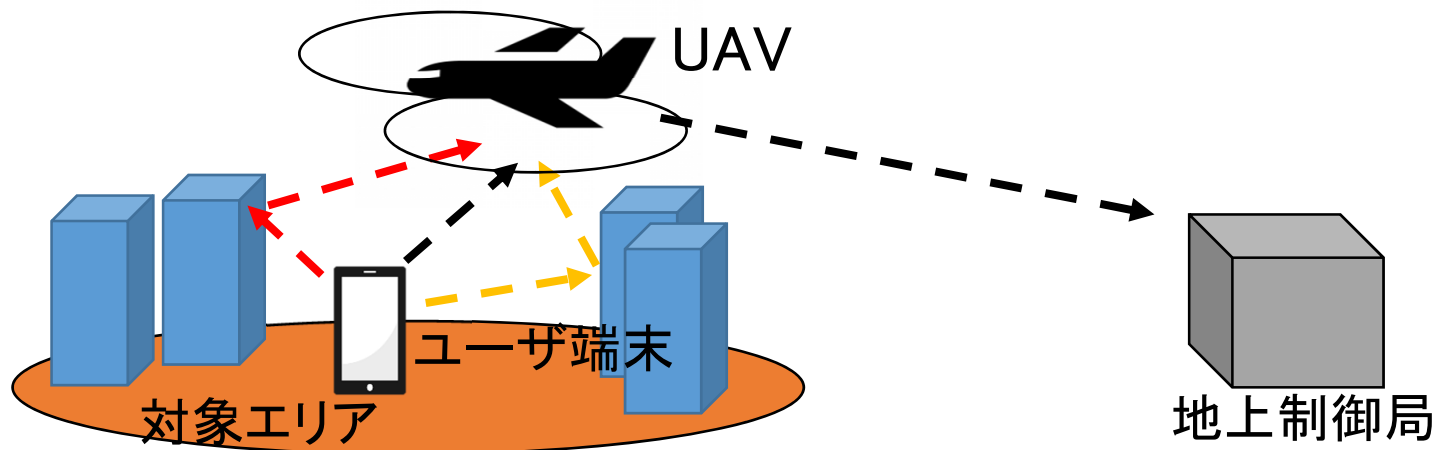
目的

➤ 従来研究

- 1機及び複数機のUAVによるドップラーシフトを用いた位置検出手法の提案
- 山岳地帯や都市環境を模擬したマルチパス環境下における1機のUAVによる円旋回飛行モデルの位置検出性能の評価

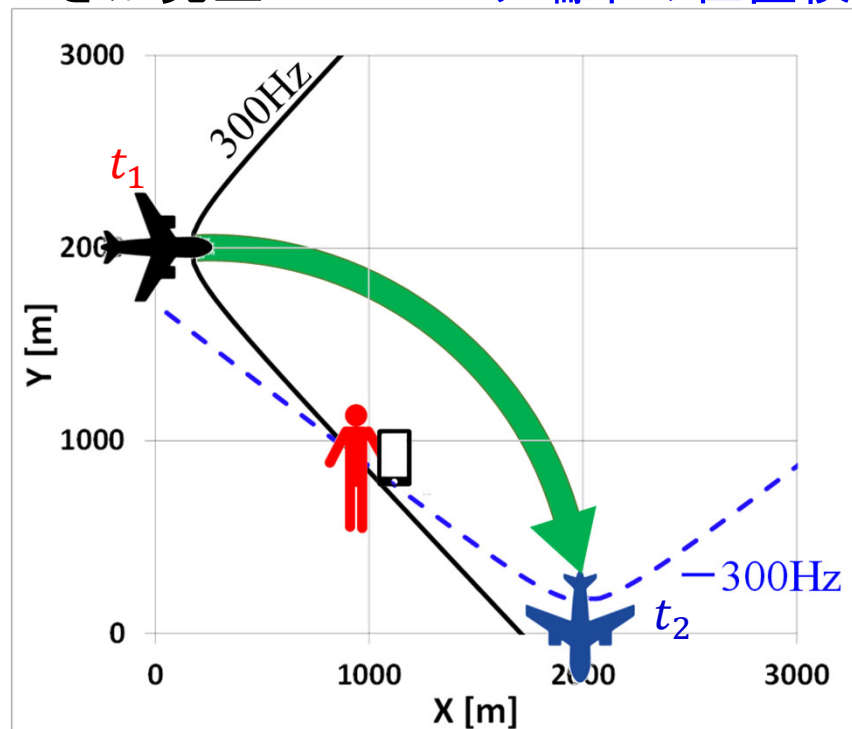
➤ 本研究

- 3Dモデルを電波伝搬シミュレーションツール上に作成し、1機のUAVが8の字旋回飛行するケースを想定
- マルチパスを考慮したドップラーシフト分布特性とその推定精度及び2次元位置検出性能の基礎的な評価

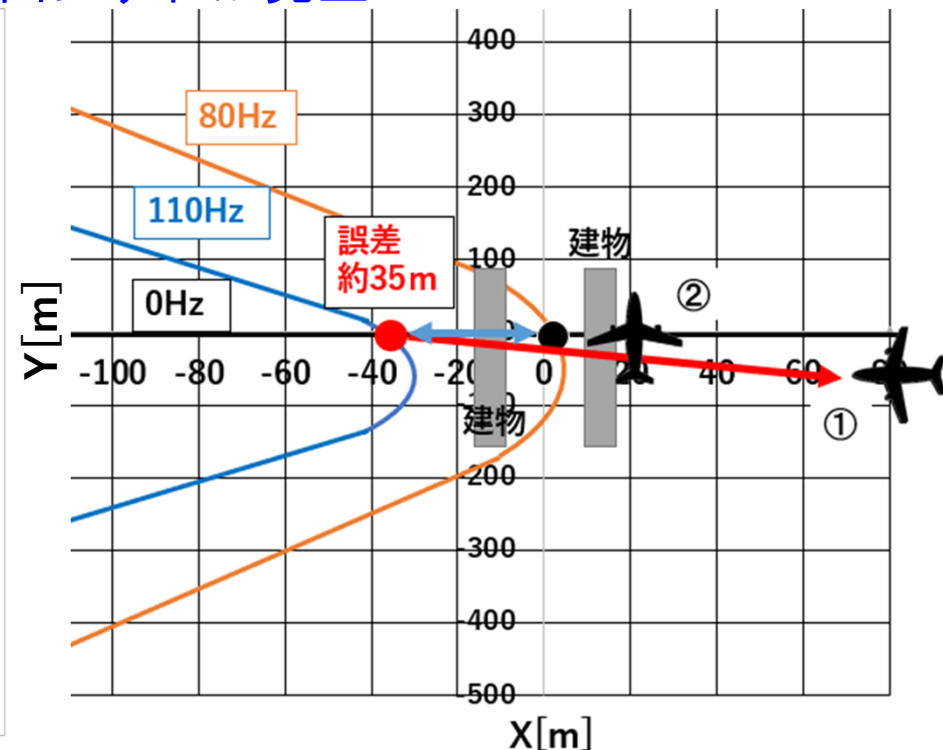


マルチパスによる測位精度への影響

- 地上制御局において、UAVの受信信号に含まれるドップラーシフト量を異なる時刻に複数回観測 ⇒ 双曲線の交点としてユーザ端末位置を検出
- 実環境ではユーザ端末から送信されたトーン信号が上空を飛行するUAVが受信するまでに複数の経路を通るため、ドップラーシフト量にばらつきが発生 ⇒ ユーザ端末の位置検出にずれが発生



位置検出原理



マルチパス環境下における位置検出

ドップラーシフト量の推定手法

ドップラーシフトの推定手法

- マルチパス信号は**反射・回折**をしてUAVにて受信
⇒ドップラーシフト量のずれを含む信号は直接波よりも受信レベルが低
- マルチパス信号の影響を低減するために**受信レベルの高い順に重みづけ**
- UAVで n 番目に観測した地点におけるドップラーシフト量の**加重平均** μ_{d_n} は次式で表される

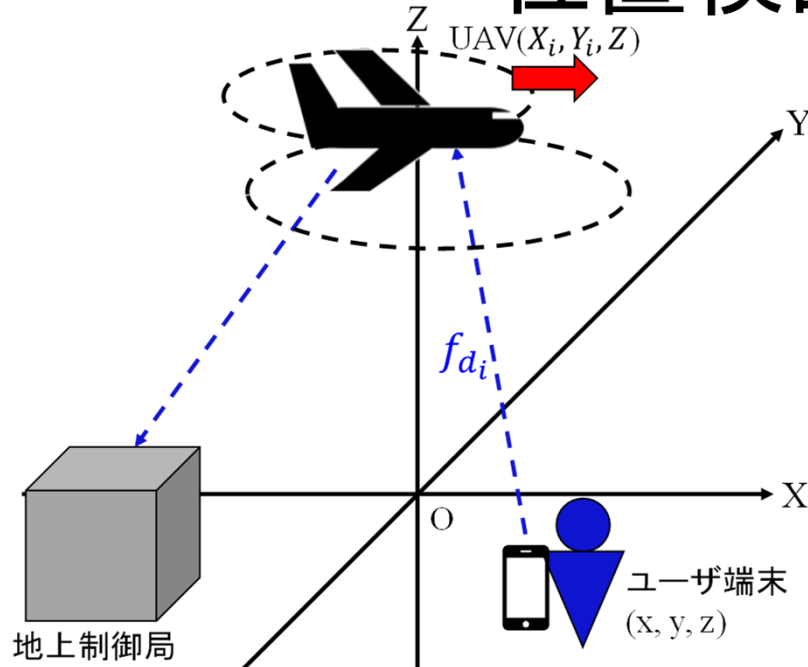
$$\mu_{d_n} = \frac{\sum_i^N w_i x_i}{\sum_i^N w_i}$$

ただし、**重み** w_i : $\frac{i\text{番目の伝搬経路の受信レベル}}{\text{各観測地点における最大受信レベル}}$

x_i : 各観測地点でUAVにて観測された i 番目の信号に含まれるドップラーシフト量[Hz]

ユーザ端末位置検出手法

位置検出手法(2次元)



位置検出モデルの概略図

$$f_{d_1} = -\frac{V_{x_1}(X_1 - x) + V_{y_1}(Y_1 - y)}{\lambda\sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2 + (Z - z)^2}} \quad \dots (1)$$

$$f_{d_2} = -\frac{V_{x_2}(X_2 - x) + V_{y_2}(Y_2 - y)}{\lambda\sqrt{(X_2 - x)^2 + (Y_2 - y)^2 + (Z - z)^2}} \quad \dots (2)$$

ドップラーシフトの初期値: $f_{d_{1ini}}$ 及び $f_{d_{2ini}}$

ユーザ端末座標の初期値: x_{ini} 及び y_{ini}

$\Delta x = x_{next} - x_{ini}$ 及び $\Delta y = y_{next} - y_{ini}$

とし, 以下の計算((3)~(7))を繰り返す,
初期値を10回更新

$$f_{d_{1ini}} = -\frac{V_{x_1}(X_1 - x_{ini}) + V_{y_1}(Y_1 - y_{ini})}{\lambda\sqrt{(X_1 - x_{ini})^2 + (Y_1 - y_{ini})^2 + (Z - z)^2}} \quad \dots (3)$$

$$f_{d_{2ini}} = -\frac{V_{x_2}(X_2 - x_{ini}) + V_{y_2}(Y_2 - y_{ini})}{\lambda\sqrt{(X_2 - x_{ini})^2 + (Y_2 - y_{ini})^2 + (Z - z)^2}} \quad \dots (4)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{d_1}}{\partial x} & \frac{\partial f_{d_1}}{\partial y} \\ \frac{\partial f_{d_2}}{\partial x} & \frac{\partial f_{d_2}}{\partial y} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} f_{d_1} - f_{d_{1ini}} \\ f_{d_2} - f_{d_{2ini}} \end{bmatrix} \quad \dots (5)$$

$$\begin{bmatrix} x_{next} \\ y_{next} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{ini} + \Delta x \\ y_{ini} + \Delta y \end{bmatrix} \quad \dots (6)$$

ただし, f_{d_1} , f_{d_2} はドップラーシフトの観測値 $x_{ini} = x_{next}$, $y_{ini} = y_{next}$ $\dots (7)$

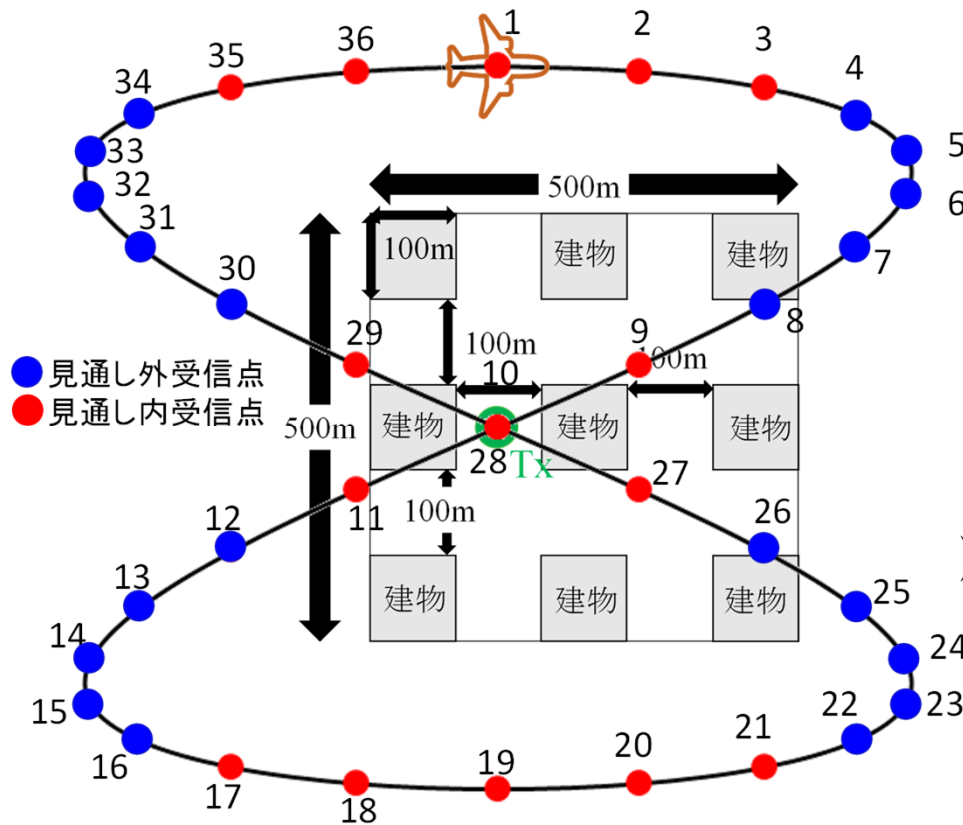
ユーザ端末座標 x, y は未知

シミュレーション条件

シミュレーションモデル

➤送受信点

- 地上端末(Tx)を受信点10及び28の直下に配置
- UAV軌道上を約3.2秒間隔, 36カ所でドップラーシフト量の観測を想定



シミュレーションモデル俯瞰図

➤環境モデル

- 対象エリア500m × 500m
- 高さ50mの四角柱型建物を前後左右に100m間隔に9つ配置

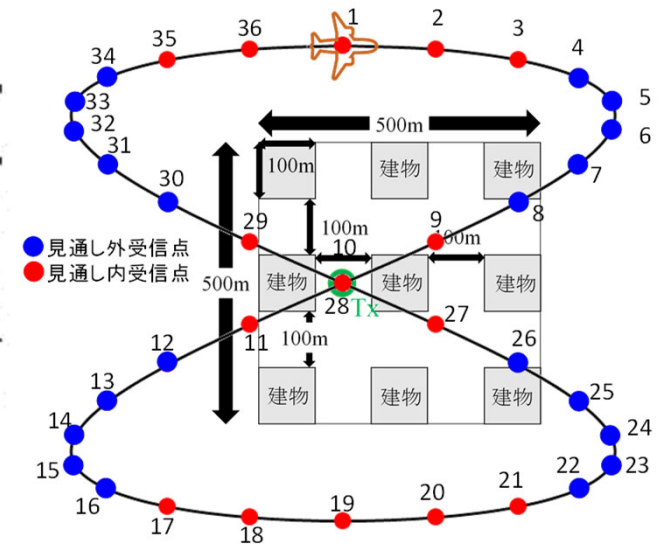
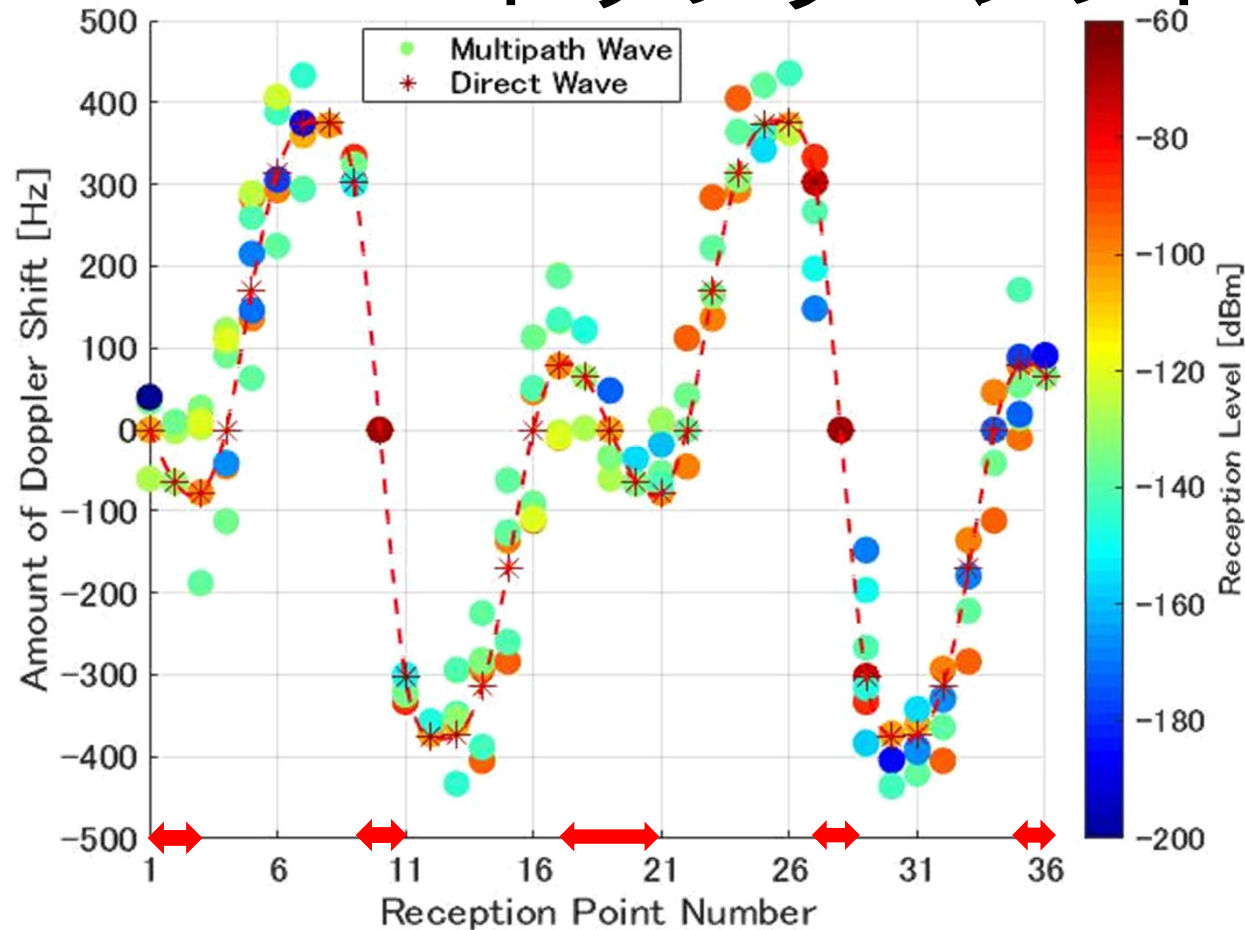
シミュレーション条件

パラメータ	設定値
地上端末(Tx)の地上高	1m
送信電力	1W
搬送波周波数	5GHz
UAV(受信機)の高度	200m
UAVの旋回半径	500m
UAVの速度	100km/h

マルチパス波の条件	設定値
反射回数	0～3回
回折回数	0～1回
透過回数	0回

シミュレーション結果

ドップラーシフト分布



➤ 直接波受信可能な区間(受信点1~3, 9~11, 17~21, 27~29, 35~36)

- ドップラーシフト量のずれを含む信号の受信レベルは低い(−100dBm未満)傾向

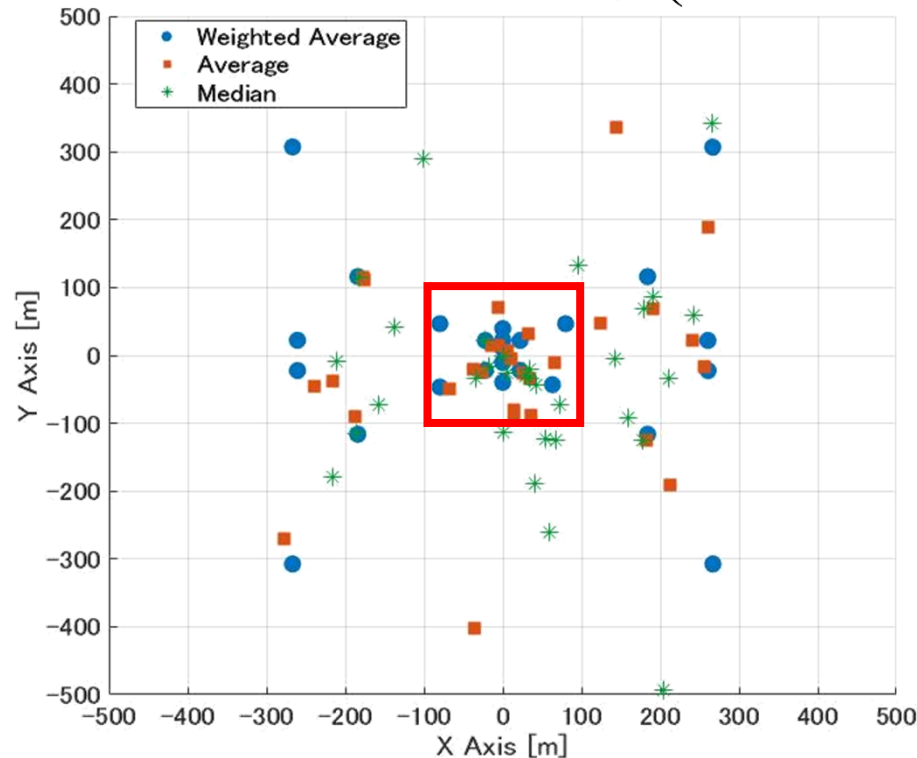
ドップラーシフト推定誤差

受信番号	加重平均 [Hz]	単純平均 [Hz]	中央値 [Hz]	受信番号	加重平均 [Hz]	単純平均 [Hz]	中央値 [Hz]
1	-0.02	10.70	34.50	19	0.00	-4.86	0.00
2	0.01	46.00	63.00	20	0.00	9.00	0.00
3	8.88	42.08	84.50	21	8.86	40.13	24.00
4	13.70	33.43	91.00	22	8.05	21.60	0.00
5	29.96	26.77	44.00	23	29.81	23.40	-5.00
6	30.94	16.00	-9.00	24	30.90	20.70	-5.00
7	-13.00	-8.71	-13.00	25	-12.99	2.86	-10.00
8	-3.00	-3.00	-3.00	26	-3.01	15.50	-3.00
9	2.48	13.71	20.00	27	2.48	-55.56	-36.00
10	0.00	0.00	0.00	28	0.00	0.00	0.00
11	-2.48	-11.44	-4.00	29	-2.48	27.17	0.50
12	3.00	10.25	10.00	30	3.00	-29.17	-29.50
13	13.01	15.40	20.50	31	13.00	-12.78	-17.00
14	-30.93	2.17	26.50	32	-30.95	-29.00	-15.00
15	-29.91	5.00	39.50	33	-29.93	-29.20	-9.00
16	-13.62	-7.43	46.00	34	-13.65	-21.60	0.00
17	-8.77	-5.36	0.00	35	-8.86	-22.20	-24.00
18	0.00	12.75	28.00	36	0.00	13.25	13.50

➤見通し内受信点(1～3, 9～11, 17～21, 27～29, 35, 36)

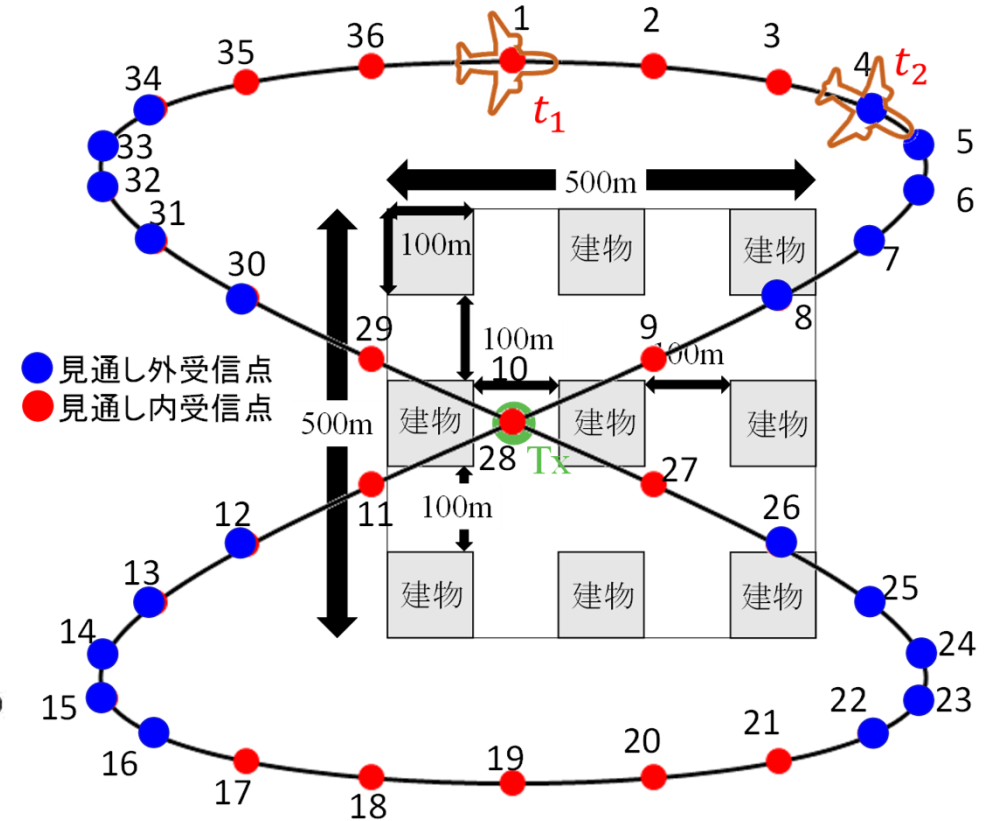
- 単純平均, 中央値適用時 → ドップラーシフト推定誤差の絶対値が10Hz以上発生
- 加重平均適用時 → ドップラーシフト推定誤差の絶対値が10Hz未満

位置検出結果(観測時間間隔 $\Delta t \cong 9.4\text{sec}$ の場合)



UAV受信点番号差 $n = 3$

真のユーザ端末位置 = (0, 0), 位置検出回数36回



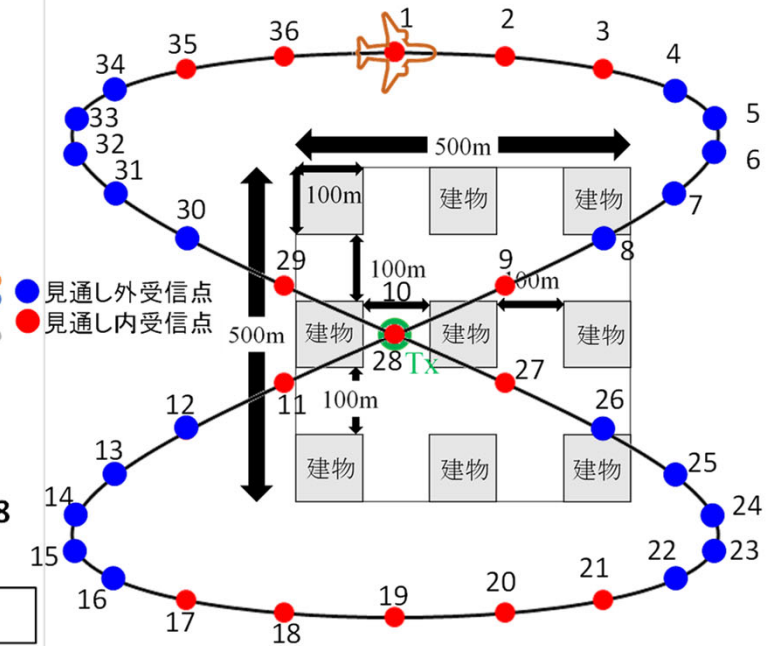
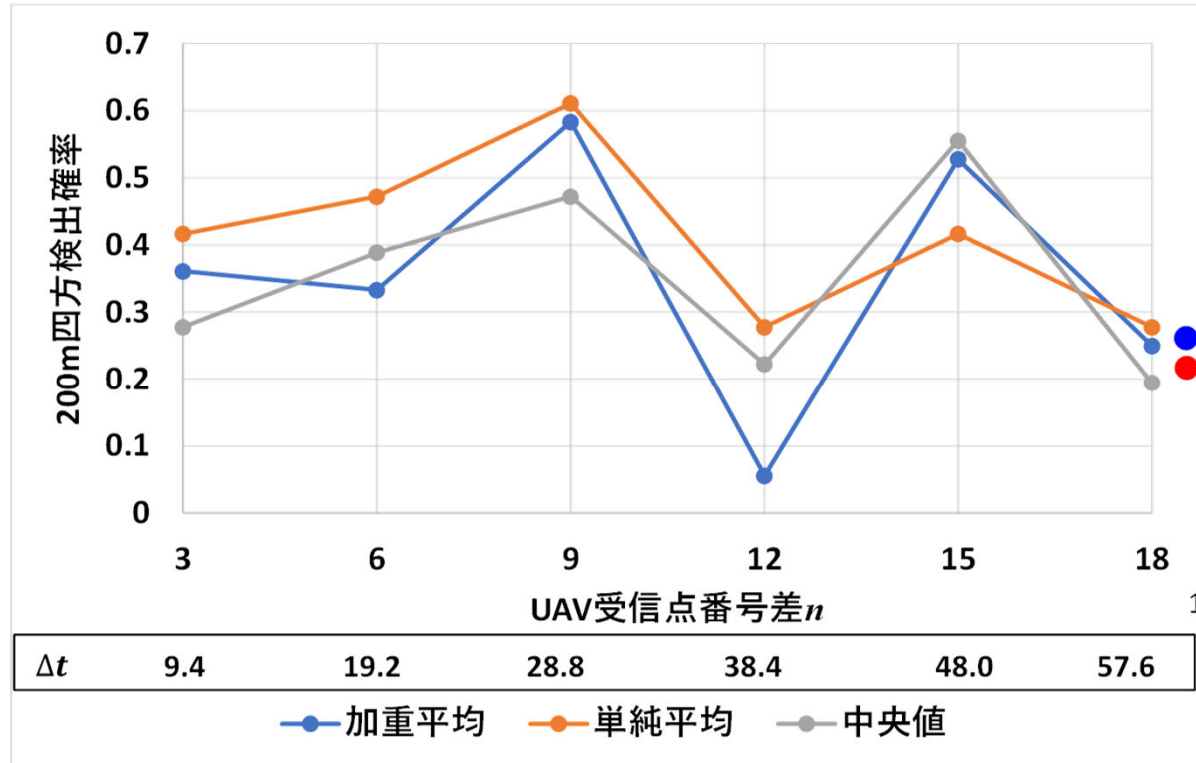
ドップラーシフト観測時間間隔 $\Delta t = t_2 - t_1 \cong 3.2n$

➤ 2次元測位結果(200m四方)

◆ UAV受信点番号差 $n = 3$ ($\Delta t \cong 9.4\text{sec}$)の場合

• 加重平均 : 13, 単純平均 : 15, 中央値 : 10

推定値に基づく位置検出結果($3 \leq n \leq 18$)



ドップラーシフト観測時間間隔 Δt [sec] $\cong 3.2n$

➤位置検出性能

- ドップラーシフトの観測時間間隔 Δt に応じて位置検出性能が変化
- 観測時間間隔 $\Delta t \cong 28.8$ [sec] ($n = 9$) または 48.0 [sec] ($n = 15$) で位置検出性能が良好

まとめと今後の課題

➤まとめ

- 簡易的なマルチパス環境モデルにおいて8の字飛行モデルを対象としたレイトラッキング法に基づくシミュレーションを実施
- 地上端末-UAV間の送受信信号に発生するドップラーシフト分布特性とその推定精度及び、推定値に基づく位置検出性能の基礎的な評価
- ドップラーシフトの観測時間間隔に応じて位置検出性能が変化

➤今後の課題

- 異なる環境モデルを適用した場合の位置検出性能の評価
- 更なるドップラーシフト観測誤差を低減する手法の検討

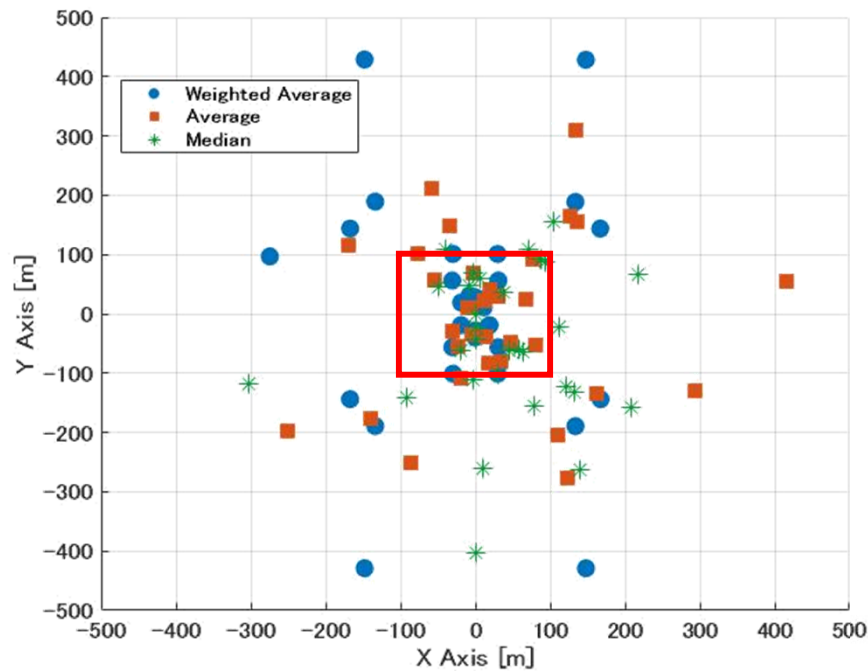
謝辞

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。

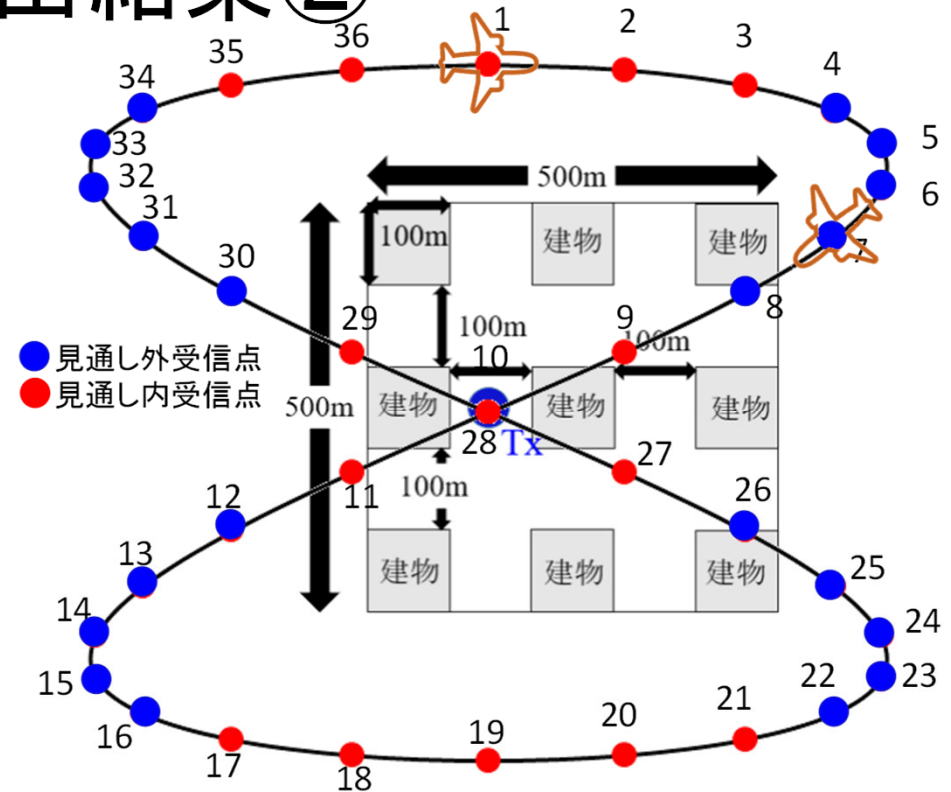
補足資料

位置検出結果②



UAV受信点番号差=6

真のユーザ端末位置=(0, 0), 位置検出回数36回

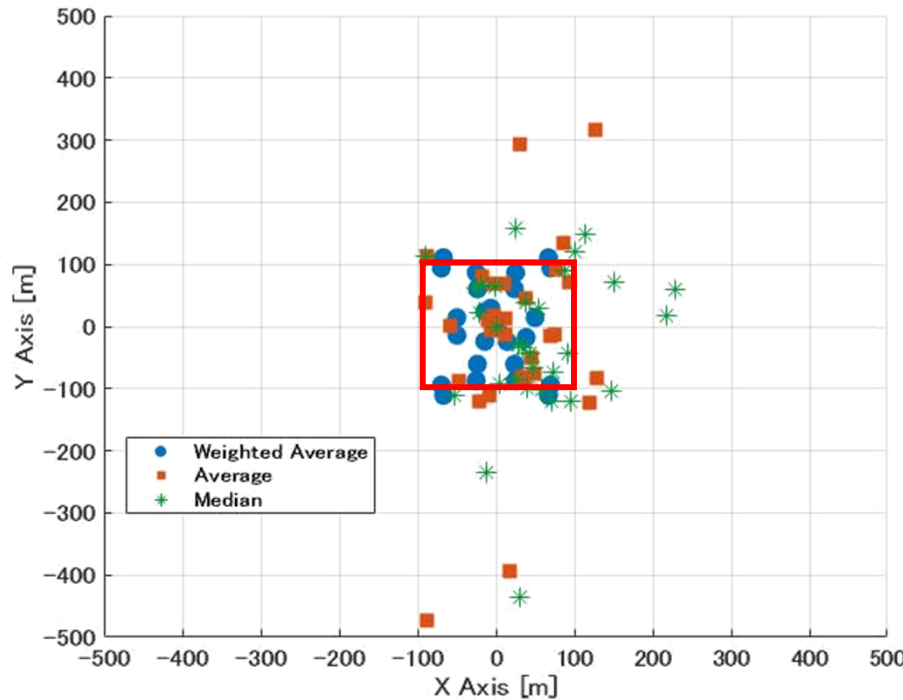


➤2次元測位結果(200m四方)

◆UAV受信点番号差=6の場合

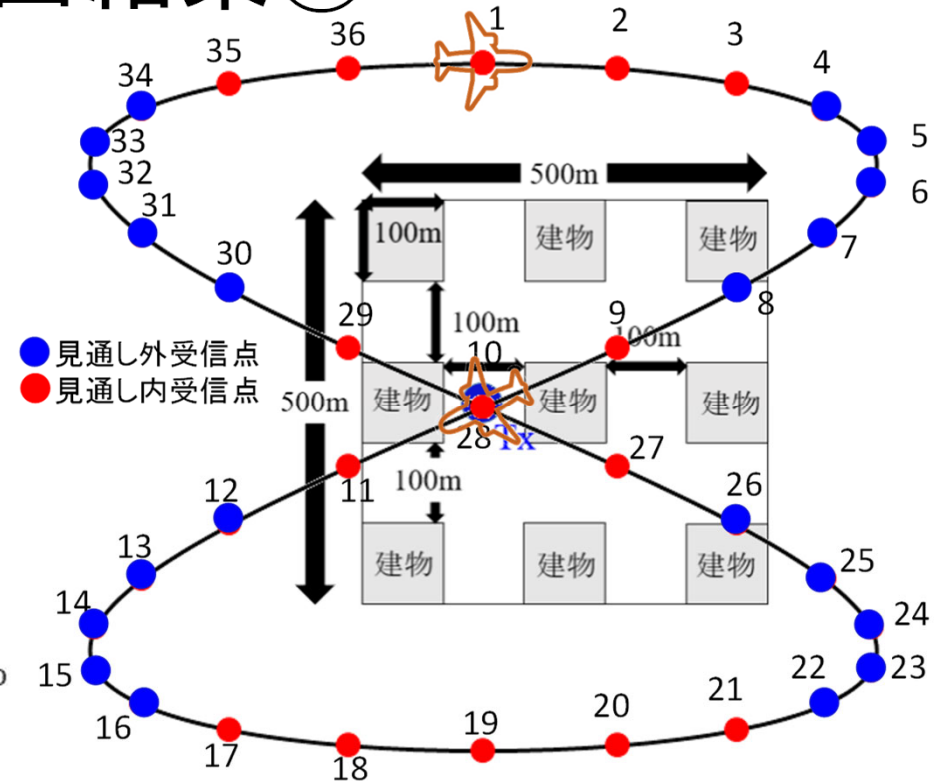
- 加重平均 : 12, 単純平均 : 17, 中央値 : 14

位置検出結果③



UAV受信点番号差=9

真のユーザ端末位置=(0, 0), 位置検出回数36回

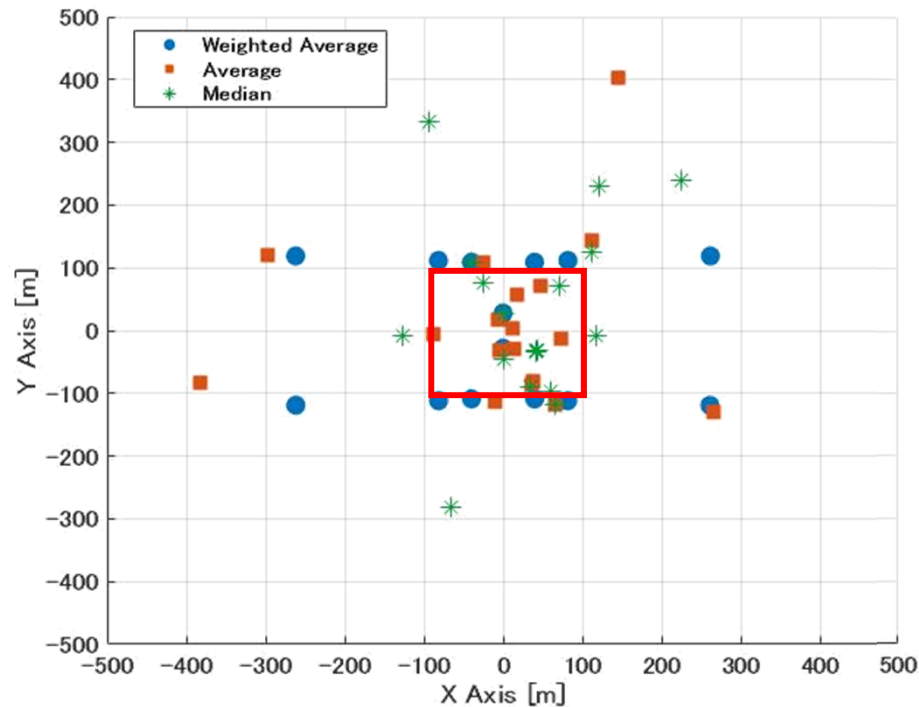


➤ 2次元測位結果(200m四方)

◆ UAV受信点番号差=9の場合

• 加重平均 : 21, 単純平均 : 22, 中央値 : 17

位置検出結果④



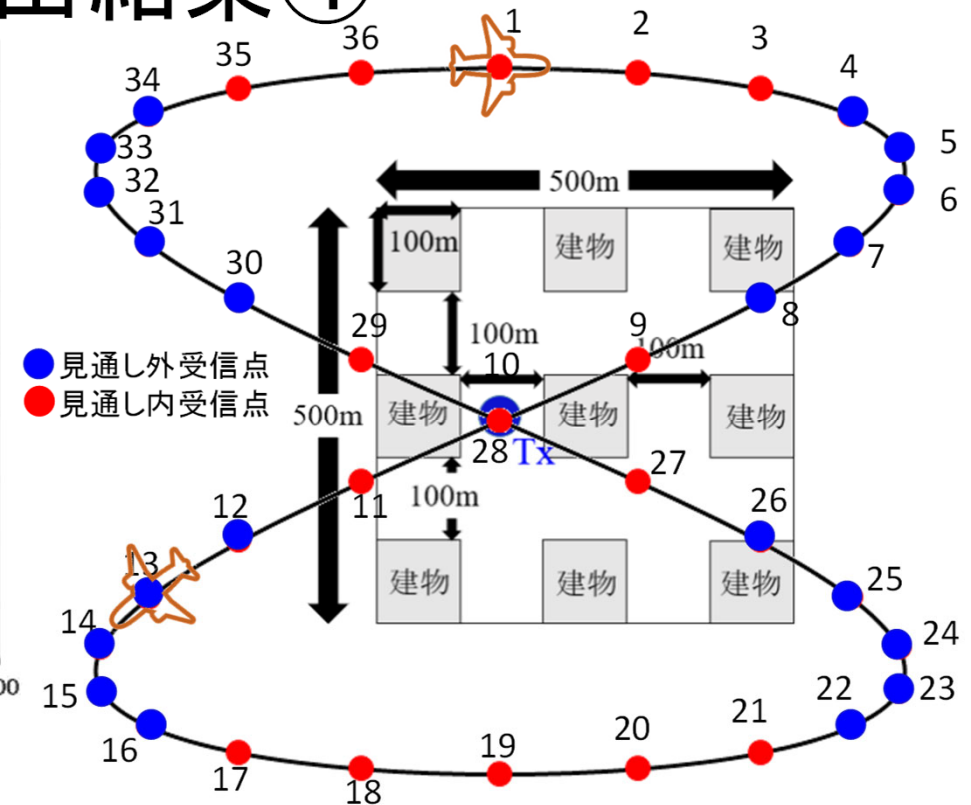
UAV受信点番号差=12

真のユーザ端末位置=(0, 0), 位置検出回数36回

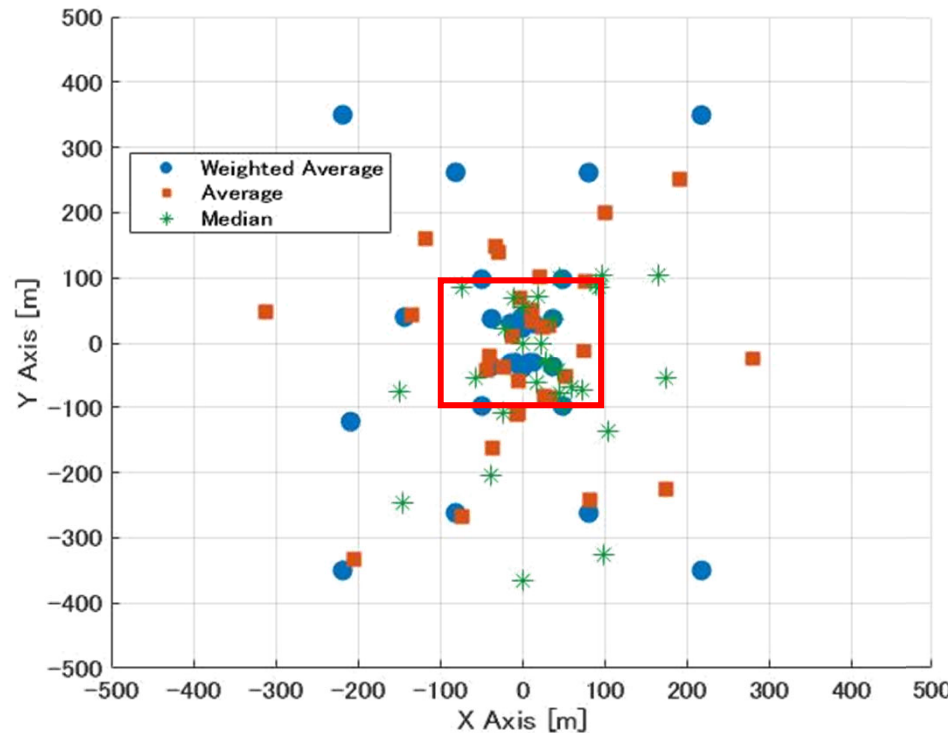
➤2次元測位結果(200m四方)

◆UAV受信点番号差=12の場合

•加重平均 : 2, 単純平均 : 10, 中央値 : 8

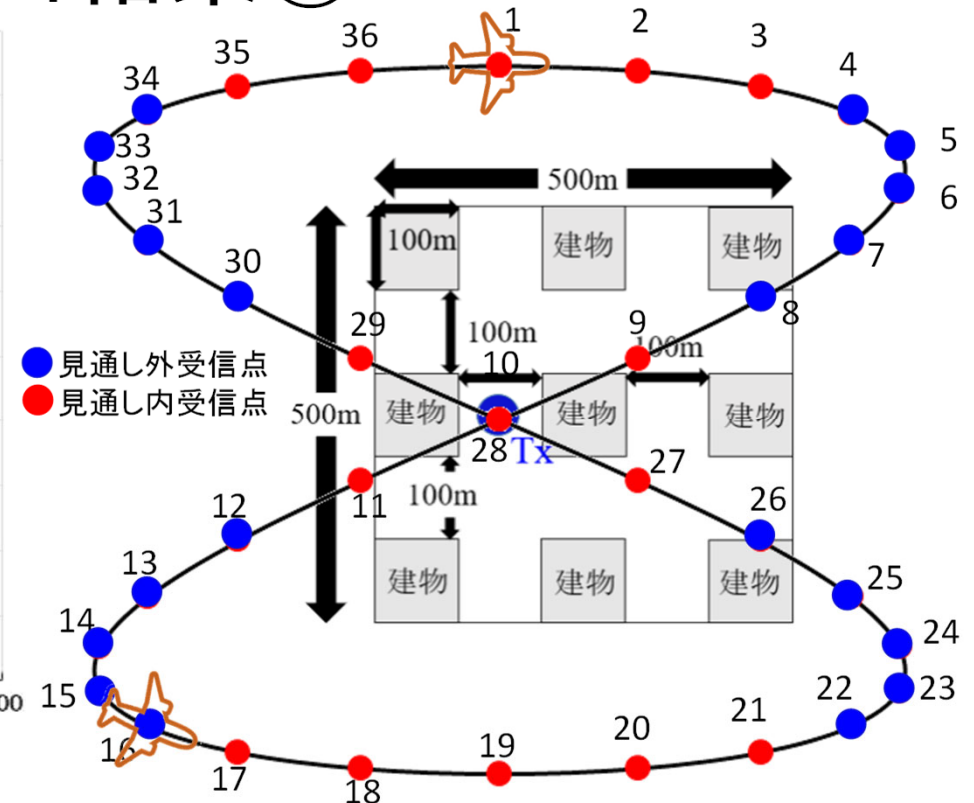


位置検出結果⑤



UAV受信点番号差=15

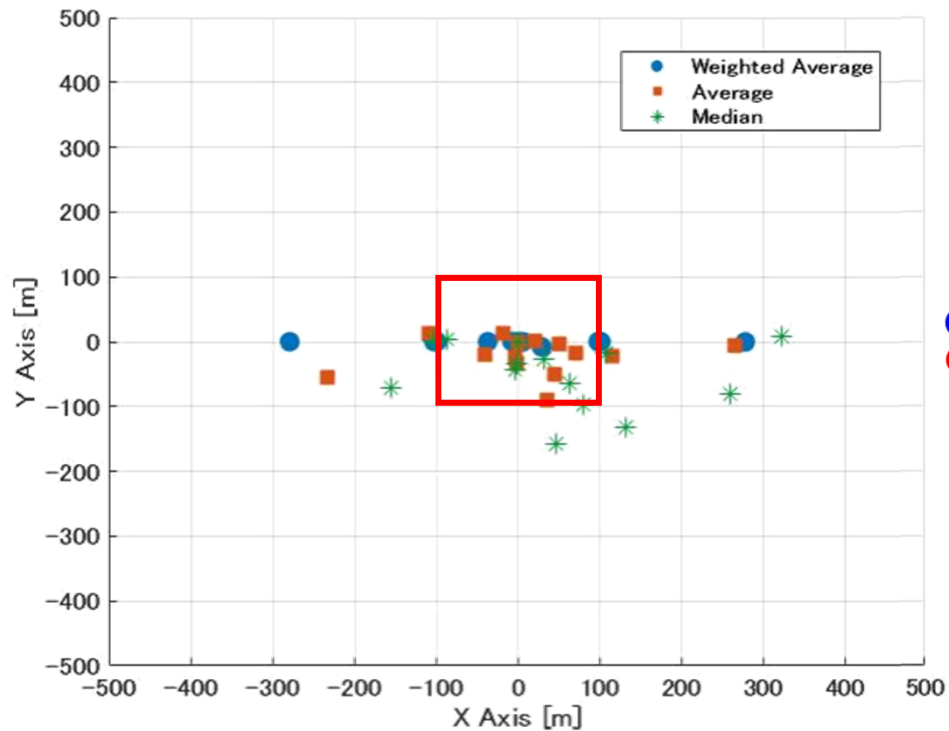
真のユーザ端末位置=(0, 0), 位置検出回数36回



➤2次元測位結果(200m四方)

- UAV受信点番号差=15の場合
- 加重平均 : 19, 単純平均 : 15, 中央値 : 20

位置検出結果⑥



UAV受信点番号差=18

真のユーザ端末位置=(0, 0), 位置検出回数36回

➤2次元測位結果(200m四方)

- UAV受信点番号差=18の場合
- 加重平均 : 9, 単純平均 : 10, 中央値 : 7

