

無人航空機を用いたユーザ位置検出 システムにおけるドップラーシフト 多重観測を行う周波数オフセット補 償手法の特性評価

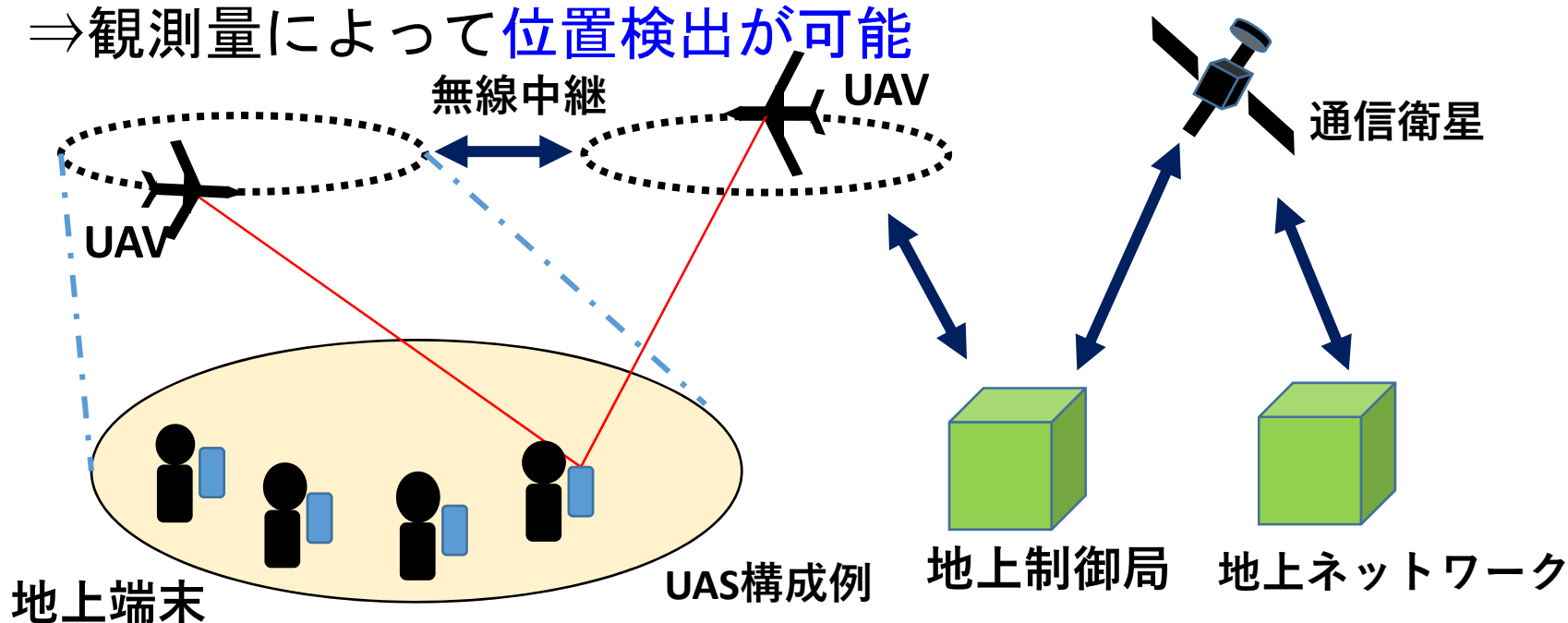
日本大学

○山中英 石川博康

研究背景及び目的

研究の背景

- 大規模災害時に無線通信基地局が機能停止する恐れ
⇒ 一時的に無線ネットワークを提供する必要
- 無人航空機(UAV)を用いた無人航空機システム(UAS)の実用化が期待
- UAV—ユーザ端末間の周波数にドップラーシフトが発生
⇒ 観測量によって位置検出が可能



研究目的

➤ 従来研究

- 最小二乗法によりユーザ位置検出と周波数オフセットの推定・補償を同時に行う位置検出システムの提案及び検証
(2021SAT/RCS研究会, SAT2021-32)
- ドップラーシフトを2回測定した場合の特性評価
⇒位置検出精度のみ定量的に特性評価 (2021信学ソ大, B-3-14)

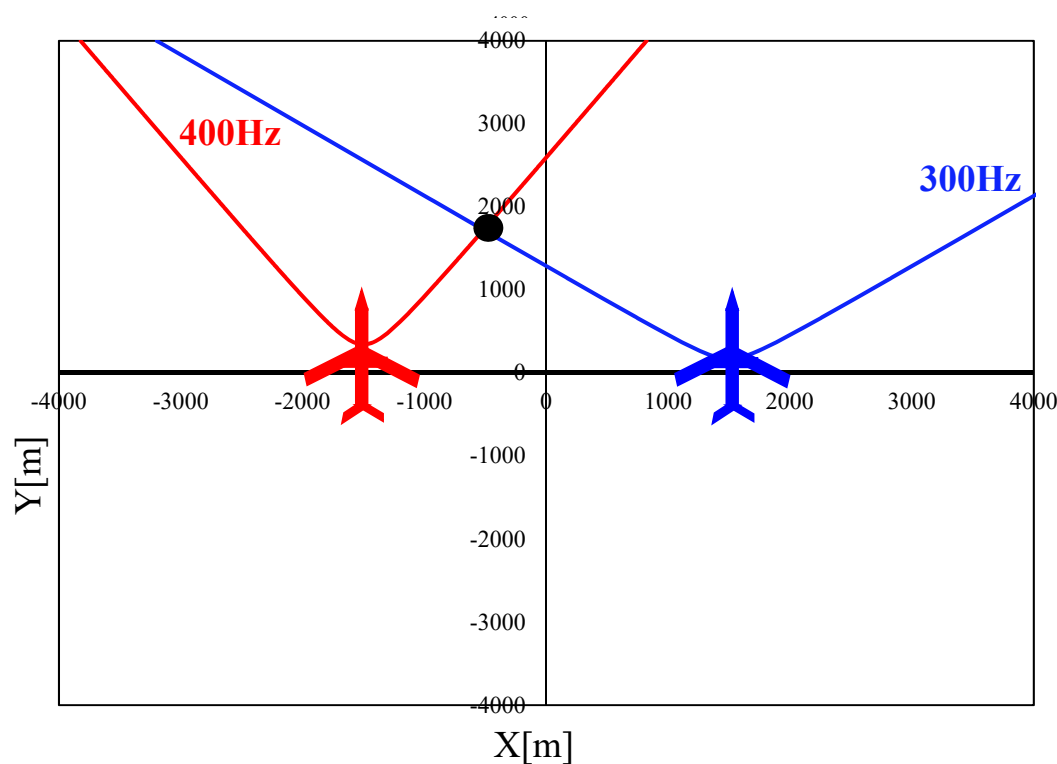
➤ 本研究

- 3機のUAVがドップラーシフトを2回測定した場合の位置検出システム
 - 測定回数1回のみでの測定結果 (従来の飛行モデル) との特性比較
- ↓
- 2回測定における最短の測定時間間隔の検討

測位原理

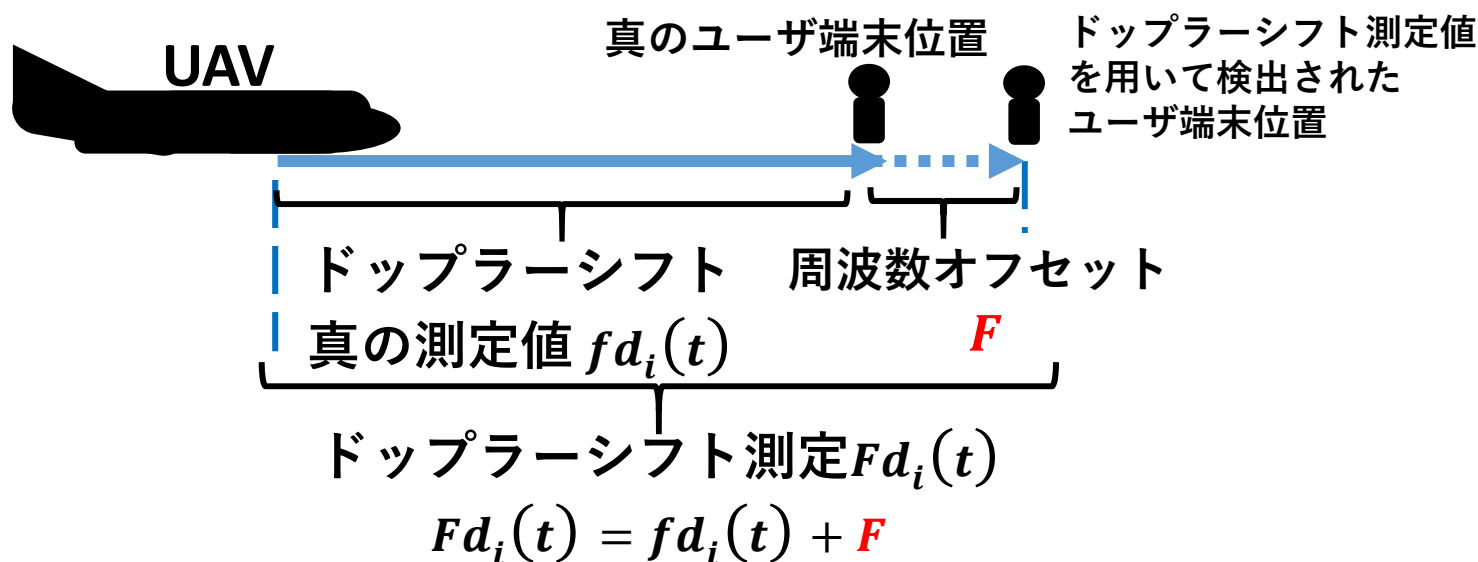
ドップラーシフト分布

- UAV—ユーザ端末間に生じるドップラーシフトを観測
- 観測値によって得られるユーザ位置は双曲線上に分布
- 複数のUAVで観測、又は1機のUAVで複数回観測し、ユーザ位置を双曲線上の交点として検出可能



周波数オフセット推定・補償

- 本研究では**周波数発振器**はユーザ端末に対し**独立している**と仮定
- ユーザ端末内の**周波数発振器**の精度の安定性によって誤差（**周波数オフセット**）が生じる
- 周波数オフセットとしてドップラーシフト量に**加算または減算され位置検出に影響**
- **最小二乗法**を利用してユーザ位置及び周波数オフセットを推定・補償



最小二乗法を用いた位置検出

- UAV-地上端末間で得られるドップラーシフトの式

$$fd_i(t) = -\frac{V_{xi}(t)(X_i(t) - x) + V_{yi}(t)(Y_i(t) - y) + V_{zi}(t)(Z_i - z)}{\lambda\sqrt{(X_i(t) - x)^2 + (Y_i(t) - y)^2 + (Z_i - z)^2}} + F \quad \dots (1)$$

- ユーザ端末z座標を固定した場合の初期値(x^0, y^0, F^0)を想定した場合のドップラーシフトの式

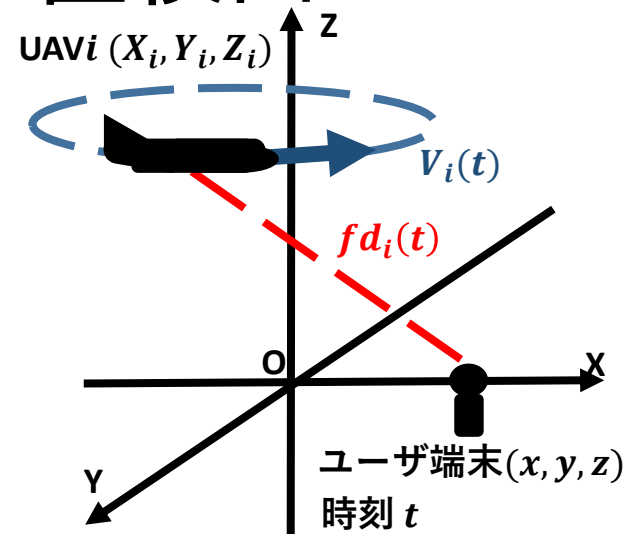
$$fd_i^0(t) = -\frac{V_{xi}(t)(X_i(t) - x^0) + V_{yi}(t)(Y_i(t) - y^0) + V_{zi}(t)(Z_i - z)}{\lambda\sqrt{(X_i(t) - x^0)^2 + (Y_i(t) - y^0)^2 + (Z_i - z)^2}} + F^0 \quad \dots (2)$$

- 観測されるドップラーシフトの真の値 $fd_{mi}(t)$ に対して $fd_i(t)$ との差である測定残差成分 $\Delta fd_i^0(t)$ との関係

$$\Delta fd_i(t) = fd_{mi}(t) - \Delta fd_i^0(t) \quad \dots (3)$$

- 初期値からの変化量($\Delta x, \Delta y, \Delta F$)とし、以下の方程式を得る

$$\Delta fd_i(t) = \frac{\partial fd_i(t)}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial fd_i(t)}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial fd_i(t)}{\partial F} \Delta F \quad \dots (4)$$



$$G = \begin{bmatrix} \frac{\partial fd_1(t)}{\partial x} & \frac{\partial fd_1(t)}{\partial y} & 1 \\ \frac{\partial fd_2(t)}{\partial x} & \frac{\partial fd_2(t)}{\partial y} & 1 \\ \frac{\partial fd_3(t)}{\partial x} & \frac{\partial fd_3(t)}{\partial y} & 1 \end{bmatrix} \quad \dots (5)$$

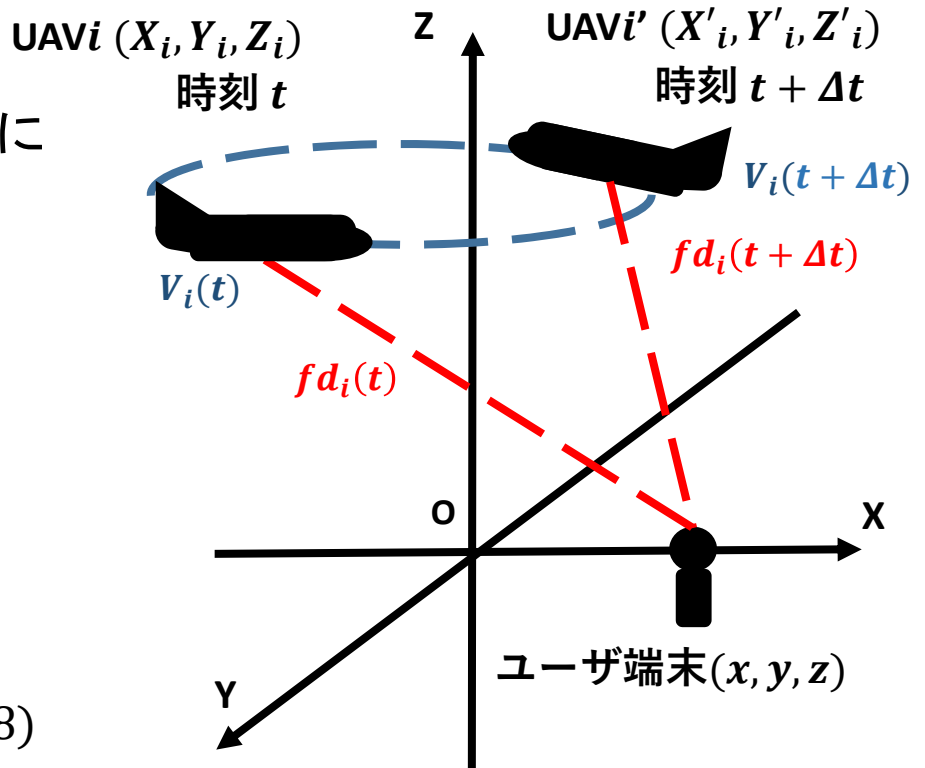
$$U = [\Delta x \quad \Delta y \quad \Delta F]^T \quad \dots (6)$$

$$[\Delta fd_1(t) \quad \Delta fd_2(t) \quad \Delta fd_3(t)]^T = R^T \quad \dots (7)$$

最小二乗法を用いた位置検出 (2回測定)

前述した最小二乗法における計算処理に
2回目の測定 $t' = (t + \Delta t)$ を追加
⇒ 2回測定に応じた 6×3 行列に拡張

$$G' = \begin{bmatrix} \frac{\partial fd_1(t)}{\partial x} & \frac{\partial fd_1(t)}{\partial y} & 1 \\ \frac{\partial fd_2(t)}{\partial x} & \frac{\partial fd_2(t)}{\partial y} & 1 \\ \frac{\partial fd_3(t)}{\partial x} & \frac{\partial fd_3(t)}{\partial y} & 1 \\ \frac{\partial fd_1(t + \Delta t)}{\partial x} & \frac{\partial fd_1(t + \Delta t)}{\partial y} & 1 \\ \frac{\partial fd_2(t + \Delta t)}{\partial x} & \frac{\partial fd_2(t + \Delta t)}{\partial y} & 1 \\ \frac{\partial fd_3(t + \Delta t)}{\partial x} & \frac{\partial fd_3(t + \Delta t)}{\partial y} & 1 \end{bmatrix} \dots (8)$$

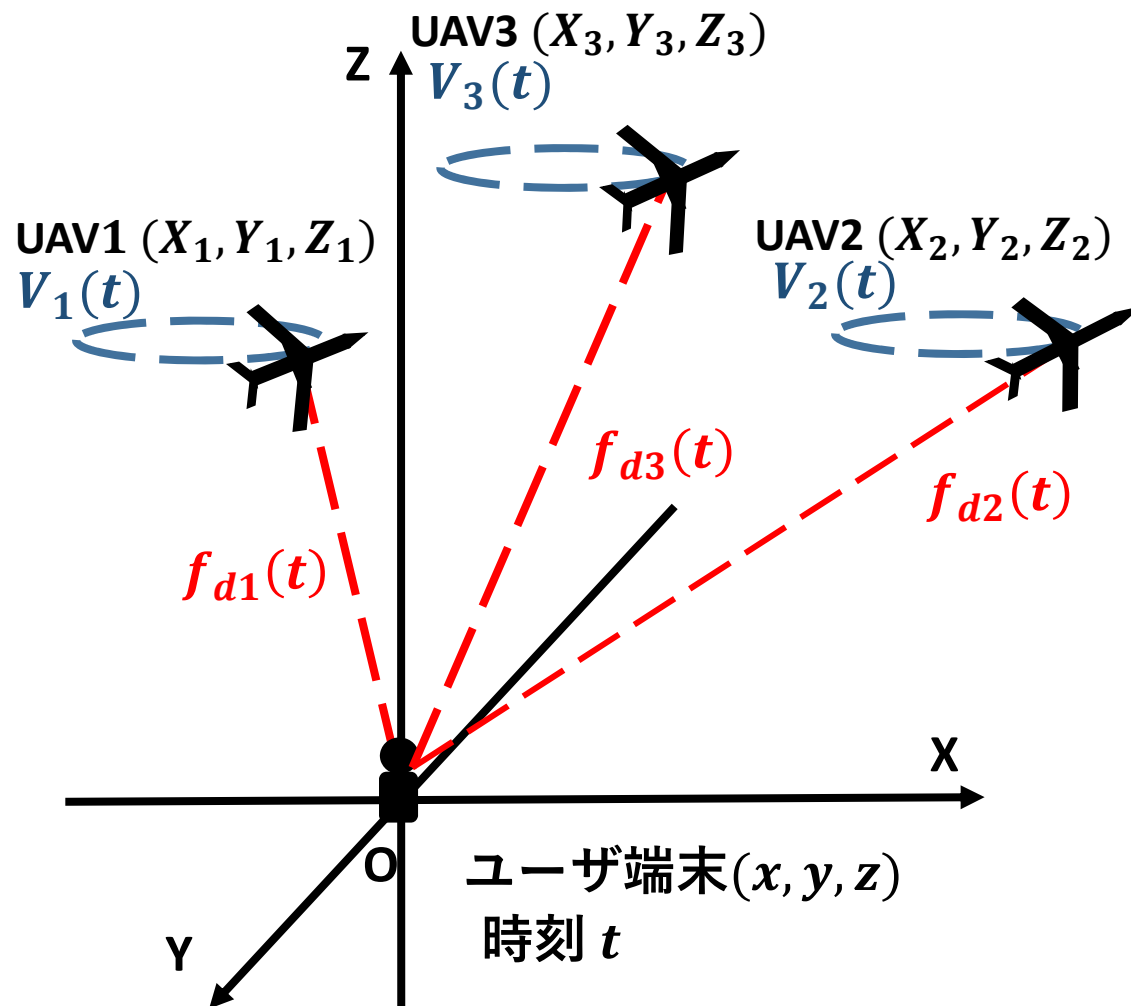


推定するパラメータより方程式が多いため
(9)により解を求める

$$U = (G'^T G')^{-1} G'^T R^T \dots (9)$$

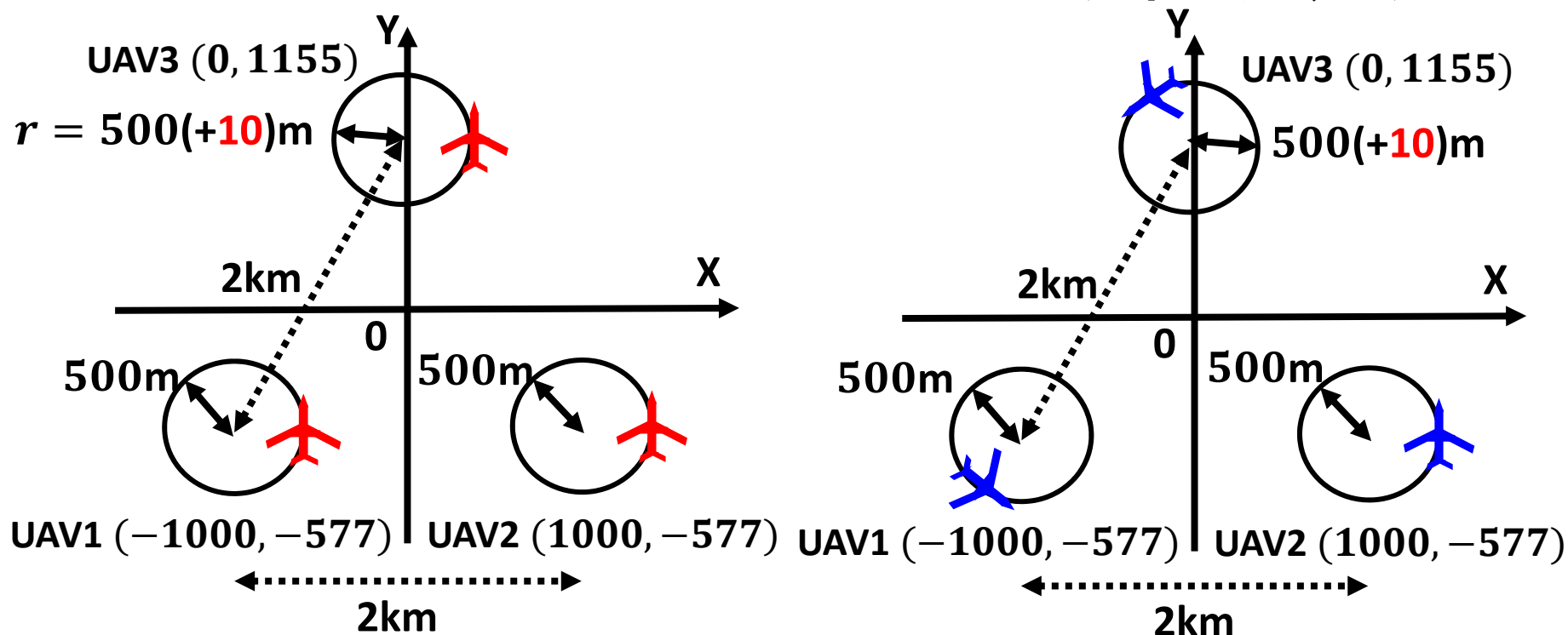
シミュレーションモデル

シミュレーションモデル（概略図）



シミュレーション条件	
パラメータ	設定値
搬送波周波数	5GHz
飛行速度	100km/h
UAV高度	200m
ユーザ高度	0m
測位対象エリア	8km四方
評価対象地点	641,601点
周波数オフセット	1kHz

シミュレーションモデル (1回測定)

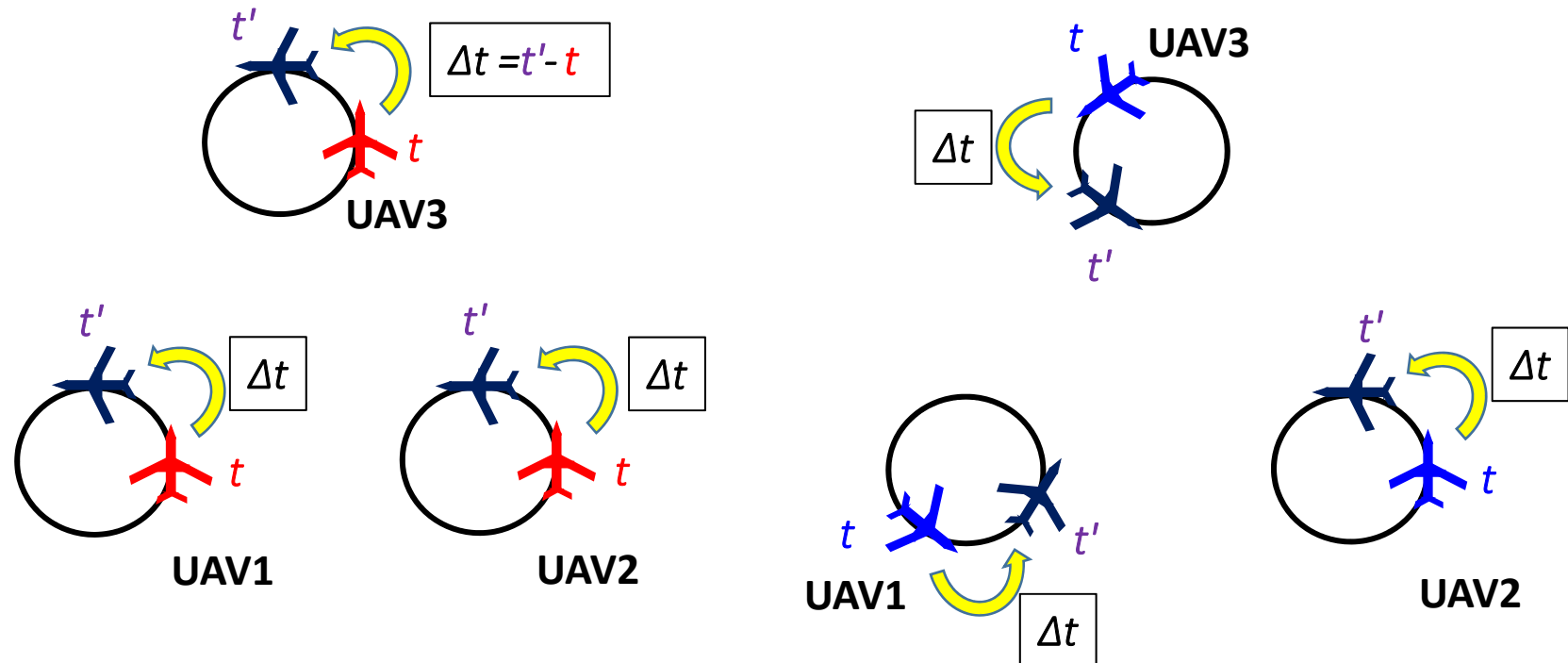


・ 各UAVの初期位相 $\Delta\theta = 0^\circ$

・ UAV1: $\Delta\theta = 240^\circ$ UAV2: $\Delta\theta = 0^\circ$
 UAV3: $\Delta\theta = 120^\circ$

- ・ UAV3のみに(r_e)**10m**の誤差を人工的に付与
- ・ 各モデルを時刻 $t = 0 \sim 110\text{s}$ まで10秒毎のシミュレーション

シミュレーションモデル (2回測定)



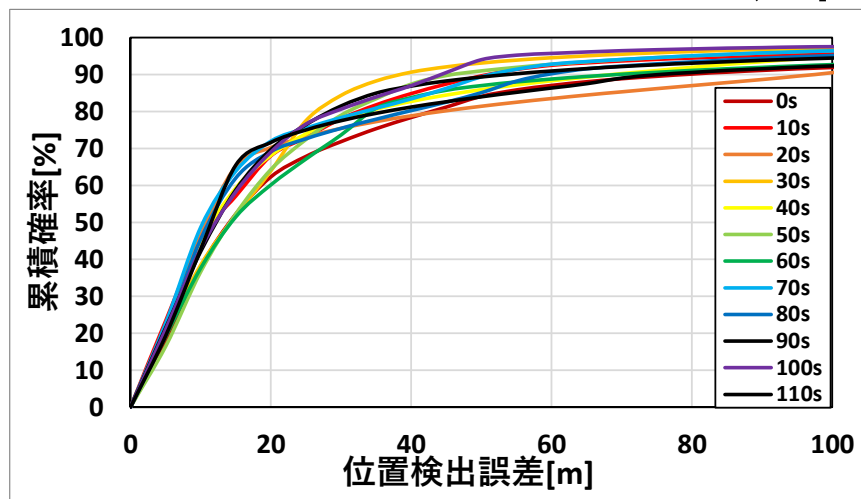
・ 各UAVの初期位相 $\Delta\theta = 0^\circ$

・ UAV1: $\Delta\theta = 120^\circ$ UAV2: $\Delta\theta = 0^\circ$
UAV3: $\Delta\theta = 240^\circ$

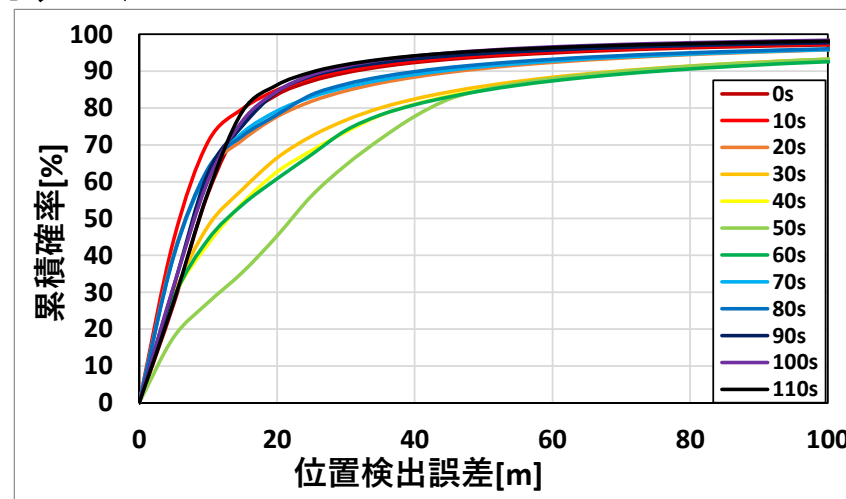
- ・ UAV3のみに($r_e =$)10mの誤差を付与
- ・ 時刻 $t = 0s$ で固定、測定時間間隔 $\Delta t = 7.1 \sim 113.6s$ を7.1秒間隔でシミュレーション

シミュレーション結果

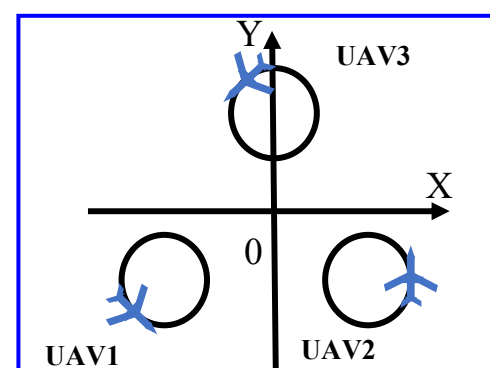
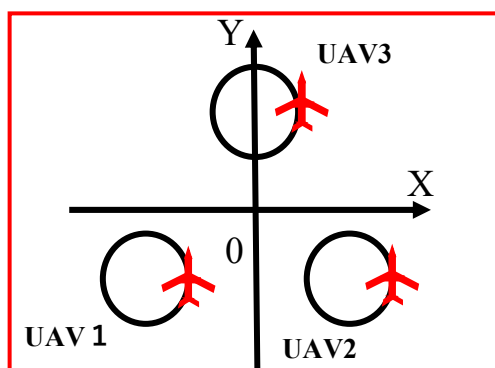
位置検出誤差累積分布特性 (1回測定)



$\Delta\theta = 0^\circ$ の場合

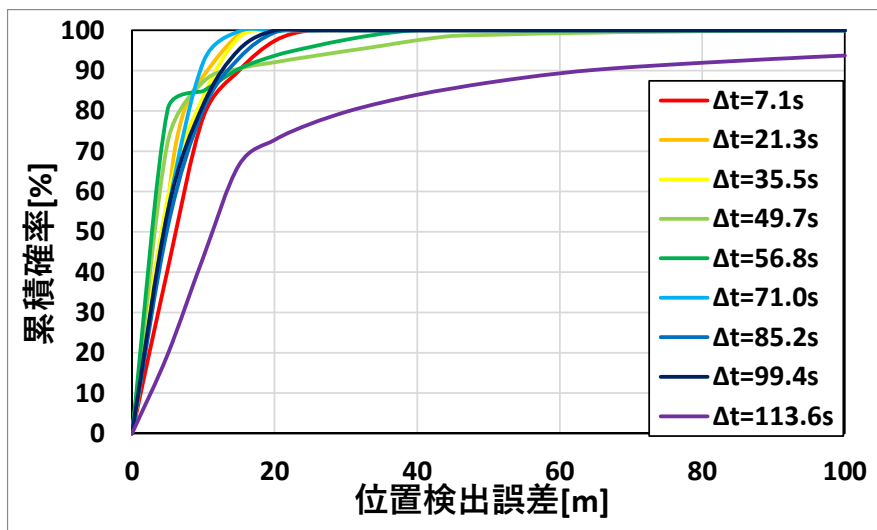


$\Delta\theta = 120^\circ$ の場合

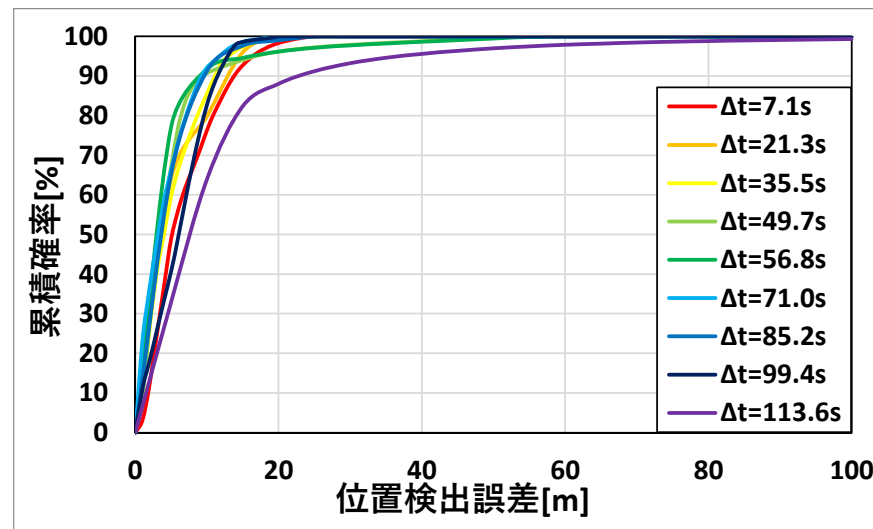


- 一部の時刻を除き $\Delta\theta = 120^\circ$ の場合の方が全体的に精度が**良好**

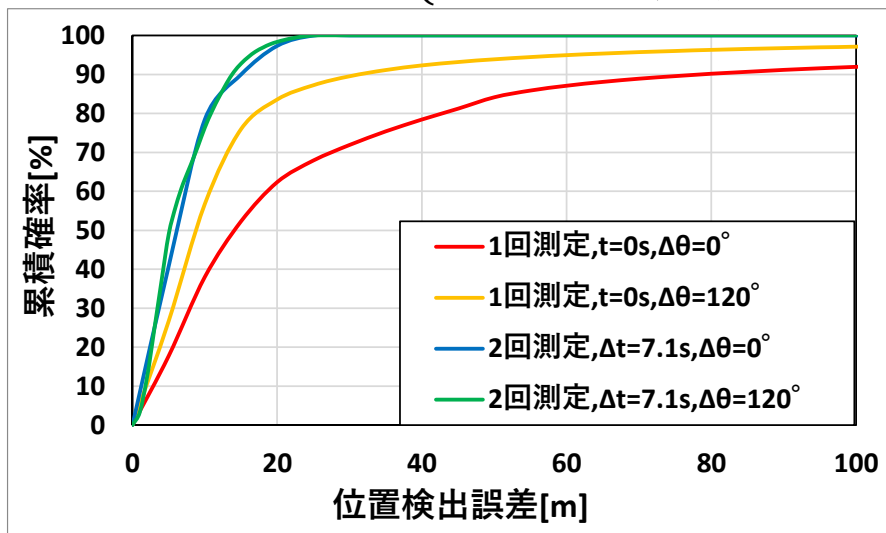
位置検出誤差累積分布特性 (2回測定)



$\Delta\theta = 0^\circ (t = 0s)$ の場合



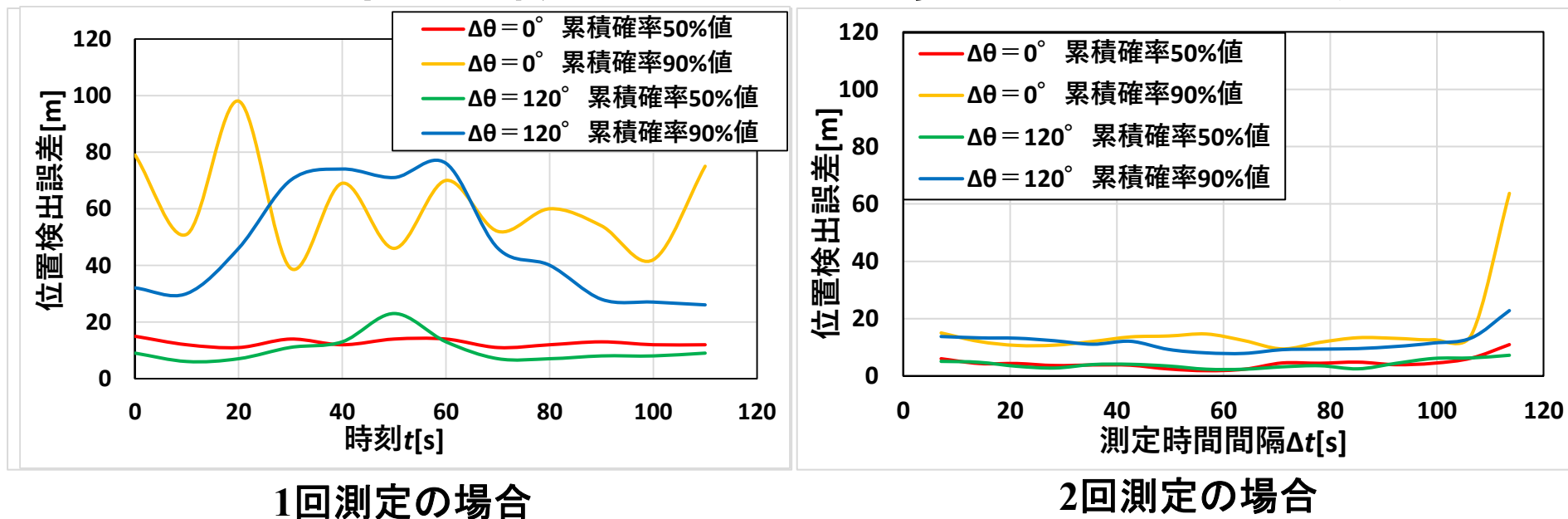
$\Delta\theta = 120^\circ (t = 0s)$ の場合



特性比較 (一例)

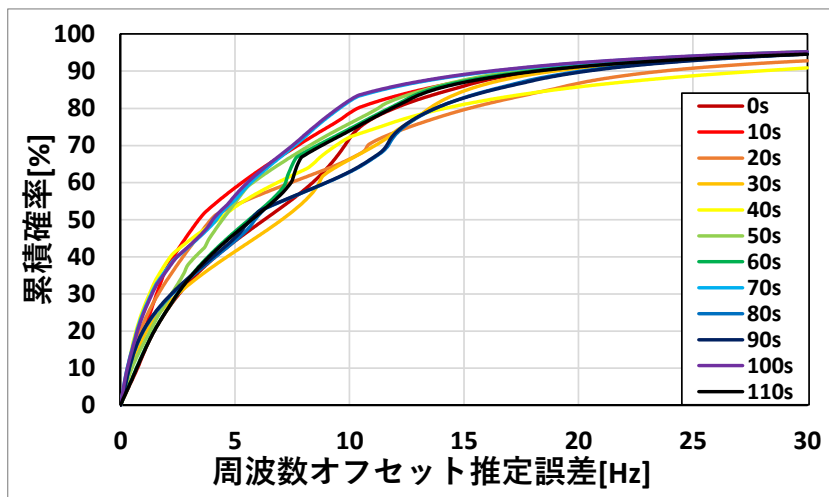
- 両初期配置とも2回測定の精度が**良好**
- 1回測定 ⇒ $\Delta\theta = 120^\circ$ の方が精度が**良好**
- 2回測定 ⇒ 両モデルともほぼ同等の精度
⇒ 初期配置による影響は小さい

位置検出誤差の時間変化特性比較

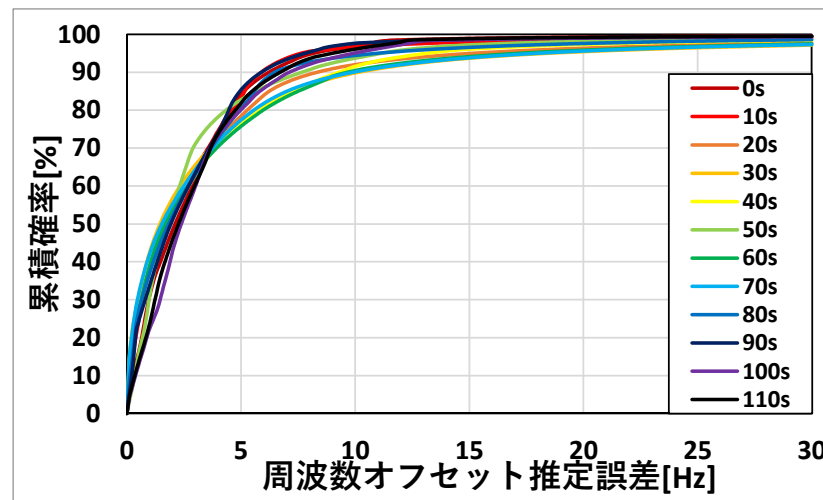


- 累積確率50%値、90%値ともに全体的に精度の改善を確認
- 2回測定 \Rightarrow 測定時間間隔に依らず**全体的に20m以下**の誤差を確認
- 2回測定 $\Delta t = 113.6$ sにおいて**極端な精度の劣化**
 \Rightarrow UAVの測定位置が重なる瞬間

周波数オフセット推定誤差累積分布特性 (1回測定)



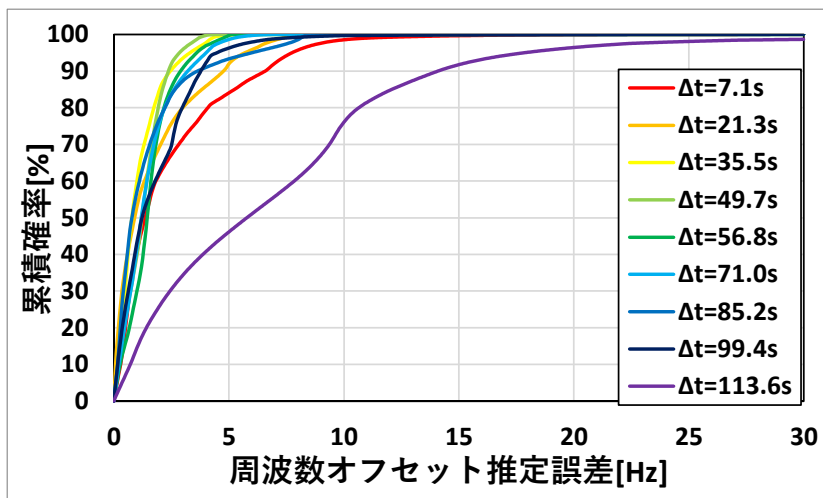
$\Delta\theta = 0^\circ$ の場合



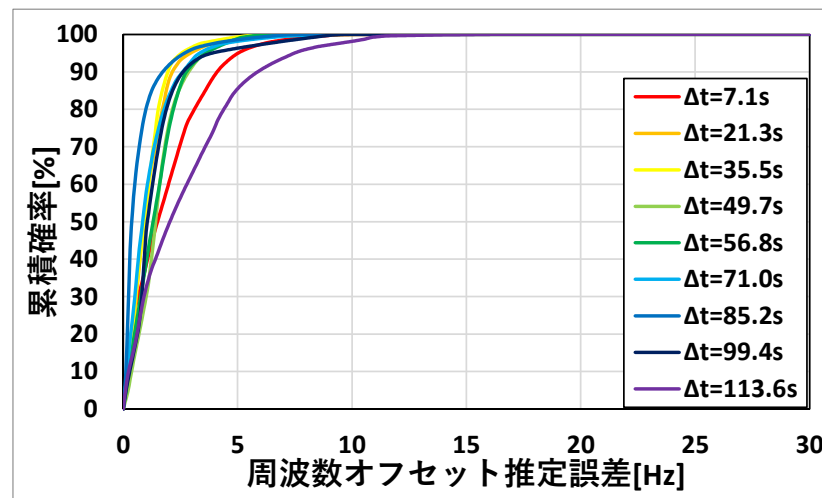
$\Delta\theta = 120^\circ$ の場合

- $\Delta\theta = 0^\circ$ の場合は時刻に応じて精度の変動が激しい
- $\Delta\theta = 120^\circ$ の場合の方が全体的に精度が**良好**

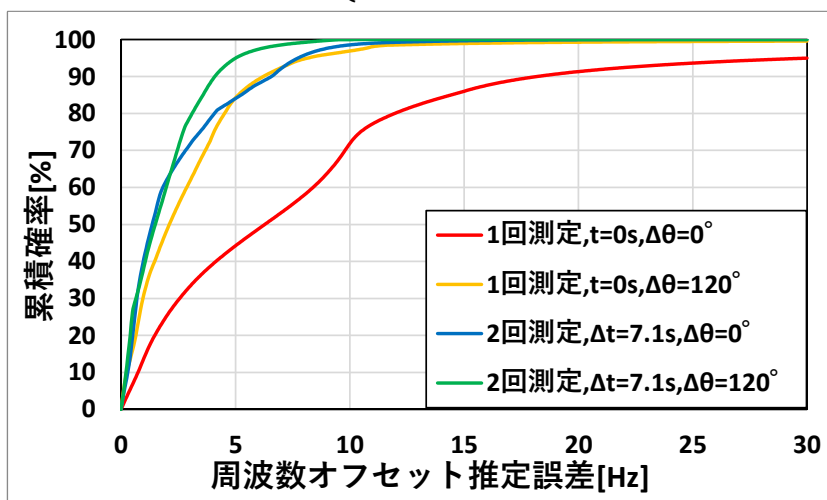
周波数オフセット推定誤差累積分布特性 (2回測定)



$\Delta\theta = 0^\circ (t = 0s)$ の場合



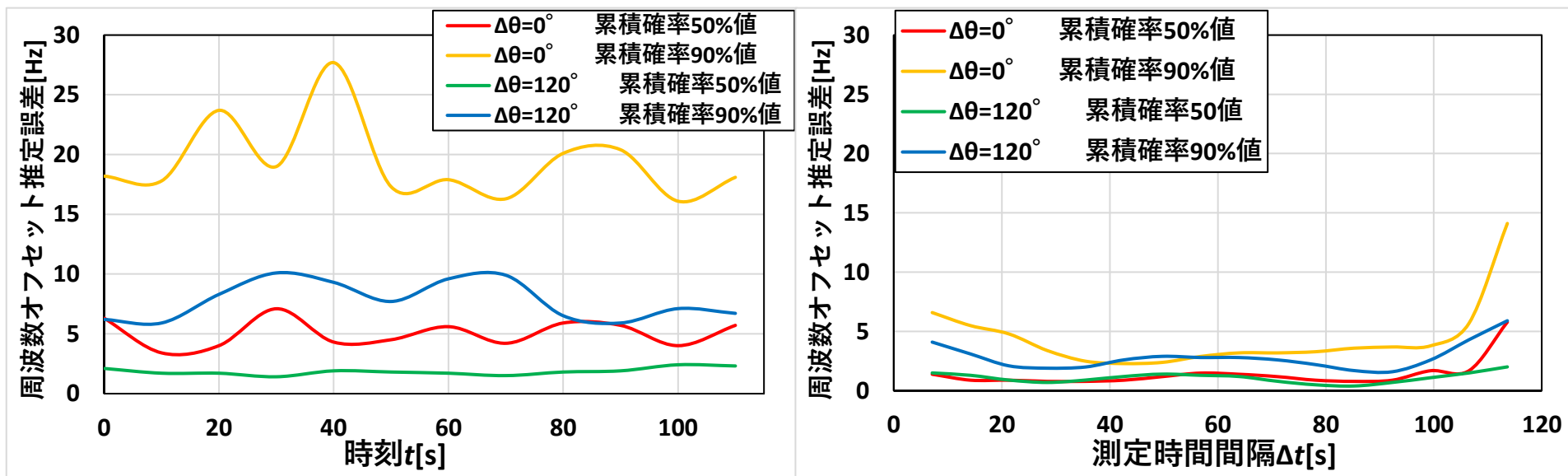
$\Delta\theta = 120^\circ (t = 0s)$ の場合



特性比較 (一例)

- 両初期配置とも2回測定の精度が**良好**
- 2回測定⇒ $\Delta\theta = 120^\circ$ の方が**良好な精度**

周波数オフセット推定誤差の時間変化特性比較



1回測定の場合

2回測定 ($t = 0s$) の場合

- 2回測定 \Rightarrow 測定時間間隔に依らず **全体的に10Hz以下の誤差を確認**
- 2回測定 $\Delta t = 113.6s$ において **精度の劣化**
 \Rightarrow UAVの測定位置が重なる瞬間

ドップラーシフトの測定回数を2回に拡張



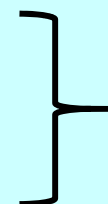
位置検出精度・周波数オフセット推定精度の**改善**



被災者の早期発見（**検出時間**）も考慮する必要

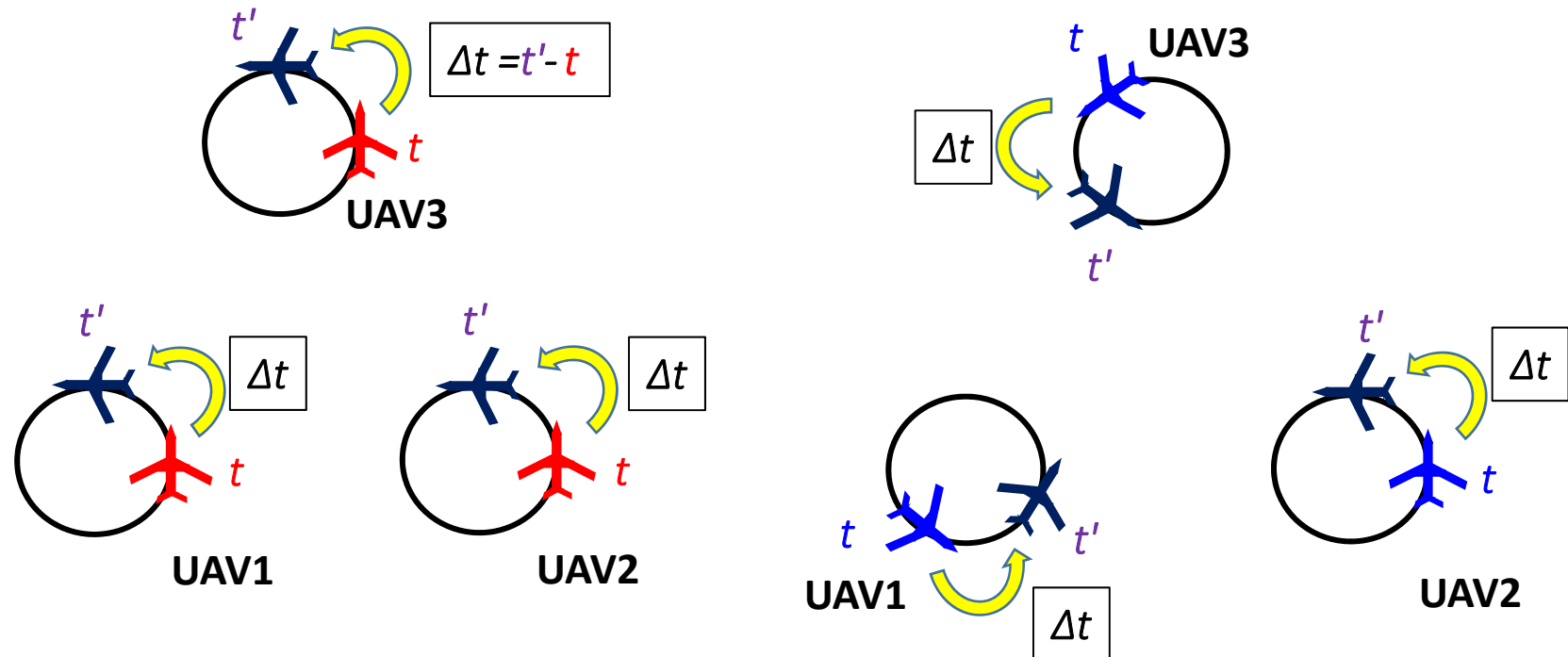


検出時間を考慮した場合
精度が収束する



最短の測定時間間隔
 Δt_{min} の検討

シミュレーションモデル（2回測定）

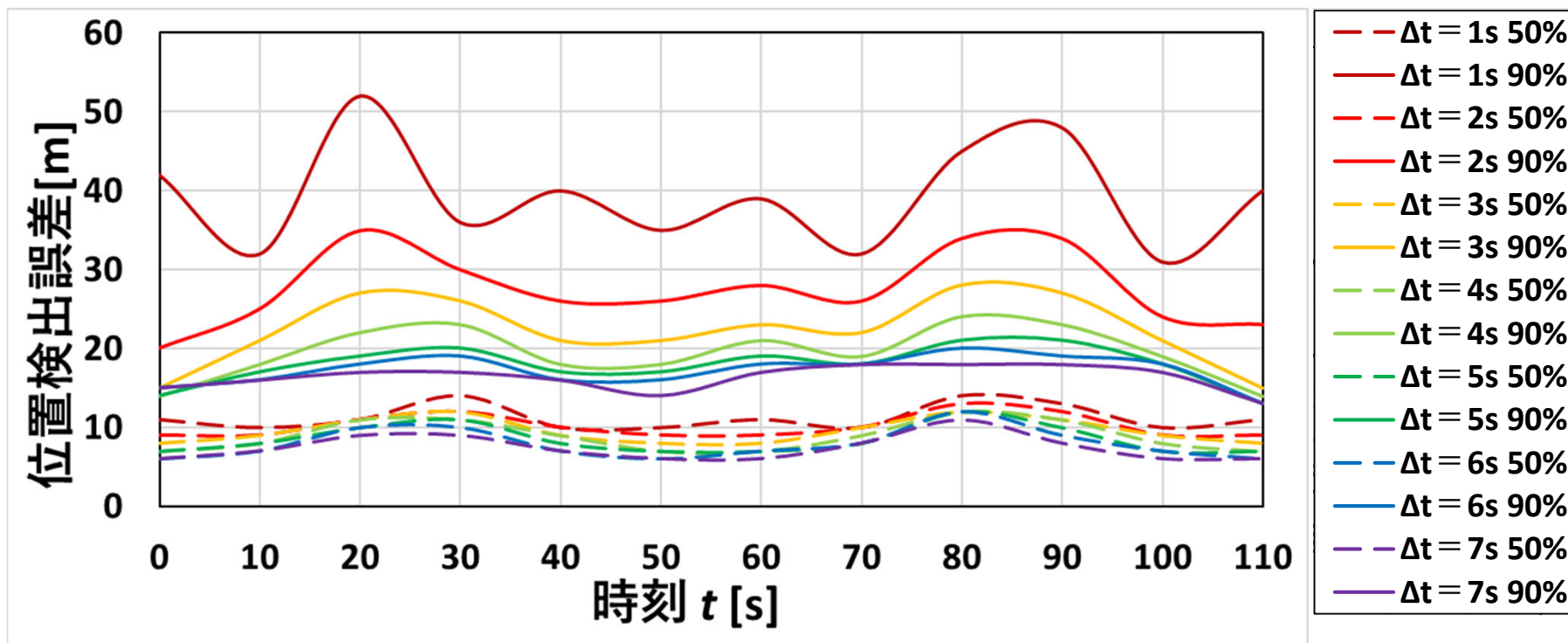


・ 各UAVの初期位相 $\Delta\theta = 0^\circ$

・ UAV1: $\Delta\theta = 120^\circ$ UAV2: $\Delta\theta = 0^\circ$
 UAV3: $\Delta\theta = 240^\circ$

- ・ 測定時間間隔の分解能を1秒単位における2回測定
- ・ 両モデルとも測定時間間隔 $\Delta t = 1 \sim 7s$ まで1秒ずつ変化
- ・ 両モデルとも測定時刻 $t = 0 \sim 110s$ まで10秒毎にシミュレーションを実施

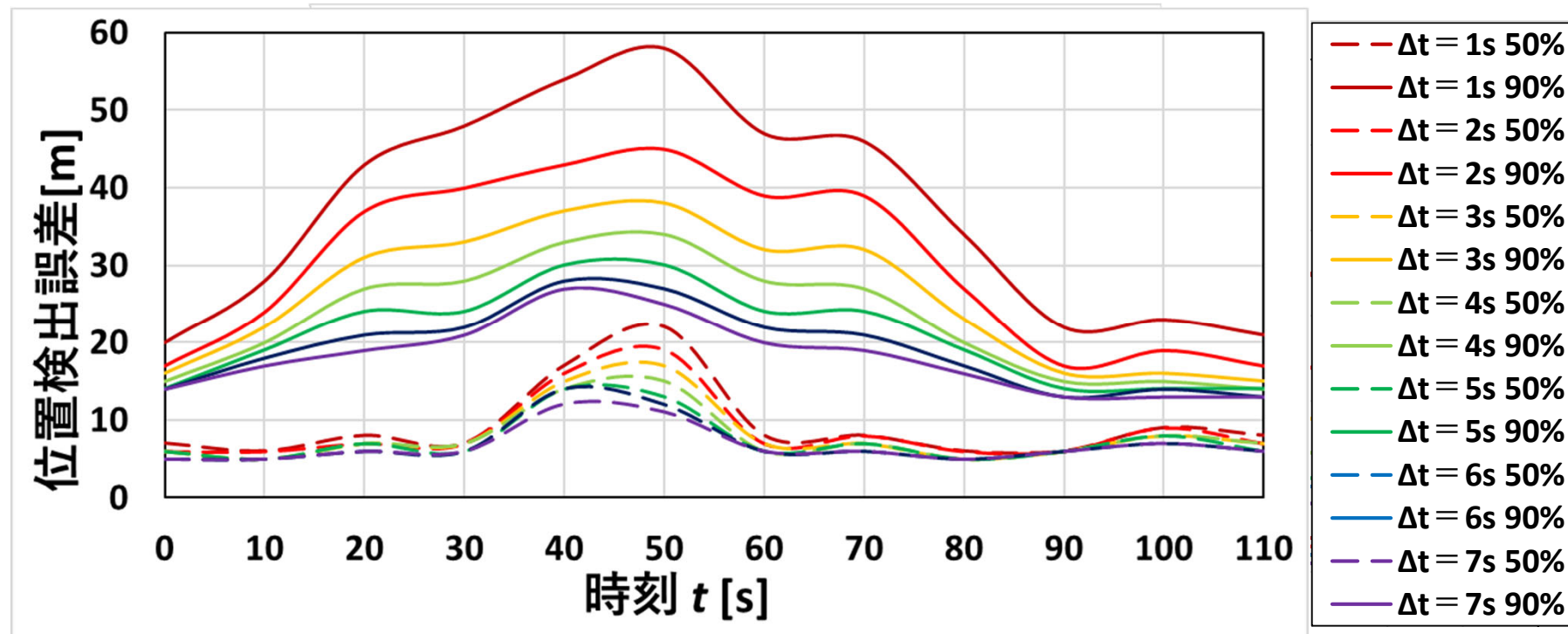
2回測定($\Delta t = 1 \sim 7s$)における時間変化特性 (位置検出誤差)



$\Delta\theta = 0^\circ$ の場合

- Δt の値が大きいくほど精度が良好になる傾向
- $\Delta t = 6, 7s \Rightarrow 50\%, 90\%$ 値で誤差が各々10m, 20m以内
- 累積確率50%, 90%値ともに $\Delta t = 6s$ で十分な測位精度

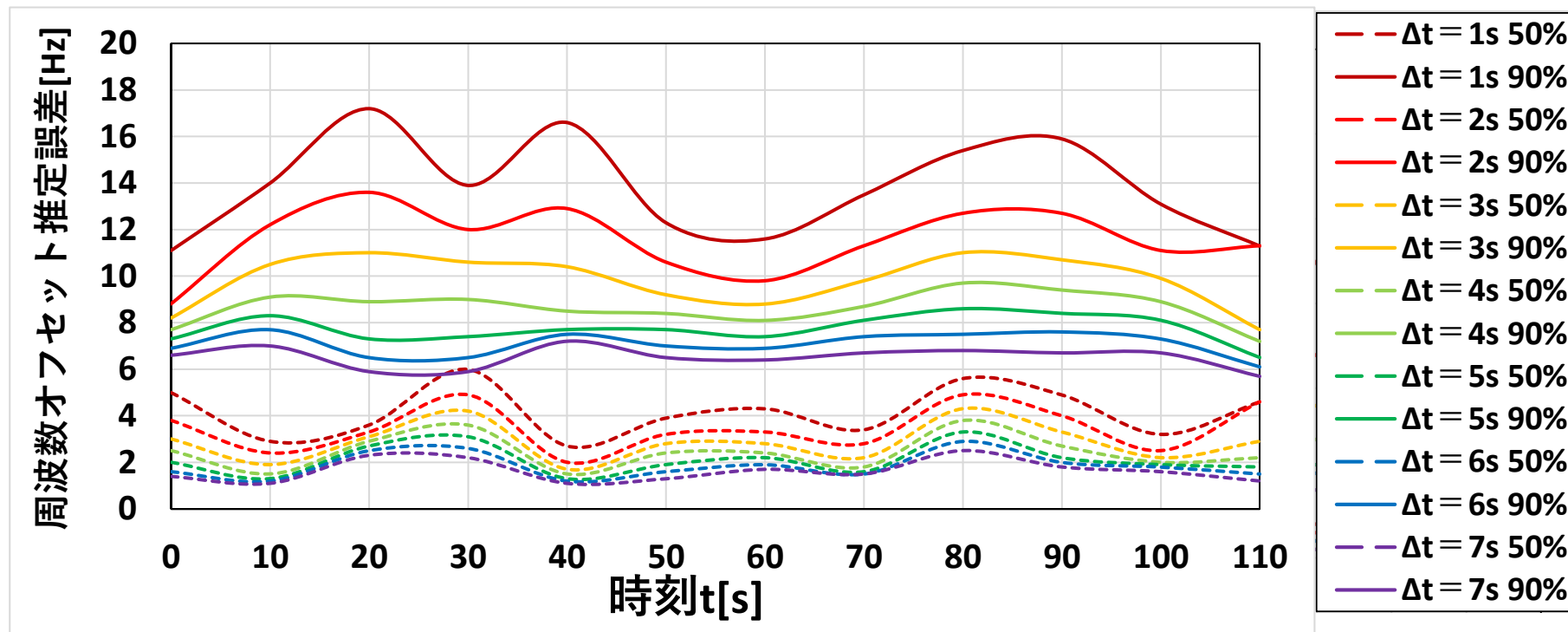
2回測定($\Delta t = 1 \sim 7s$)における時間変化特性 (位置検出誤差)



$\Delta\theta = 120^\circ$ の場合

- 精度が劣化する $t = 50s$ 付近 \Rightarrow UAV同士が接近する瞬間
- 累積確率50%値 $\Rightarrow t = 40 \sim 50s$ を除き $10m$ 以下の誤差を確認
- 90%値 $\Rightarrow t = 30 \sim 50s$ 付近で $20m$ 以上の誤差を確認

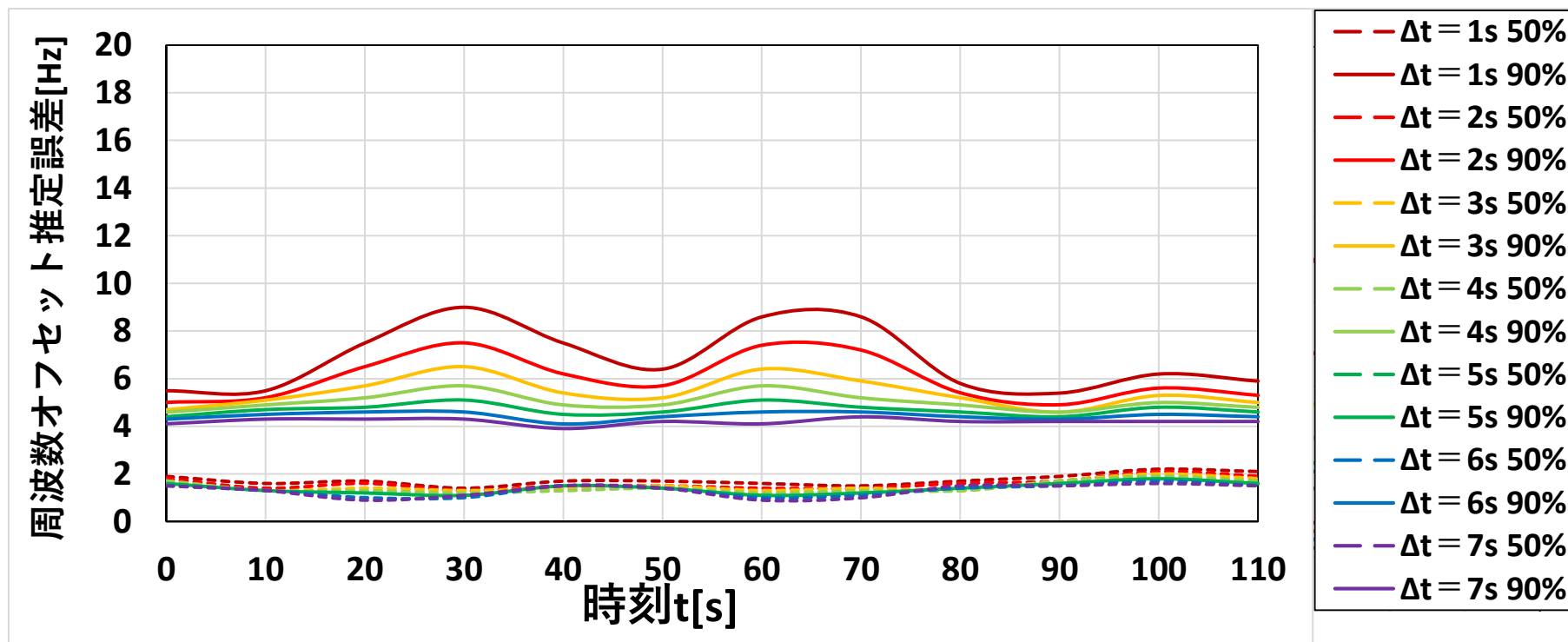
2回測定($\Delta t = 1 \sim 7s$)における時間変化特性 (周波数オフセット推定誤差)



$\Delta\theta = 0^\circ$ の場合

- $\Delta t = 4s$ 以降 \Rightarrow 90%値で誤差が**10Hz以内**
- $\Delta t = 6, 7s$ 間 \Rightarrow 50%, 90%値で変化量が1Hz以下
 \Rightarrow 累積確率50%, 90%値ともに **$\Delta t = 6s$** で十分な測位精度

2回測定($\Delta t = 1\sim 7s$)における時間変化特性 (周波数オフセット推定誤差)



$\Delta\theta = 120^\circ$ の場合

- $\Delta\theta = 0^\circ$ と比較して全体的に精度が良好
- $\Delta t = 1\sim 7s \Rightarrow$ 周波数オフセット推定誤差がほぼ一定
- $\Delta t = 6s$ 以降 \Rightarrow 累積確率90%値で誤差**5Hz以内**

まとめ・今後の課題

まとめ

- 最小二乗法によりユーザ位置検出と周波数オフセットの推定・補償を同時に行う位置検出システム
- 測定時間間隔 Δt を用いた2回測定
 - 1回測定（従来手法）との特性比較・評価
 - 十分な精度が得られる測定時間間隔 Δt の検討
- 2回測定に拡張することで測定時間間隔に依らず安定した測位精度の改善が確認
- 十分な測位精度を得られる最短の測定時間間隔
⇒ $\Delta t_{min} = 6s$ の場合

今後の課題

- **飛行半径**以外の飛行位置誤差を考慮した場合の特性評価
- **ユーザ端末毎**の周波数オフセットにおける同時推定、補償する手法の検討

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。