

3機の無人航空機を用いた ユーザ三次元位置検出手法の特性評価

ワイヤレス通信研究室

2020408深谷泰良

指導教員

石川博康

副指導教員

渡邊博之

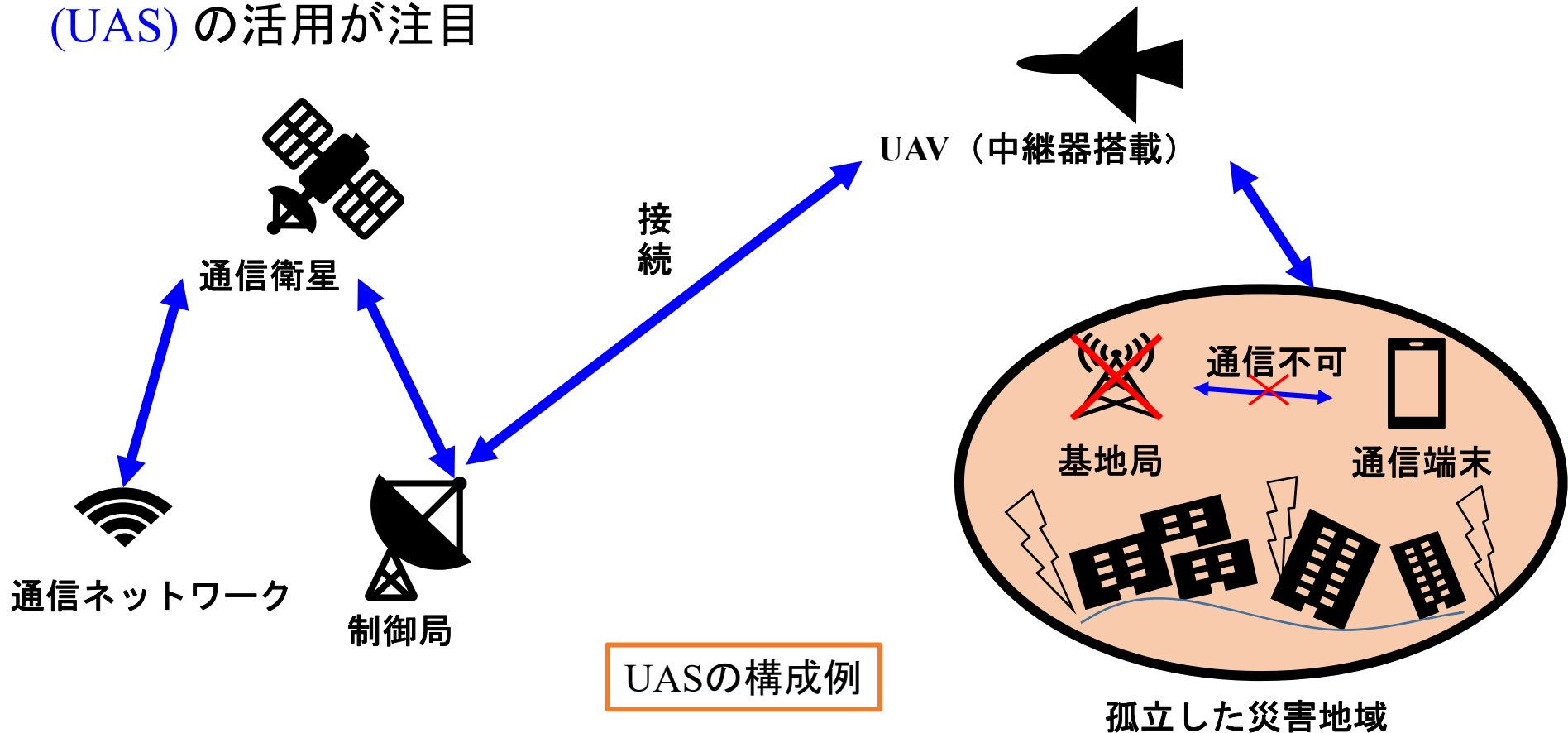
目次

- ◆研究の目的・背景
- ◆測位原理
- ◆二次元測位と三次元測位の特性比較
- ◆三次元測位の位置検出精度の改善手法
- ◆まとめ

研究の目的・背景

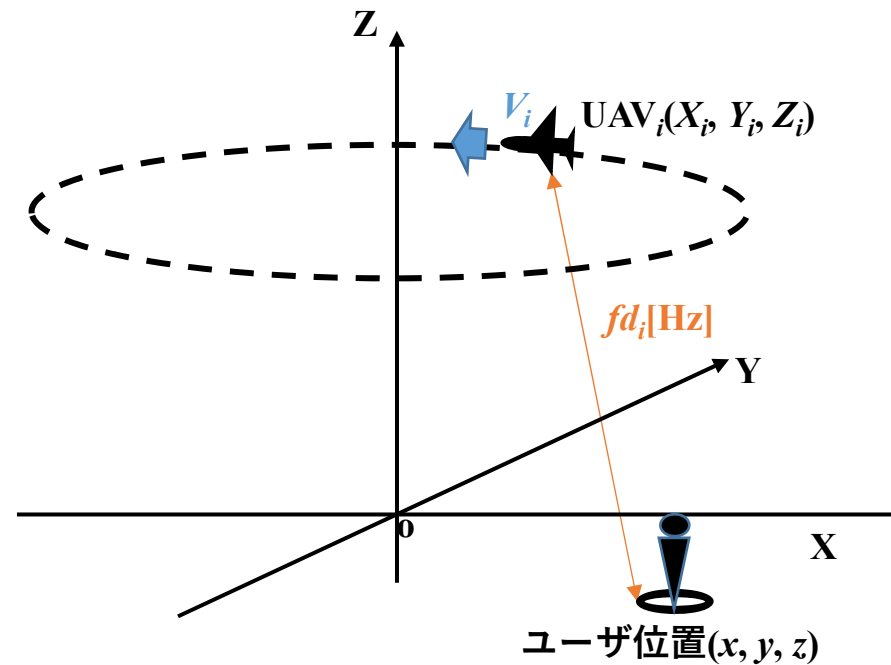
研究の背景

- 大規模災害等発生時には、携帯電話等の公的な通信手段の確保が困難
- 安否確認や情報収集のために迅速な通信ネットワークの提供が必要
- 無線中継機能を有する無人航空機(UAV)を用いた無人航空機システム(UAS)の活用が注目



研究の背景

- UASではUAVが上空を旋回飛行することを想定
- 地上端末-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
- このドップラーシフトを観測することによりユーザ位置の検出が可能



ユーザ位置検出システムの構成例

研究の目的

●従来研究

- 複数のUAVを介して観測されるドップラーシフトを用いた
最小二乗法によるユーザ位置検出手法の提案
- UAVが円周回飛行・8の字飛行・直線飛行等を行うモデル
二次元位置検出手法（二次元測位）で実施

⇒ユーザの地表面上（XY平面）のみの評価

山岳地帯や高層ビル等のユーザの高度情報（Z軸方向）

を含む場所では正確な位置情報の推定不能

研究の目的

●本研究①（中間発表）

- 二次元測位をユーザ高度情報まで含む**三次元測位に拡張**
- **三次元測位の有効性を**
ドップラーシフトの測定回数1回（1回測定手法）で検証
- 二次元測位と三次元測位の位置検出誤差の特性を比較・評価
- 3機のUAVの円周回飛行モデル

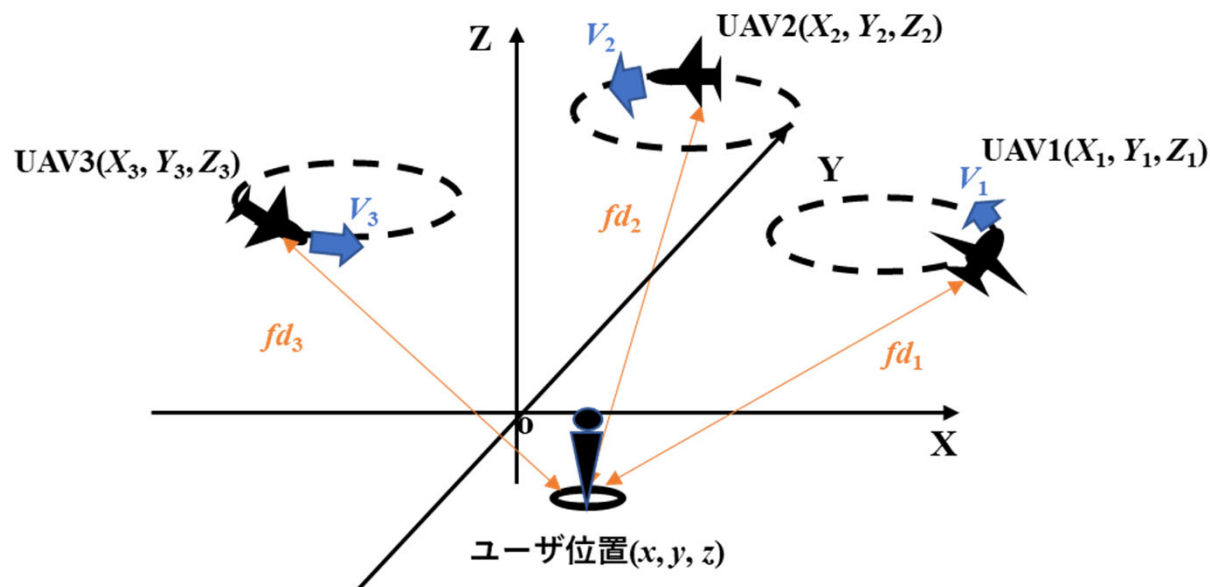
●本研究②

- 新たに**測定回数を2回に拡張する手法を導入**（2回測定手法）
- 三次元測位において**位置検出精度の改善**
- ドップラーシフトの測定回数拡張による
測位精度改善効果を検討
- 3機のUAVの円周回飛行モデル

測位原理

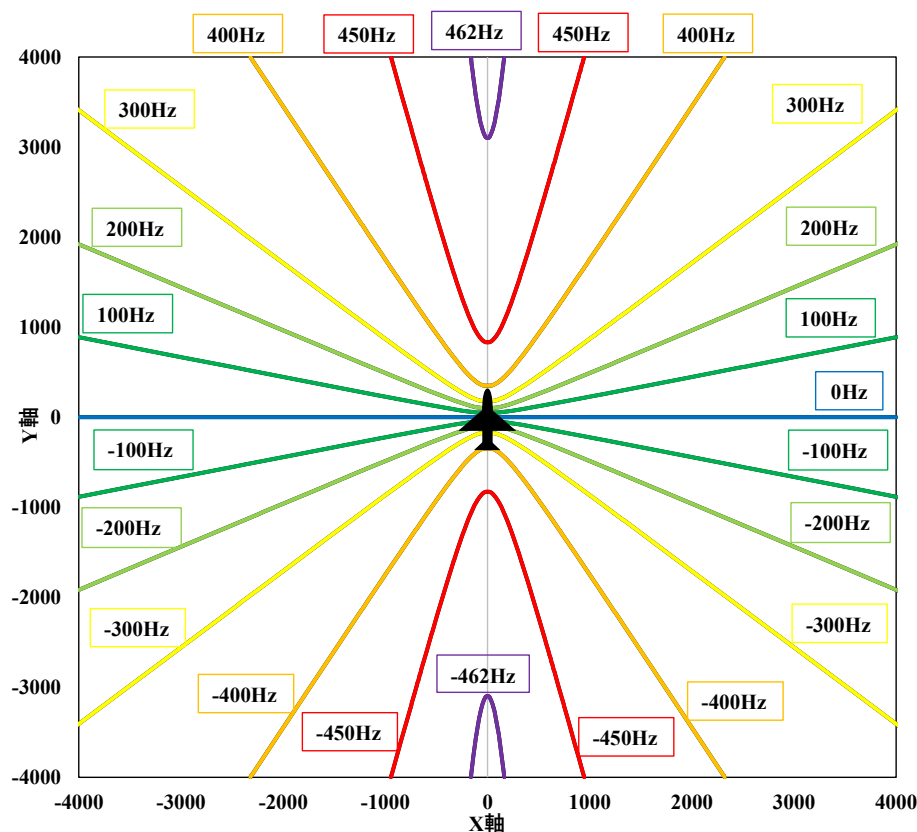
測位原理

- ユーザが所有する通信端末から一定周波数のトーン信号（CW信号）を送信
- 上空を飛行するUAVを中継して地上制御局で受信
- 地上端末-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
- 観測されたドップラーシフトから**最小二乗法**を利用してユーザの位置検出



3機のUAVによるユーザ位置検出システム

UAVによる ドップラーシフト分布 (UAV高度200m)



ドップラーシフトを観測すると
ユーザ位置は**双曲面上**に分布



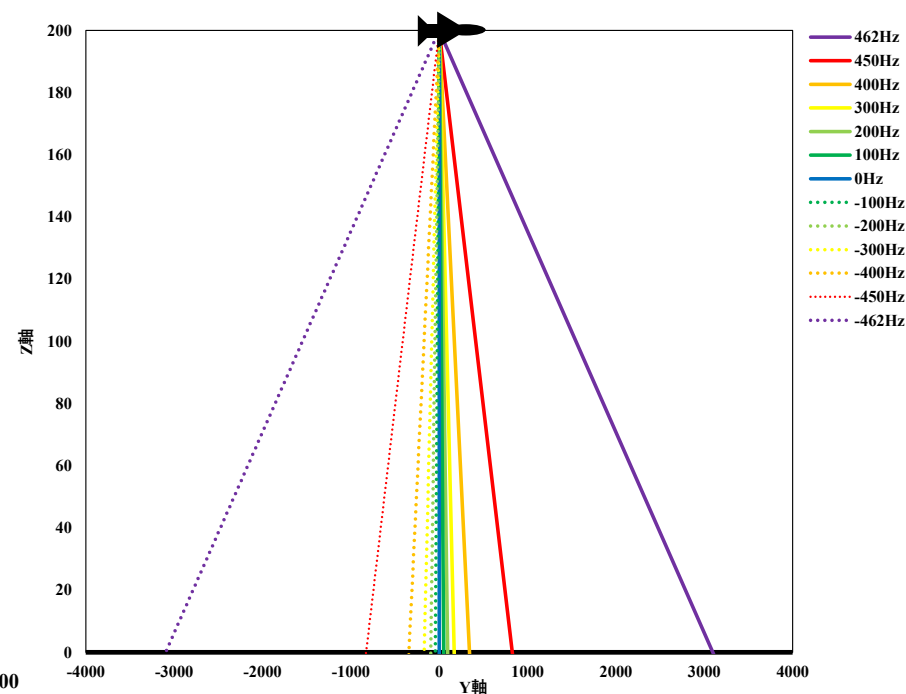
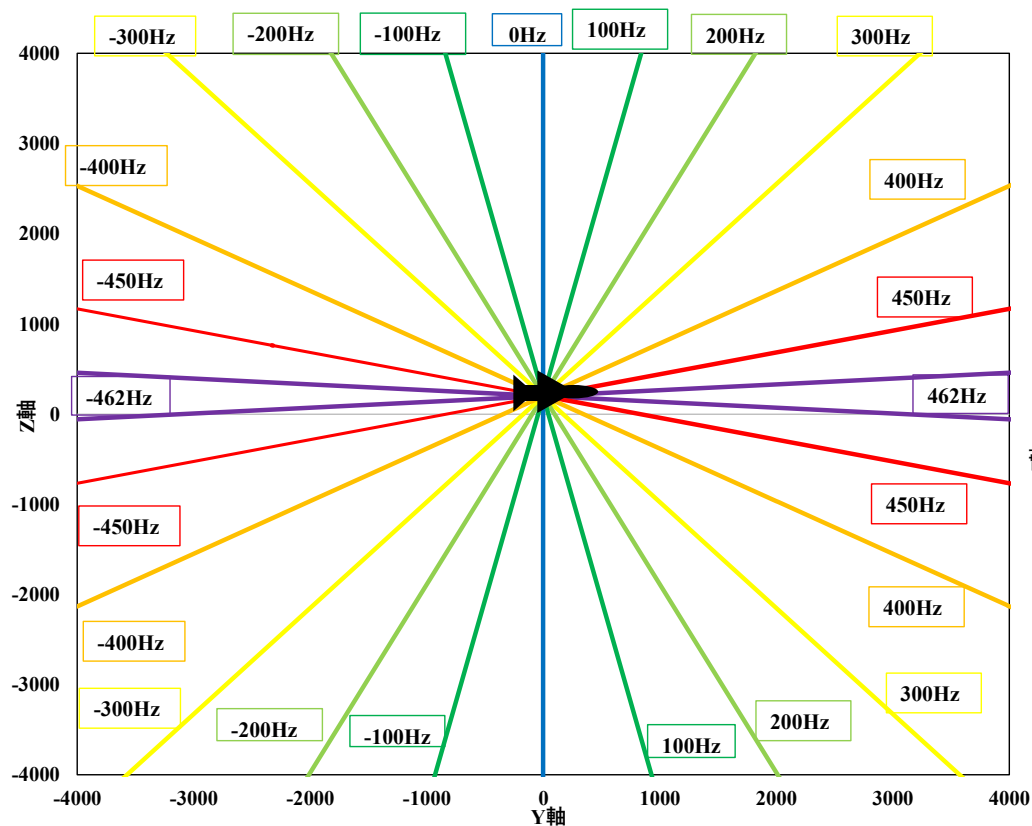
1機のUAVまたは複数のUAVで
複数回測定観測

⇒双曲面の交点として
ユーザ位置を検出可能

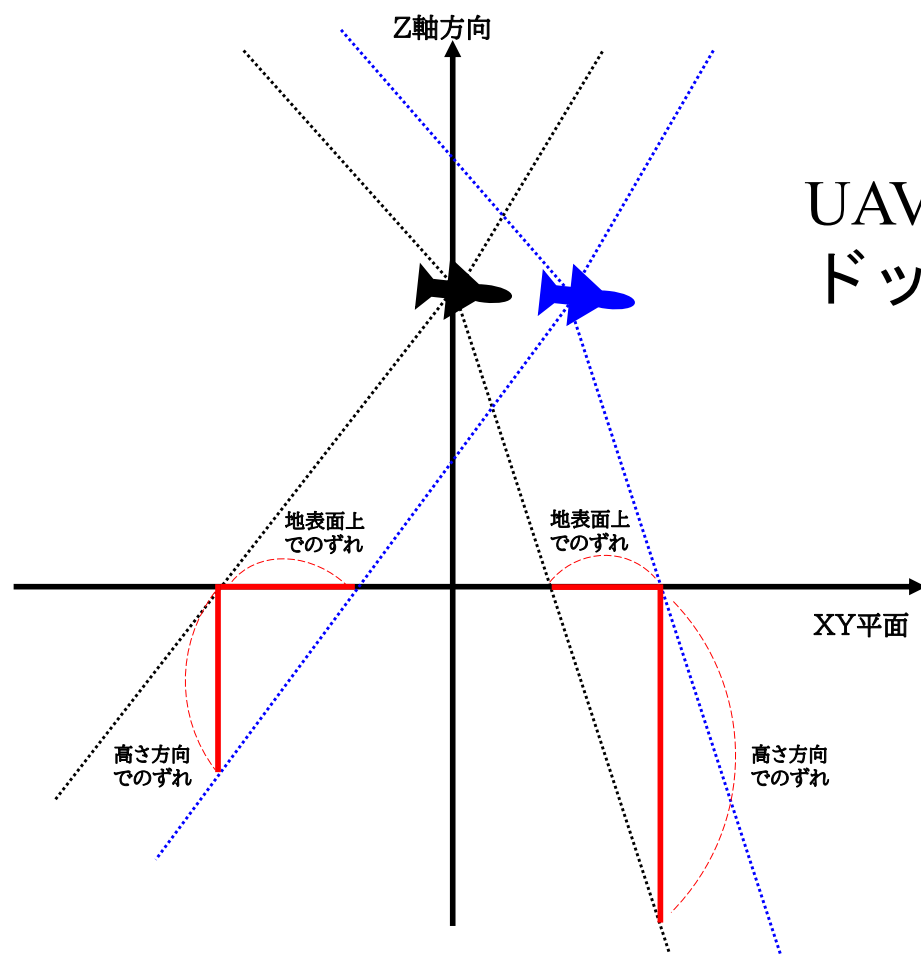
$$\text{ドップラーシフト} : fd_i(t_j) = -\frac{V_{xi}(t_j)(X_i(t_j)-x) + V_{yi}(t_j)(Y_i(t_j)-y) + V_{zi}(t_j)(Z_i(t_j)-z)}{\lambda \sqrt{(X_i(t_j)-x)^2 + (Y_i(t_j)-y)^2 + (Z_i(t_j)-z)^2}}$$

UAVによる ドップラーシフト分布（Z軸方向）

高さ方向においてもドップラーシフトは双曲面上に分布
(直線的で傾きが急峻)



UAVによる ドップラーシフト分布（Z軸方向）



UAVの飛行位置に**誤差**が生じる場合
ドップラーシフトは平行移動した状態



ユーザ位置の検出誤差は
高さ方向が劣化

最小二乗法に基づく位置検出手法

- **最小二乗法**により，各UAVに対して次式のような関係式が得られる

$$\Delta f d_i(t_j) = \frac{\partial f d_i(t_j)}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f d_i(t_j)}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial f d_i(t_j)}{\partial z} \Delta z$$

- この連立方程式を解くため，各UAVにおけるドップラーシフトに関する偏微分方程式を行列式 G ，ユーザ位置の変化量 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ を転置行列 U として表現

$$G = \begin{bmatrix} \frac{\partial f d_1(t_1)}{\partial x} & \frac{\partial f d_1(t_1)}{\partial y} & \frac{\partial f d_1(t_1)}{\partial z} \\ \frac{\partial f d_2(t_1)}{\partial x} & \frac{\partial f d_2(t_1)}{\partial y} & \frac{\partial f d_2(t_1)}{\partial z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f d_i(t_j)}{\partial x} & \frac{\partial f d_i(t_j)}{\partial y} & \frac{\partial f d_i(t_j)}{\partial z} \end{bmatrix} \quad U = [\Delta x \quad \Delta y \quad \Delta z]^T$$

また、 $[\Delta f d_1(t_1) \quad \Delta f d_2(t_1) \quad \cdots \quad \Delta f d_i(t_j)]^T = F^T = GU$ から $U = (G^T G)^{-1} G^T F^T$

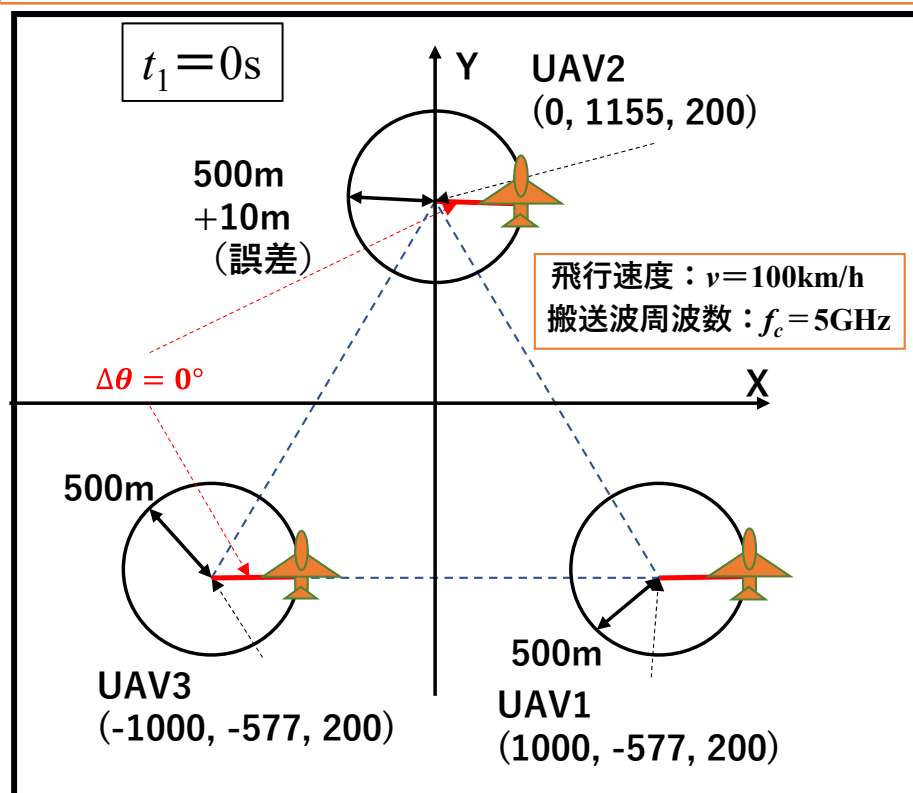
- U が十分に小さくなるまで更新 \Rightarrow ユーザ位置推定

- 時刻 t_j は1回測定手法では $j = 1$ のみ，2回測定手法では $j = 1, 2$ と設定
- 本研究では拡張性や実用性を考慮し，**最小二乗法に基づく位置検出手法**を採用

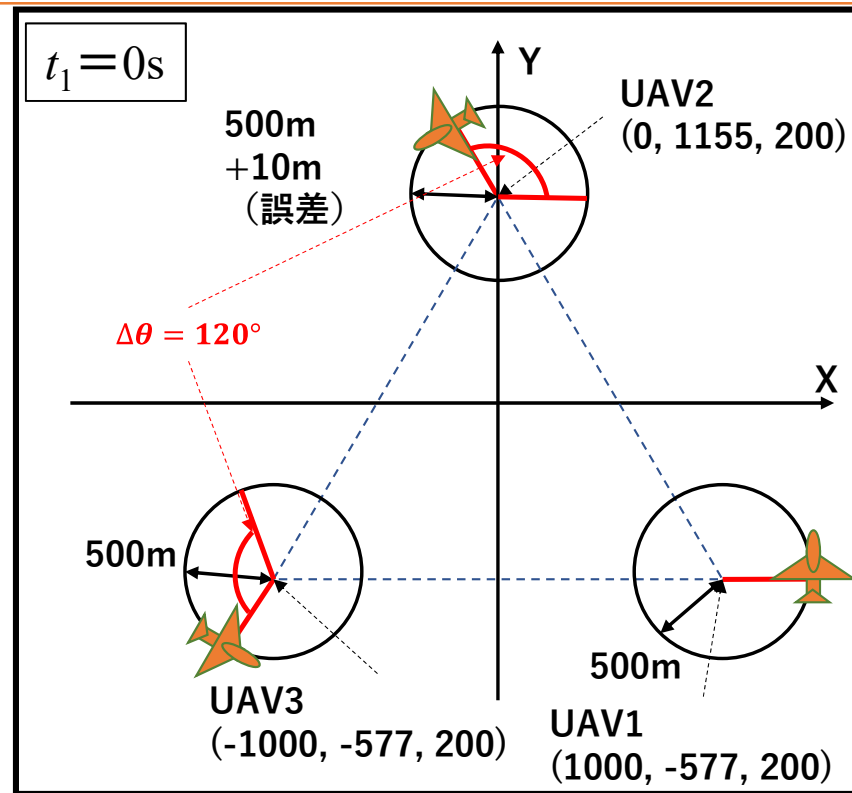
二次元測位と三次元測位の特性比較

シミュレーションモデル（1回測定手法）

- $\Delta\theta = 0^\circ, 120^\circ$ のUAV配置モデル2通り
- XY平面のみの二次元測位とZ軸方向含む三次元測位の2種類
- ドップラーシフトの測定回数1回（1回測定手法）
- 測定時間 $t_1 = 0\text{s} \sim 113.6\text{s}$
- 8km四方の評価対象エリア内を10m間隔で区切った交点（641601点）



(a)各UAVの初期位相差 0° の場合



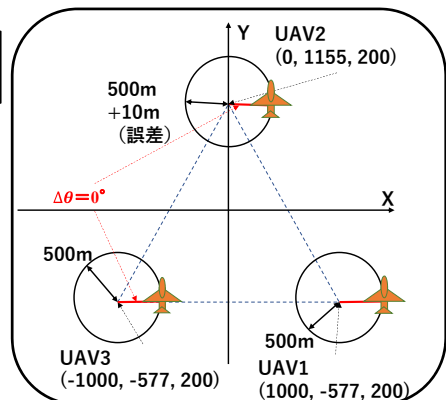
(b)各UAVの初期位相差 120° の場合

位置検出推定誤差の累積分布特性 ($t_1 = 0s$)

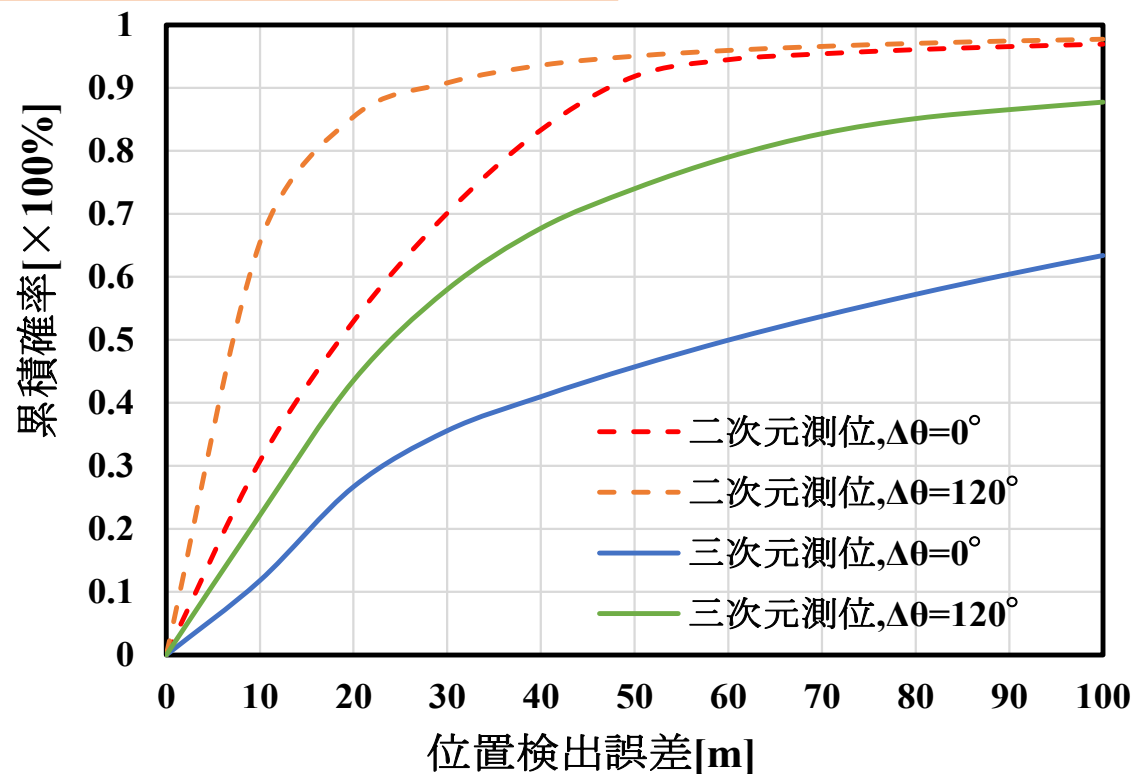
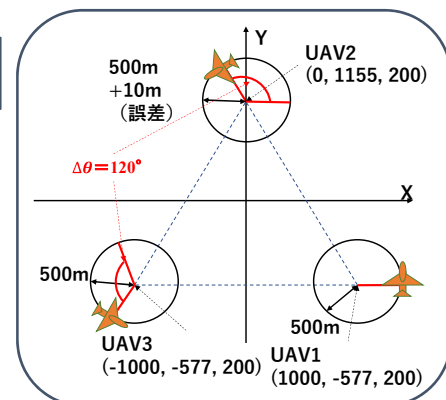
三次元測位では

- 測位精度：劣化傾向
- 初期位相差 $\Delta\theta = 120^\circ \rightarrow$ 測位精度：良好
- 初期位相差による測位精度の変化大
 \Rightarrow UAVの配置関係の影響が顕著

$\Delta\theta = 0^\circ$



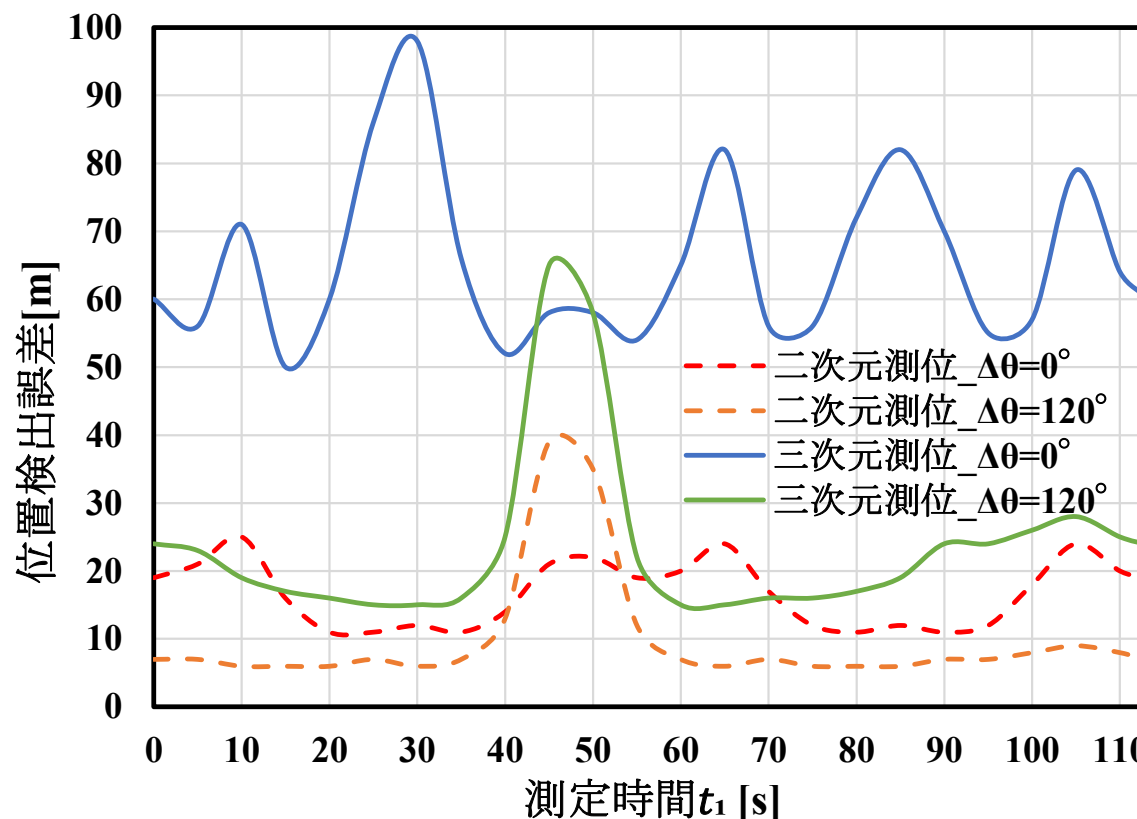
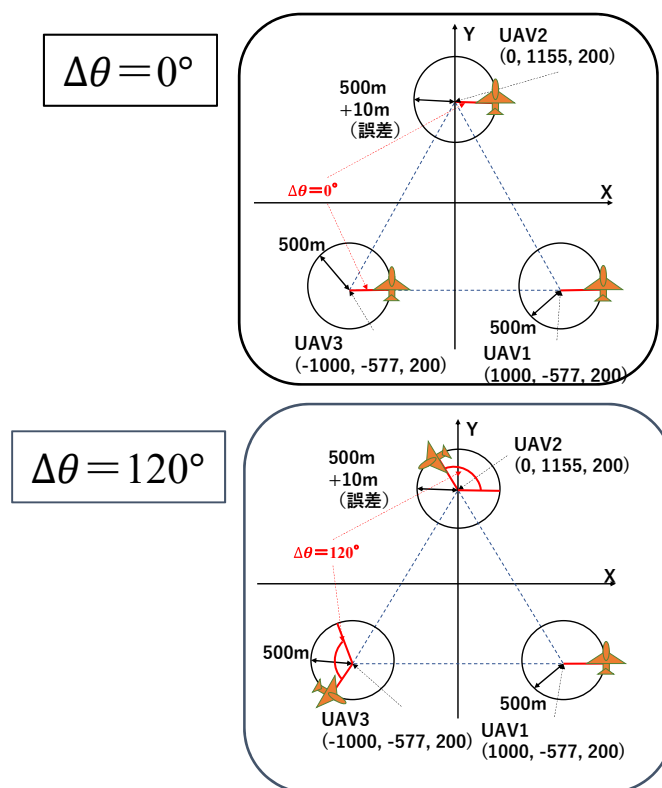
$\Delta\theta = 120^\circ$



位置検出推定誤差の時間変化特性 (累積確率50%値)

初期位相差 $\Delta\theta = 120^\circ$ の場合

- 測位精度：良好
(二次元測位:位置検出誤差10m以下,三次元測位:20m以下)
- $t_1 = 45\text{s}$ 付近 \Rightarrow 測位精度：劣化



位置検出推定誤差の時間変化特性 (XY平面とZ軸方向の比較, 累積確率50%値)

三次元測位 (XY平面) と二次元測位 \Rightarrow 測位精度が**ほぼ一致**

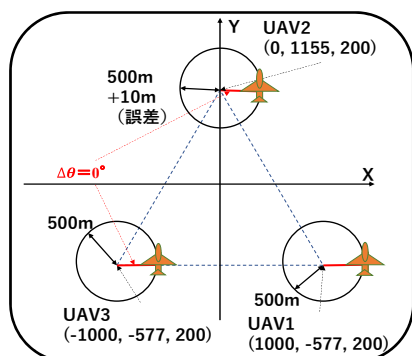
三次元測位 (Z軸方向) \Rightarrow 測位精度：**劣化傾向**

\Rightarrow 三次元測位は**Z軸方向の測位誤差が支配的**

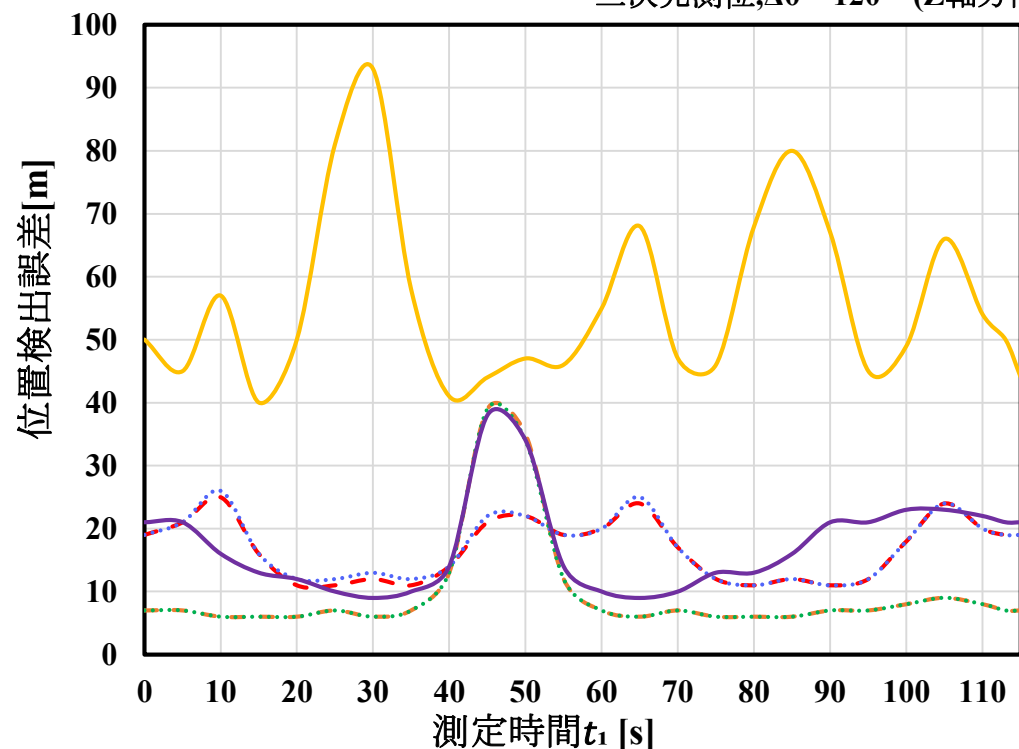
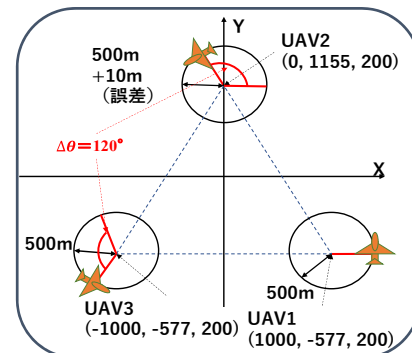
$\Delta\theta = 120^\circ$: $t_1=45s$ 付近でXY平面とZ軸方向ともに
測位精度は**局所的に劣化**

- 二次元測位, $\Delta\theta=0^\circ$
- 二次元測位, $\Delta\theta=120^\circ$
- 三次元測位, $\Delta\theta=0^\circ$ (XY平面)
- 三次元測位, $\Delta\theta=120^\circ$ (XY平面)
- 三次元測位, $\Delta\theta=0^\circ$ (Z軸方向)
- 三次元測位, $\Delta\theta=120^\circ$ (Z軸方向)

$\Delta\theta=0^\circ$



$\Delta\theta=120^\circ$



二次元測位と三次元測位の特性比較

●結果

三次元測位において

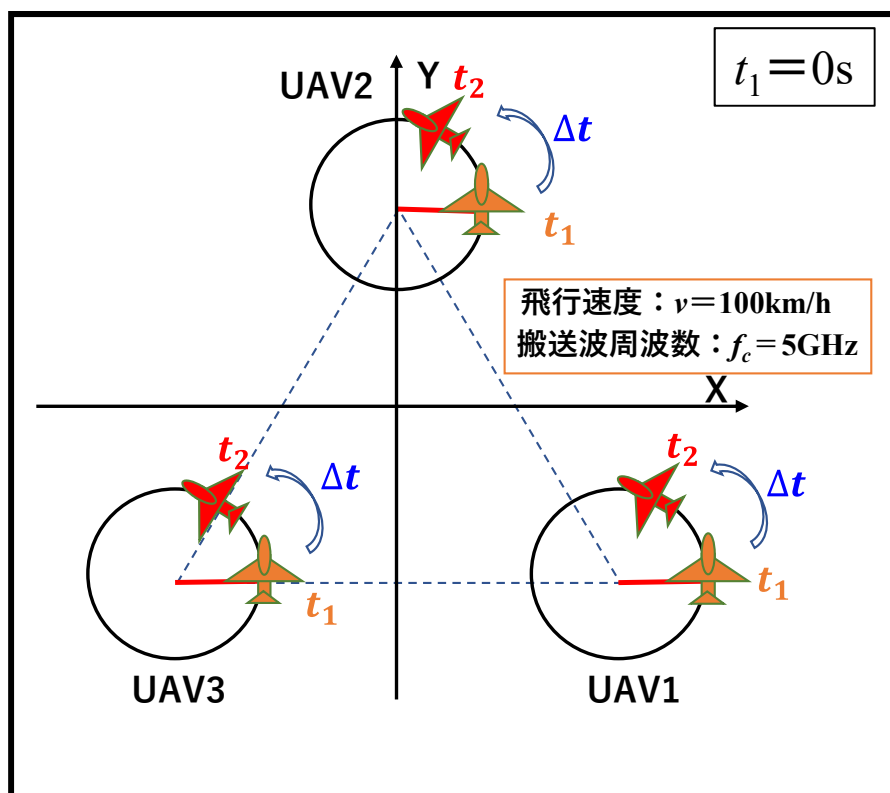
- Z軸方向の影響により測位精度が劣化傾向
- UAVの配置関係の影響が顕著
- 初期位相差 $\Delta\theta = 120^\circ$: 測位精度は良好

⇒位置検出精度の改善を目的として,
ドップラーシフトの測定回数を拡張

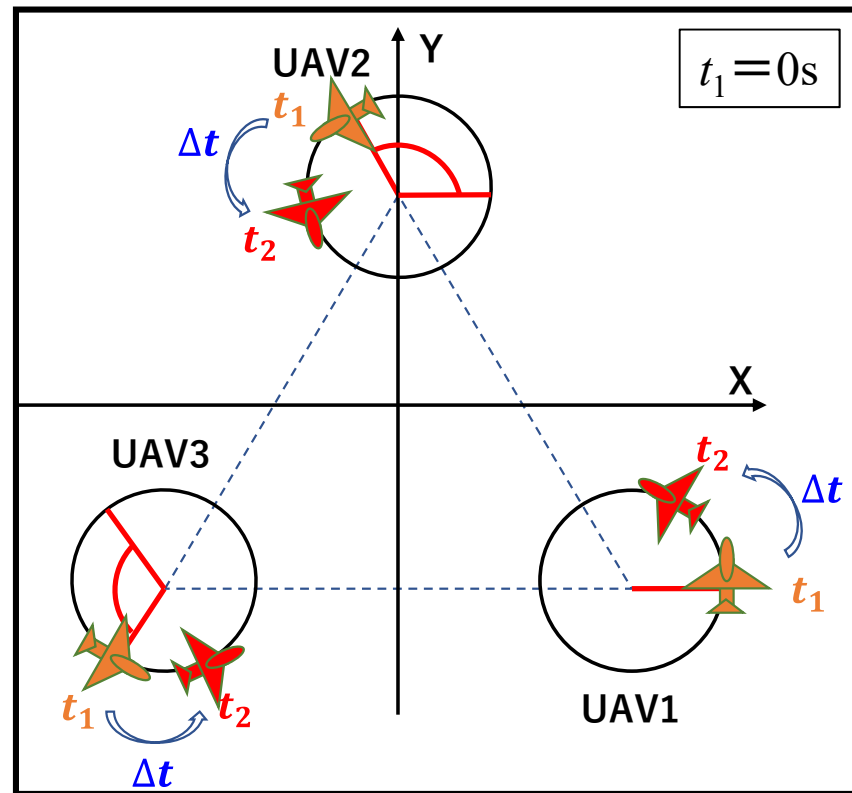
三次元測位の位置検出精度の改善手法

シミュレーションモデル（2回測定手法）

- Z軸方向含む三次元測位：測位精度は劣化
- ドップラーシフトの測定回数2回（2回測定手法）に拡張
- $\Delta\theta = 0^\circ, 120^\circ$ のUAV配置モデル2通り
- 1回目の測定時間 $t_1 = 0\text{s} \sim 113.6\text{s}$ ，測定時間間隔 $\Delta t (= t_2 - t_1) = 0\text{s} \sim 110\text{s}$
- 8km四方の評価対象エリア内を10m間隔で区切った交点（641601点）



(a)各UAVの初期位相差 0° の場合



(b)各UAVの初期位相差 120° の場合

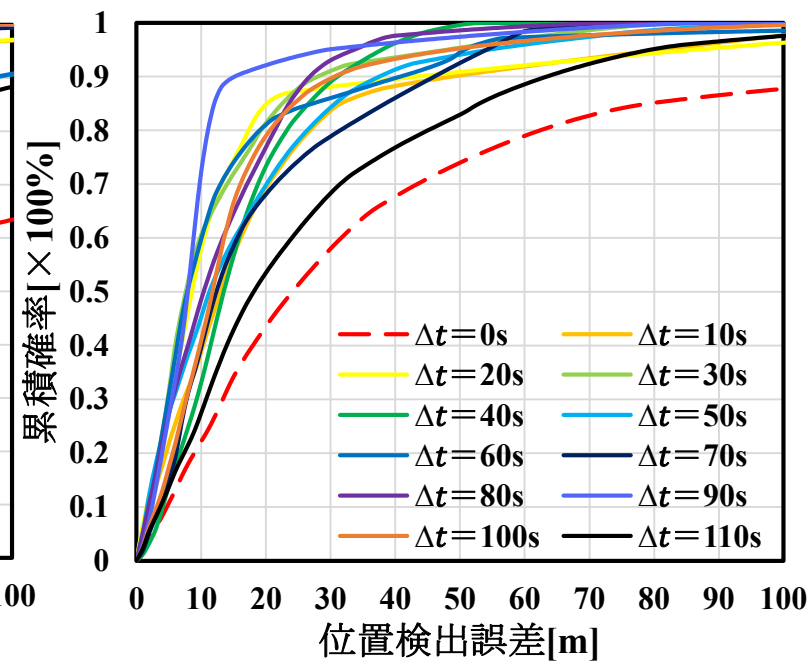
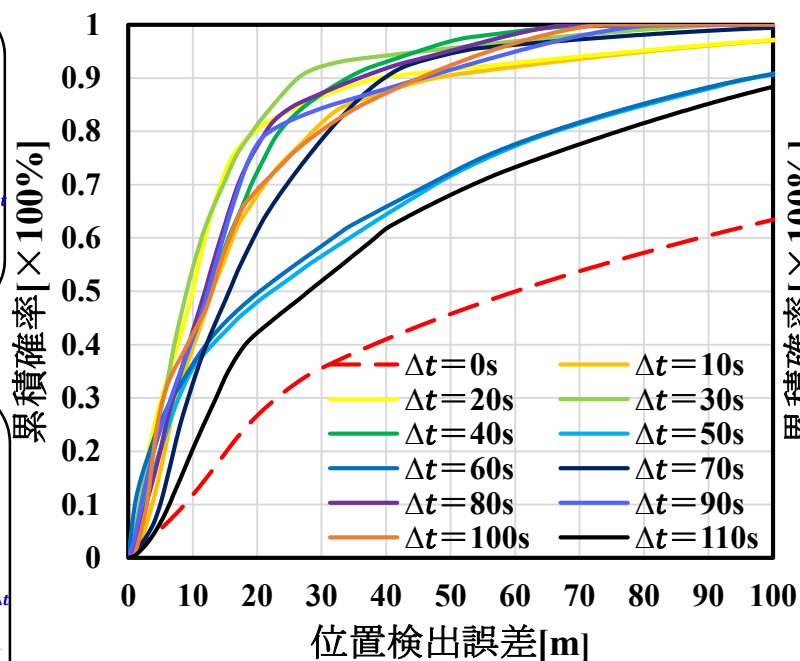
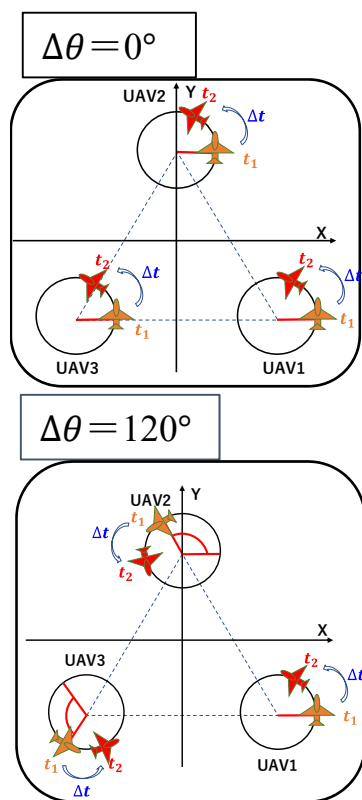
位置検出推定誤差の累積分布特性 ($t_1 = 0s$, 2回測定手法)

$\Delta t = 0s$ 以外

- $\Delta\theta = 0^\circ$: 位置検出誤差30m以下 (累積確率50%値)
- $\Delta\theta = 120^\circ$: 位置検出誤差20m以下 (累積確率50%値)

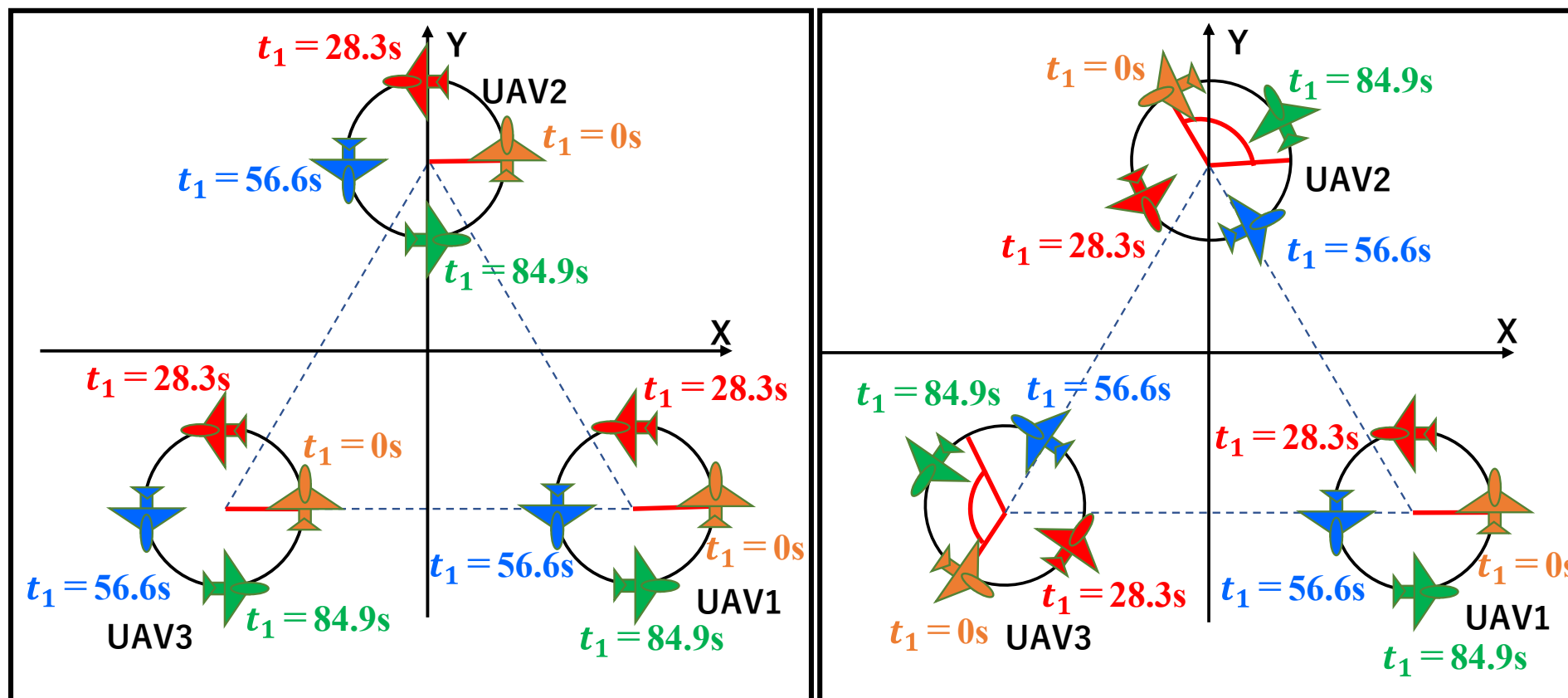
⇒2回測定手法では特に初期位相差 $\Delta\theta = 0^\circ$ の場合で測位精度が大幅に改善

ただし、最適な測定時間間隔が存在



シミュレーションモデル（2回測定手法）

- 2回測定手法における最適な測定時間間隔を検討
- 円周上の異なる点から測定を開始
- 1回目の測定時間 $t_1 = 0s, 28.3s, 56.6s, 84.9s$ の4通りのUAV初期配置



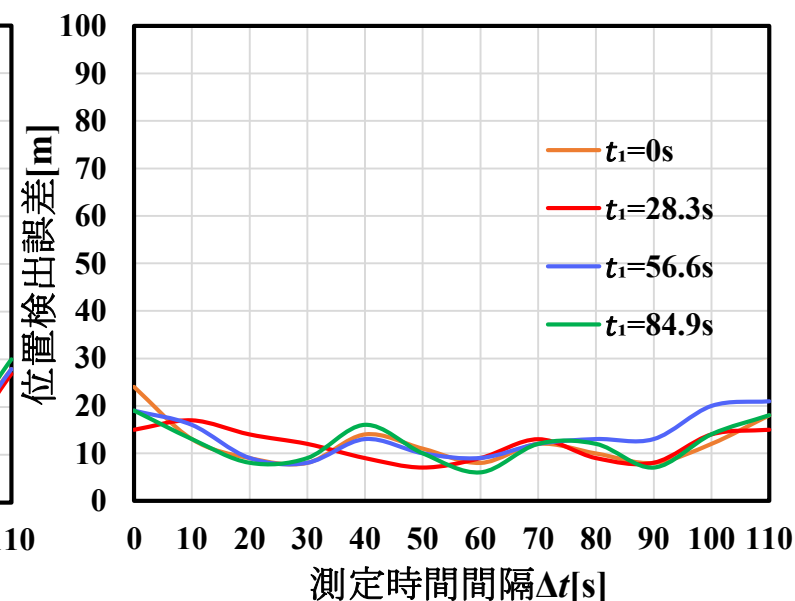
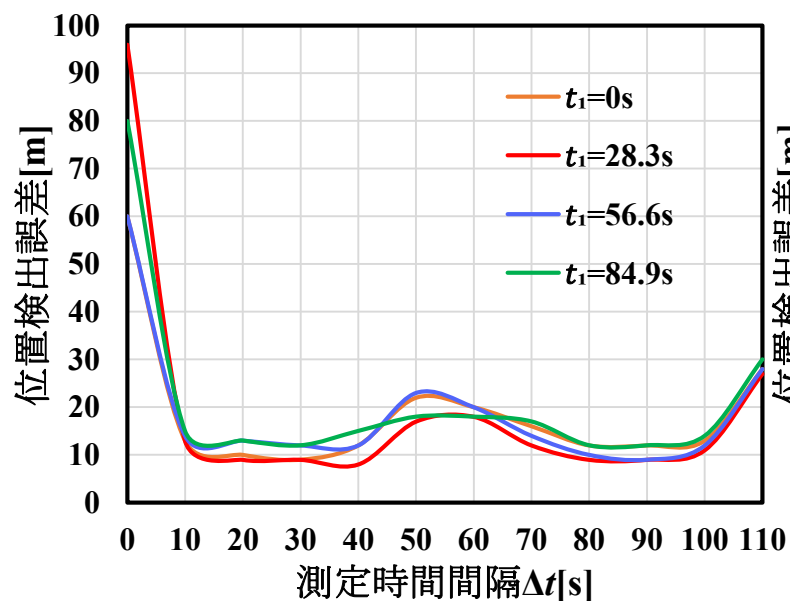
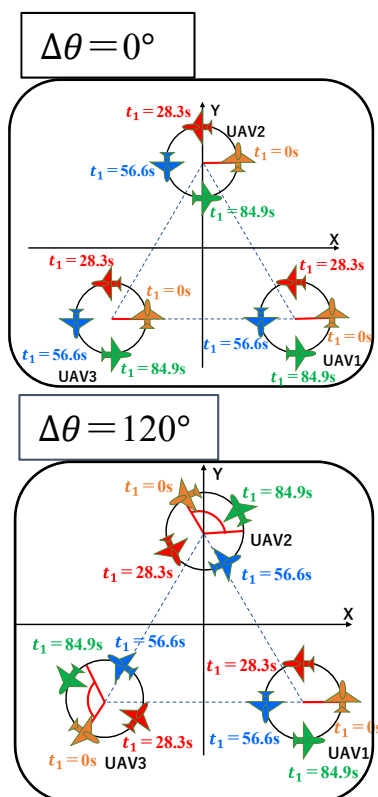
(a)各UAVの初期位相差 0° の場合

(b)各UAVの初期位相差 120° の場合

位置検出推定誤差の測定時間間隔特性 ($t_1 = 0s, 28.3s, 56.6s, 84.9s$, 累積確率50%値)

- $\Delta t = 0s$ 以外：測位精度は良好
($\Delta\theta = 0^\circ$ ：位置検出誤差30m以下, $\Delta\theta = 120^\circ$ ：20m以下)
 - $\Delta t = 20\sim 30s$ ：位置検出誤差約10m
- ⇒ $\Delta t = 20\sim 30s$ 程度で十分な測位精度改善効果

⇒2回測定手法： $\Delta t = 20s, 30s$ に固定
1回測定手法と時間変化による特性差を詳細に比較



位置検出推定誤差の時間変化特性 ($\Delta\theta = 0^\circ$)

($\Delta t = 20\text{s}, 30\text{s}$ 固定, 累積確率50%値)

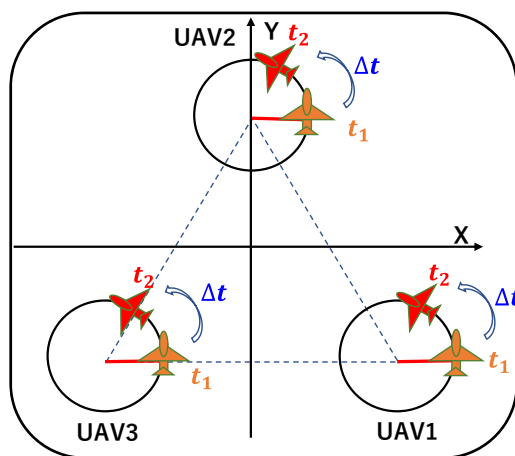
1回測定手法:

- 測位精度が**大きく劣化** (位置検出誤差約60m, **最大96m**)

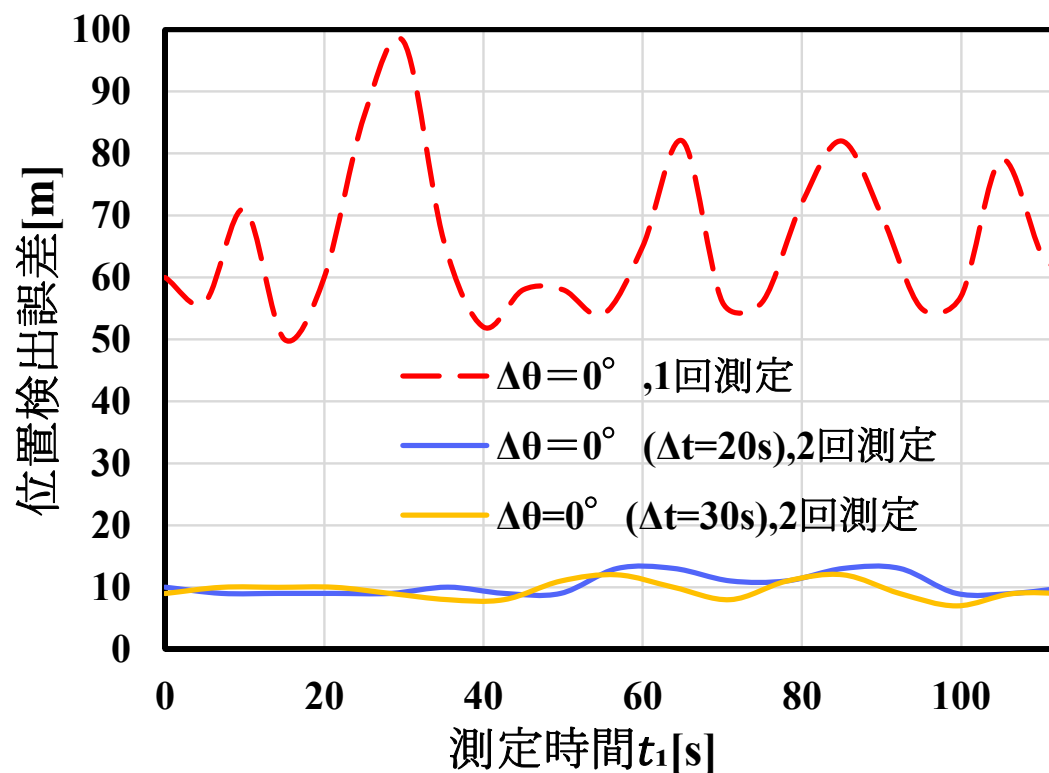
2回測定手法:

- $\Delta t = 20\text{s}, 30\text{s} \Rightarrow$ **位置検出誤差約10m**

\Rightarrow 2回測定手法における測位精度改善効果**大** ($\Delta t = 20\text{s}$ で十分)



$$\Delta\theta = 0^\circ$$



位置検出推定誤差の時間変化特性 ($\Delta\theta = 120^\circ$)

($\Delta t = 20\text{s}, 30\text{s}$ 固定, 累積確率50%値)

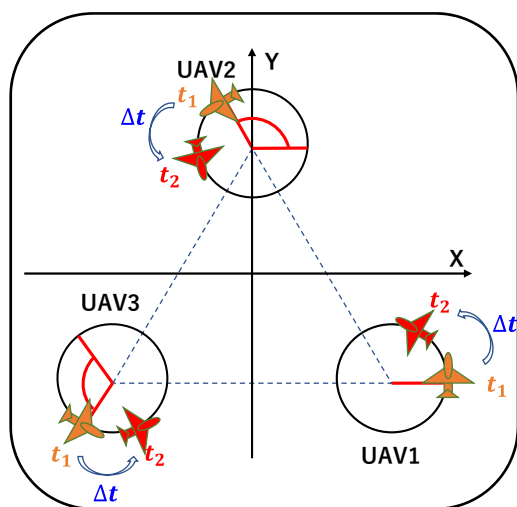
1回測定手法:

- 測位精度は比較的**良好** (位置検出誤差約**20m**)
- $t_1 = 45\text{s}$ 付近で測位精度が**劣化**

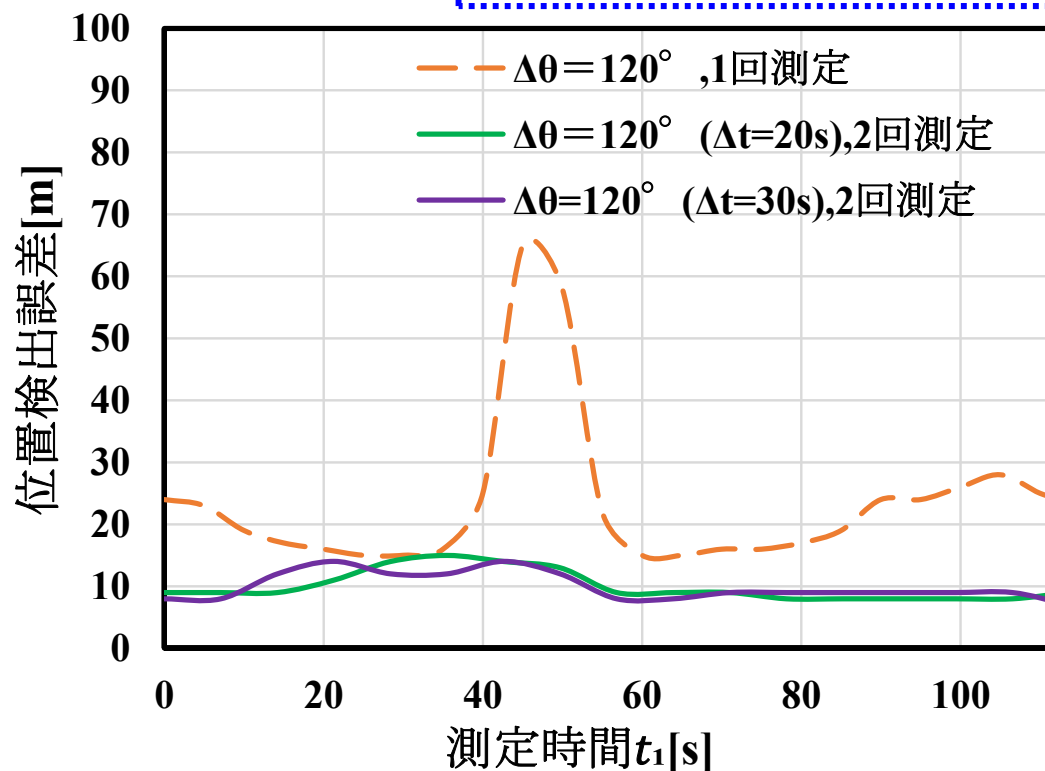
2回測定手法:

- $\Delta t = 20\text{s}, 30\text{s} \Rightarrow$ 位置検出誤差約**10m**

\Rightarrow 2回測定手法における測位精度改善効果**小**, **局所的な測位精度の劣化を改善**



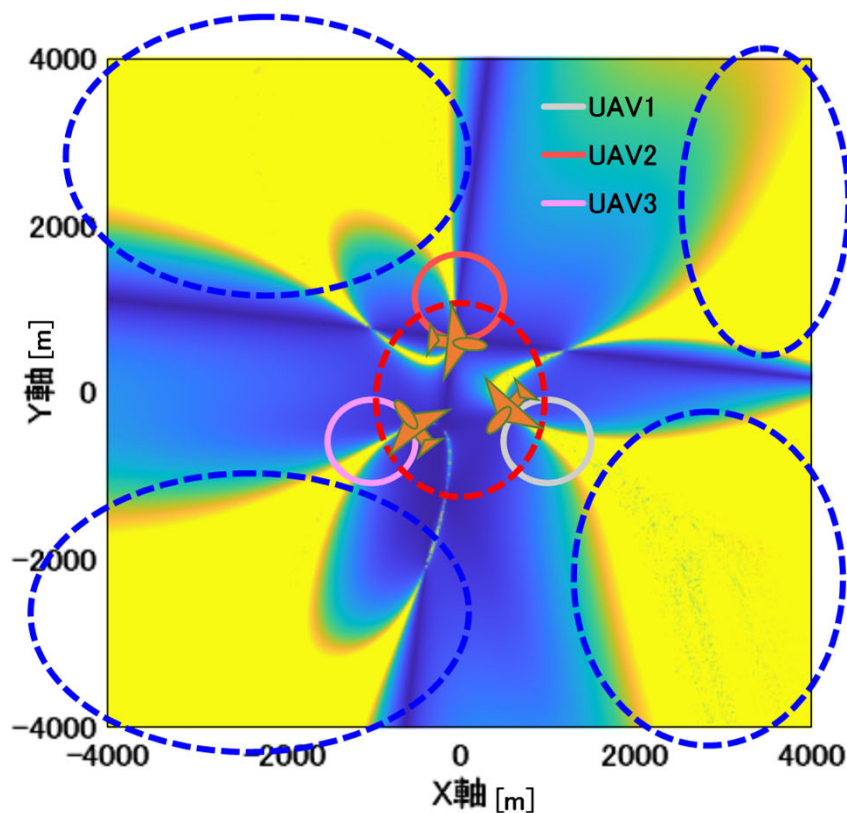
$$\Delta\theta = 120^\circ$$



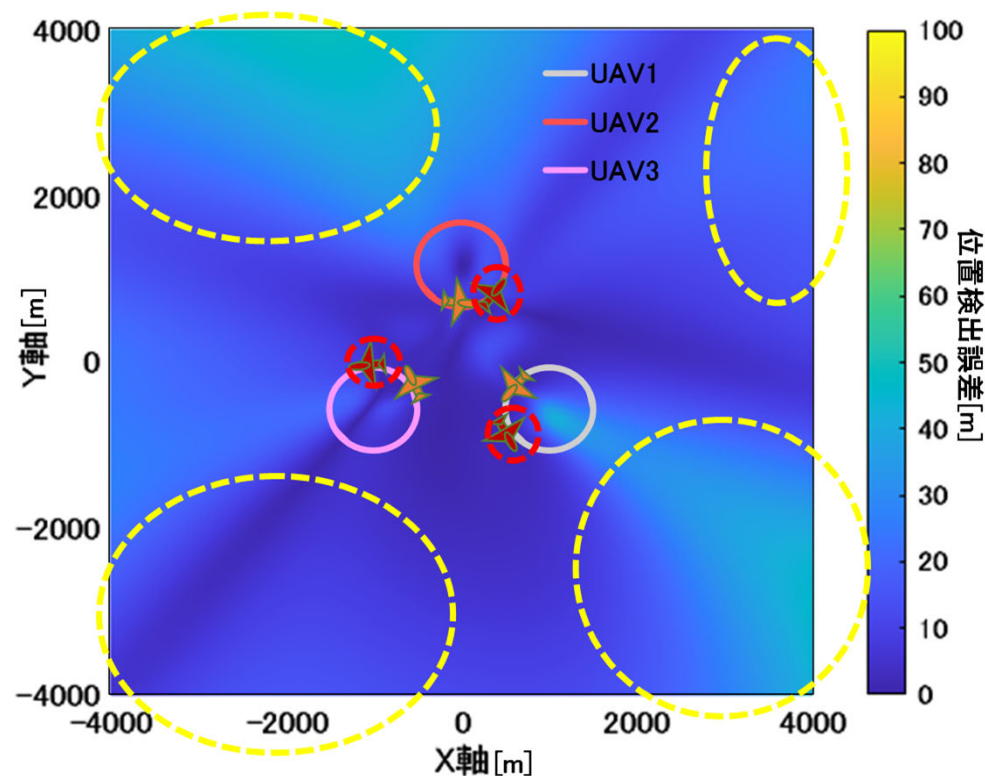
$t_1=45s$ におけるドップラーシフトの面的分布 (2回測定手法: $\Delta t = 20s$)

2回目の測定でUAVの配置関係改善及びドップラーシフトの双曲面増加
⇒交点として解が得られやすくなる

青色のエリア⇒測位精度良好
黄色のエリア⇒測位精度劣化



(a)1回測定時の面的分布



(b)2回測定時の面的分布

三次元測位の位置検出精度改善手法

●結果

ドップラーシフトの測定回数を拡張することで

- $\Delta\theta = 0^\circ$: 測位精度の改善効果**大**
(測定時間間隔 $\Delta t = 20\text{s}$ 程度で十分な測位精度改善)
- $\Delta\theta = 120^\circ$: 測位精度の改善効果**小**

局所的な測位精度の劣化が改善

(2回測定手法 : UAV配置による測位精度への直接的な影響を軽減)

まとめ

まとめ

●本研究

- ① 従来の二次元測位をユーザの高度情報を加えた三次元測位に拡張し、三次元測位の有効性の検証
 - ② 三次元測位の測位精度改善を目的として、ドップラーシフトの測定回数を拡張した2回測定手法の測位精度改善効果についての評価
- 3機のUAVが円周回飛行をするモデル
 - 最小二乗法を用いたシミュレーション
- ① 二次元測位と三次元測位の位置検出誤差特性の比較・評価
 - ② ドップラーシフトの測定回数を2回に拡張した場合の位置検出特性の評価

●結果

- ① ユーザの高さ方向（Z軸方向）を含む三次元測位は
 - 測位精度が大きく劣化
 - UAVの配置関係の影響大
- ② 三次元測位はドップラーシフトの測定回数を拡張することで
 - 測位精度は測定時間間隔 $\Delta t = 20\text{s}$ 程度で十分な改善効果
 - UAV配置による測位精度への影響を軽減

まとめ

●今後の課題

- 三次元測位における最適なUAV初期配置及び各パラメータの検討
- UAVの初期配置や飛行経路による高さ方向の測位精度の解析
- ユーザ三次元位置検出時の測位精度を定性的に推定する手法の提案

発表リスト

- ① 深谷, 石川, “**曲線飛行を行う 1 機の無人航空機を用いた位置検出手法に関する特性評価**”, 2020年電気関係学会東北支部連合大会, 2020-08.
- ② 深谷, 石川, “**曲線飛行を行う 1 機の無人航空機を用いた位置検出手法の特性評価**”, 2020年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2020-09.
- ③ 深谷, 石川, “**3機の無人航空機を用いたユーザ三次元位置検出手法の基礎検討**”, 第63回日本大学工学部学術研究報告会, 2020-12.
- ④ 深谷, 石川, “**3機の無人航空機を用いたユーザ三次元位置検出手法の特性評価**”, 電子情報通信学会衛星通信研究会(SAT), 2021-07.
- ⑤ 深谷, 石川, “**3機の無人航空機を用いたユーザ三次元位置検出手法の測位精度改善**”, 2021年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2021-09.
- ⑥ 深谷, 石川, “**3機の無人航空機を用いたユーザ三次元位置検出手法の測位精度改善効果**”, 第64回日本大学工学部学術研究報告会, 2021-12.

補足

ドップラーシフトについて

- 地上のユーザ位置(x, y, z)
- 時刻 t で i 番目($i=1, 2, 3$)のUAV飛行位置($X_i(t), Y_i(t), Z_i(t)$)
- 各UAVの速度ベクトル $V_i(t) = (V_{xi}(t), V_{yi}(t), V_{zi}(t))$
- このとき, 時刻 t に観測したユーザと i 番目のUAV間に生じるドップラーシフト $fd_i(t)$ は次式となる

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

※搬送波周波数の波長: λ

ユーザ位置の変化量($\Delta x, \Delta y, \Delta z$)

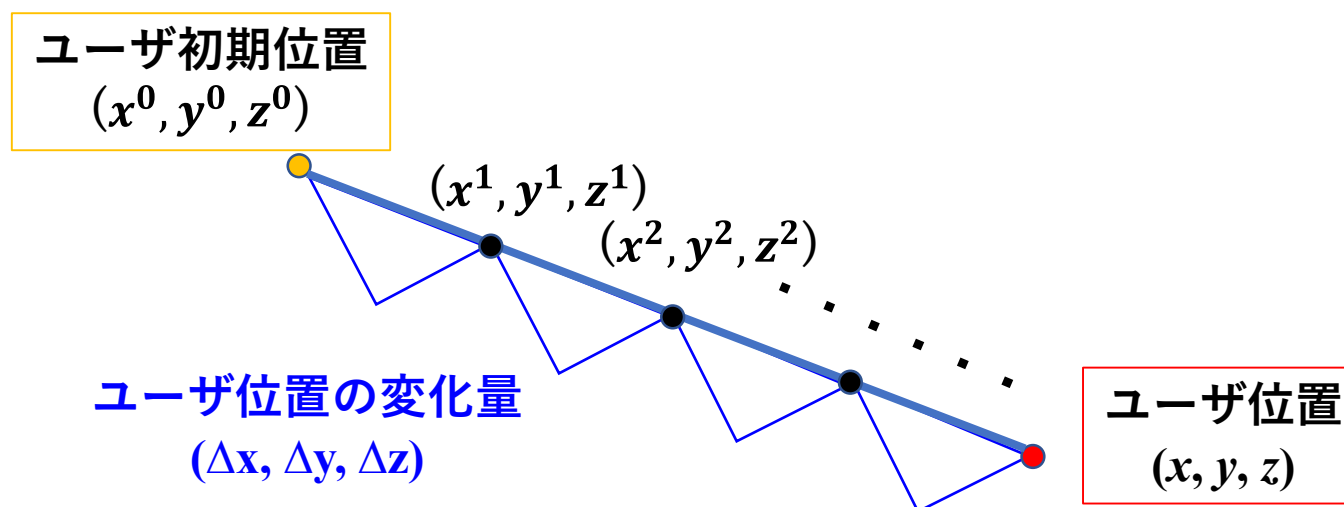
- ユーザ位置(x, y, z)の初期値として(x^0, y^0, z^0)を想定した場合
(x^0, y^0, z^0)から導いたドップラーシフトとの測定残差成分 $\Delta f d_i$ は次式となる

$$\Delta f d_i(t) = f d m_i(t) - f d_i^0(t)$$

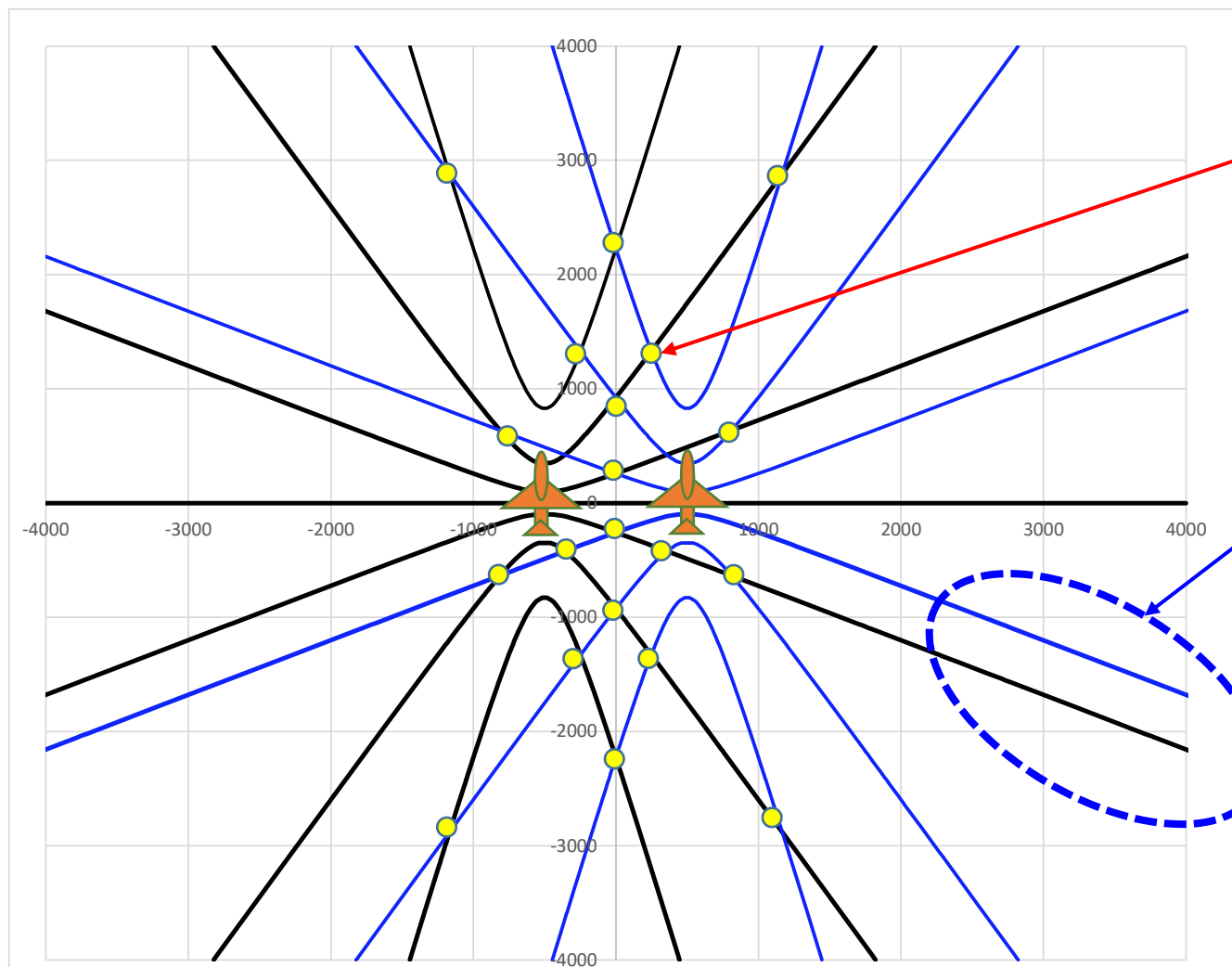
$f d m_i(t)$: 真のドップラーシフト

- このドップラーシフトの残差を解消するためユーザの初期値(x^0, y^0, z^0)から
追い込み処理を行ったもの

⇒ユーザ位置の変化量($\Delta x, \Delta y, \Delta z$)



複数のUAVによる ドップラーシフト分布



ユーザ位置を双曲面の
交点として検出
(交点を得られやすい)

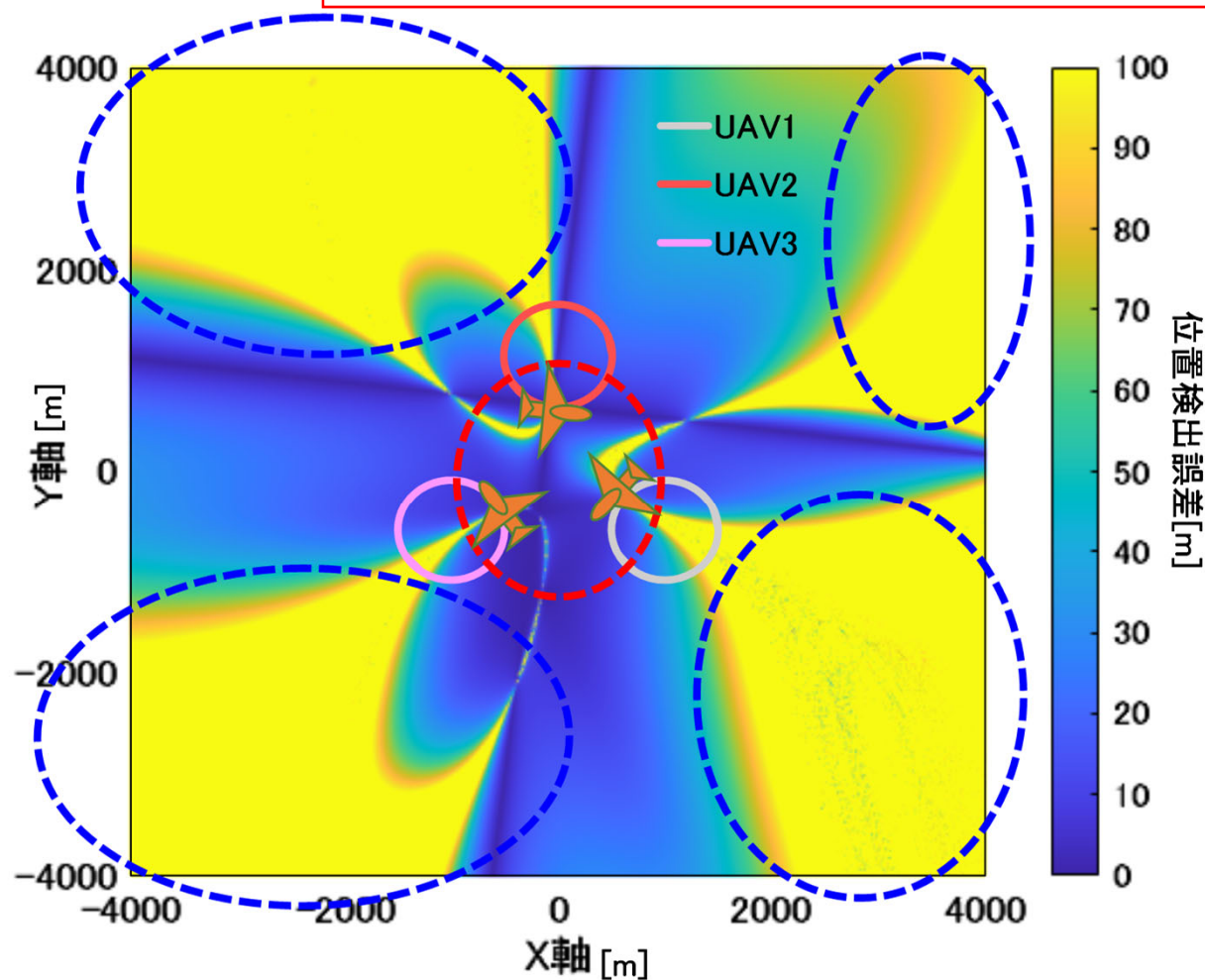
双曲面が平行に近づくと
交点を得られにくい

UAVの位置的関係（三次元測位）

$t_1=45s$ における初期位相差 $\Delta\theta = 120^\circ$ の面的分布

青色のエリアほど位置検出誤差が $\approx 0m \Rightarrow$ 測位精度**良好**

黄色のエリアほど位置検出誤差が $\geq 100m \Rightarrow$ 測位精度**劣化**



各UAVの飛行位置が
極端に接近

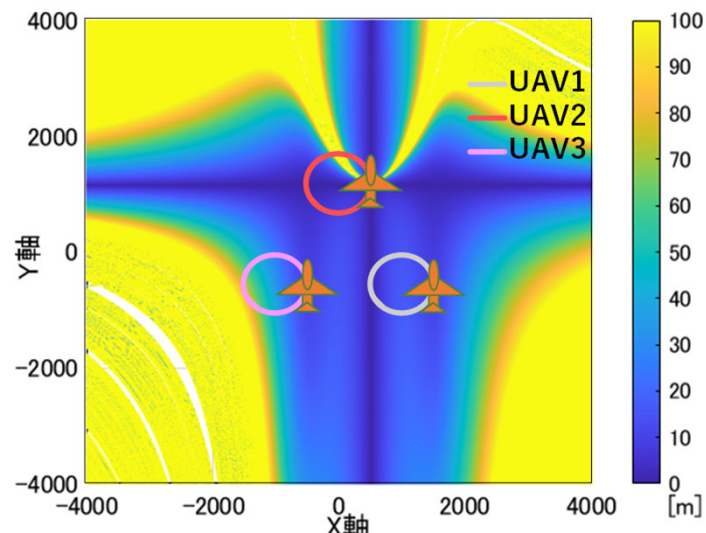


ドップラーシフト双曲面分布が
互いに接する関係

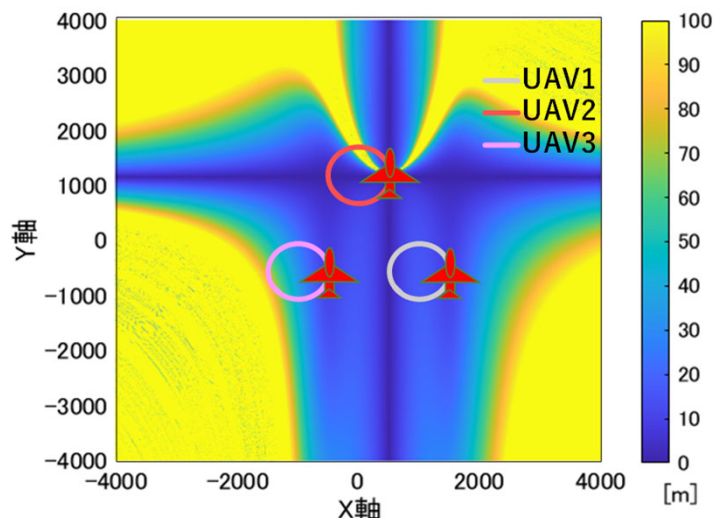


交点が得られにくい領域が発生

2回測定手法 ($\Delta t = 0s$) と1回測定手法の関係



(a) 1回測定時の面的分布 ($t_1 = 0s$)

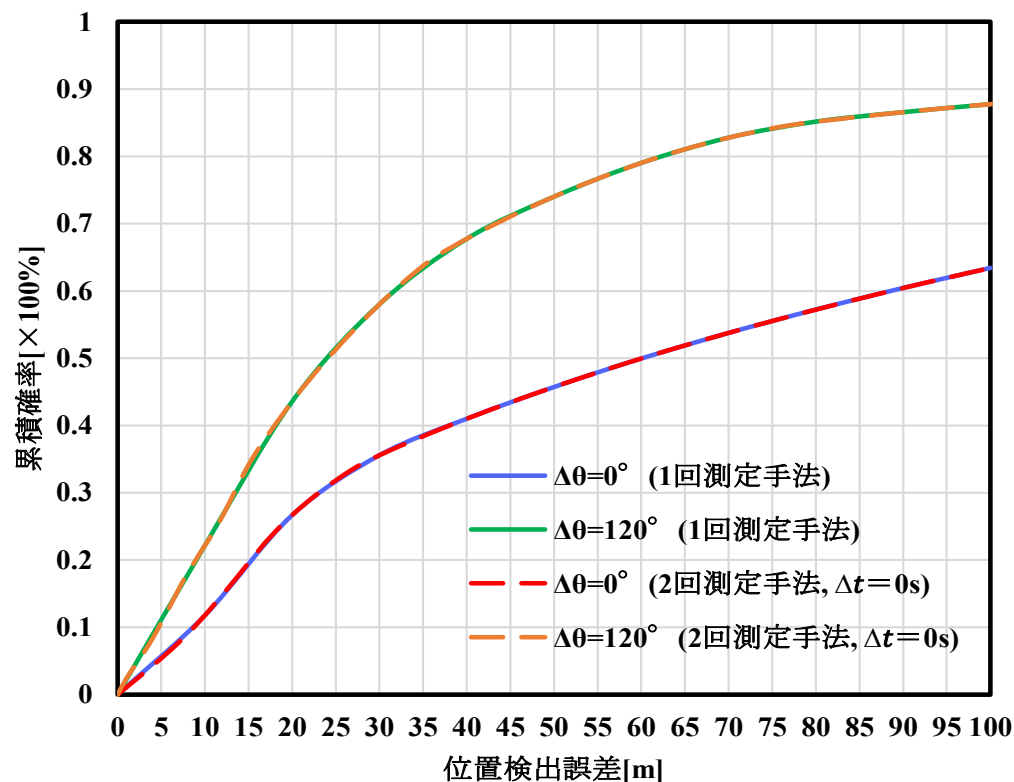


(b) 2回測定時の面的分布 ($t_1 = 0s, \Delta t = 0s$)

測定時間間隔 $\Delta t = 0s$ は,

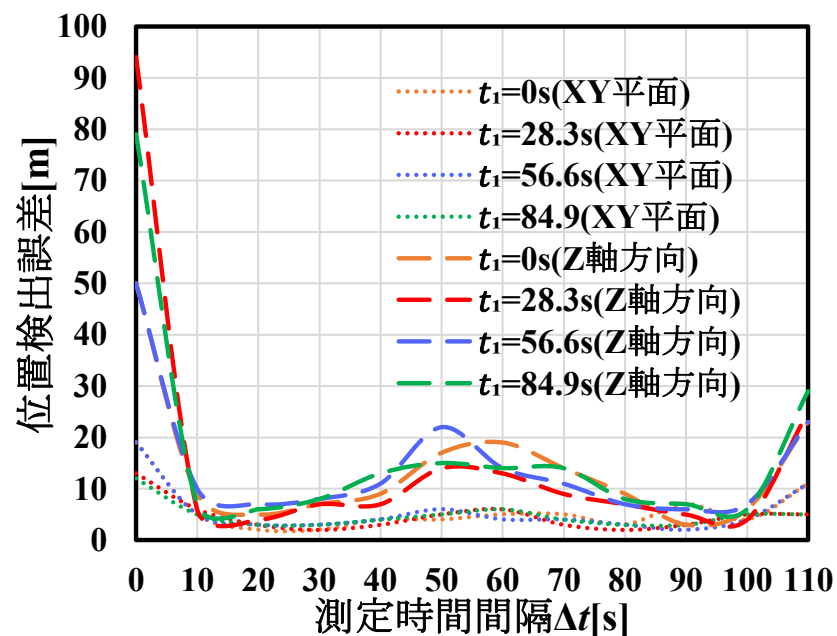
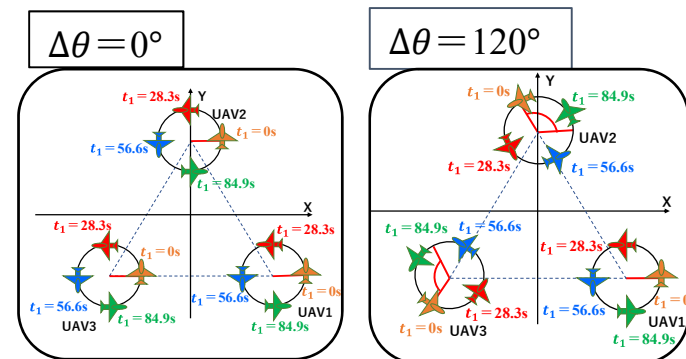
2回目のドップラーシフト測定時のUAV配置
と1回目の測定時のUAV配置が重なって一致

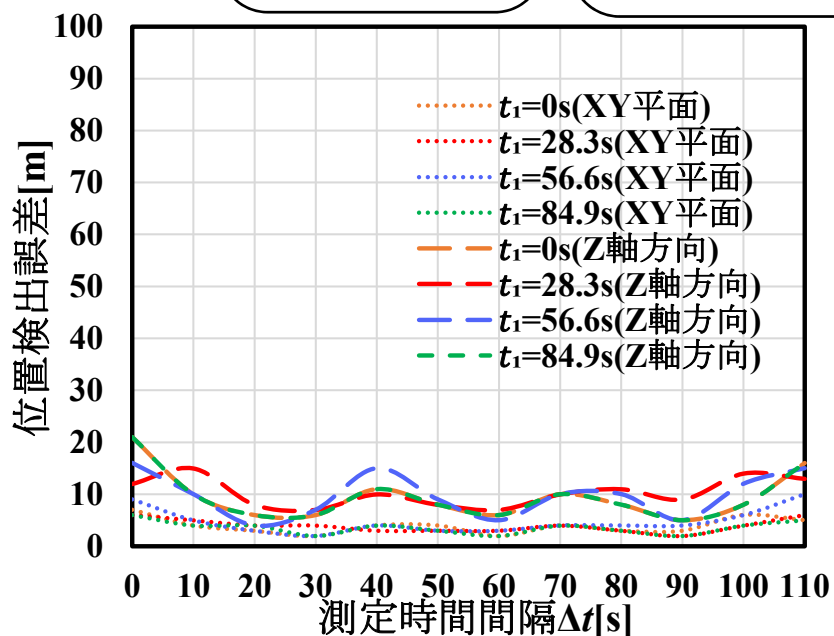
⇒ 1回測定手法の測定時間 $t_1 = 0s$ における位置検出誤差の累積分布特性と同じ測位精度



位置検出推定誤差の時間特性 (XY平面とZ軸方向の比較, 累積確率50%値)

- Z軸方向は三次元測位と同様の特性
⇒Z軸方向の影響が支配的
- 初期位相差による特性差小



$$\Delta\theta = 0^\circ$$


$$\Delta\theta = 120^\circ$$

位置検出推定誤差の時間変化特性

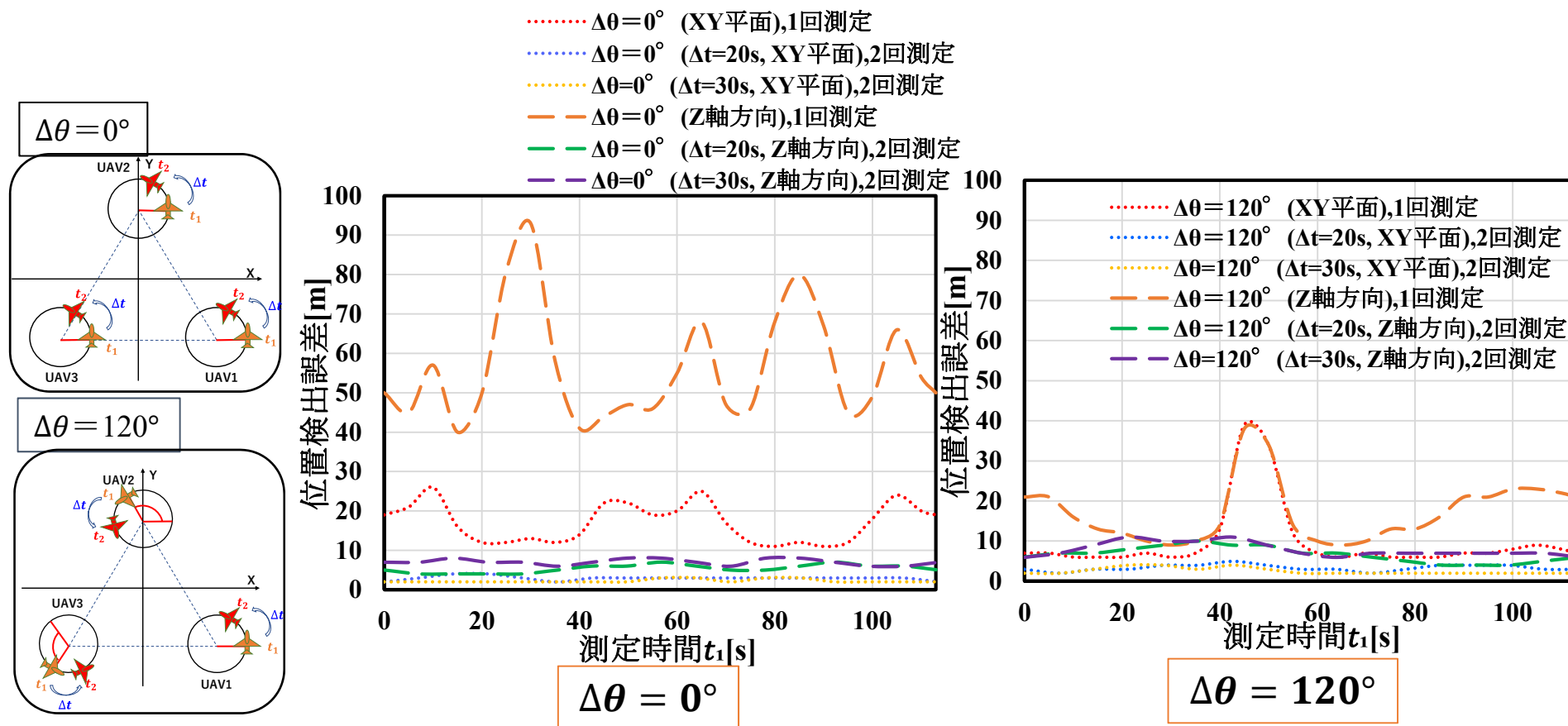
($\Delta t = 20s, 30s$ 固定, XY平面とZ軸方向の比較, 累積確率50%値)

- 1回測定手法

Z軸方向においても $t_1 = 45s$ 付近で測位精度劣化 ($\Delta\theta = 120^\circ$)

- 2回測定手法

⇒測位精度は全体的に良好, 特に初期位相差 $\Delta\theta = 0^\circ$ 改善効果大



初期位相差 $\Delta\theta = 120^\circ$ 与えた場合の位置検出誤差の変化指標 (累積確率50%値)

- 二次元測位と三次元測位の位置検出誤差について、初期位相差 $\Delta\theta = 120^\circ$ を与えたときに生じる位置検出誤差の変化量の割合を示す指標として、位置検出誤差の「**変化指標**」と定義

$$\text{変化指標}[\%] = \frac{\text{初期位相差}\Delta\theta = 120^\circ\text{与えた場合の位置検出誤差の変化量}}{\text{初期位相差}\Delta\theta = 0^\circ\text{の場合の位置検出誤差}} \times 100$$

t [s]	二次元測位	三次元測位	三次元測位(XY平面)	三次元測位(Z軸方向)
	位置検出誤差変化指標[%]			
0	63.2	60.0	63.2	58.0
5	66.7	58.9	66.7	53.3
10	76.0	73.2	76.9	71.9
15	62.5	66.0	62.5	67.5
20	45.5	73.3	50.0	76.0
25	36.4	82.6	41.7	87.7
30	50.0	84.7	53.8	90.3
35	36.4	75.8	41.7	82.8
40	7.1	51.9	7.1	65.9
45	-85.7	-12.1	-77.3	13.6
50	-59.1	0.0	-54.5	27.7
55	36.8	59.3	36.8	69.6
60	65.0	76.9	65.0	81.8
65	75.0	81.7	76.0	86.8
70	58.8	71.4	58.8	78.7
75	50.0	71.4	50.0	71.7
80	45.5	76.4	45.5	80.9
85	50.0	76.8	50.0	80.0
90	36.4	65.7	36.4	68.7
95	41.7	56.4	41.7	53.3
100	55.6	54.4	55.6	53.1
105	62.5	64.6	62.5	65.2
110	60.0	60.9	60.0	59.3
115	63.2	54.7	63.2	52.3

- 二次元測位と三次元測位のXY平面の位置検出誤差の**変化傾向一致**
- 三次元測位はZ軸方向の特性と傾向が一致

2回測定手法における位置検出誤差の改善指標① (累積確率50%値)

- 2回測定手法に拡張した際の1回測定手法時に対する位置検出誤差の改善量の変化割合を指標として位置検出誤差の「改善指標」と定義

$$\text{改善指標}[\%] = \frac{\text{2回測定手法にした場合の位置検出誤差の変化量}}{\text{1回測定手法の位置検出誤差}} \times 100$$

初期位相差 $\Delta\theta = 0^\circ$ の場合

Δt [s]	$t_1=0s$	$t_1=28.3s$	$t_1=56.6s$	$t_1=84.9s$
	位置検出誤差改善指標[%]			
10	78.3	86.5	76.7	81.3
20	83.3	90.6	78.3	83.8
30	85.0	90.6	80.0	85.0
40	80.0	91.7	80.0	81.3
50	63.3	82.3	61.7	77.5
60	66.7	81.3	66.7	77.5
70	73.3	87.5	76.7	78.8
80	80.0	90.6	83.3	85.0
90	80.0	90.6	85.0	85.0
100	78.3	88.5	80.0	82.5
110	53.3	71.9	53.3	62.5

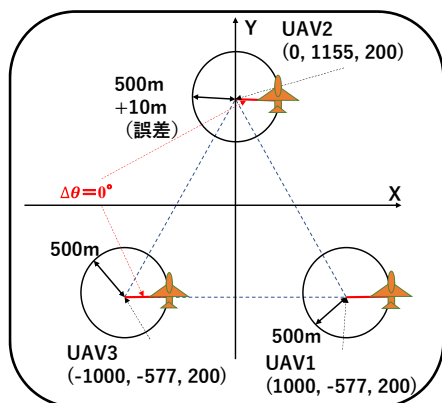
初期位相差 $\Delta\theta = 120^\circ$ の場合

Δt [s]	$t_1=0s$	$t_1=28.3s$	$t_1=56.6s$	$t_1=84.9s$
	位置検出誤差改善指標[%]			
10	45.8	-13.3	15.8	31.6
20	62.5	6.7	52.6	57.9
30	66.7	20.0	57.9	52.6
40	41.7	40.0	31.6	15.8
50	54.2	53.3	47.4	47.4
60	66.7	40.0	52.6	68.4
70	50.0	13.3	36.8	36.8
80	58.3	40.0	31.6	36.8
90	66.7	46.7	31.6	63.2
100	50.0	6.7	-5.3	26.3
110	25.0	0.0	-10.5	5.3

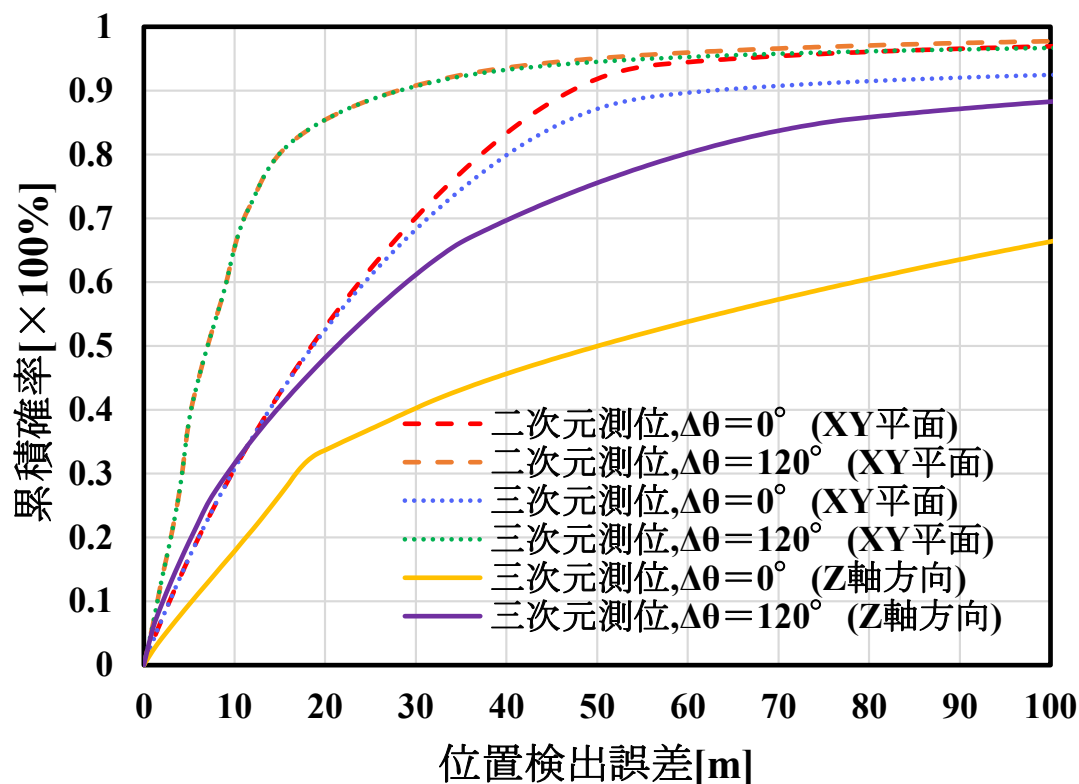
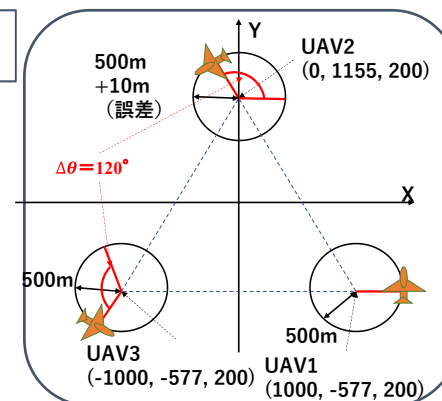
位置検出推定誤差の累積分布特性 ($t_1 = 0s$, XY平面とZ軸方向の比較)

- 三次元測位 (XY平面) と二次元測位 : 測位精度がほぼ一致
⇒ 三次元測位はZ軸方向の測位誤差が支配的
- $\Delta\theta = 120^\circ$: Z軸方向の測位精度良好
⇒ 三次元測位 : UAV配置関係の影響が顕著 → Z軸方向の特性

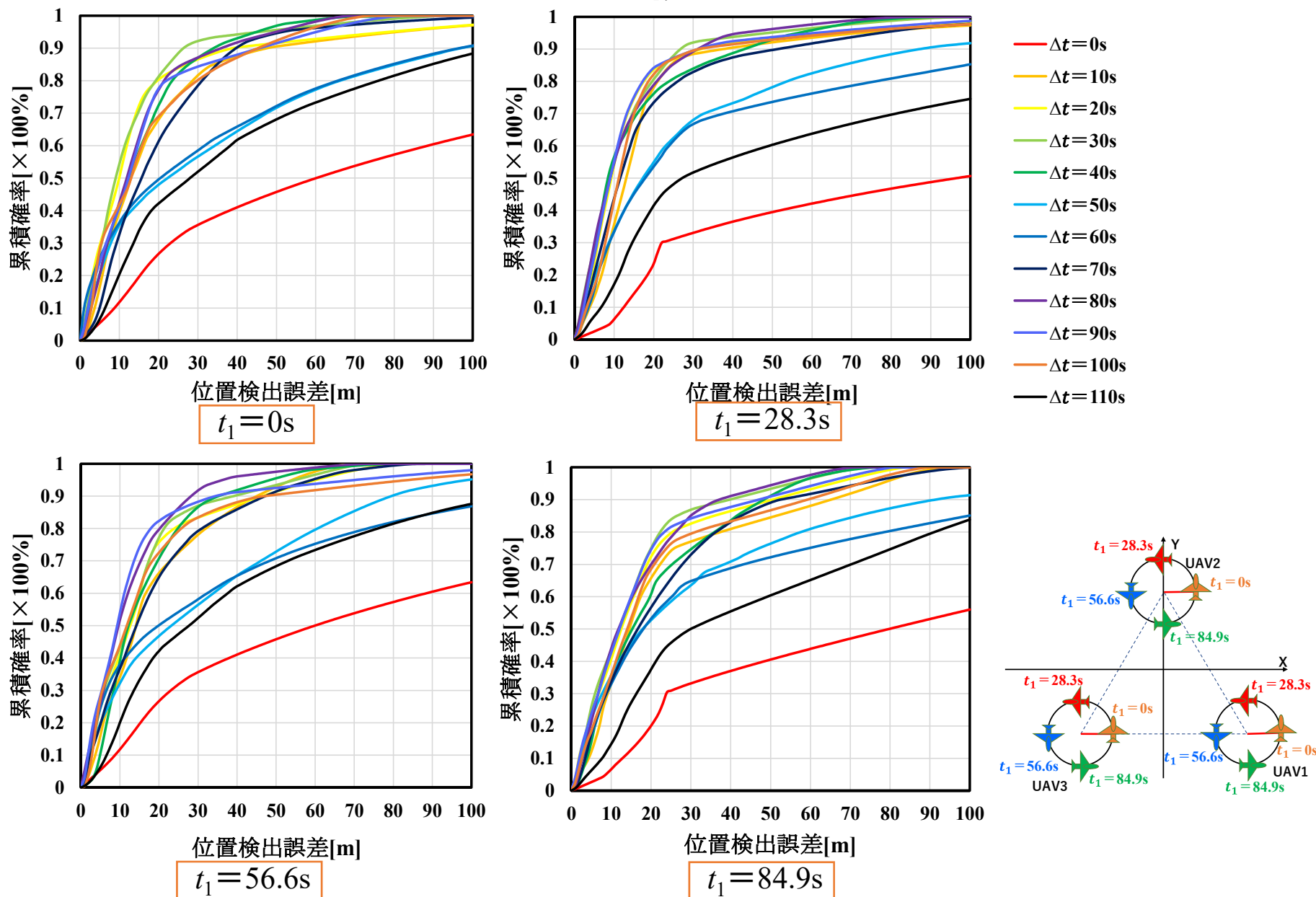
$\Delta\theta = 0^\circ$



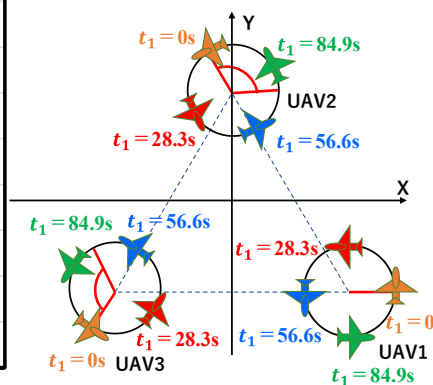
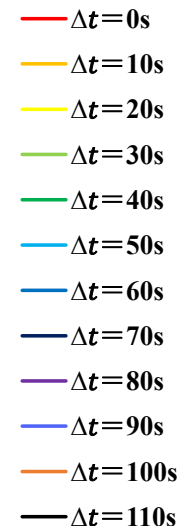
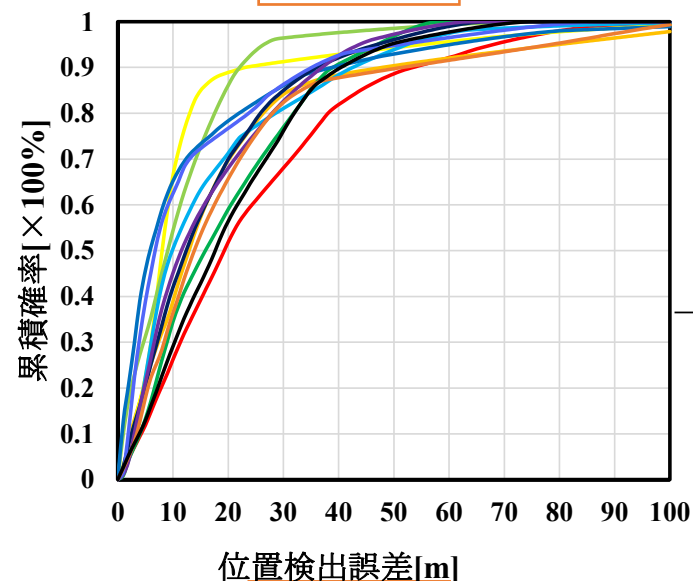
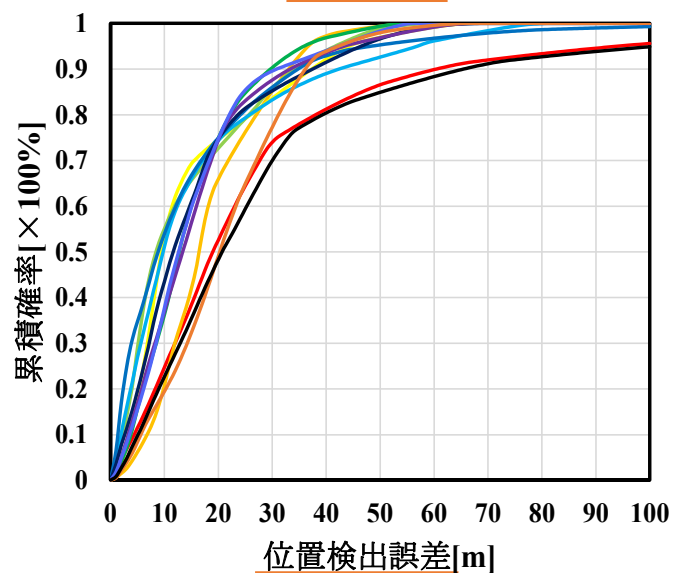
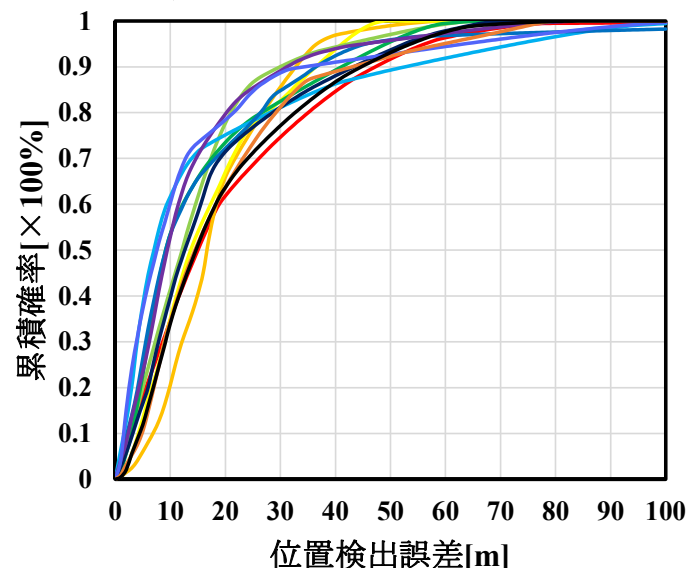
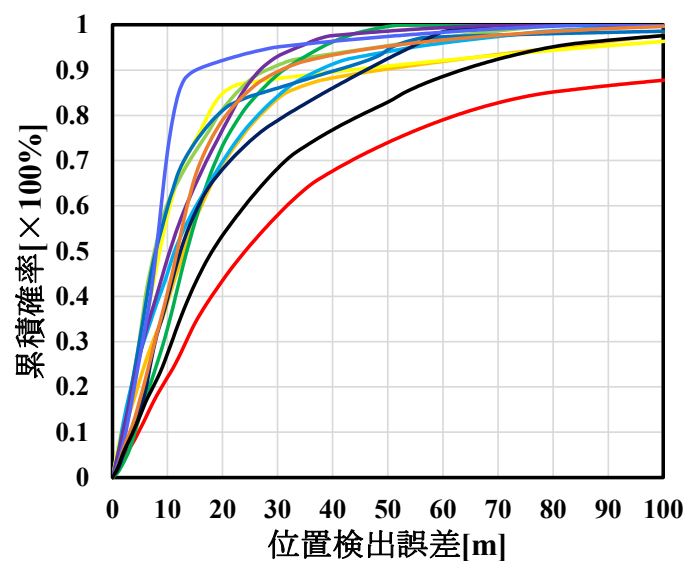
$\Delta\theta = 120^\circ$



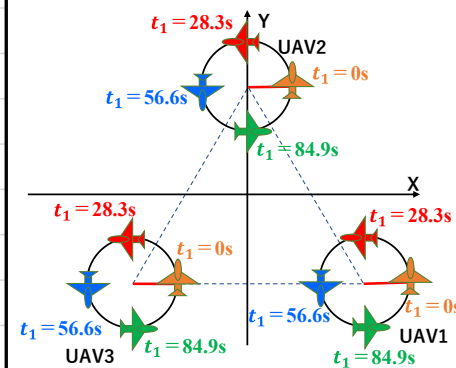
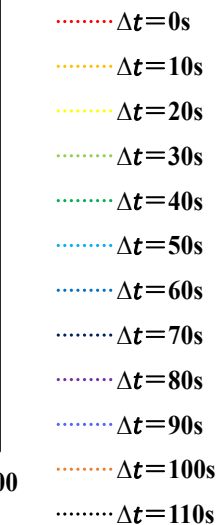
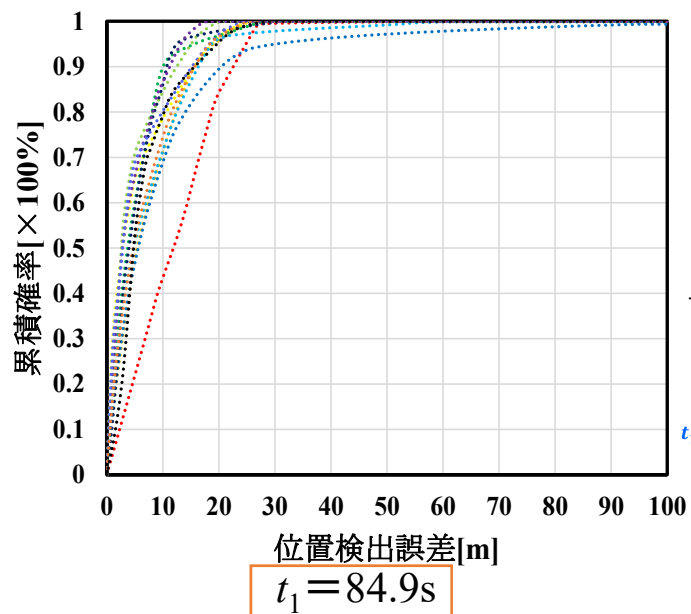
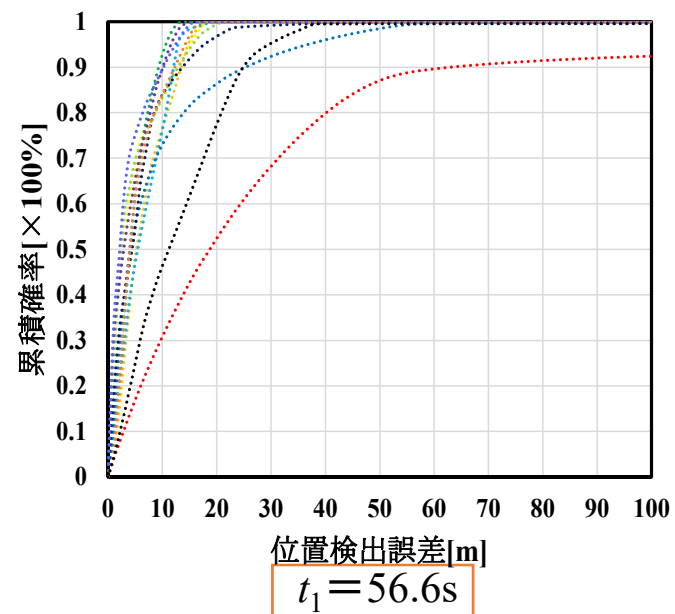
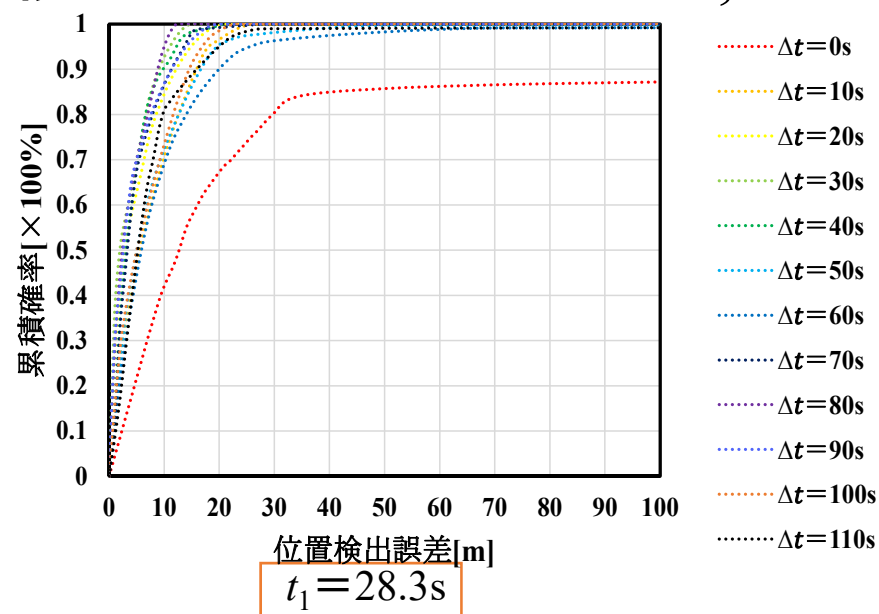
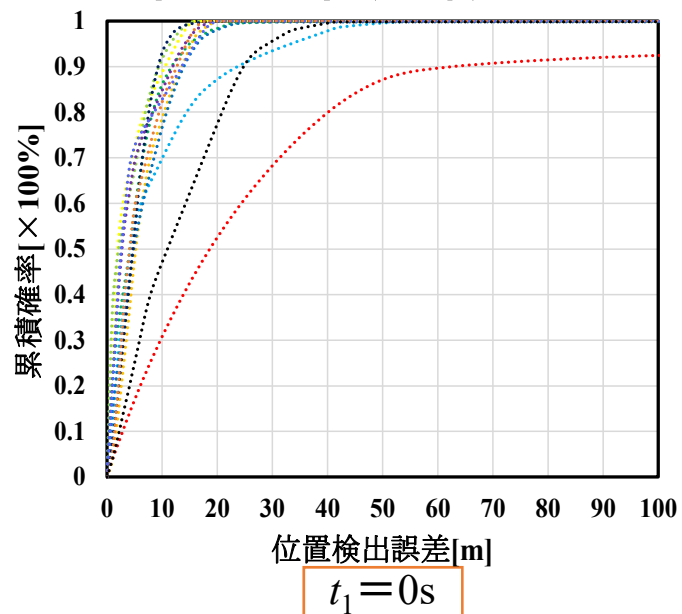
位置検出推定誤差の累積分布特性 ($\Delta\theta = 0^\circ$)



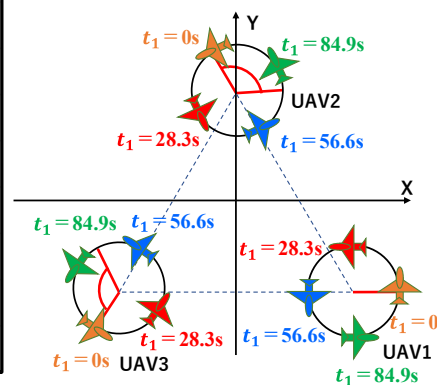
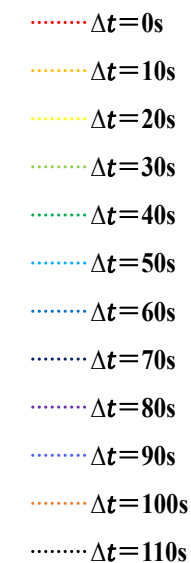
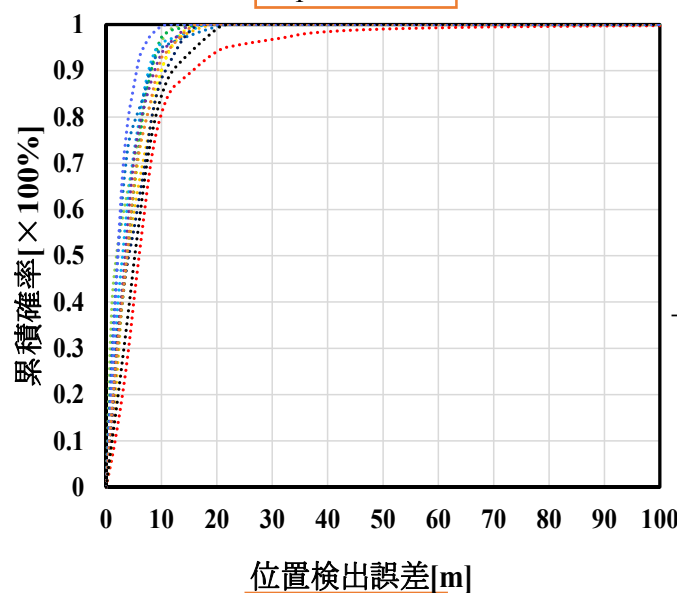
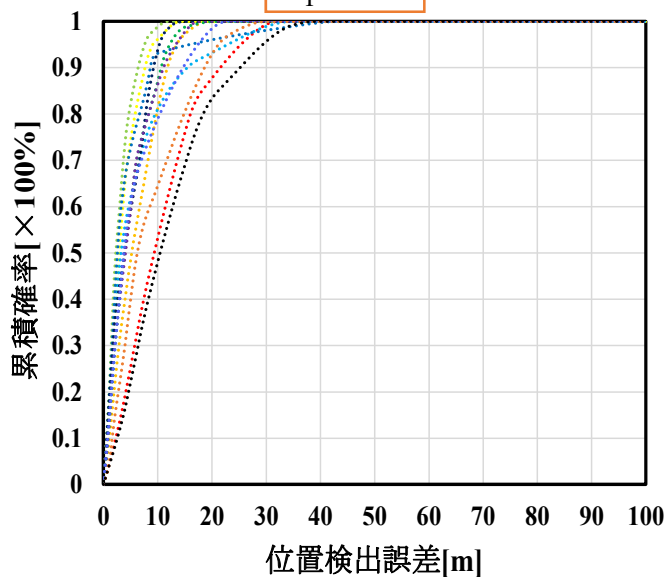
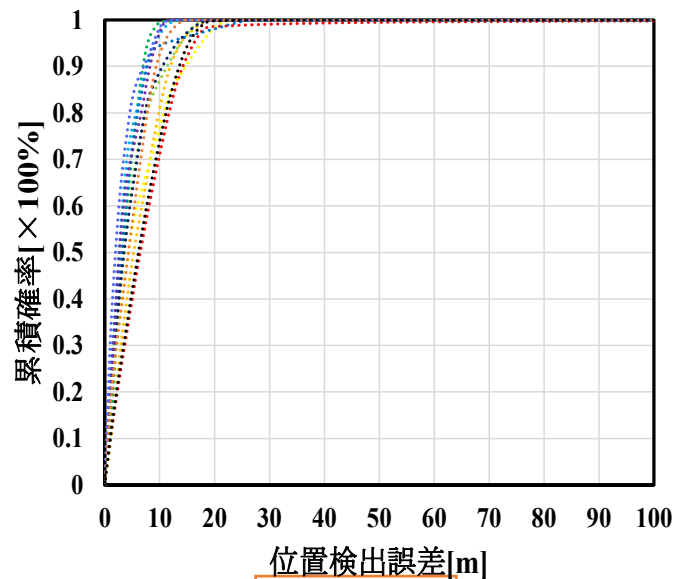
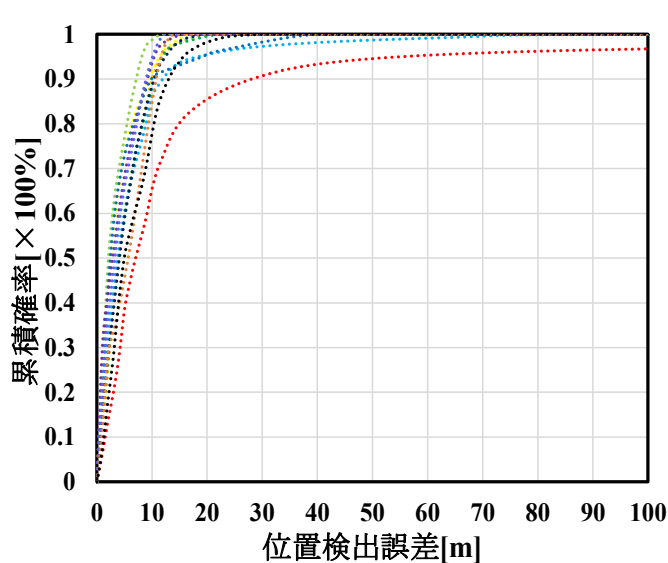
位置検出推定誤差の累積分布特性 ($\Delta\theta = 120^\circ$)



位置検出推定誤差の累積分布特性 ($\Delta\theta = 0^\circ$, XY平面)



位置検出推定誤差の累積分布特性 ($\Delta\theta = 120^\circ$, XY平面)



2回測定手法における位置検出誤差の改善指標② (累積確率50%値)

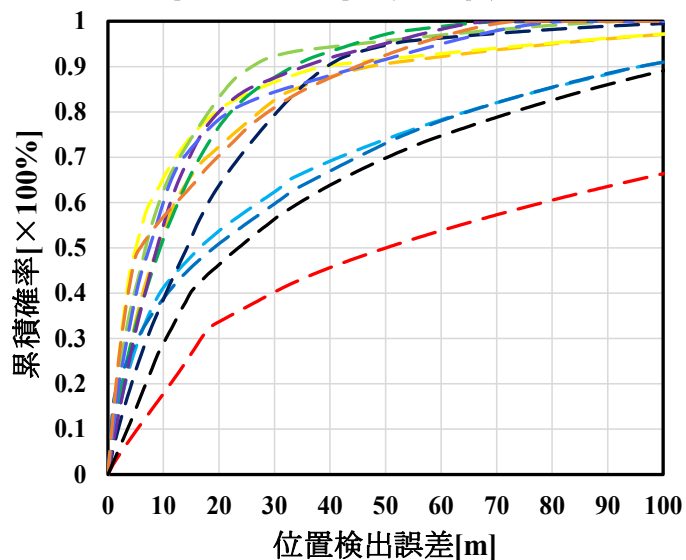
初期位相差 $\Delta\theta = 0^\circ$ の場合 (XY平面)

$\Delta t[s]$	$t_1=0s$	$t_1=28.3s$	$t_1=56.6s$	$t_1=84.9s$
	位置検出誤差改善指標[%]			
10	73.7	53.8	73.7	58.3
20	89.5	76.9	84.2	75.0
30	89.5	84.6	84.2	75.0
40	78.9	76.9	78.9	66.7
50	78.9	61.5	68.4	58.3
60	73.7	53.8	78.9	50.0
70	73.7	76.9	78.9	66.7
80	84.2	84.6	84.2	75.0
90	63.2	76.9	89.5	75.0
100	78.9	61.5	78.9	58.3
110	42.1	61.5	42.1	58.3

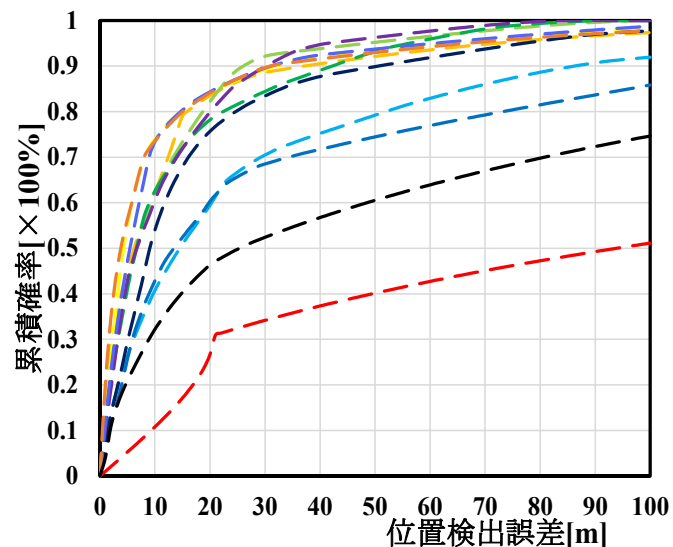
初期位相差 $\Delta\theta = 120^\circ$ の場合 (XY平面)

$\Delta t[s]$	$t_1=0s$	$t_1=28.3s$	$t_1=56.6s$	$t_1=84.9s$
	位置検出誤差改善指標[%]			
10	42.9	16.7	44.4	33.3
20	57.1	33.3	66.7	33.3
30	71.4	33.3	77.8	66.7
40	42.9	50.0	55.6	33.3
50	42.9	50.0	66.7	50.0
60	71.4	50.0	66.7	66.7
70	42.9	33.3	55.6	33.3
80	57.1	50.0	55.6	50.0
90	57.1	66.7	55.6	66.7
100	14.3	33.3	33.3	33.3
110	28.6	0.0	-11.1	16.7

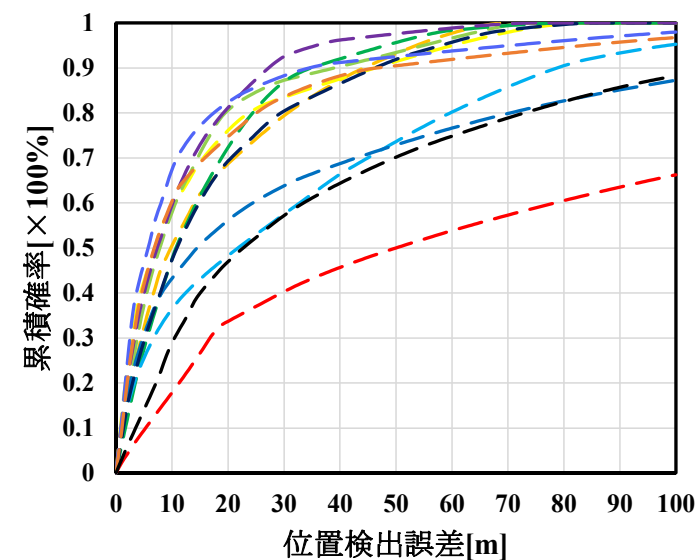
位置検出推定誤差の累積分布特性 ($\Delta\theta = 0^\circ$, Z軸方向)



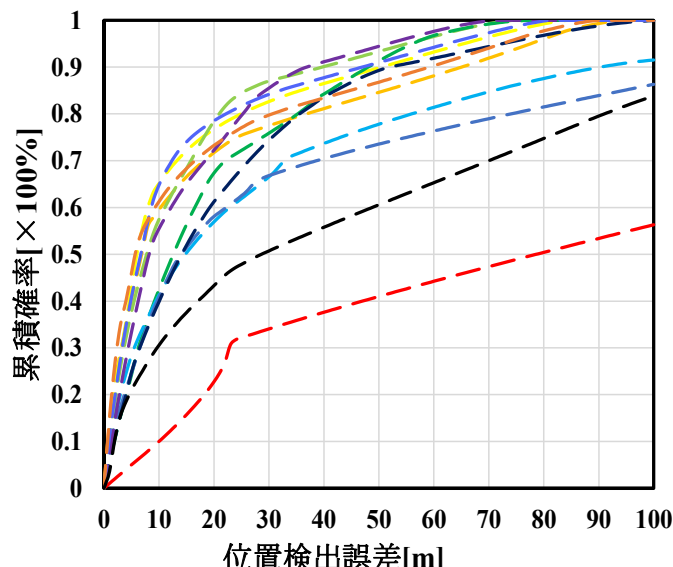
$t_1 = 0\text{s}$



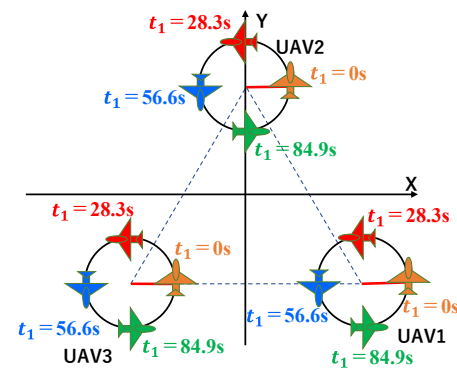
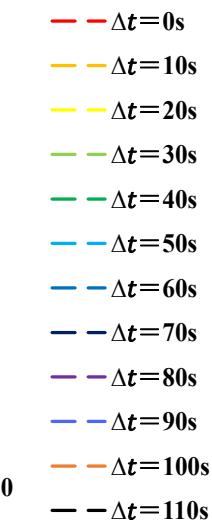
$t_1 = 28.3\text{s}$



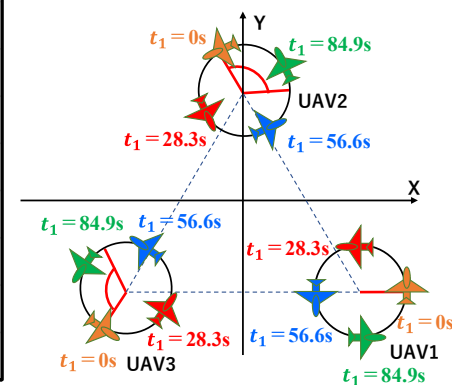
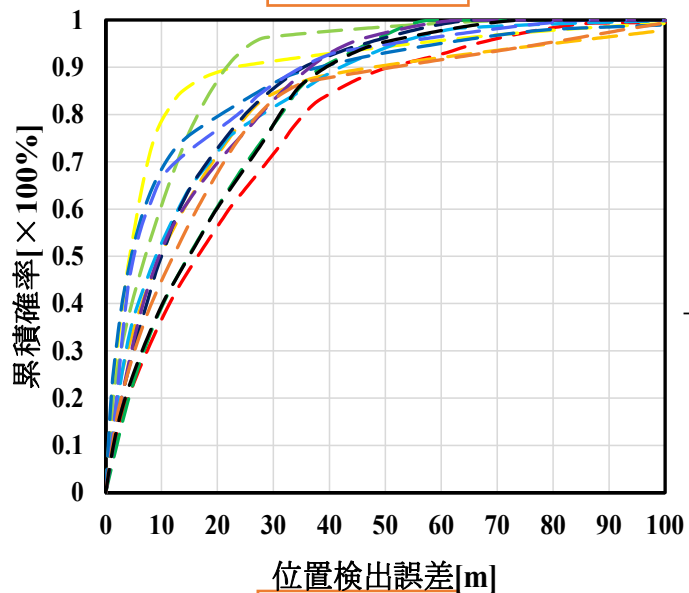
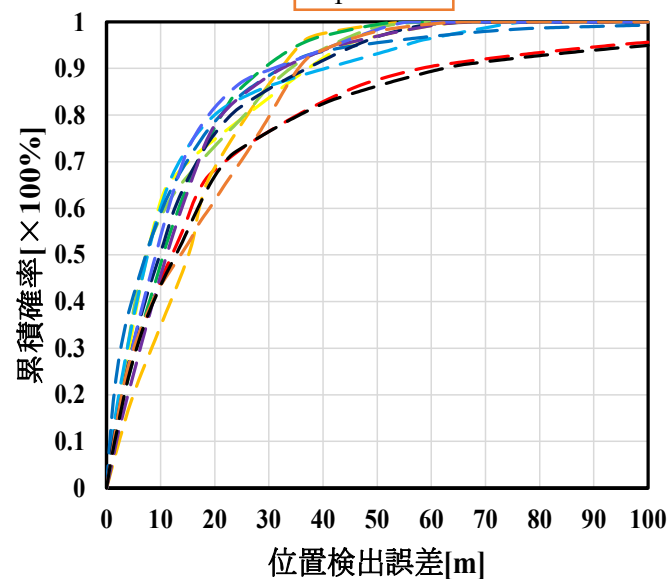
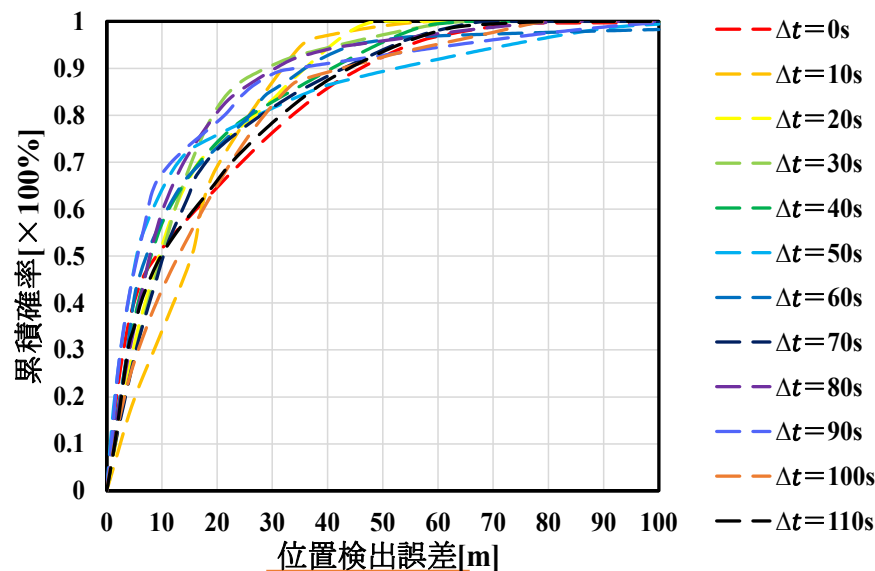
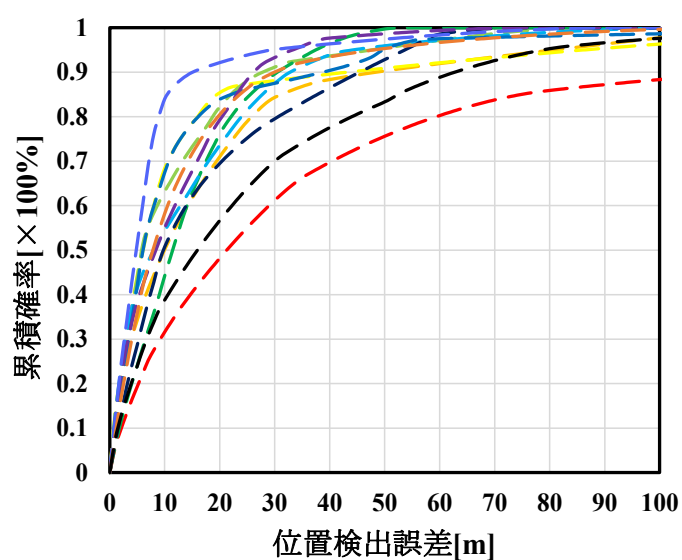
$t_1 = 56.6\text{s}$



$t_1 = 84.9\text{s}$



位置検出推定誤差の累積分布特性 ($\Delta\theta = 120^\circ$, Z軸方向)



2回測定手法における位置検出誤差の改善指標③ (累積確率50%値)

初期位相差 $\Delta\theta = 0^\circ$ の場合 (Z軸方向)

$\Delta t[s]$	$t_1=0s$	$t_1=28.3s$	$t_1=56.6s$	$t_1=84.9s$
	位置検出誤差改善指標[%]			
10	82.0	93.6	80.0	91.1
20	90.0	95.7	86.0	92.4
30	86.0	92.6	84.0	89.9
40	82.0	92.6	78.0	83.5
50	66.0	85.1	56.0	81.0
60	62.0	86.2	72.0	82.3
70	72.0	90.4	78.0	82.3
80	82.0	92.6	86.0	89.9
90	94.0	94.7	88.0	91.1
100	88.0	95.7	86.0	92.4
110	54.0	73.4	54.0	63.3

初期位相差 $\Delta\theta = 120^\circ$ の場合 (Z軸方向)

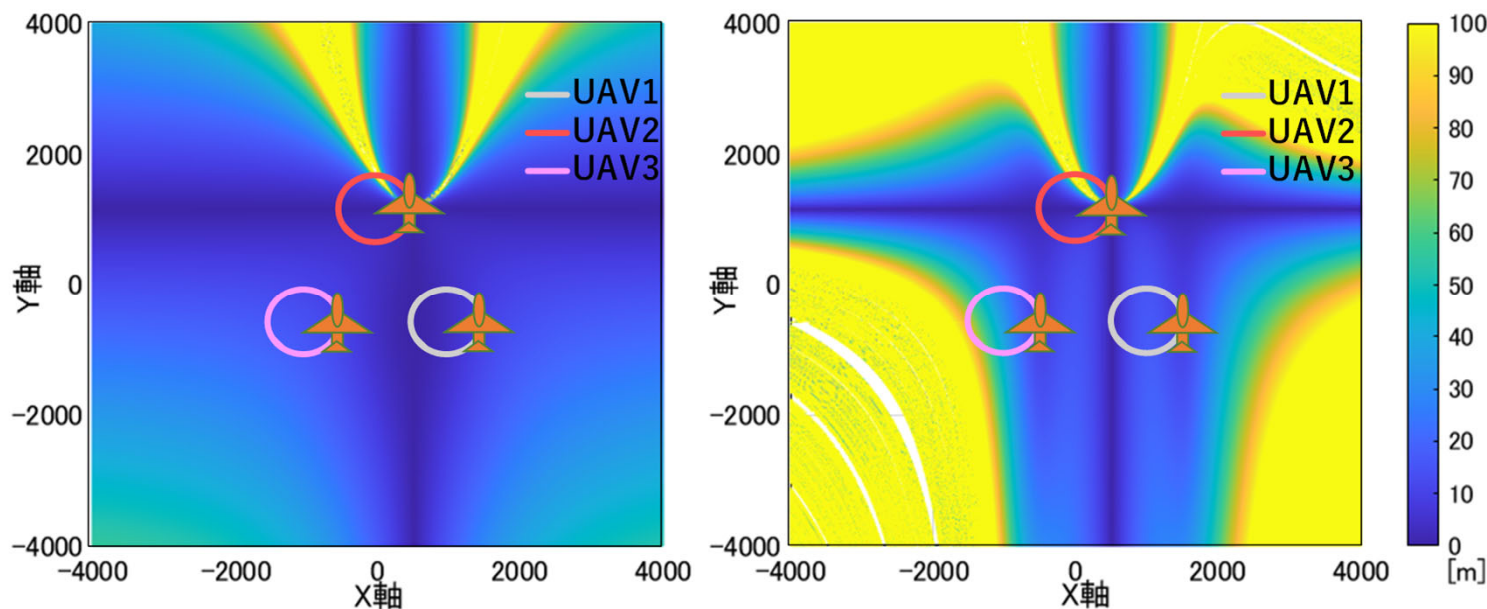
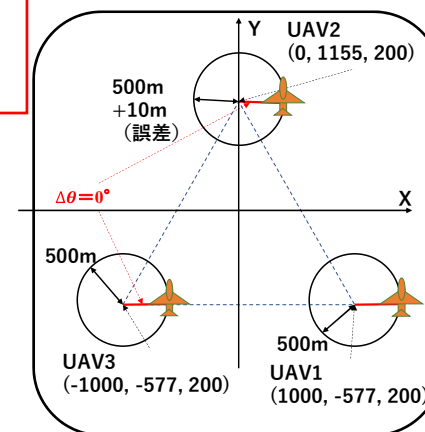
$\Delta t[s]$	$t_1=0s$	$t_1=28.3s$	$t_1=56.6s$	$t_1=84.9s$
	位置検出誤差改善指標[%]			
10	52.4	-66.7	-25.0	37.5
20	71.4	0.0	33.3	75.0
30	71.4	-11.1	41.7	56.3
40	47.6	11.1	16.7	6.3
50	61.9	44.4	33.3	43.8
60	71.4	22.2	41.7	68.8
70	52.4	-11.1	16.7	37.5
80	61.9	11.1	8.3	37.5
90	76.2	33.3	25.0	68.8
100	61.9	-44.4	-16.7	25.0
110	23.8	-11.1	-8.3	6.3

位置検出誤差の面的分布特性① ($t_1 = 0s$)

青色のエリアほど位置検出誤差が0mに近く精度が**良好**

黄色のエリアほど位置検出誤差が100m($\geq 100m$)に近く精度が**劣化**

- 初期位相差を与えない場合 ($\Delta\theta = 0^\circ$)
⇒三次元測位の測位精度が**大きく劣化**
- Z軸方向の測位精度に与える影響は**劣化傾向**



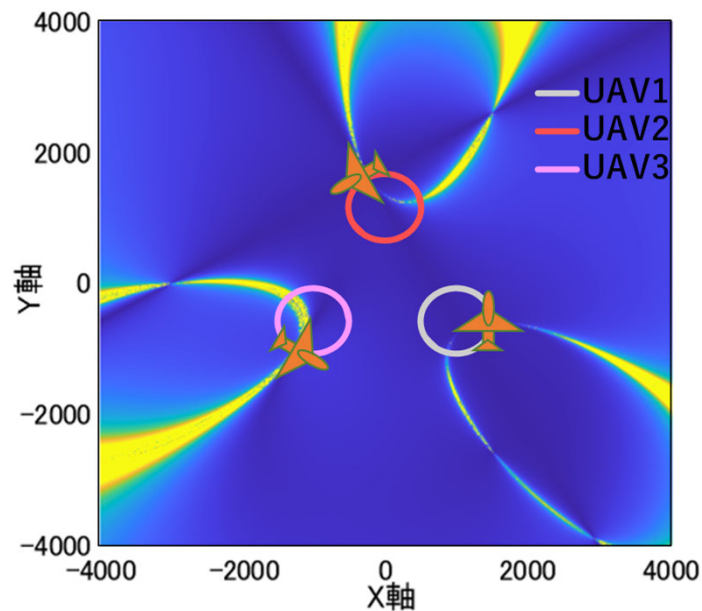
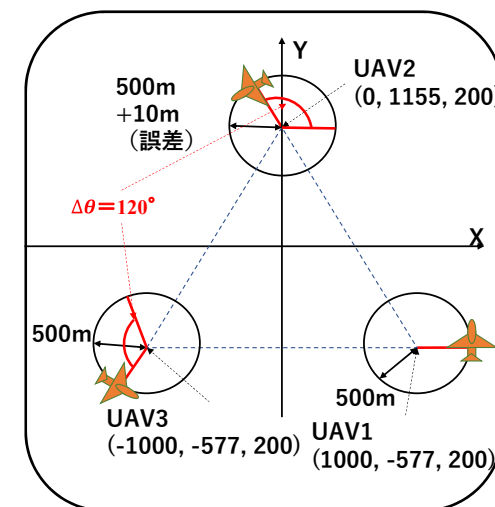
二次元測位 ($\Delta\theta = 0^\circ$)

三次元測位 ($\Delta\theta = 0^\circ$)

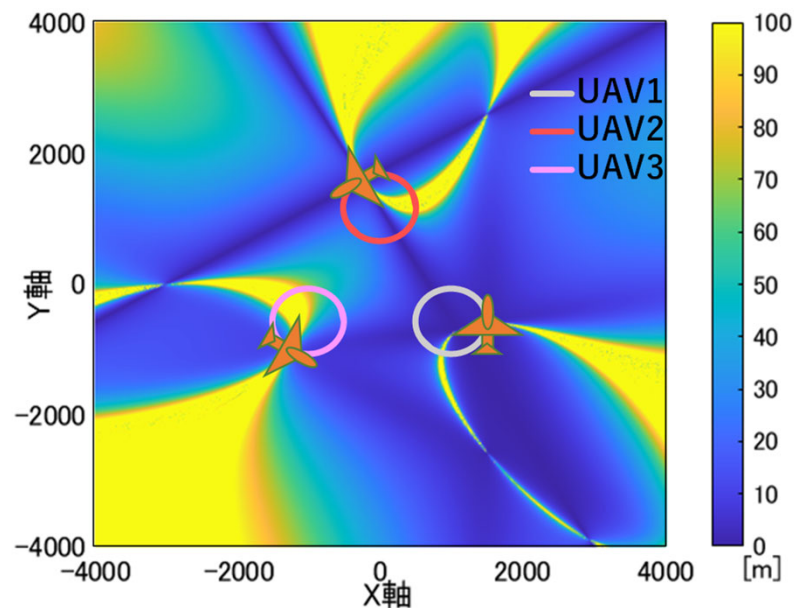
位置検出誤差の面的分布特性② ($t_1 = 0s$)

- 初期位相差を 120° 与えた場合 ($\Delta\theta = 120^\circ$)
- ⇒ 三次元測位の測位精度は**劣化傾向**
- ⇒ 二次元測位, 三次元測位のいずれの場合も
初期位相差を与えることで**測位精度良好**

特に三次元測位では大幅な測位精度の**変化**を確認
⇒ 累積確率による特性評価でより詳細に比較検討



二次元測位 ($\Delta\theta = 120^\circ$)



三次元測位 ($\Delta\theta = 120^\circ$)