



マルチパス環境下における無人航空機を用いた ドップラーシフトに基づく位置検出手法の検討

日本大学

○毛塚 直哉 石川 博康

目次

- 背景と目的
- ユーザ端末位置検出手法の概要
- 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

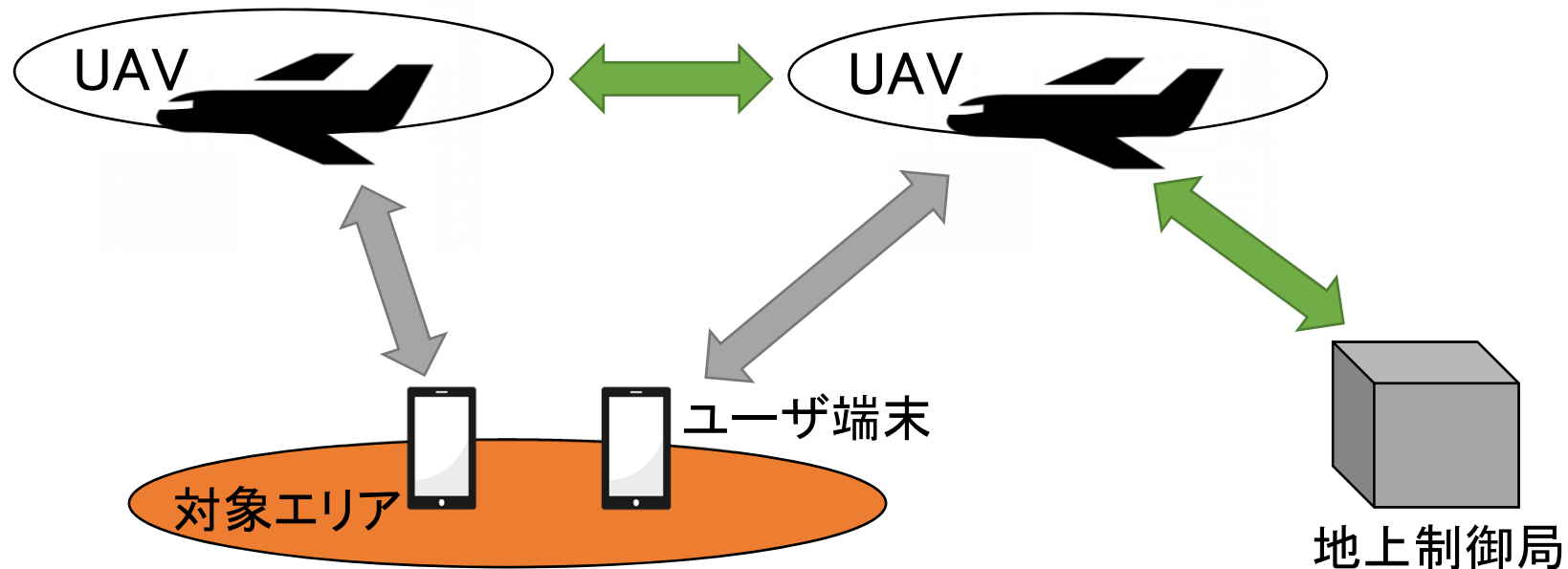


研究の背景と目的

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

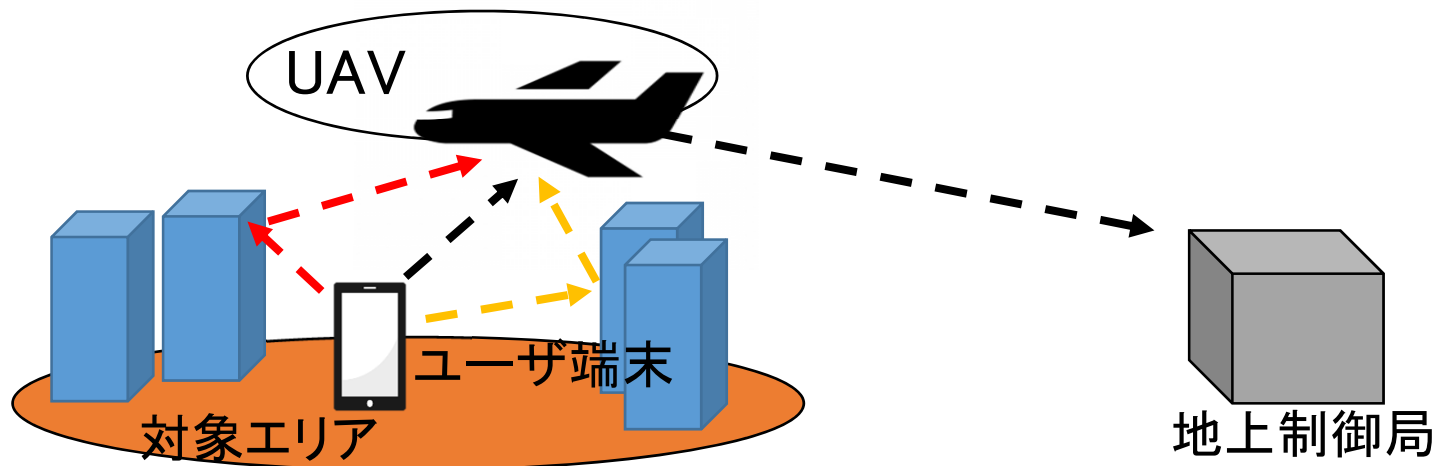
目的

➤従来研究

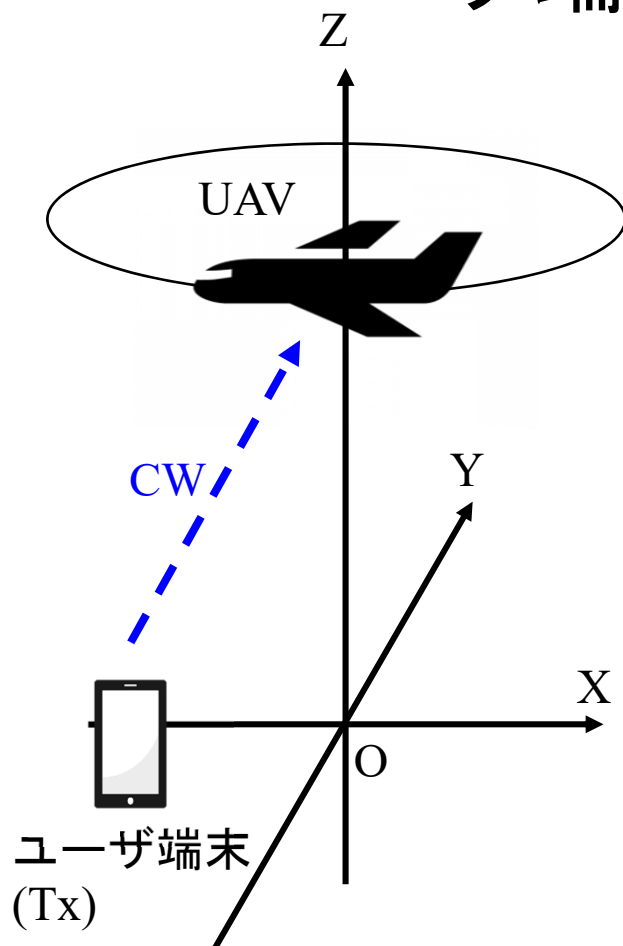
- 1機及び複数機のUAVによるドップラーシフトを用いた位置検出手法の提案
- 円旋回や8の字飛行モデルにおける特性評価やUAVの最適配置検討
⇒理想的な条件下でのシミュレーション評価

➤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が円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3次元位置検出性能の基礎的な評価



ユーザ端末位置検出手法の概要



- UAV受信信号(**直接波**)に含まれる**ドップラースhift** f_d

$$f_d(t) = -\frac{V_x(t)(X(t) - \mathbf{x}) + V_y(t)(Y(t) - \mathbf{y})}{\lambda \sqrt{(X(t) - \mathbf{x})^2 + (Y(t) - \mathbf{y})^2 + (Z - \mathbf{z})^2}}$$

λ : トーン信号の波長[m]

UAV速度ベクトル $V = (V_x(t), V_y(t), 0)$

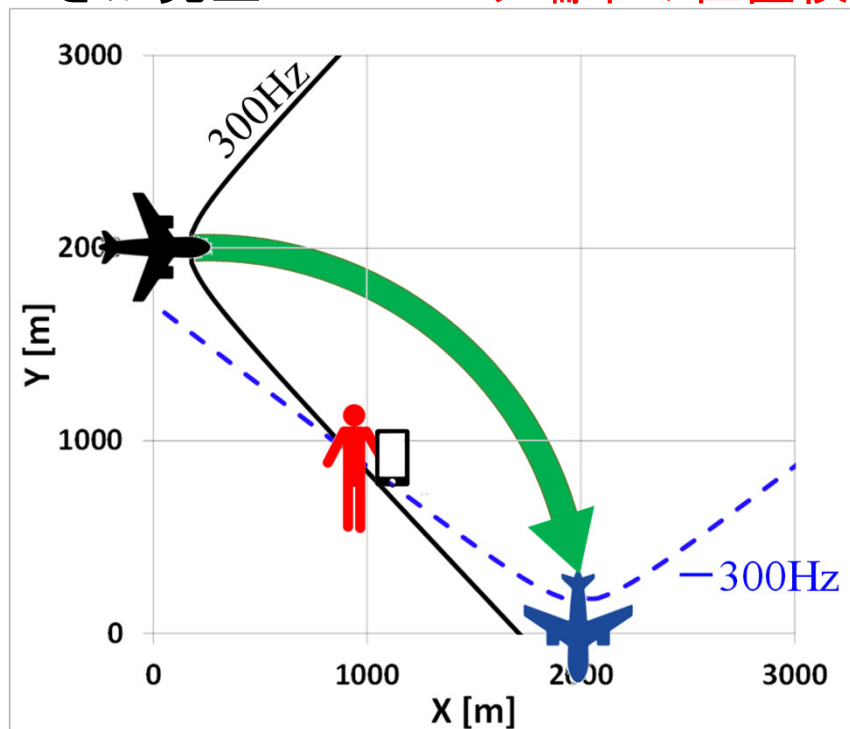
UAV飛行位置 $(X(t), Y(t), Z(t))$

地上端末位置 $(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$

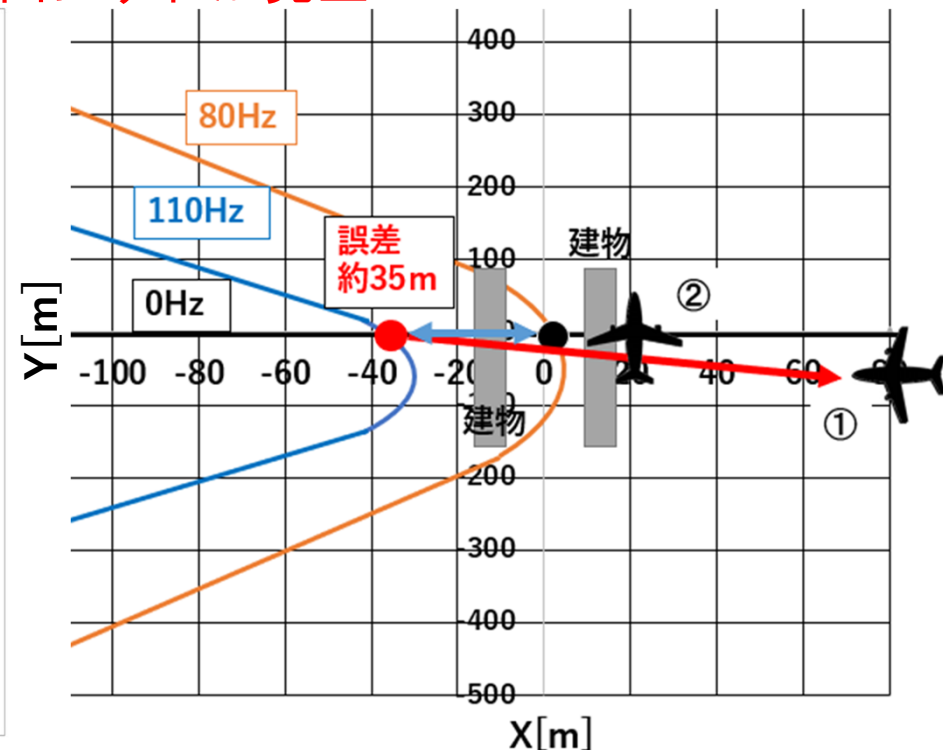
- ドップラースhiftの式から求めた値と観測値を用いて**最小二乗法**により位置検出

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

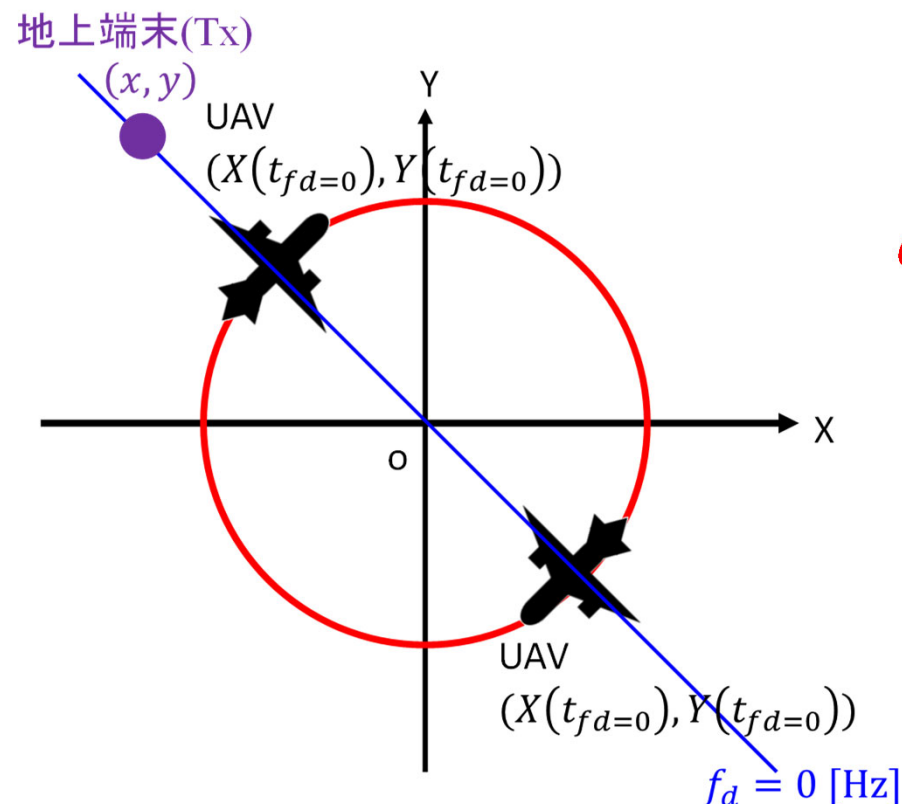
x_i : 各観測地点でUAVにて観測された i 番目の信号に含まれるドップラーシフト量[Hz]

ユーザ端末位置検出手法

位置検出手法

- 円旋回飛行モデルにおいてドップラーシフトが0Hzとなる場合：

UAVの速度ベクトルとUAV位置-地上端末位置のベクトルが直交

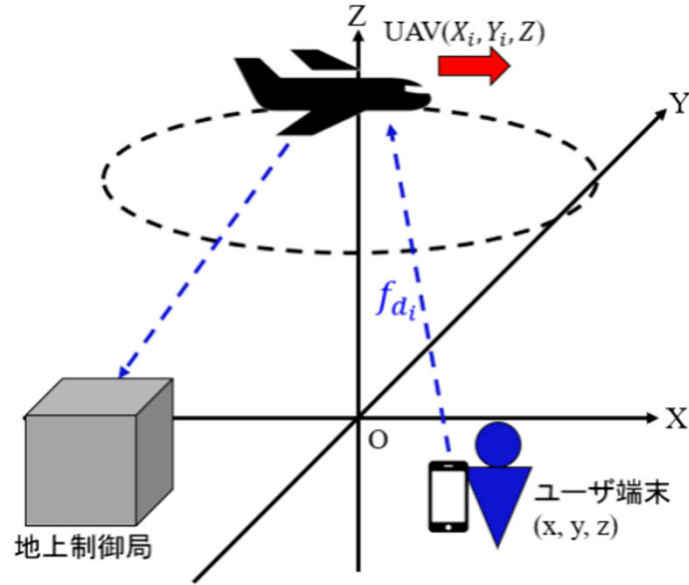


$$y(x) = ax$$

$$a = -\frac{v_x(t_{fd=0})}{v_y(t_{fd=0})} = \frac{Y(t_{fd=0})}{X(t_{fd=0})}$$

- UAVと地上端末(Tx)が同一直線上に位置
- UAVの飛行位置又は速度情報から傾き a を決定可能

3次元位置検出手法



位置検出モデルの概略図

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

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

ただし, f_{d_1} , f_{d_2} はドップラーシフトの観測値

ユーザ端末座標 x, y, z は未知

ドップラー周波数の初期値: $f_{d_{1ini}}$ 及び $f_{d_{2ini}}$

ユーザ端末座標の初期値: x_{ini}, y_{ini} 及び z_{ini}

$\Delta x = x_{next} - x_{ini}$ 及び $\Delta z = z_{next} - z_{ini}$

とし, 以下の計算((3)~(7))を繰り返す,
初期値を10回更新

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

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

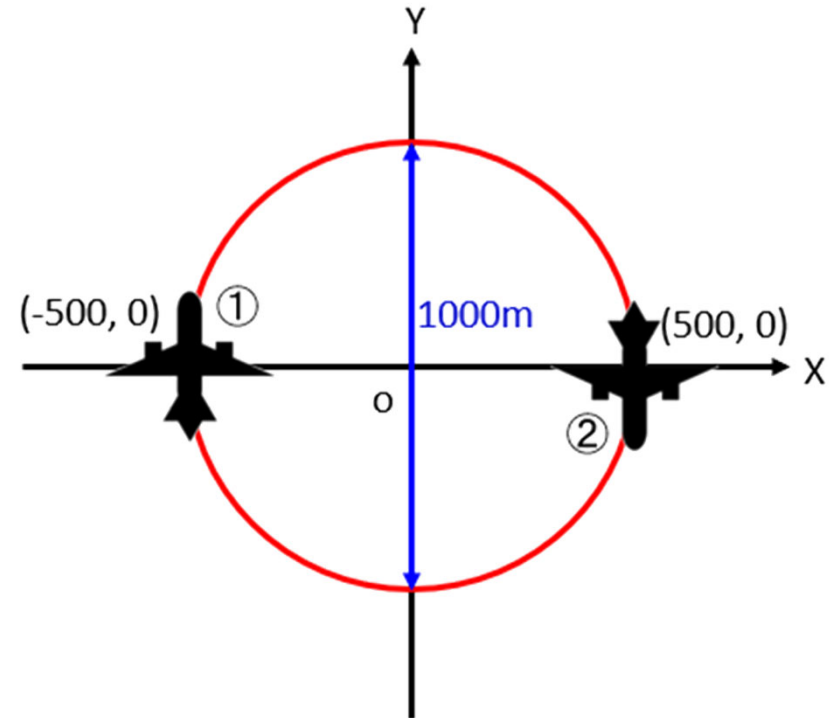
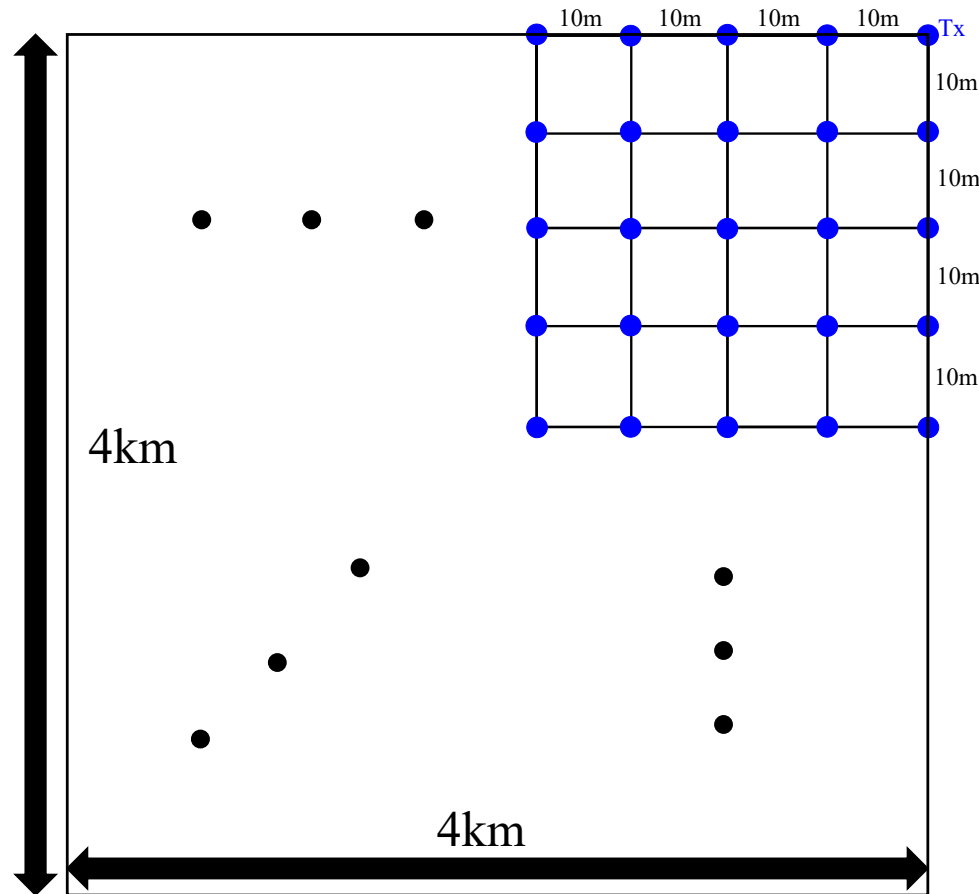
$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{d_1}}{\partial x} & \frac{\partial f_{d_1}}{\partial z} \\ \frac{\partial f_{d_2}}{\partial x} & \frac{\partial f_{d_2}}{\partial z} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} f_{d_1} - f_{d_{1ini}} \\ f_{d_2} - f_{d_{2ini}}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

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

$$x_{ini} = x_{next}, \quad z_{ini} = z_{next} \quad \dots (7)$$

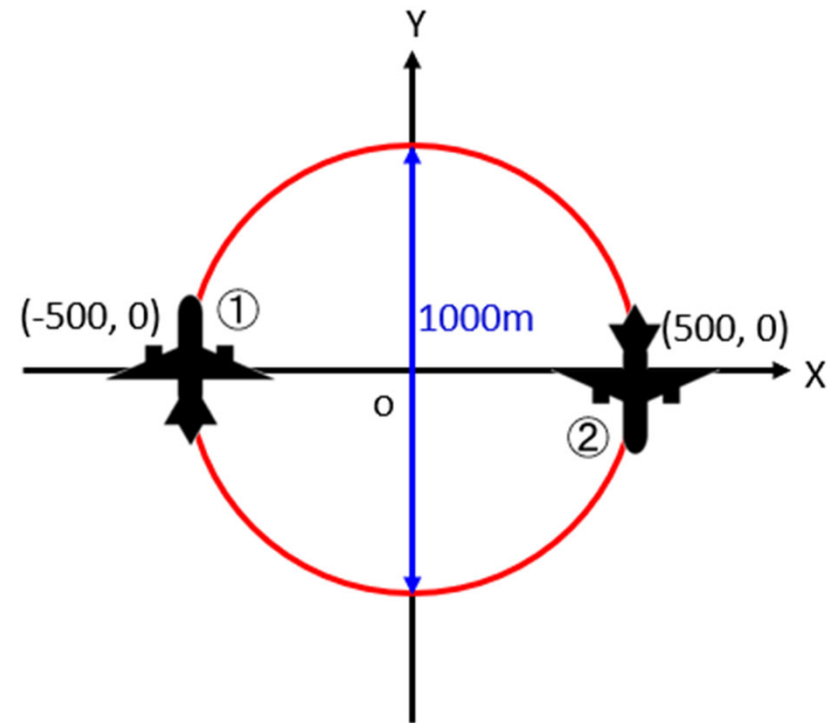
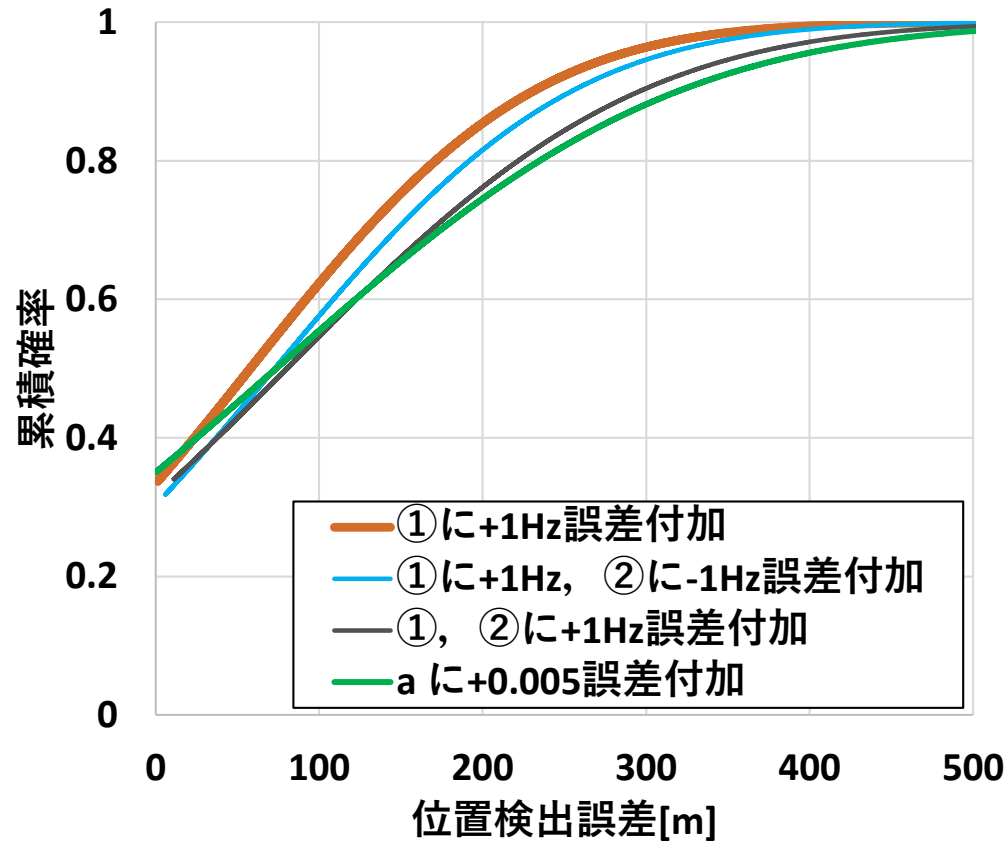
$$y(x) = ax$$

3次元位置検出特性



- 直接波のみ考慮した理想環境下における位置検出特性
- 4km四方を縦横10m間隔で地上端末位置を変化(約16万回)
- 3次元測位：傾き α は可変，その他の2つの観測地点は①，②固定

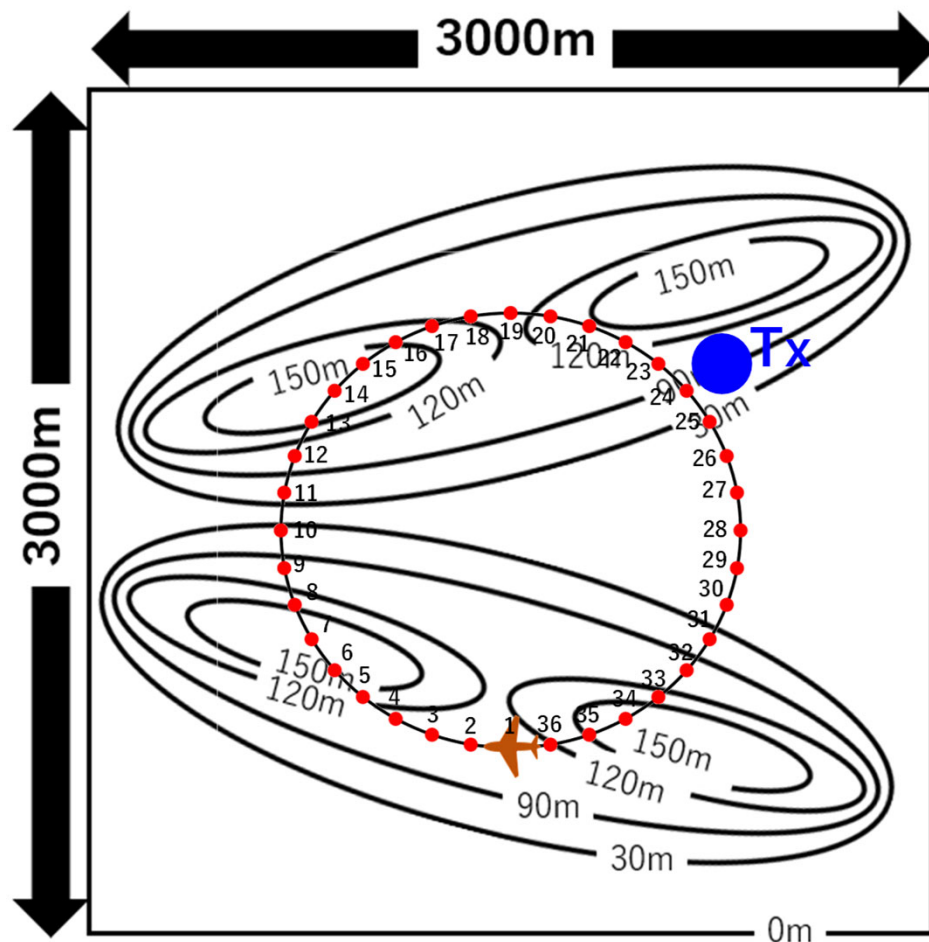
3次元位置検出特性



- 人工的にドップラーシフト観測誤差, 傾き a 誤差を付加
- 80%値 : 171.2m, 192.1m, 221.9m, 235.0m
- 傾き a 誤差を付加した場合に劣化が顕著⇒旋回半径小さいほど困難

シミュレーション条件

シミュレーションモデル (a)



モデル(a)俯瞰図

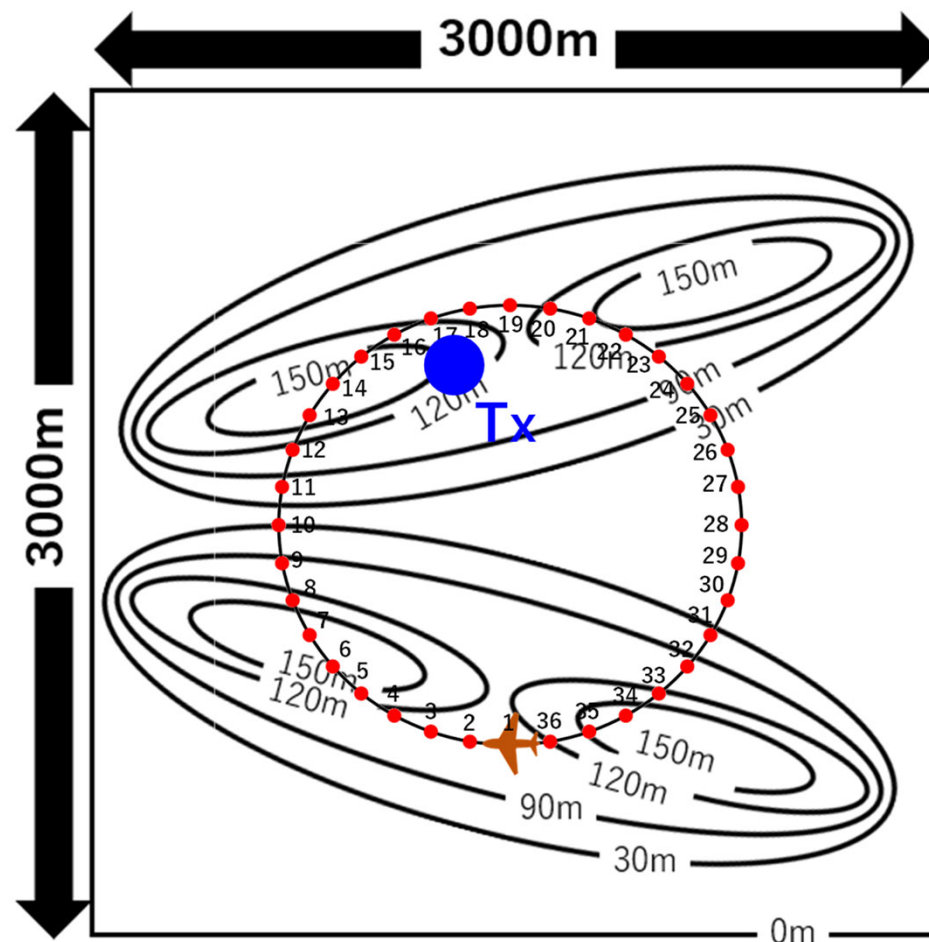
➤送受信点

- 地上端末(Tx)を山の中腹付近に配置(標高100m)
- UAV軌道上を10° 間隔, 36カ所でドップラーシフト量の観測を想定

➤環境モデル

- 対象エリア3km × 3km
- 標高150mの山をハの字型2列に配置

シミュレーションモデル (b)



モデル(b)俯瞰図

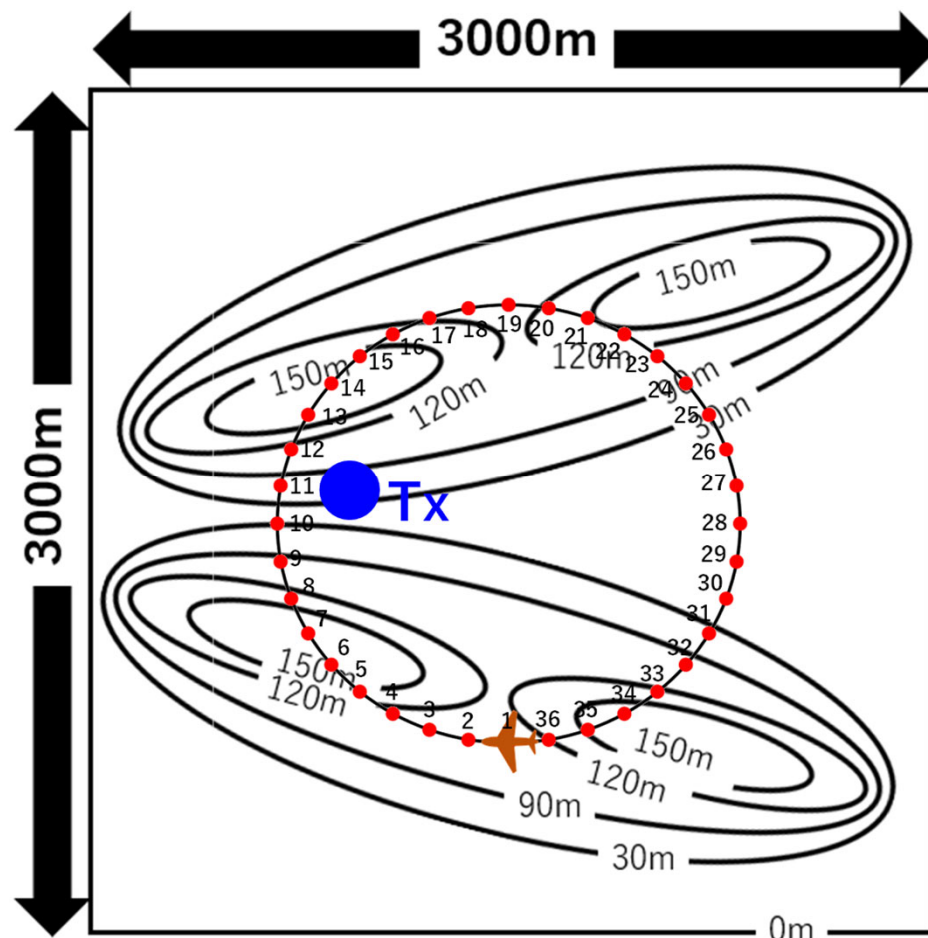
➤送受信点

- 地上端末(Tx)を山頂付近に配置(標高120m)
- UAV軌道上を 10° 間隔, 36地点でドップラーシフト量の観測を想定

➤環境モデル

- 対象エリア3km×3km
- 標高150mの山をハの字型2列に配置

シミュレーションモデル (c)



モデル(c)俯瞰図

➤ 送受信点

- 地上端末(Tx)を谷間付近に配置(標高50m)
- UAV軌道上を 10° 間隔, 36地点でドップラーシフト量の観測を想定

➤ 環境モデル

- 対象エリア3km×3km
- 標高150mの山をハの字型2列に配置

シミュレーション条件

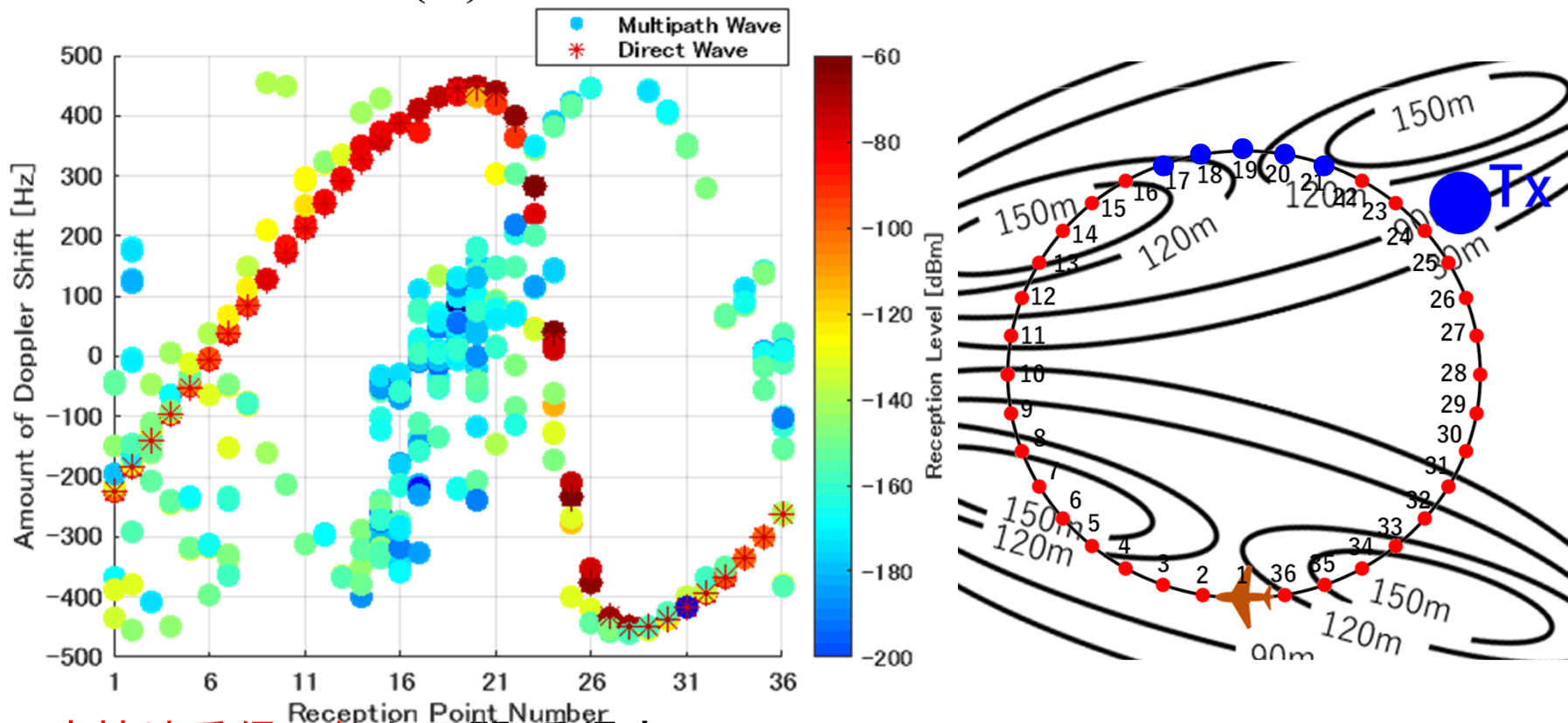
パラメータ	設定値
送信電力	1W
搬送波周波数	5GHz
UAV(受信機)の高度	200m
UAVの旋回半径	500m
UAVの速度	100km/h

マルチパス波の条件	モデルa, b, c
反射回数	0～2回
回折回数	0～1回
透過回数	0回



シミュレーション結果

モデル(a)のドップラーシフト分布



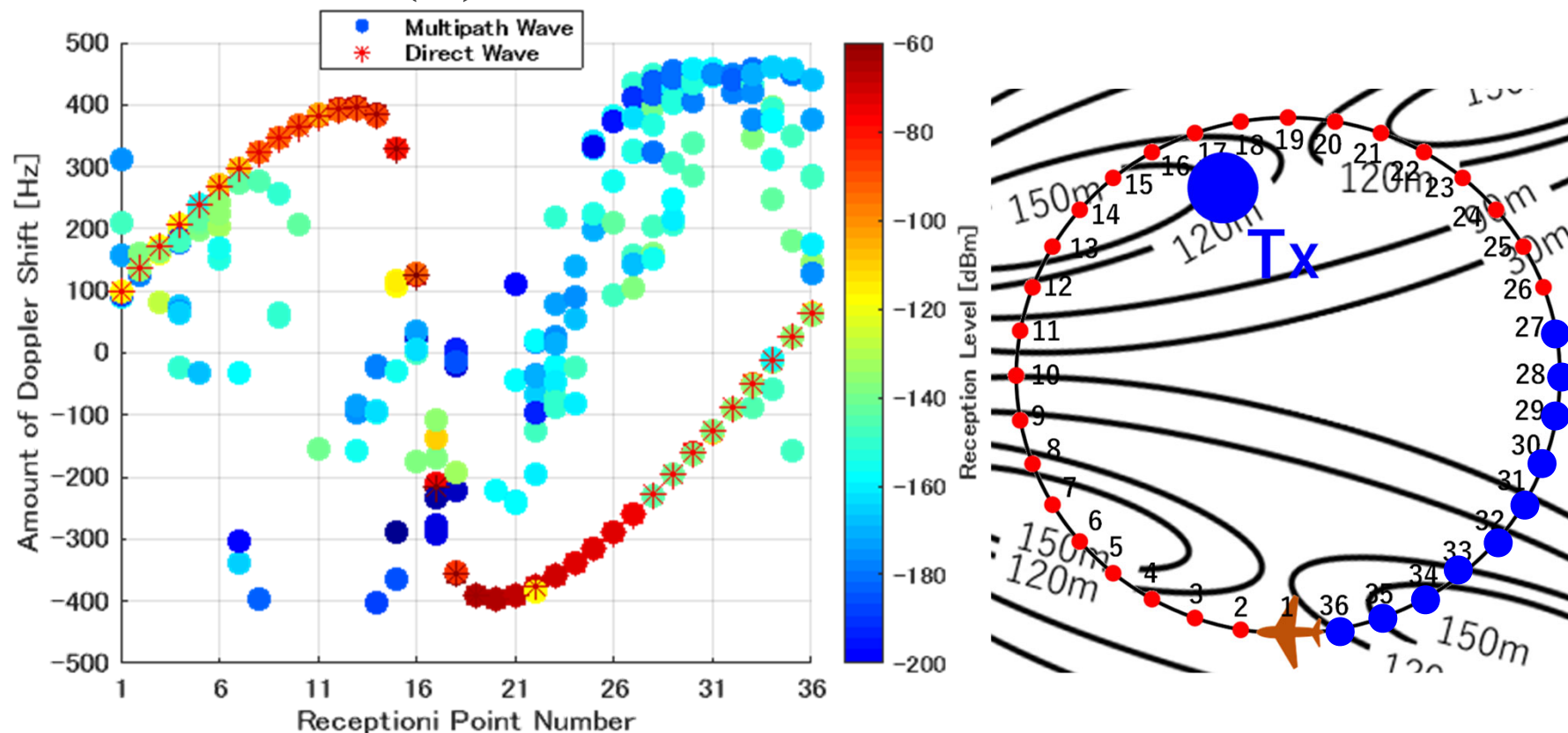
➤ 直接波受信可能な区間(受信点1~36) :

- 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以下)傾向

➤ 受信点17~21 :

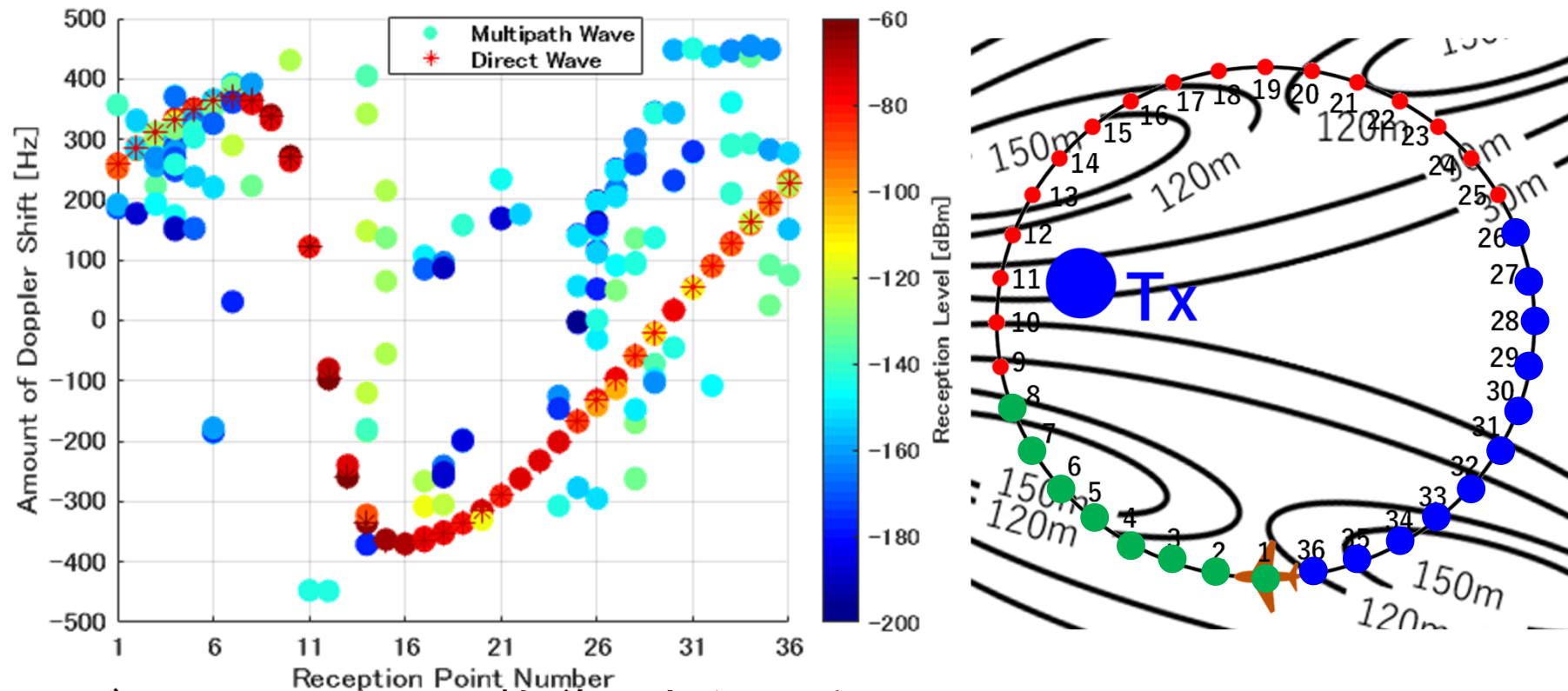
- 山の斜面に反射→UAV進行方向に対して横方向からの到来する伝搬経路が増加

モデル(b)のドップラーシフト分布



- モデル(a)よりも直接波の**最大ドップラーシフト**が50Hz程度**小**
 - **地上端末**がUAV旋回円の**内側**に存在→必ずUAV速度方向と視線方向が重ならない
- 受信点**27~36**
 - Tx下側の山の斜面に反射→**UAVの前方**からマルチパス波が到来 ₂₂

モデル(c)のドップラーシフト分布

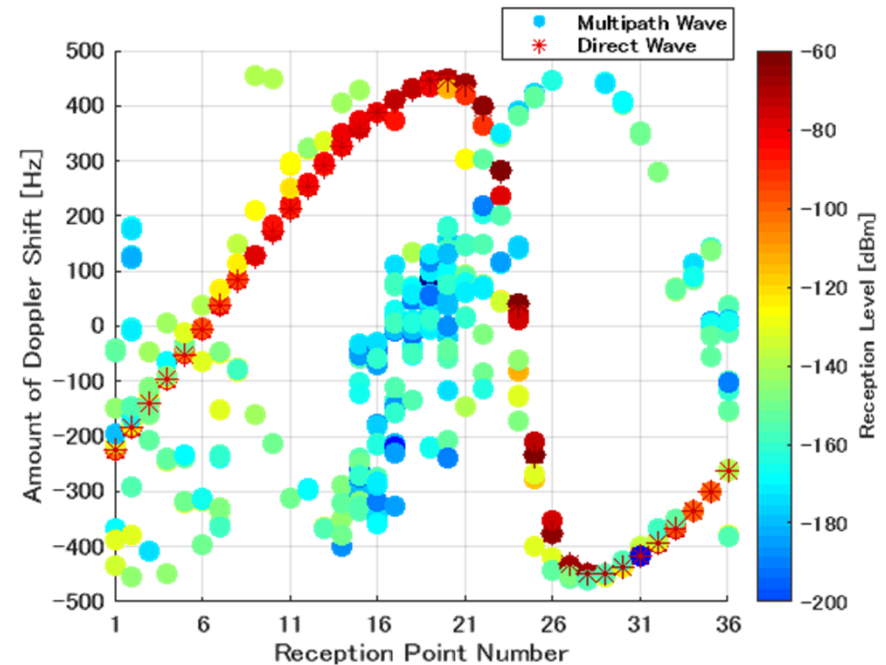


- モデル(b)よりもUAV軌道の中心に近い
→ 直接波の最大ドップラーシフトが小
- 受信点26~36
 - Tx下側の斜面に反射し, UAVの前方からマルチパス波が到来
- 受信点1~8 → Tx上側の斜面に反射し, 視線方向よりUAVの横方向から到来

ドップラーシフト推定結果

➤モデル(a)

UAV受信点 番号	推定誤差 [Hz]	直接波 [Hz]	UAV受信点 番号	推定誤差 [Hz]	直接波 [Hz]
1	-0.22	-223.78	19	-0.98	445.49
2	-0.46	-182.53	20	-0.74	450.10
3	-0.23	-139.77	21	0.48	439.43
4	-0.13	-95.86	22	0.24	397.66
5	0.18	-51.17	23	-0.76	283.79
6	0.09	-6.06	24	-1.75	40.12
7	-0.05	39.10	25	1.96	-232.08
8	0.14	83.94	26	1.41	-376.84
9	-0.10	128.10	27	-0.65	-432.35
10	1.13	171.20	28	0.14	-449.14
11	2.32	212.89	29	-0.22	-447.78
12	1.52	252.80	30	0.17	-436.17
13	1.48	290.57	31	-0.28	-417.69
14	4.71	325.79	32	0.05	-394.04
15	4.51	358.08	33	0.18	-366.18
16	0.18	386.95	34	-0.24	-334.76
17	-1.59	411.81	35	0.28	-300.27
18	0.20	431.80	36	0.16	-263.15

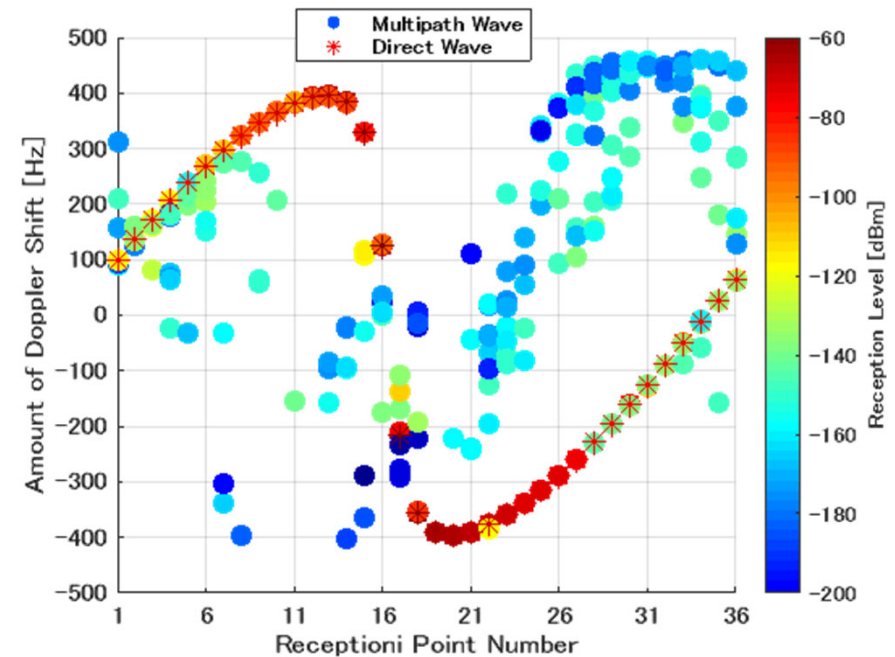


- -100dBm以上かつドップラーシフトのずれを含む信号が存在する受信点で推定誤差の絶対値が1Hz以上

ドップラーシフト推定結果

➤モデル(b)

UAV受信点 番号	推定誤差 [Hz]	直接波 [Hz]	UAV受信点 番号	推定誤差 [Hz]	直接波 [Hz]
1	-0.05	100.05	19	-0.11	-389.89
2	0.42	136.58	20	-0.39	-395.61
3	-0.02	172.02	21	-0.41	-389.59
4	-0.10	206.10	22	0.05	-377.05
5	0.38	238.53	23	-0.06	-359.94
6	-0.05	269.03	24	0.18	-339.18
7	0.68	297.32	25	-0.68	-315.32
8	-0.10	323.10	26	-0.28	-288.72
9	-0.04	346.04	27	-0.29	-259.71
10	0.28	365.72	28	-0.43	-228.57
11	0.48	381.52	29	-0.40	-195.60
12	0.68	392.32	30	0.02	-161.06
13	0.49	395.51	31	0.22	-125.25
14	0.39	383.61	32	-0.55	-88.45
15	0.34	328.65	33	-0.05	-50.95
16	-0.08	124.11	34	0.06	-13.06
17	0.09	-215.03	35	0.06	24.94
18	-0.62	-354.37	36	0.26	62.75

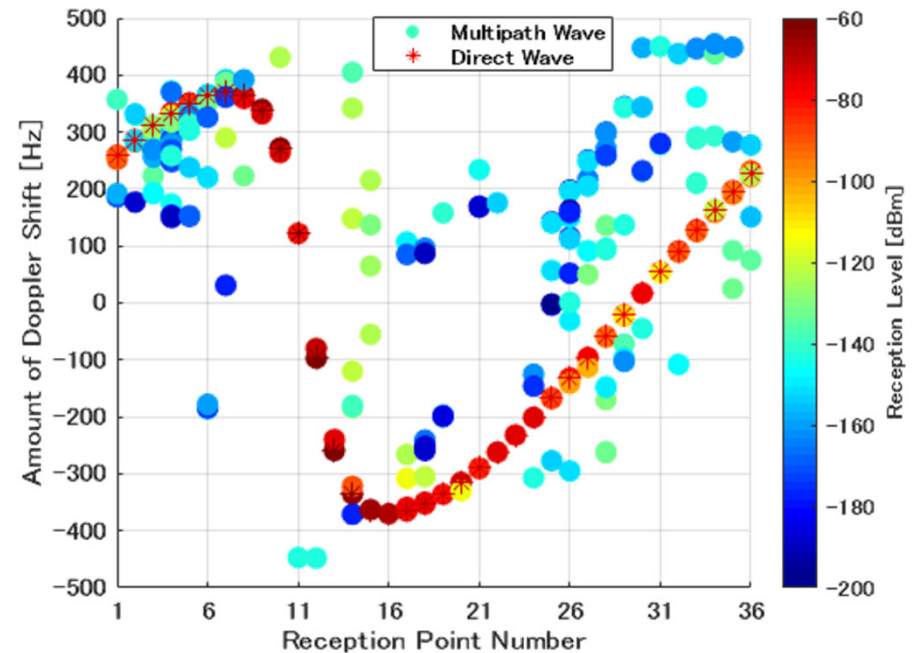


- 全ての受信点において推定精度が**良好**
(**ずれ1Hz以内**)
→ **-100dBm以上の高受信レベルのマルチパス波が存在しないため**

ドップラーシフト推定結果

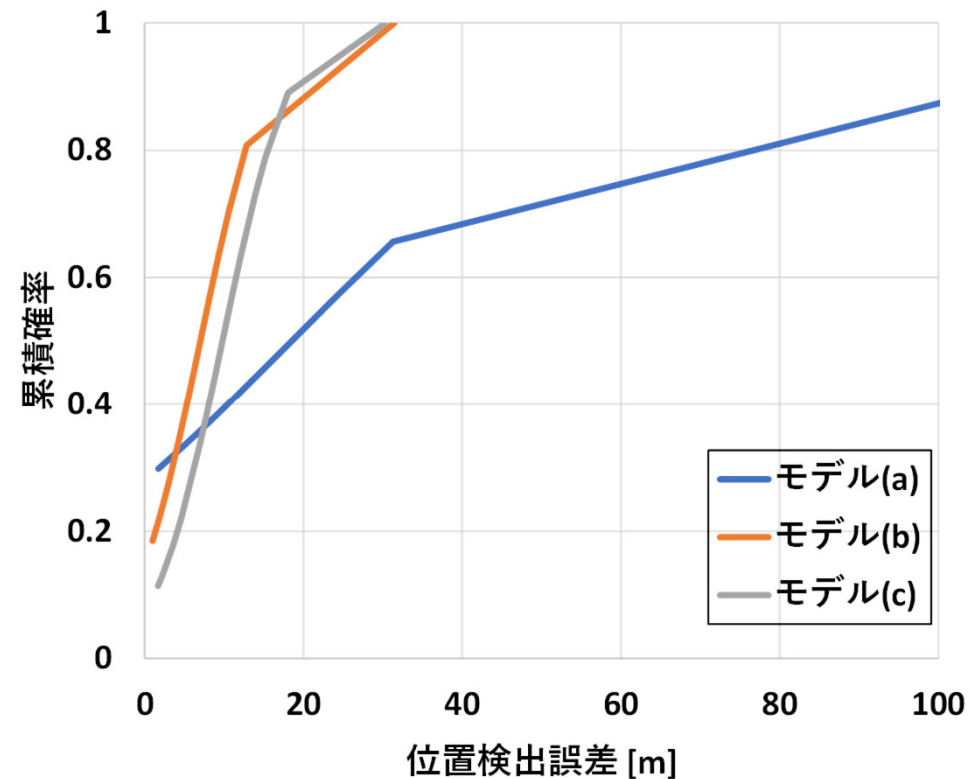
➤モデル(c)

UAV受信点 番号	推定誤差 [Hz]	直接波 [Hz]	UAV受信点 番号	推定誤差 [Hz]	直接波 [Hz]
1	-0.02	258.78	19	-0.37	-335.63
2	0.42	286.55	20	-0.69	-314.31
3	0.30	311.55	21	-0.44	-289.66
4	0.52	333.30	22	0.20	-262.20
5	-0.22	351.12	23	0.33	-232.33
6	-0.08	363.94	24	-0.61	-200.40
7	-0.11	369.81	25	-0.32	-166.73
8	-0.20	364.73	26	-0.90	-131.66
9	-0.17	339.47	27	-0.56	-95.48
10	-0.18	271.73	28	-0.51	-58.50
11	0.52	121.48	29	0.03	-21.04
12	1.73	-97.22	30	0.41	16.59
13	1.06	-259.04	31	-0.11	54.08
14	-0.65	-334.30	32	-0.17	91.13
15	0.07	-363.06	33	0.52	127.42
16	-0.11	-369.89	34	0.31	162.64
17	1.04	-365.05	35	0.41	196.49
18	0.60	-352.93	36	0.27	228.64



- 受信点12, 13, 17において推定精度劣化
→ 高受信レベルのマルチパス波の存在
と受信信号数が少ない(10波以下)

位置検出結果



位置検出回数36回, モデル(a) のみ発散2回, 傾き a は真値を使用

➤ 3次元位置検出性能

- 80%値 : (a)76.5m , (b) 12.7m, (c)15.6m

⇒ ドップラーシフト推定誤差の絶対値の合計

(a)29.9Hz, (b)9.8Hz, (c)15.1Hz

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を対象としたレイトレーシ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、位置検出性能の基礎的な評価
- 地上端末がUAV旋回円の内側に存在する場合に位置検出性能が良好

➤今後の課題

- 位置検出におけるマルチパス信号利用の検討
- 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

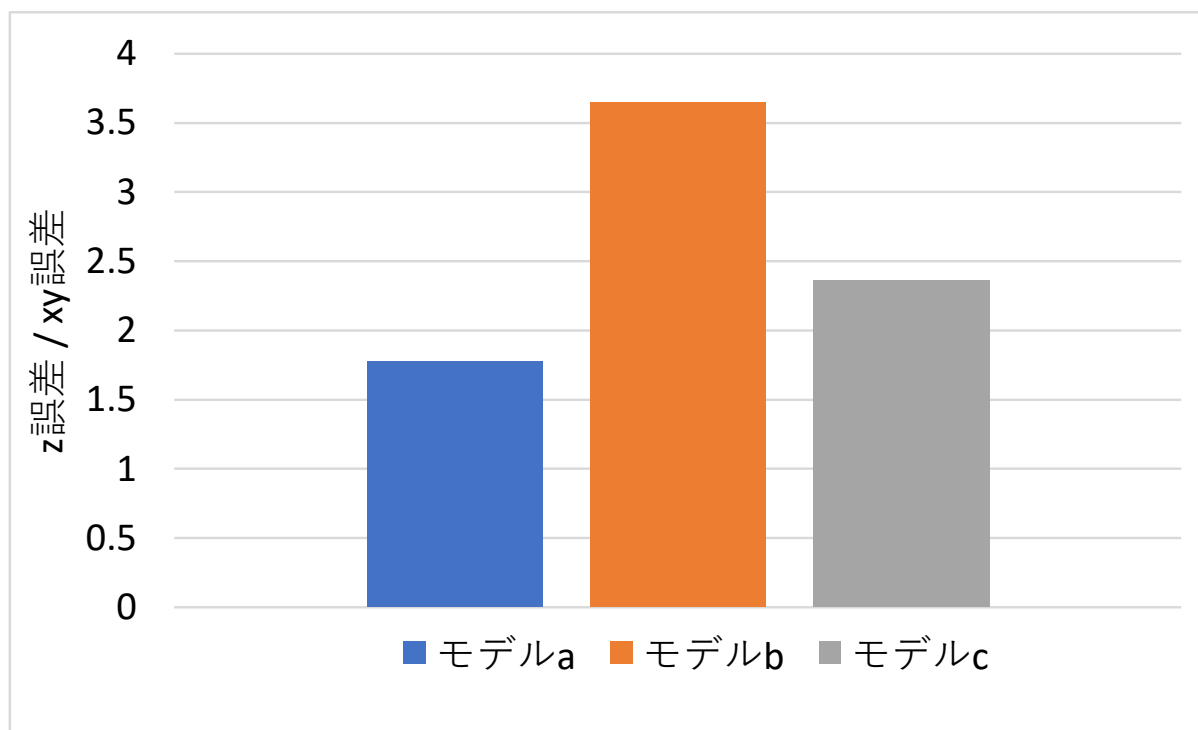
謝辞

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。

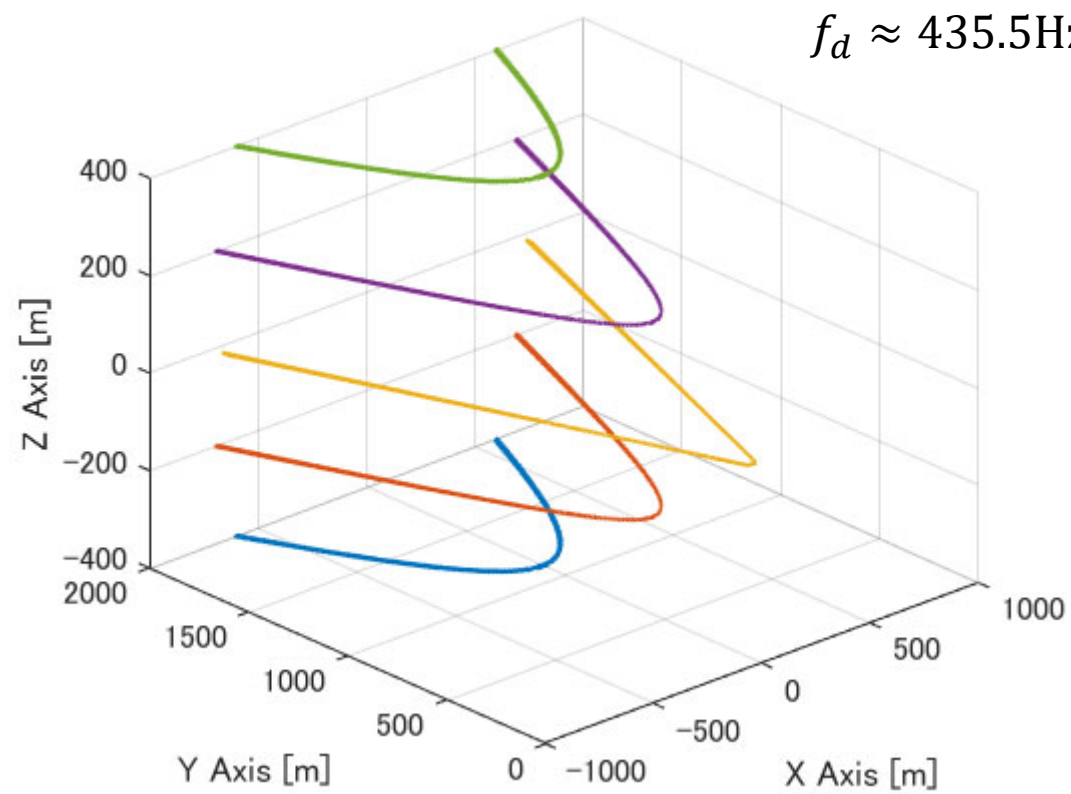
ご清聴ありがとうございました。

補足資料

地表上の誤差と高さ方向誤差の比の平均



高度差によるドップラーシフト分布変化



位置検出手法

- 円旋回飛行モデルにおいてドップラーシフトが0Hzとなる場合：

UAVの速度ベクトルとUAV位置-地上端末位置のベクトルが直交

$$y(x, z) = ax - \frac{v_z(t_{fd=0})}{v_y(t_{fd=0})} \{z - Z(t_{fd=0})\}$$

$$a = -\frac{v_x(t_{fd=0})}{v_y(t_{fd=0})} = \frac{Y(t_{fd=0})}{X(t_{fd=0})}$$

