

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

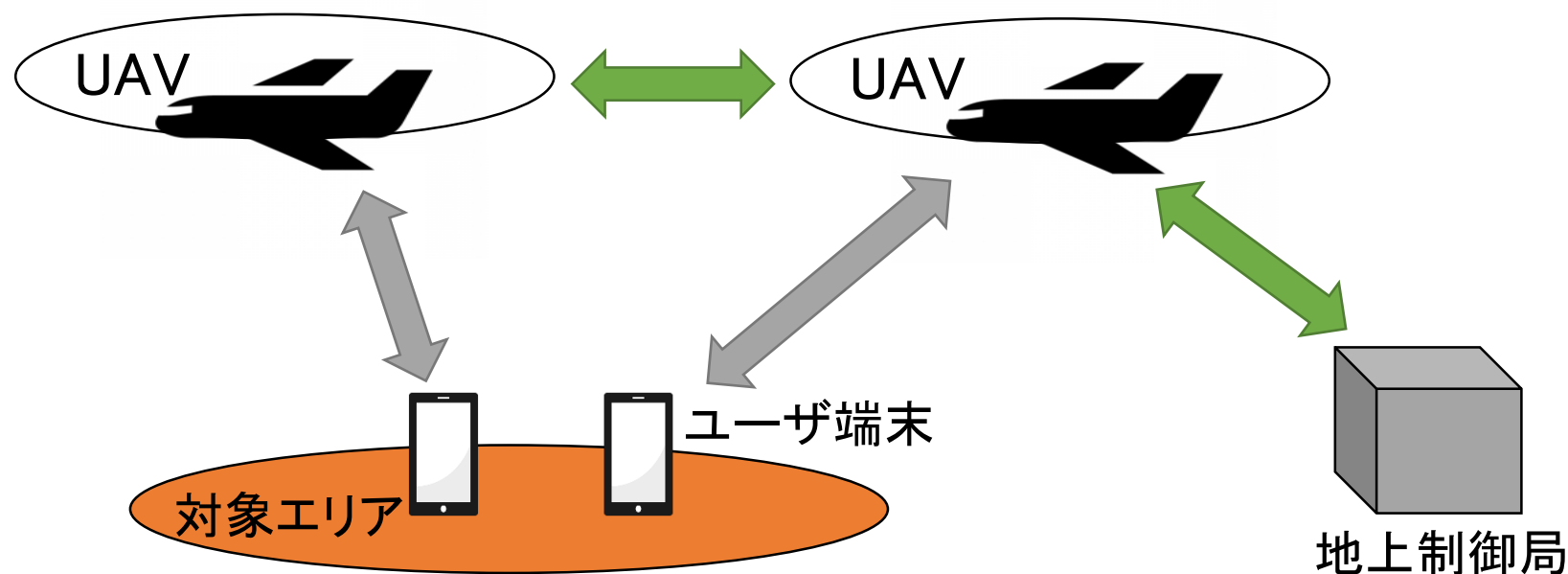
- 背景と目的
- マルチパスによる測位精度への影響
- シミュレーション条件
- ドップラーシフト量の推定手法
- ユーザ端末位置検出手法
- シミュレーション結果
- まとめ

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

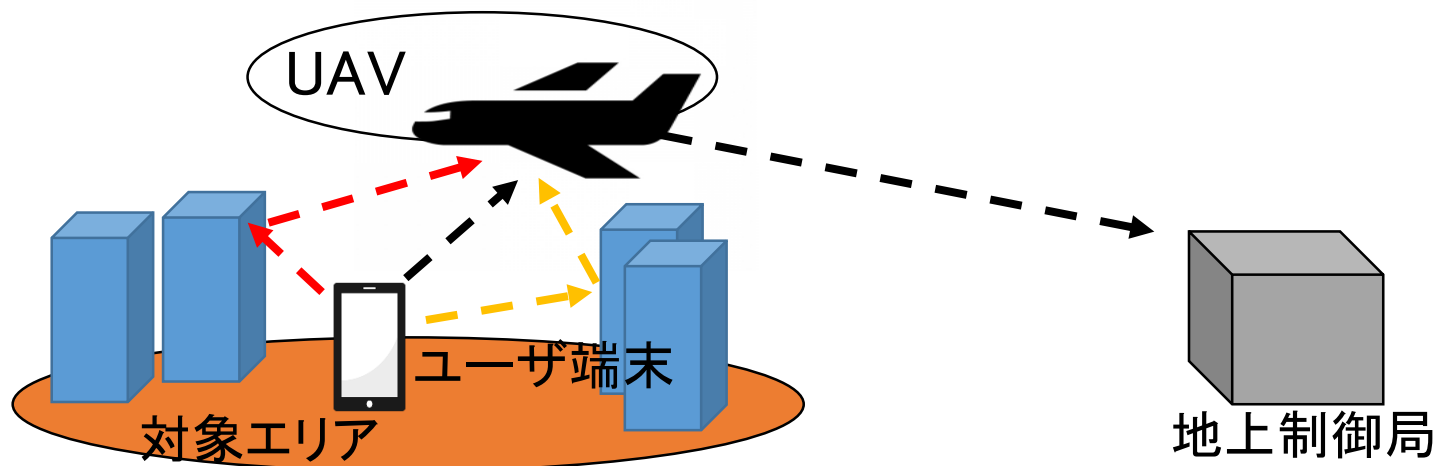
目的

➤ 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

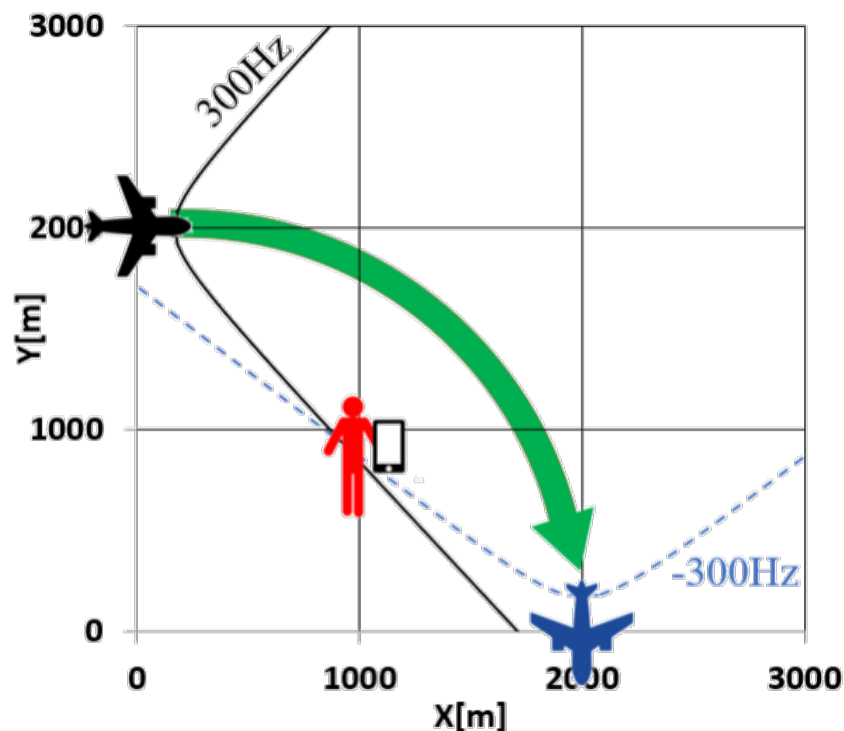
➤ 本研究

- 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**

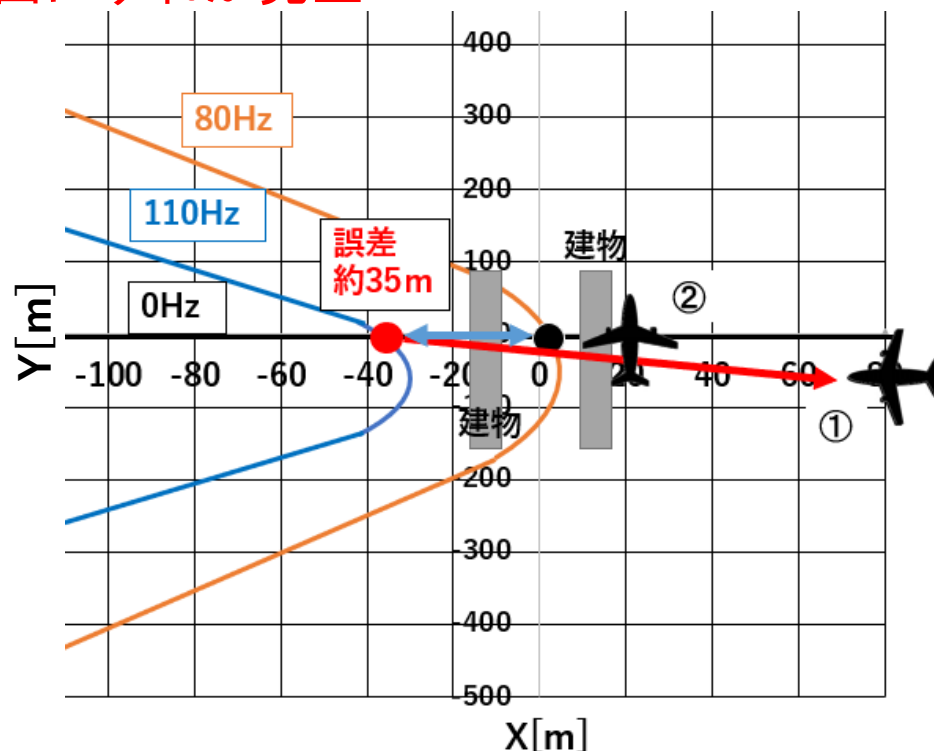


マルチパスによる測位精度への影響

- 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



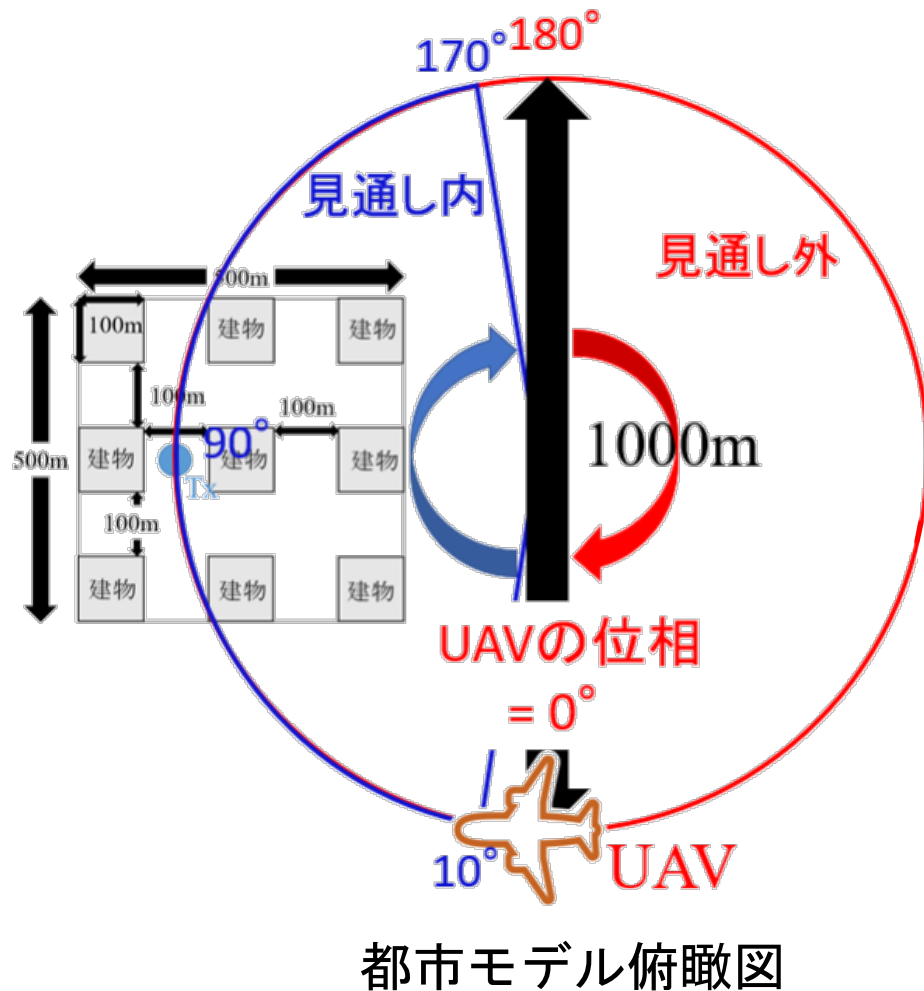
位置検出原理



マルチパス環境下における位置検出 6

シミュレーション条件

シミュレーションモデル図①



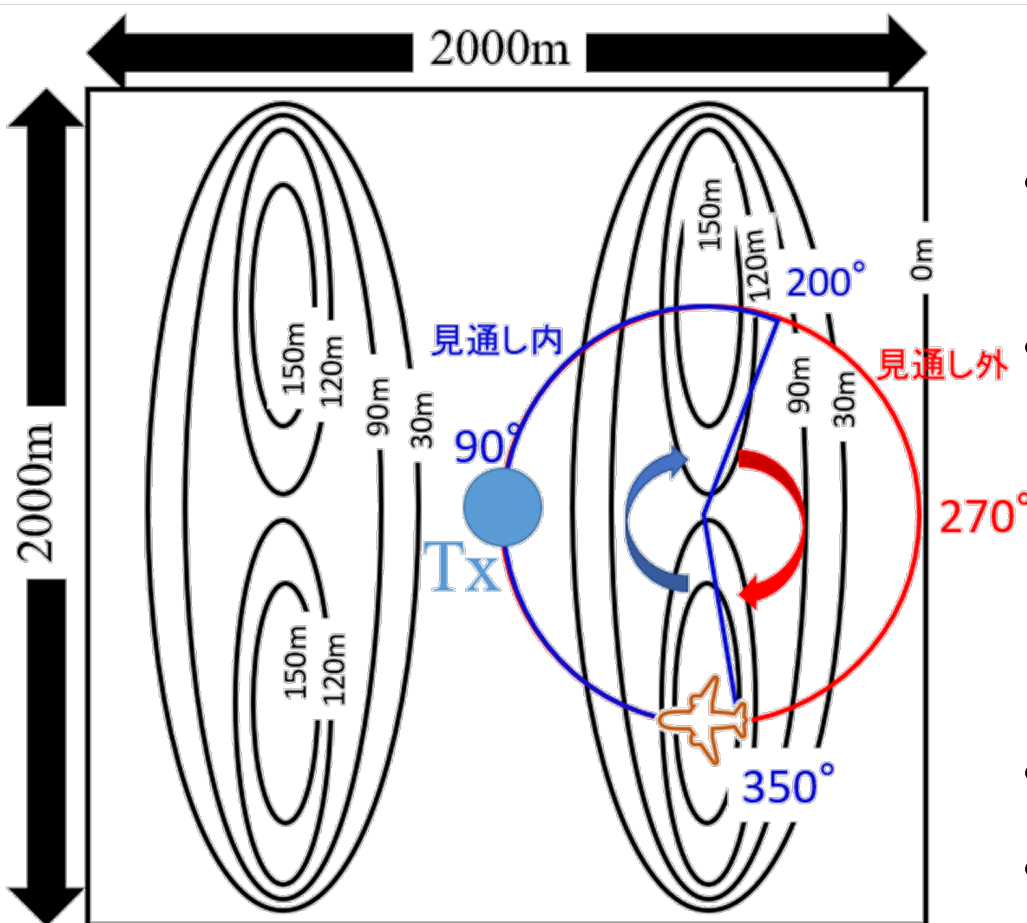
➤送受信点

- 地上端末(Tx)をUAVの位相角 90° の直下に配置
- 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 $500\text{m} \times 500\text{m}$
- 底面 $100\text{m} \times 100\text{m}$ の四角柱型建物を前後左右 100m 間隔に9つ配置

シミュレーションモデル図②



山岳モデル俯瞰図

➤送受信点

- 地上端末(Tx)をUAVの位相角 90° の直下に配置
- 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 $2000\text{m} \times 2000\text{m}$
- 標高 150m の4つの山を2列に配置

シミュレーション条件

パラメータ	設定値
地上端末(送信機)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	都市モデル	山岳モデル
反射回数	0～3回	0～2回
回折回数	0～1回	0～1回
透過回数	0回	0回

ドップラーシフト量の推定手法

ドップラーシフト量の推定手法

- 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

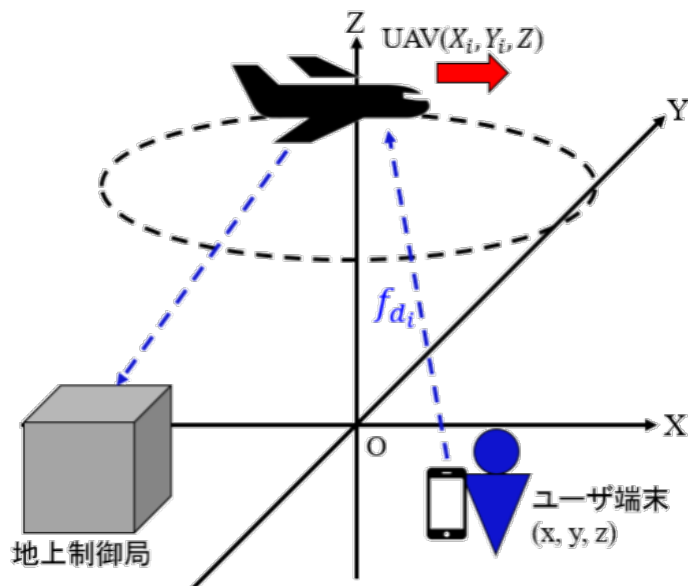
$$\mu_{d_n} = \frac{\sum_i^N w_i x_i}{\sum_i^N w_i}$$

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

最小二乗法による位置検出



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} 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

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

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

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

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

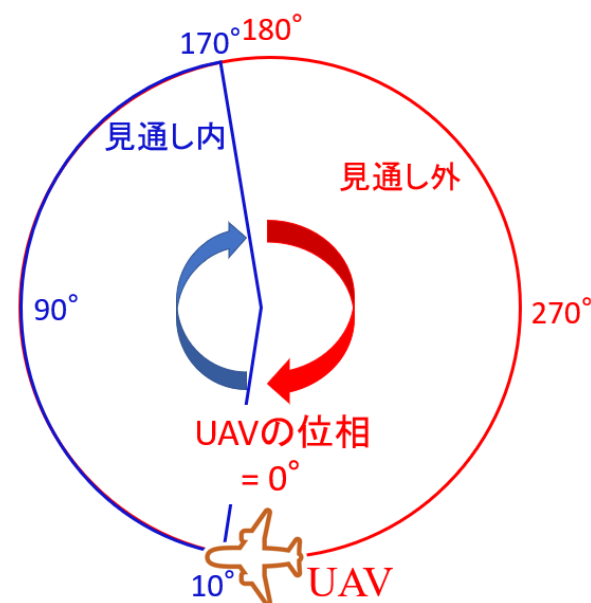
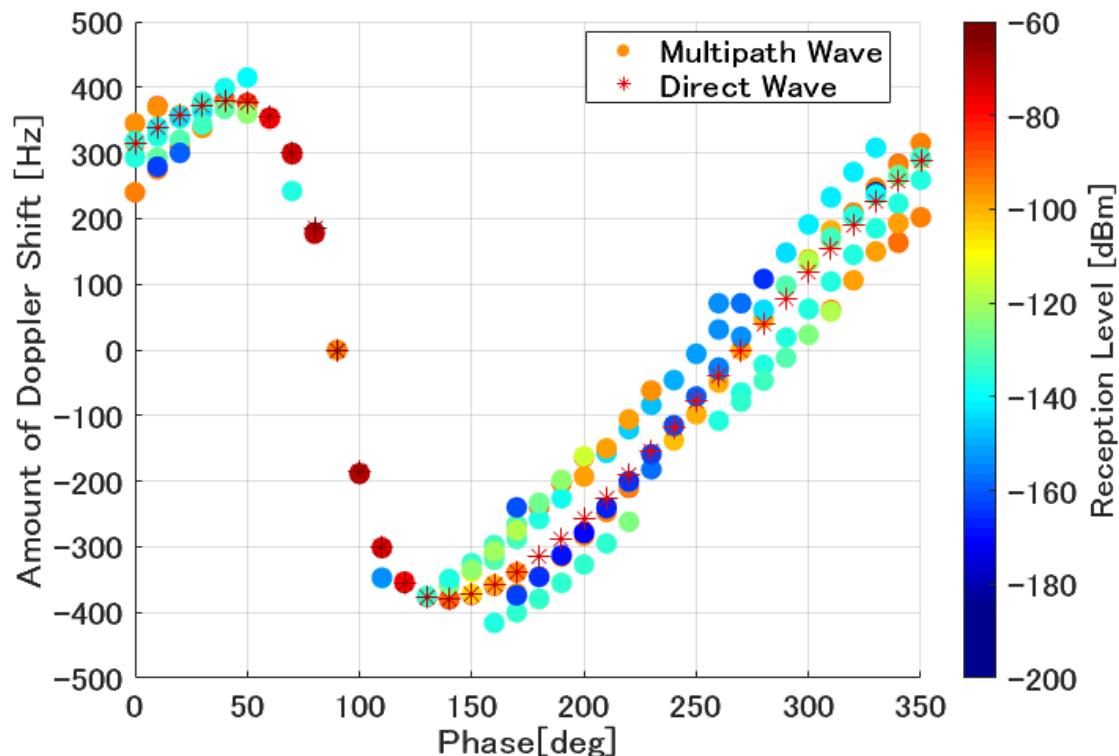
$$x_{ini} = x_{next}, \quad y_{ini} = y_{next} \quad \dots (7)$$

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 は未知

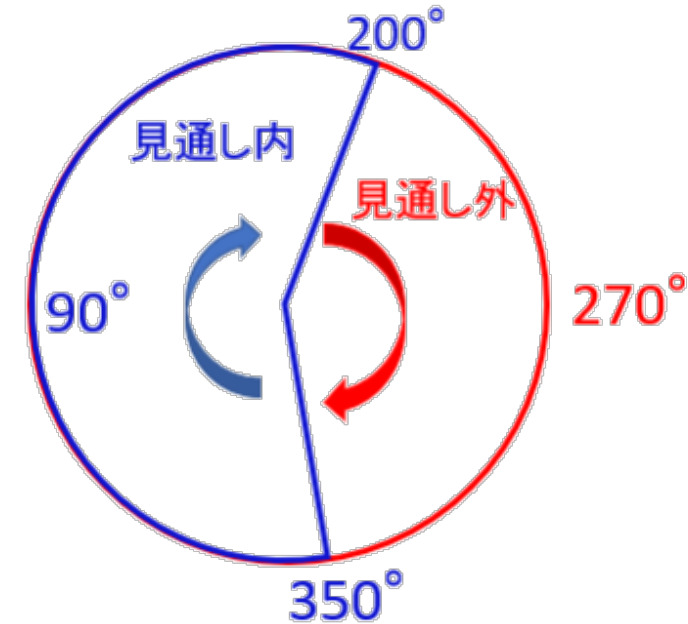
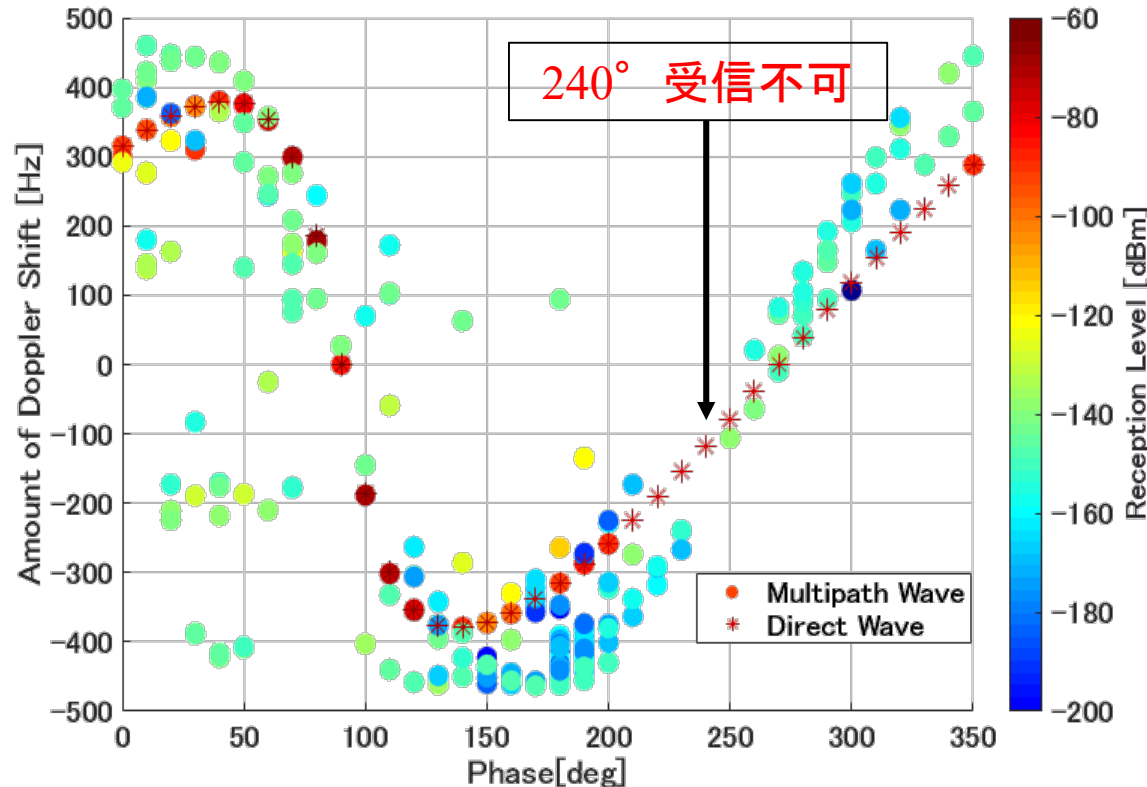
シミュレーション結果

都市モデルのドップラーシフト分布



- 直接波受信可能な区間($10^\circ \sim 170^\circ$) :
 - 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
- 見通し外受信点 (0° 及び $180^\circ \sim 350^\circ$) :
 - 高受信レベル (-100dBm 以上) のずれを含む信号が存在

山岳モデルのドップラーシフト分布

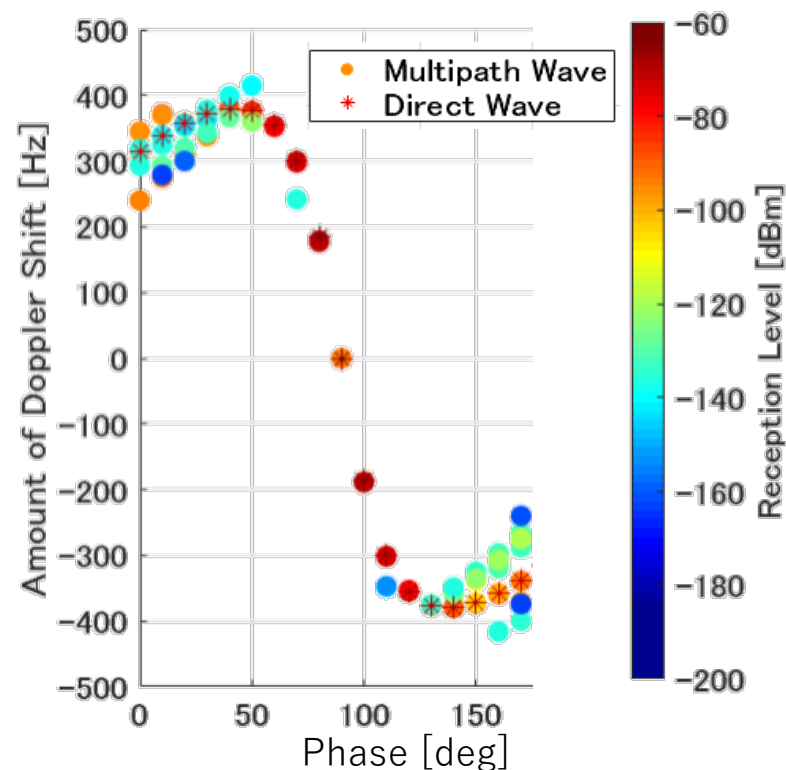


- 直接波を受信可能な区間($0^\circ \sim 200^\circ$ 及び 350°)
 - 障害物の間隔が200m以上のため、**ドップラーシフト観測誤差の大きな信号は受信レベルが低い傾向**
- 見通し外受信点($210^\circ \sim 340^\circ$)
 - 受信レベルのばらつきが小さい

ドップラーシフト推定結果①-1

➤都市モデル

UAV位相角 [°]	単純平均 [Hz]	中央値 [Hz]	加重平均 [Hz]	直接波 [Hz]
0	-12.82	-0.12	-6.77	315.12
10	-19.22	-8.29	-0.01	338.79
20	-22.93	-6.29	-5.32	358.29
30	-13.52	-9.02	-2.58	372.52
40	2.23	-0.11	0.38	379.61
50	7.64	-0.53	-0.05	376.03
60	-1.51	-1.51	-0.63	354.51
70	-19.77	-1.77	0.03	299.77
80	-7.02	-7.02	-6.32	185.02
90	0.00	0.00	0.00	0.00
100	-3.48	-3.48	-3.83	-185.02
110	-24.73	-24.73	-2.13	-299.77
120	0.51	0.51	-0.37	-354.51
130	0.69	1.03	0.05	-376.03
140	17.11	20.61	-0.38	-379.61
150	30.82	34.52	2.81	-372.52
160	25.90	44.29	4.43	-358.29
170	19.96	50.79	-0.07	-338.79

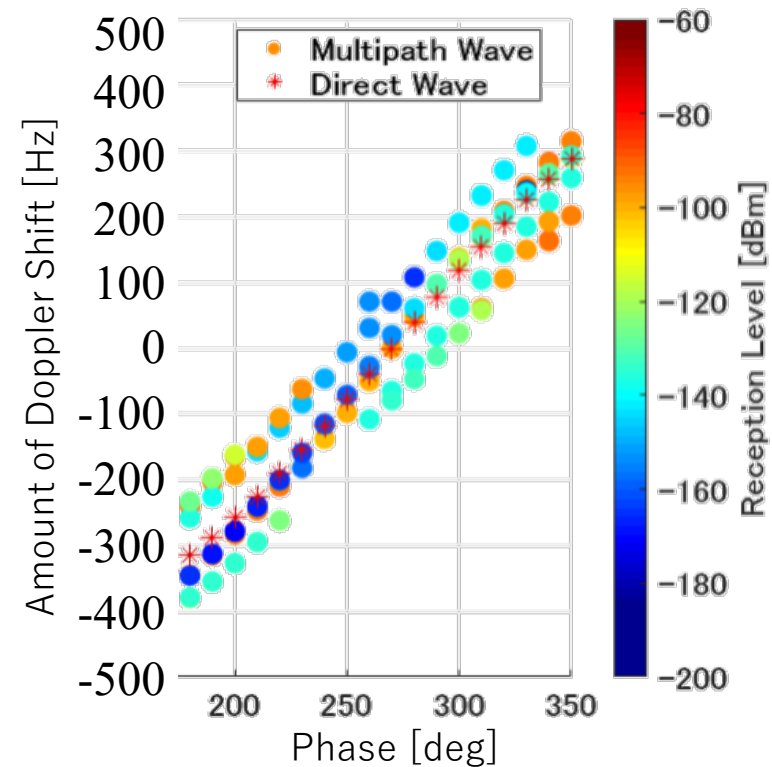


- 0° ~170° においてほぼ全てが**見通し内受信点**
- 90° 地点の推定精度が**最も良好**
- 0° ~50° 及び140° ~170° では真値に対してドップラーシフト量の分布に**偏りがあるため推定誤差が増加しやすい**

ドップラーシフト推定結果①-2

➤都市モデル

UAV位相角 [°]	単純平均 [Hz]	中央値 [Hz]	加重平均 [Hz]	直接波 [Hz]
180	14.87	13.62	11.11	-315.12
190	19.69	18.53	22.35	-288.03
200	23.16	22.54	37.55	-258.04
210	3.94	-14.90	2.00	-225.60
220	15.10	-8.90	8.46	-191.10
230	26.46	-4.09	56.14	-154.91
240	17.53	1.86	-20.64	-117.36
250	28.40	7.80	-19.19	-78.80
260	15.35	12.57	-10.55	-39.57
270	-3.37	10.00	-0.15	0.00
280	4.85	20.43	8.27	39.57
290	4.87	18.20	18.01	78.80
300	6.87	17.64	20.51	117.36
310	-4.47	15.09	-45.90	154.91
320	0.54	12.40	-9.07	191.10
330	3.46	10.40	-1.99	225.60
340	-26.12	-14.54	-37.38	258.04
350	-16.03	2.97	-22.53	288.03

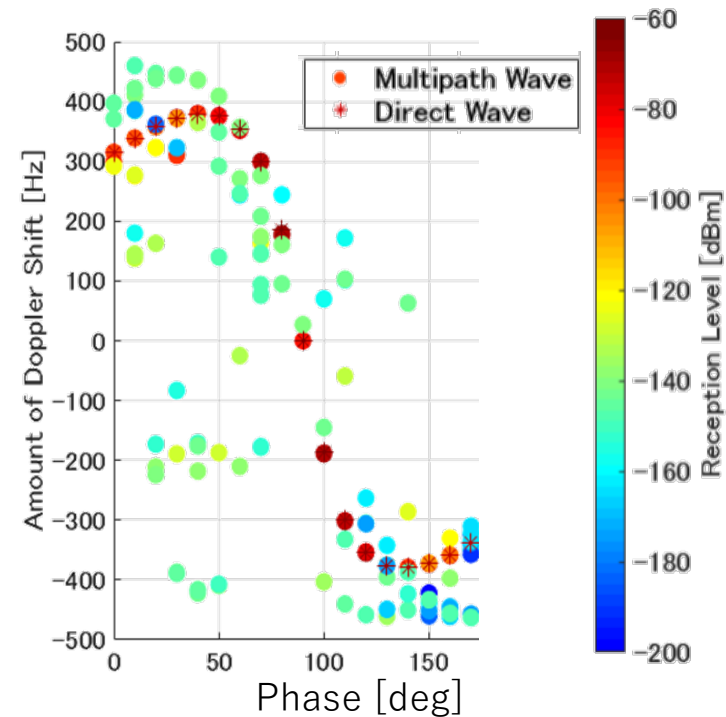


- 180° ~350° は**全て見通し外受信点**
- 180° ~260° 及び340° ~350° の区間は真値に対してドップラーシフト量の分布が偏っているため**推定精度が劣化しやすい**
- 100dBm程度の高レベルなドップラーシフトのずれを含む信号がほとんどの受信点で観測

ドップラーシフト推定結果②-1

➤山岳モデル

UAV位相角 [°]	単純平均 [Hz]	中央値 [Hz]	加重平均 [Hz]	直接波 [Hz]
0	49.13	81.88	-0.57	315.12
10	-51.39	-61.79	0.13	338.79
20	-220.19	-195.29	-0.29	358.29
30	-319.62	-455.52	-1.65	372.52
40	-443.08	-555.61	0.38	379.61
50	-283.39	-27.03	-0.05	376.03
60	-105.79	-83.51	-0.63	354.51
70	-158.39	-153.77	0.03	299.77
80	-25.27	-24.02	-6.32	185.02
90	15.43	27.00	0.00	0.00
100	54.19	18.52	-3.83	-185.02
110	201.43	240.77	-2.13	-299.77
120	21.20	48.51	-0.37	-354.51
130	-6.15	0.03	0.05	-376.03
140	1.55	-43.39	-0.38	-379.61
150	-61.98	-62.98	-0.48	-372.52
160	-76.88	-97.71	-0.71	-358.29
170	-44.60	-11.21	-0.21	-338.79

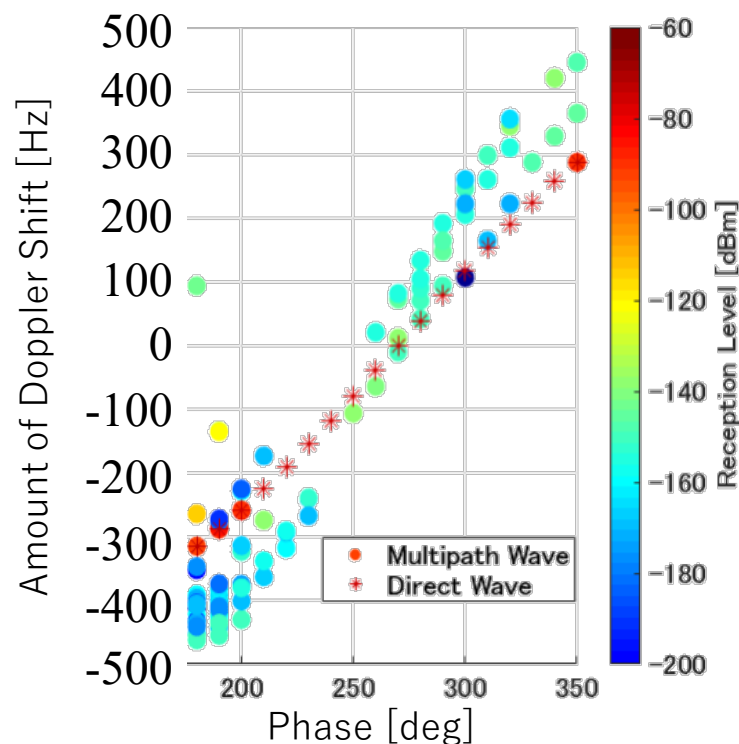


- 0° ~170° の区間では全てが見通し内受信点
- マルチパス波の受信レベルは直接波よりも20dBm以上小さいが、直接波よりも圧倒的に波数が多いため推定精度に影響
- 直接波に対するドップラーシフト分布のばらつきが都市モデルよりも激しいため、単純平均や中央値による推定は困難

ドップラーシフト推定結果②-2

➤山岳モデル

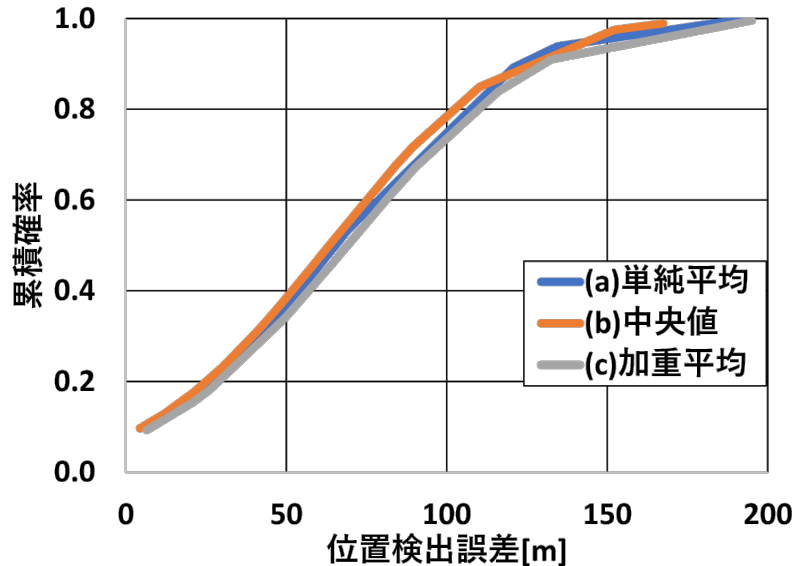
UAV位相角 [°]	単純平均 [Hz]	中央値 [Hz]	加重平均 [Hz]	直接波 [Hz]
180	-70.79	-102.38	0.13	-315.12
190	-80.84	-121.97	0.21	-288.03
200	-83.90	-120.96	-0.92	-258.04
210	-96.13	-112.40	-85.85	-225.60
220	-106.81	-100.40	-101.11	-191.10
230	-88.38	-84.09	-84.12	-154.91
240				-117.36
250	11.36	11.36	11.36	-78.80
260	71.47	99.80	37.14	-39.57
270	89.07	117.57	54.41	0.00
280	71.64	56.50	64.50	39.57
290	90.57	81.43	71.41	78.80
300	136.87	144.20	144.50	117.36
310	124.31	143.64	170.13	154.91
320	149.59	156.09	182.51	191.10
330	96.90	96.90	96.90	225.60
340	114.77	103.40	119.08	258.04
350	99.56	106.96	29.96	288.03



- 210° ~ 340° の区間が**見通し外受信点**
- 210° ~ 230° 及び 270° ~ 340° の区間では受信信号のドップラーシフト分布に偏りがあるため推定精度が劣化しやすい
- 真値に対して正(または負)の一方に分布の偏りが集中する傾向にあるため、加重平均適用時でも推定誤差が増加しやすい

位置検出結果

発表原稿の図7に対応



都市モデル：発散回数(a)4回, (b)4回, (c)2回, 位相差180°, 位置検出回数36回

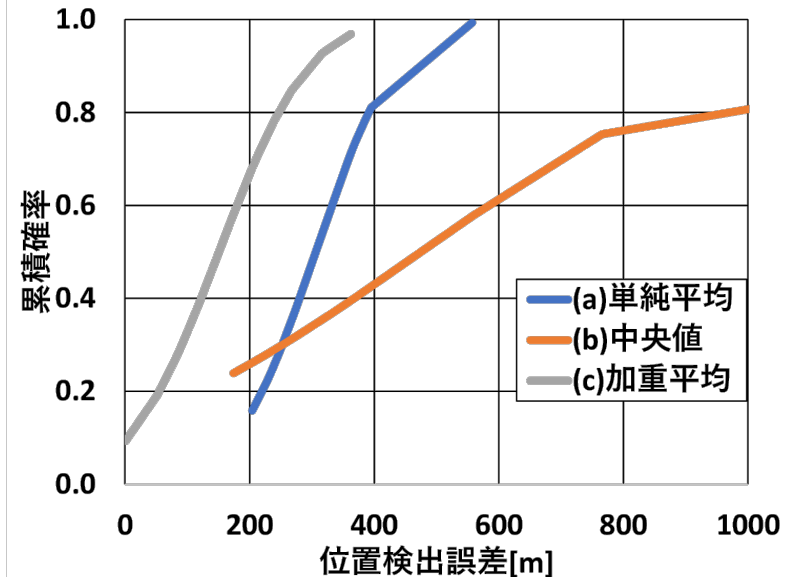
➤ 都市モデル

- 80%値：(a)107m, (b) 103m, (c)110m

➤ 山岳モデル

- 80%値：(a) 390m, (b)970m, (c) 247m

発表原稿の図8に対応



山岳モデル：発散回数(a)14回, (b)8回, (c)2回, 位相差180°, 位置検出回数34回

発表原稿の図7及び 図8の結果に不備があったため、修正のうえ差し替えさせて頂きました。

見通し内環境の位置検出結果

都市モデル(位相差90°，位置検出回数：8回)

推定手法	X座標	Y座標	位置検出誤差[m]	発散回数
①単純平均	-507.5	29.1	30.1	0
	-443.8	10.2	57.1	
	-441.2	-17.5	61.3	
	-431.6	23.8	72.4	
	-451.3	-80.2	93.8	
	-397.8	-129.1	164.7	
	-495.7	196.4	196.4	
	-410.3	183.7	204.4	
②中央値	-500.4	9.3	9.4	0
	-473.1	-8.1	28.1	
	-467.1	-48.4	58.5	
	-455.0	-64.8	78.9	
	-365.3	40.3	140.6	
	-476.8	168.7	170.3	
	-368.5	113.7	173.8	
	-404.9	200.6	222.0	
③加重平均	-498.3	-2.5	3.1	0
	-501.2	4.8	4.9	
	-501.2	-4.8	4.9	
	-503.0	-4.1	5.1	
	-490.3	11.0	14.7	
	-485.1	8.4	17.1	
	-489.9	-14.3	17.5	
	-480.5	-13.7	23.8	

山岳モデル(位相差：110°，位置検出回数：11回)

推定手法	X座標	Y座標	位置検出誤差[m]	発散回数
①単純平均	-882.0	28.9	383.1	9
	-964.2	229.8	517.9	
②中央値	-877.4	-7.2	377.5	8
	-229.3	-430.9	508.9	
	-1558.6	413.6	1136.5	
③加重平均	-499.2	0.4	0.9	0
	-500.9	0.8	1.2	
	-500.6	2.8	2.9	
	-503.4	0.0	3.4	
	-498.1	-3.3	3.8	
	-496.9	-2.8	4.2	
	-503.9	-4.3	5.8	
	-497.9	8.0	8.3	
	-493.1	-6.1	9.2	
	-507.6	-10.4	12.8	
	-500.1	13.3	13.3	

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
- 3つの推定手法のうち、都市モデルでは中央値、山岳モデルでは加重平均でドップラーシフトを推定した場合に位置検出性能が良好
- 見通し内の受信点で位置検出した場合には両モデルともに加重平均が最良
- 見通し内であることが明らかである場合、受信点における最大受信レベルの信号に含まれるドップラーシフトを用いることで位置検出精度を最良とすることが可能

➤ 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

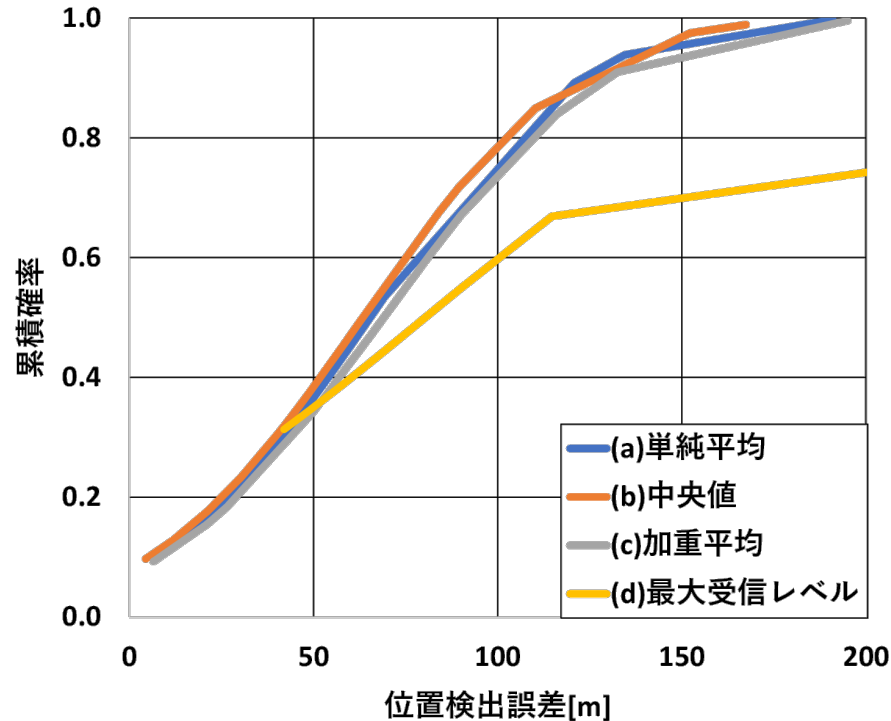
本研究はJSPS科研費
19K04380の助成を受けたものであり、
その支援に深く感謝いたします。

ご清聴ありがとうございました。

補足資料

都市モデル位置検出結果

見通し内受信点の観測値のみを適用した場合



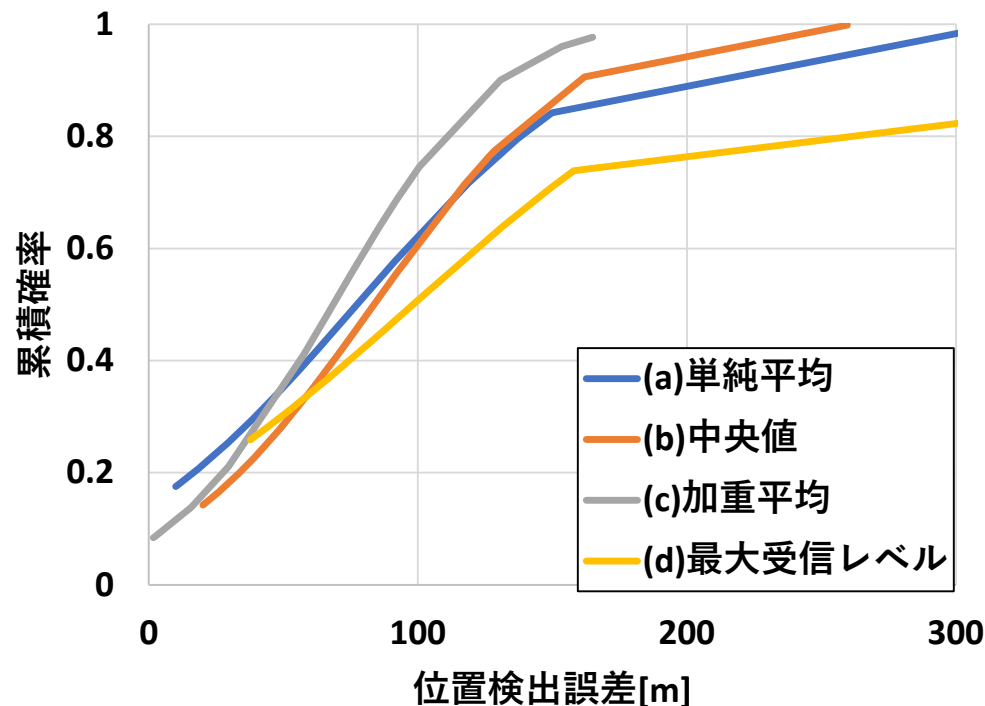
シミュレーション諸元の設定の際、UAVの座標及び、方位角の設定値の粗さから④の誤差が生じたものと考えられる

推定手法	X座標	Y座標	位置検出誤差[m]	発散回数
①単純平均	-507.5	29.1	30.1	0
	-443.8	10.2	57.1	
	-441.2	-17.5	61.3	
	-431.6	23.8	72.4	
	-451.3	-80.2	93.8	
	-397.8	-129.1	164.7	
	-495.7	196.4	196.4	
	-410.3	183.7	204.4	
②中央値	-500.4	9.3	9.4	0
	-473.1	-8.1	28.1	
	-467.1	-48.4	58.5	
	-455.0	-64.8	78.9	
	-365.3	40.3	140.6	
	-476.8	168.7	170.3	
	-368.5	113.7	173.8	
	-404.9	200.6	222.0	
③加重平均	-498.3	-2.5	3.1	0
	-501.2	4.8	4.9	
	-501.2	-4.8	4.9	
	-503.0	-4.1	5.1	
	-490.3	11.0	14.7	
	-485.1	8.4	17.1	
	-489.9	-14.3	17.5	
	-480.5	-13.7	23.8	
④最大受信レベル	-501.2	0.3	1.2	0
	-502.2	-0.9	2.4	
	-498.9	-2.5	2.7	
	-497.4	-3.9	4.7	
	-501.2	-4.6	4.8	
	-501.2	4.6	4.8	
	-502.4	-4.2	4.8	
	-503.3	-4.0	5.2	

ユーザ端末位置(-600, 0)の場合①

見通し内受信点の観測値のみを適用した場合

➤ 都市環境モデル

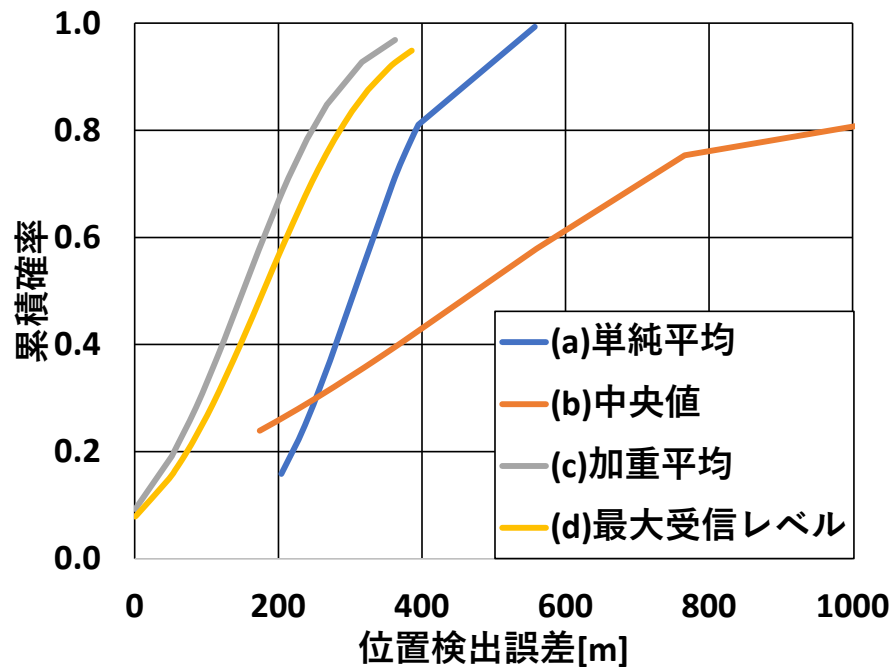


36受信点の観測値を適用した場合

推定手法	X座標	Y座標	位置検出誤差[m]	発散回数
①単純平均	-612.4	7.0	14.2	0
	-580.3	1.9	19.8	
	-563.0	-11.3	38.7	
	-557.4	-4.0	42.8	
	-551.8	-22.2	53.1	
	-546.5	-20.0	57.1	
	-554.1	37.3	59.1	
②中央値	-597.7	2.1	3.1	0
	-597.6	2.3	3.3	
	-605.6	-10.2	11.6	
	-560.7	-26.7	47.5	
	-540.8	-7.2	59.6	
	-536.8	47.3	79.0	
	-506.9	16.6	94.6	
③加重平均	-602.4	-1.7	3.0	0
	-603.2	-0.4	3.2	
	-600.8	-3.8	3.9	
	-596.4	-1.6	4.0	
	-603.9	-1.8	4.3	
	-596.3	2.6	4.6	
	-592.5	-6.6	10.0	
④最大受信レベル	-600.7	-0.5	0.9	0
	-601.6	0.0	1.6	
	-600.0	-2.5	2.5	
	-599.0	-2.5	2.7	
	-599.2	-3.2	3.3	
	-603.4	-1.9	3.9	
	-603.6	-3.1	4.7	

山岳モデル位置検出結果

見通し内受信点の観測値のみを適用した場合



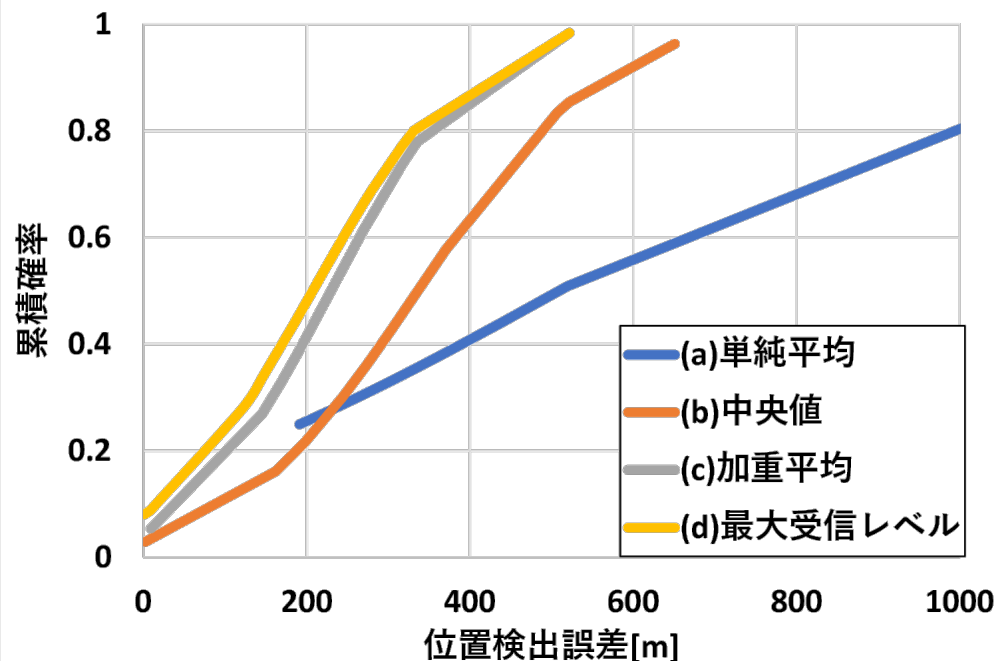
34受信点の観測値を適用した場合

推定手法	X座標	Y座標	位置検出誤差[m]	発散回数
①単純平均	-882.0	28.9	383.1	9
	-964.2	229.8	517.9	
②中央値	-877.4	-7.2	377.5	8
	-229.3	-430.9	508.9	
	-1558.6	413.6	1136.5	
③加重平均	-499.2	0.4	0.9	0
	-500.9	0.8	1.2	
	-500.6	2.8	2.9	
	-503.4	0.0	3.4	
	-498.1	-3.3	3.8	
	-496.9	-2.8	4.2	
	-503.9	-4.3	5.8	
	-497.9	8.0	8.3	
	-493.1	-6.1	9.2	
	-507.6	-10.4	12.8	
	-500.1	13.3	13.3	
④最大受信レベル	-500.9	0.7	1.2	0
	-500.9	-0.7	1.2	
	-498.9	0.8	1.3	
	-500.7	3.0	3.0	
	-503.5	0.0	3.5	
	-498.4	-3.3	3.7	
	-496.8	-2.9	4.3	
	-504.4	-4.2	6.1	
	-495.4	-5.0	6.8	
	-498.0	7.7	8.0	
	-506.8	-9.2	11.5	

ユーザ端末位置(-600, 0)の場合②

見通し内受信点の観測値のみを適用した場合

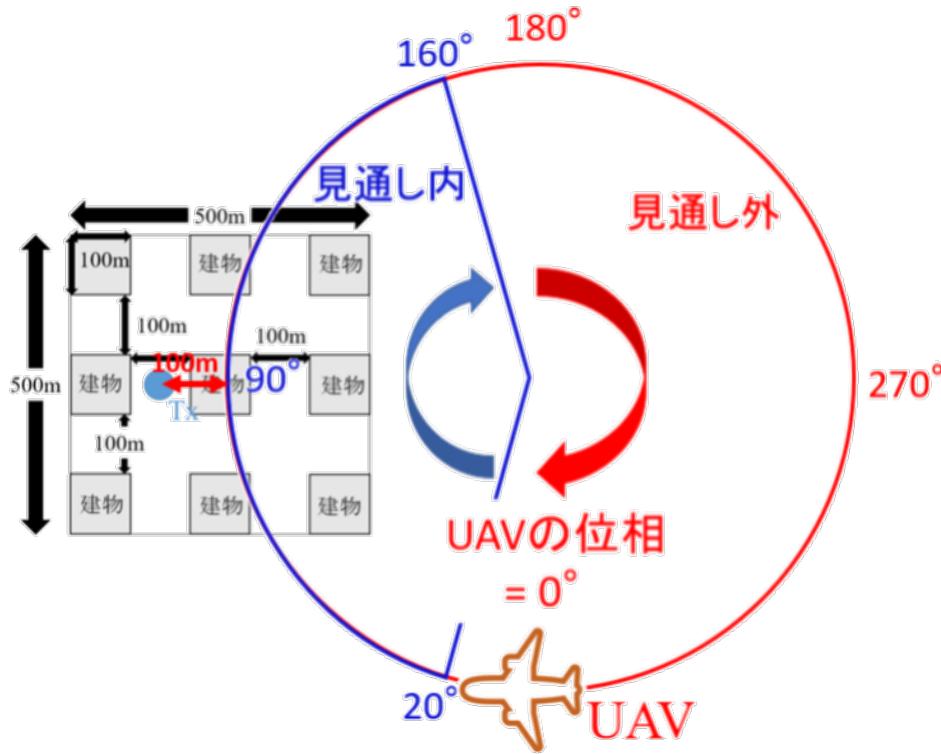
➤ 山岳モデル



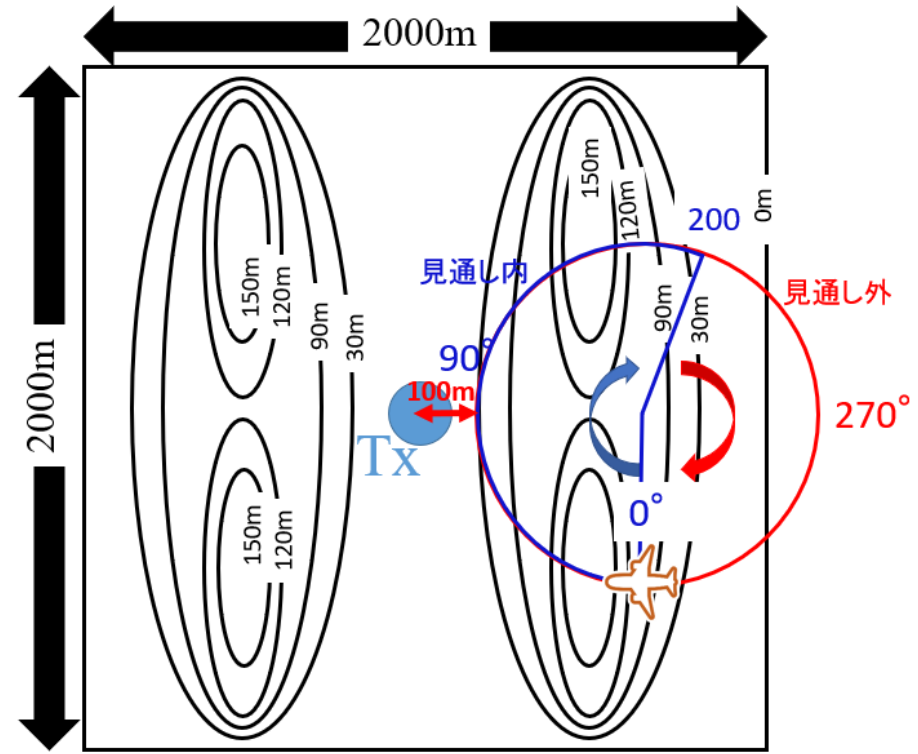
32受信点の観測値を適用した場合

推定手法	X座標	Y座標	位置検出誤差[m]	発散回数
①単純平均	-713.7	-170.7	205.1	3
	-842.4	-18.2	243.1	
	-797.0	-148.6	246.8	
	-863.9	78.3	275.3	
	-890.6	-18.4	291.2	
	-347.9	-361.9	441.0	
	-1492.8	-63.9	895.1	
②中央値	-618.5	130.2	131.5	3
	-722.1	-177.3	215.3	
	-894.3	-69.2	302.3	
	-903.8	-52.3	308.2	
	-1173.3	38.0	574.5	
	-1221.5	-183.6	648.0	
③加重平均	-1579.2	57.0	980.8	0
	-599.5	0.0	0.5	
	-599.0	-2.3	2.5	
	-602.7	-0.7	2.8	
	-602.7	-1.8	3.2	
	-596.8	9.0	9.6	
	-596.5	-9.7	10.3	
	-589.4	-3.4	11.1	
	-584.2	-4.4	16.4	
	-583.2	-10.0	19.5	
④最大受信レベル	-604.8	130.7	130.8	0
	-599.7	0.0	0.3	
	-600.3	-2.0	2.0	
	-598.8	-2.5	2.7	
	-602.7	-0.6	2.7	
	-602.6	-1.6	3.1	
	-599.5	-3.2	3.2	
	-604.6	-3.1	5.5	
	-596.4	-10.0	10.6	
	-596.4	10.0	10.6	
	-601.9	24.2	24.2	

地上端末-UAV位置関係



都市環境モデル



山岳モデル