空港面における協調監視システムの監視性能および測位結果の統合

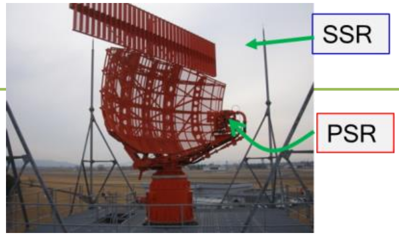
監視通信領域　本田純一、松永圭左、角張泰之
航空交通管理領域　大津山卓哉

発表内容

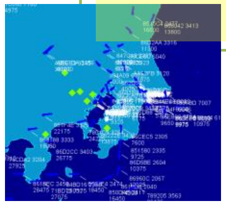
1. 背景・目的
2. 監視性能要件
3. 実験結果
   - 位置精度検証
   - 航跡統合
4. まとめ

© Electronic Navigation Research Institute. All rights reserved.

監視システムの種類



名称	原理	利用環境		
		空港面	空港	航空路
一次監視レーダ(PSR)	反射波	−	○	−
空港面探知レーダ(ASDE)	反射波	○	−	−
独立非協調監視システム(INCS)	将来技術:マルチスタティックレーダ等	−	−	−
二次監視レーダ(SSR)	トランスポンダ:応答時間	−	○	○
マルチラテレーション(MLAT)	トランスポンダ:応答時間+スキッター	○	△	−
広域MLAT(WAM)	トランスポンダ:MLATの広域拡張	△	○	○
放送型自動従属監視(ADS-B)	トランスポンダ:機体の位置情報を放送	−	−	−



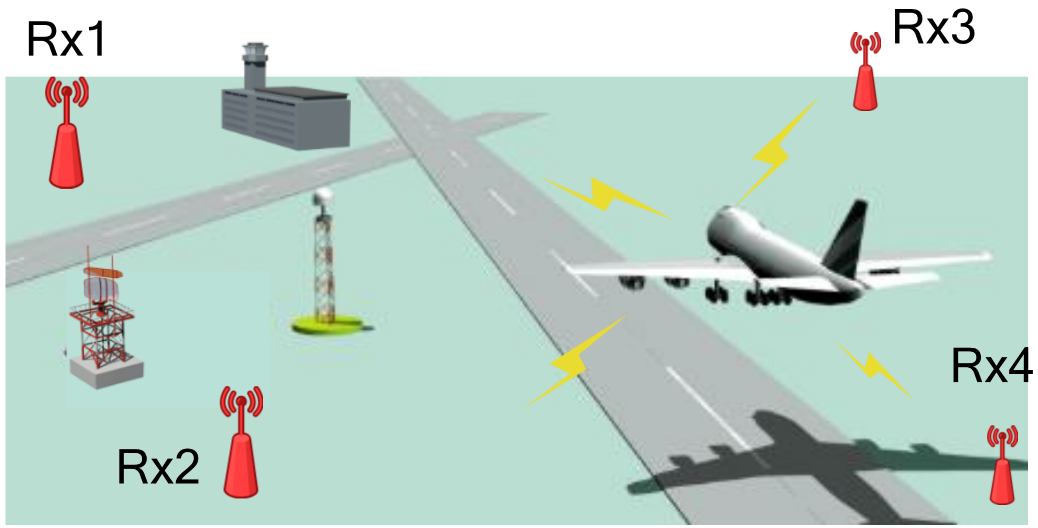
機上装置に依存しない(主に反射波を利用)(赤破線)
機上装置に依存する(トランスポンダの利用)(青破線)

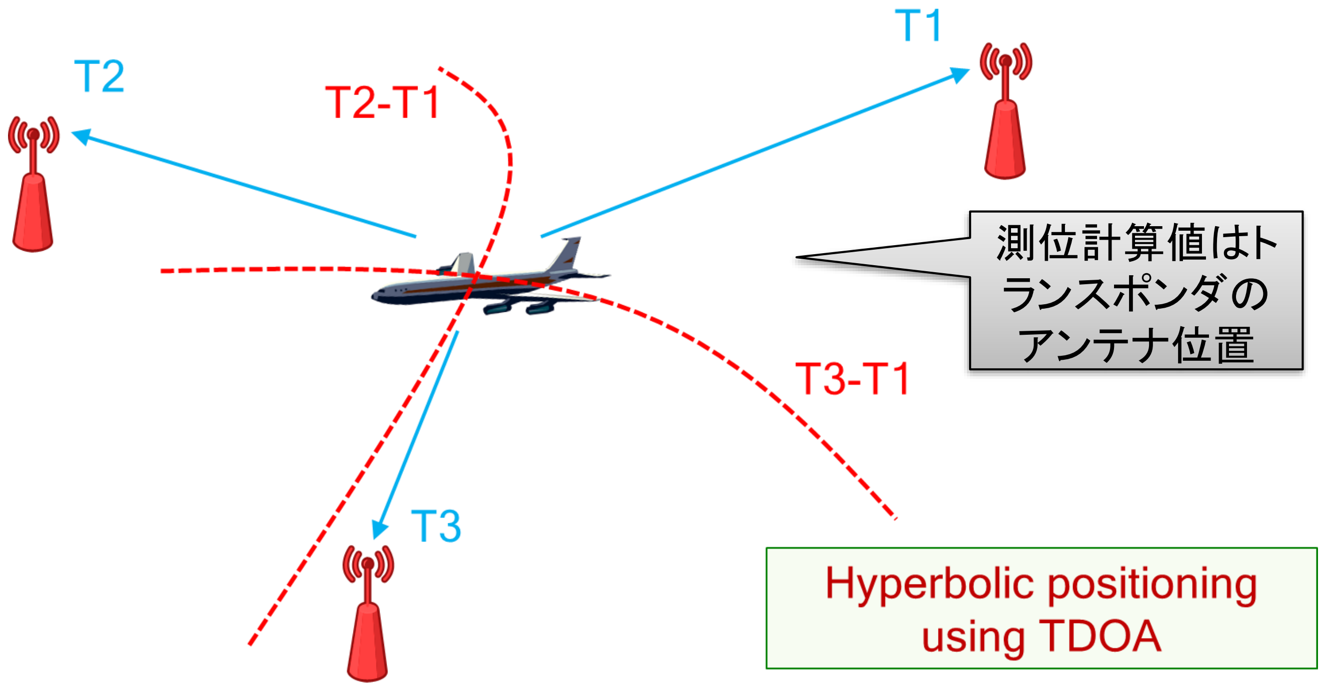
© Electronic Navigation Research Institute. All rights reserved.

MLATの原理

Multilateration (MLAT):　Surveillance on airport surface

- モードS信号を利用する。
- 主に空港面を対象に航空機の位置を計算する。





➢ 複数の受信機を地上に設置して、航空機からの信号を受信し、検出時間の差を見ることで航空機の位置を推定する。

$$\sqrt{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2+(z-z_i)^2} = c\left(t_{TOA_i} - t_{send}\right)$$

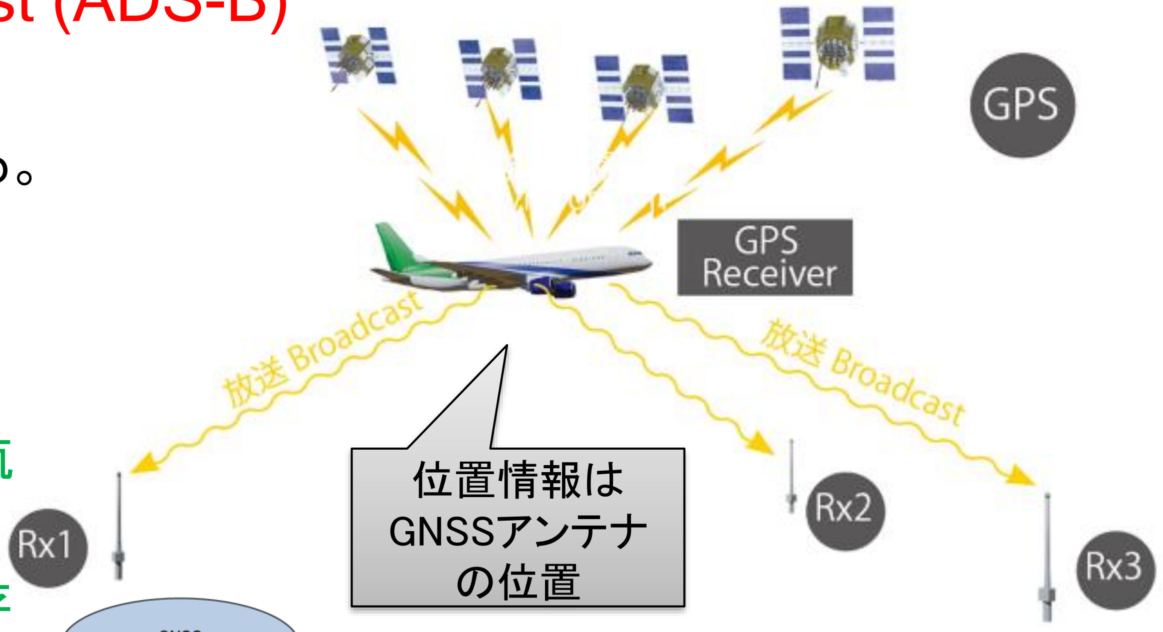
➢ 2つの受信局への信号到達時間差(TDOA)から描かれる双曲線を2本以上を使い双曲線の交点を航空機の位置とみなす。

© Electronic Navigation Research Institute. All rights reserved.

ADS-Bの原理

Automatic Dependent Surveillance - Broadcast (ADS-B)

- モードS信号の24種類のフォーマットの一つ(DF=17)を使って機上で取得した位置情報を埋め込み放送する。
- 地上では受信したモードS信号をデコードすることで航空機の位置を知ることができる。(正確には少し処理が必要)

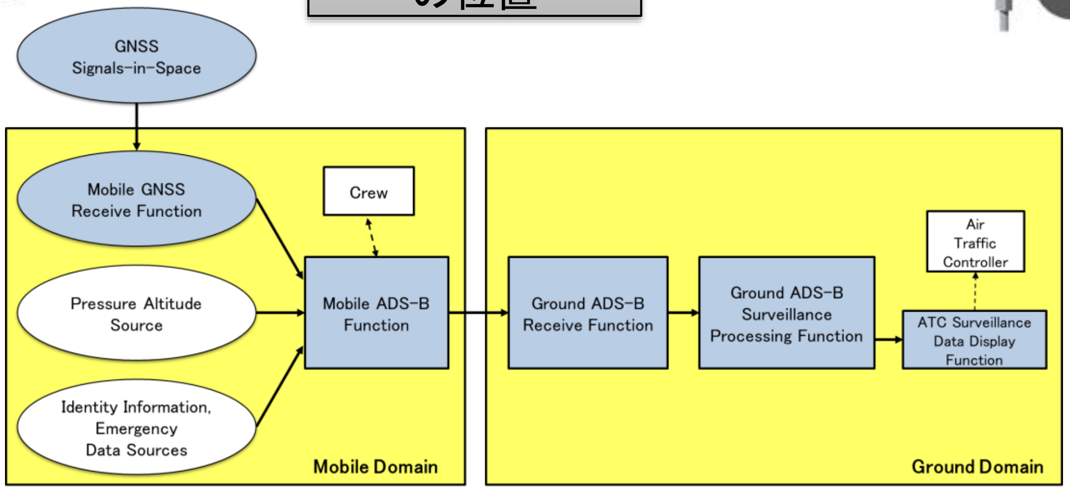


➢ 信号を受信することができればどのエリアであっても航空機の補足が可能である。

➢ 位置情報は完全に機上のGNSS受信機の性能に依存する。

➢ 機上の運航情報も放送する。

➢ 異なるメッセージバージョンを使用するADS-B機が運航している。(Ver. 0, 1, 2と呼ぶ)



© Electronic Navigation Research Institute. All rights reserved.

ADS-Bの性能指数

ADS-Bは機上で取得された位置情報等に基づくため、受信側でその精度が分からない。
そのため、NICやNACpといった機上のADS-Bの性能を判断するための指数もあわせて放送される。

FAA, 14 CFR 91.227により以下の5つの指標が示されている

1. NIC (Navigation Integrity Category)
2. NACp (Navigation Accuracy Category – position)

} 位置精度

3. NACv (Navigation Accuracy Category – velocity)
4. SDA (System Design Assurance)
5. SIL (Source Integrity Level)

} システム状態

NIC	Radius of Containment (Rc)
0	Rc unknown
1	Rc<20NM (37.04km)
…	…
6	Rc<0.6NM (1111.2m)
	Rc<0.5NM (926m)
	Rc<0.3NM (555.6m)
7	Rc<0.2NM (370.4m)
8	Rc<0.1NM (185.2m)
9	Rc<75m
10	Rc<25m
11	Rc<7.5m

NACp	Meaning = 95% horizontal accuracy bounds (EPU)
0	EPU≧18.52km(10NM)
1	EPU＜ 18.52km(10NM)
…	…
6	EPU＜ 555.6m(0.3NM)
7	EPU＜ 185.2m(0.1NM)
8	EPU＜ 92.6m(0.05NM)
9	EPU＜ 30m
10	EPU＜ 10m
11	EPU＜ 3m

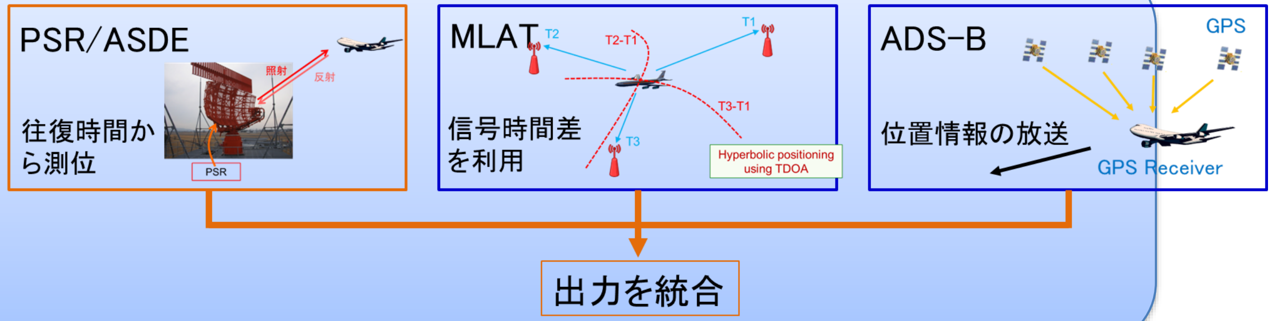
※多くの場合でNACp=8 or 9が提供され、実力値としては2～3mの誤差

© Electronic Navigation Research Institute. All rights reserved.

発表内容

【研究目的】
マルチ監視としての性能評価手法を確立(提案)する

【研究内容】
- 各監視システムの性能を明らかにする
- 複数の監視システムの測位結果の統合する



【本発表】
- 協調監視システムの位置精度を算出する ⟶ <u>当所実験用航空機を用いた試験</u>
- 測位結果の統合方法を紹介する ⟶ <u>選択・統合方式の適用</u>

© Electronic Navigation Research Institute. All rights reserved.

発表内容

1. 背景・目的
2. 監視性能要件
3. 実験結果
   - 位置精度検証
   - 航跡統合
4. まとめ

© Electronic Navigation Research Institute. All rights reserved.

監視システムに求められる要件

位置情報だけでなく運用に資するようにクリアすべき様々な要件が定められている

1. 位置精度
2. 覆域
3. 更新頻度
4. 検出率
5. 誤検出率
6. 遅延
7. 同期

etc…

Performance Parameter	Manoeuvring Area	Apron Taxiways and Taxi Lanes	Stands
PTR Probability of Target Report (update rate)	≥ 95 % (1 s)	≥ 70 % (1 s)	≥ 90 % (5 s)
PFTR Probability of False Target Report	$\leq 10^{-4}$ per Target Report		
PID Probability of Identification (see Note 1)	Mode S Address: ≥ 99% Mode A Code: ≥ 97% Aircraft ID: ≥97%		
PFID Probability of False Identification	$\leq 10^{-4}$ per Target Report		
RPA Reported Position Accuracy (see Notes 2,3,4)	≤ 12 m (95 %)	≤ 20 m (95 %)	≤ 25 m (95 %)
TRUR Target Report Update Rate	≥ 1 Hz	≥ 1 Hz	≥ 0.2 Hz
IRTOP Identification Renewal Time Out Period	≤ 30 s		
PLG Probability of Long Horizontal Gaps	Gaps ≥ 3 s: PLG $\leq 10^{-3}$ per Target Report	Gaps ≥ 3 s: PLG $\leq 10^{-2}$ per Target Report	Gaps ≥ 15 s: PLG $\leq 10^{-3}$ per Target Report
TRIT Target Report Initiation Time	≤ 3 s	≤ 6 s	≤ 13 s
System Capacity	300 Targets		
Latency	≤ 0.5 s		
Time Synchronization	+/- 0.1 s		
Switchover Time	≤ 3 s		
Failure Report Time	≤ 10 s		

ED-124A MOPS参照

© Electronic Navigation Research Institute. All rights reserved.

空港面の位置精度の要件

[MLAT]
EUROCAE
ED87C,ED117Aより

項目	Manoeuvring Area	Apron Taxiways and Taxi Lanes	Stands
検出率	≥ 95% (1s)	≥ 70% (1s)	≥ 90% (5s)
位置誤差	≤ 12m (95%)	≤ 20m (95%)	≤ 25m (95%)
遅延	≤ 0.5s		

[ADS-B]
EUROCAE
ED163より

項目	Ver. 0	Ver. 1	Ver. 2
NIC	> 6*	> 0	> 0
NACp	–	≥ 8	≥ 8
SIL	–	≥ 2	= 3

＊Ver. 0はNUCpとして定義されるが
NIC変換テーブルを使って換算が可能

NIC	Radius of Containment (Rc)
0	Rc unknown
8	Rc<0.1NM (185.2m)
9	Rc<75m
10	Rc<25m
11	Rc<7.5m

NACp	Meaning = 95% horizontal accuracy bounds (EPU)
0	EPU≧18.52km(10NM)
8	EPU＜ 92.6m(0.05NM)
9	EPU＜ 30m
10	EPU＜ 10m
11	EPU＜ 3m

© Electronic Navigation Research Institute. All rights reserved.

発表内容

1. 背景・目的

2. 監視性能要件

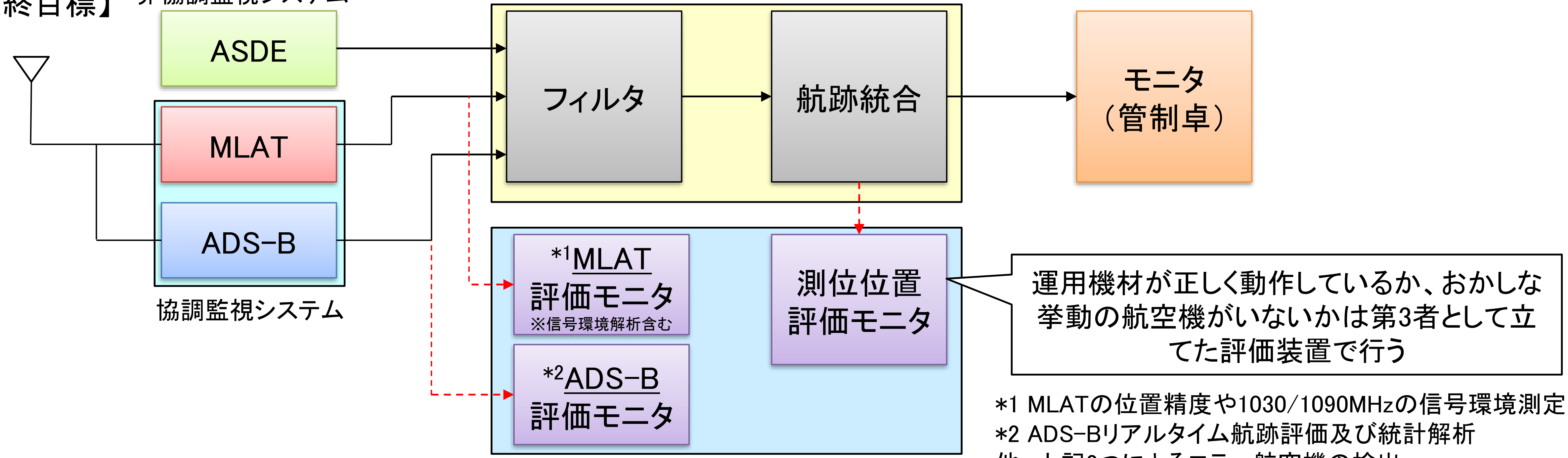
3. 実験結果
   – 位置精度検証
   – 航跡統合

4. まとめ

© Electronic Navigation Research Institute. All rights reserved.

解析手順

【最終目標】

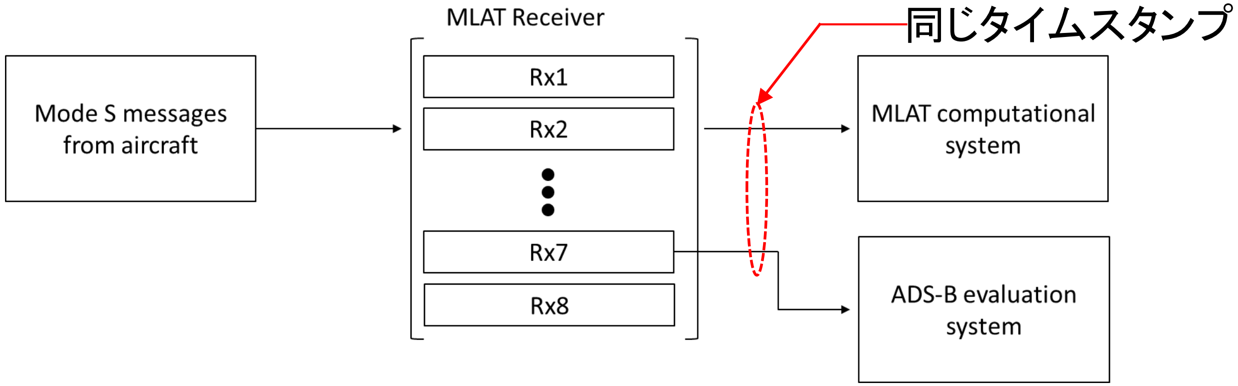


*1 MLATの位置精度や1030/1090MHzの信号環境測定

*2 ADS-Bリアルタイム航跡評価及び統計解析

他、上記2つによるエラー航空機の検出

【本解析】



本発表では、

1. MLATはMLATの通常の計算処理
2. ADS-BはMLAT受信局の一つを利用

することとし、上記のフィルタと航跡統合処理へのアプローチを実施した

© Electronic Navigation Research Institute. All rights reserved.

評価試験の概要

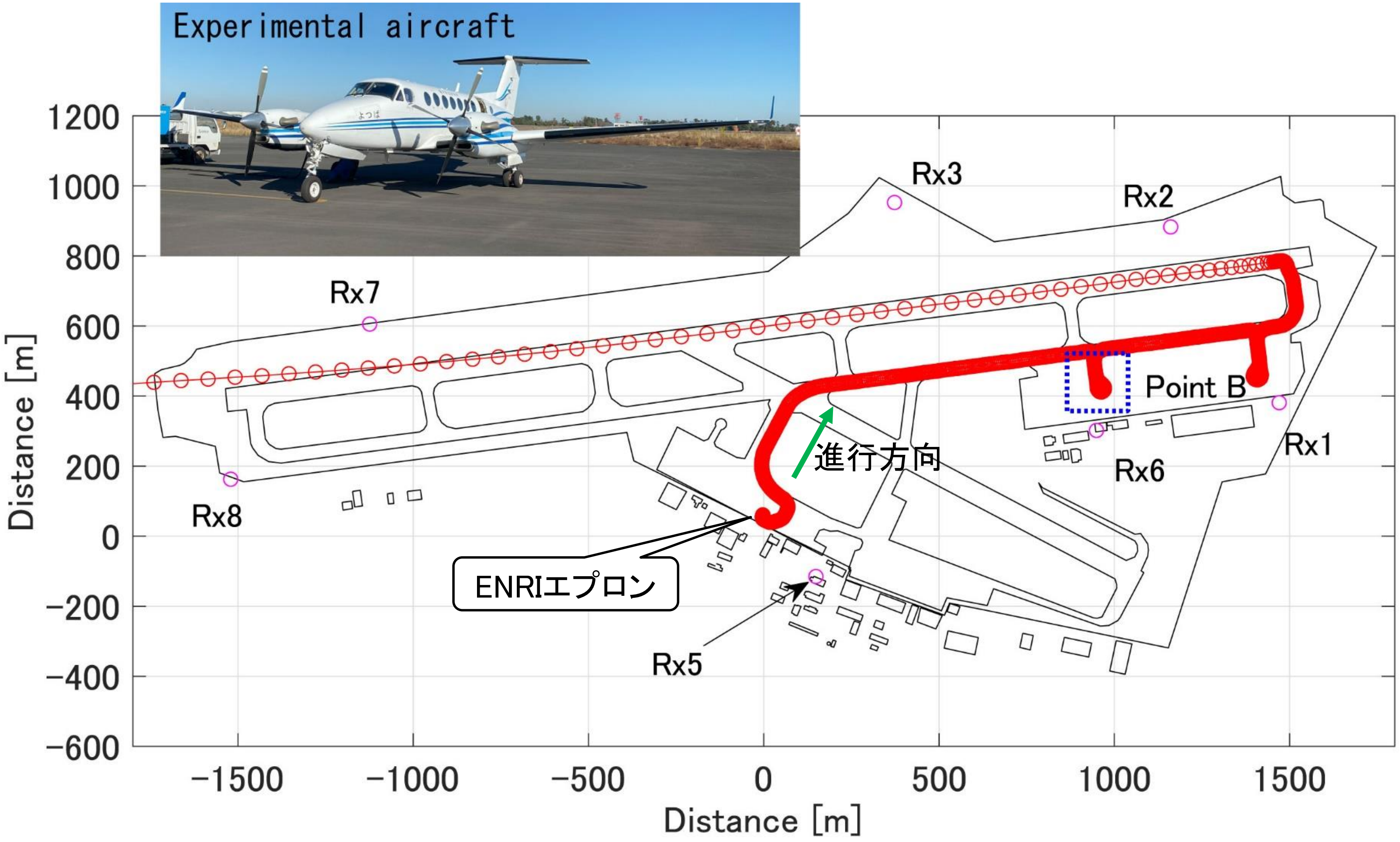
（目的）
協調監視システムの性能評価を行い、航跡統合のためのデータとするため

（実施日程）
2024年10月と12月

（場所）
仙台空港

（方法）
・リファレンスとして機上でGPS位置を測定する
・仙台空港に展開しているOCTPASS実験装置を使用する

※Rx4が故障中であったためフルスペックでの取得はできなかった

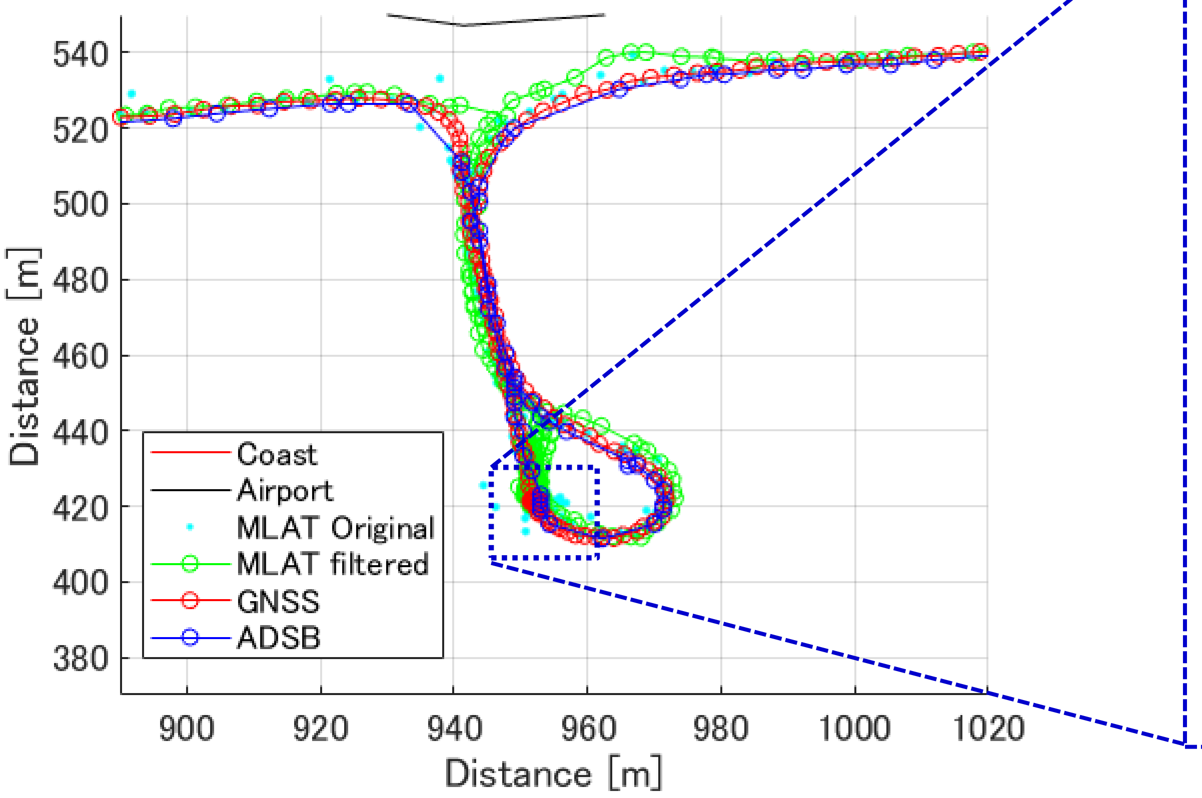


機上GNSS受信機で取得した機体の位置

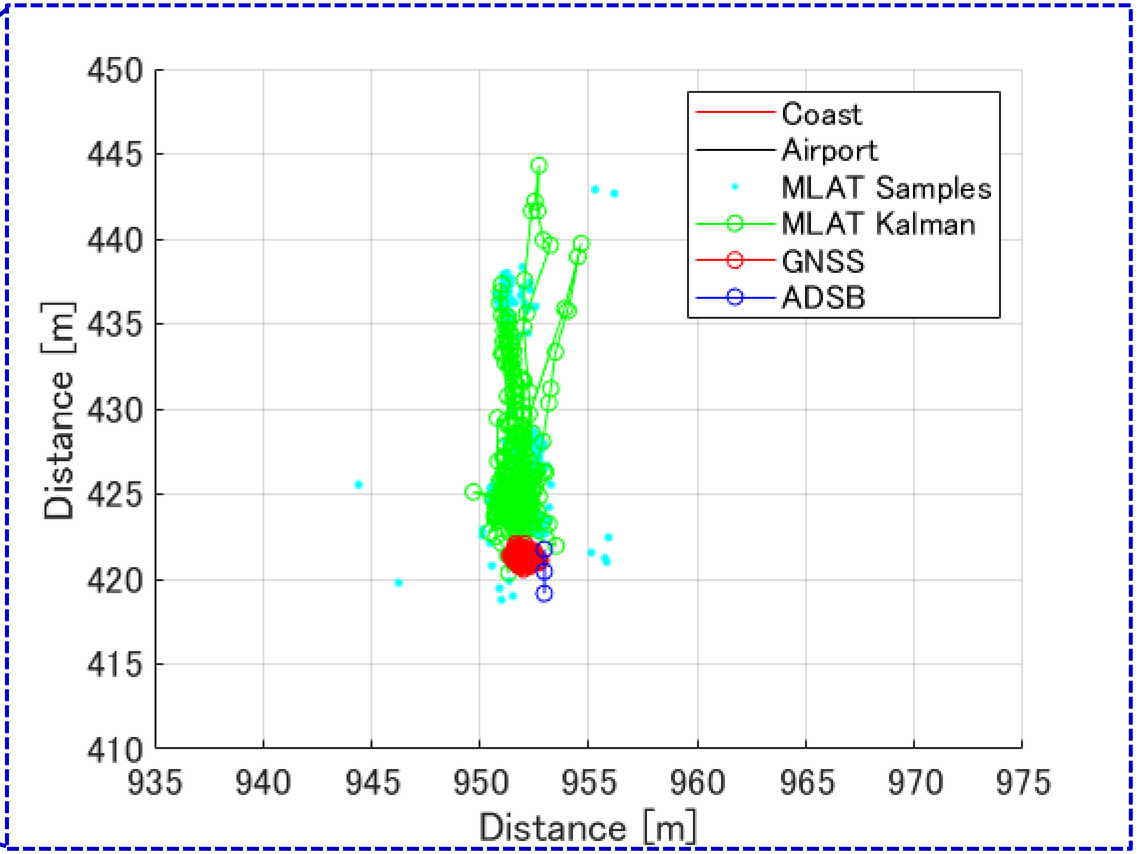
© Electronic Navigation Research Institute. All rights reserved.

駐機時の位置精度の比較

機上のGNSS受信機とADS-Bの航跡はほぼ同じだが、
MLATはやや異なる位置で出力される場合がある。
※MLATも十分に機体の範囲内には収まっている。



スポットイン・アウト



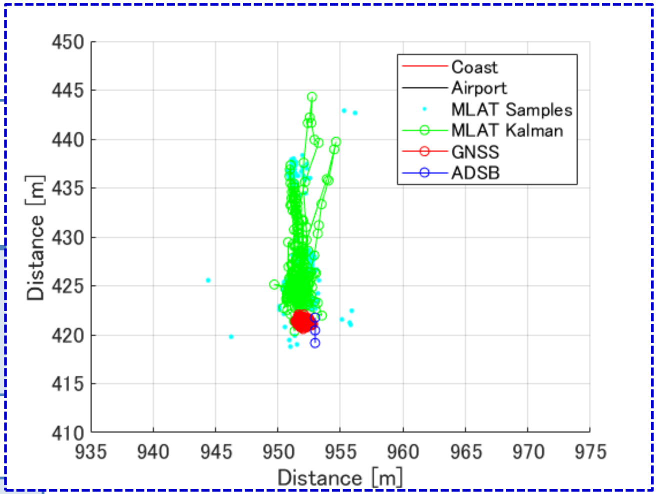
駐機時

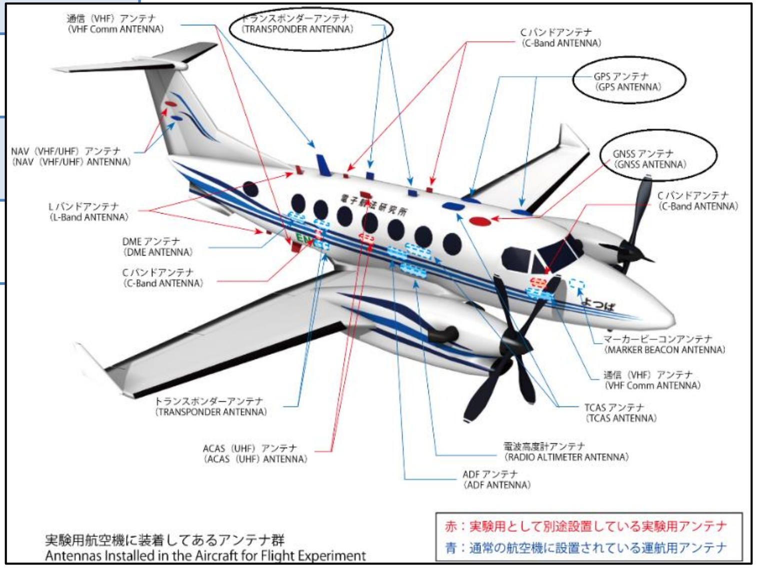
J. Honda,et al., “Positional Accuracy of Multilateration and ADS-B on Airport Surface Through Flight Experiment,” Proc. ISAP2025, Fukuoka, Oct. 2025. (submitted)

© Electronic Navigation Research Institute. All rights reserved.

駐機時の位置精度の比較

Sensor	Error [m] *95% confidence	Remarks
Onboard GNSS	0.0	Reference position based on the median value
MLAT Original	5.57	
MLAT filtered (1)	4.27	Kalman filter
MLAT filtered (2)	5.21	A-B filter
MLAT filtered (3)	4.67	Moving average
ADS-B	1.57	





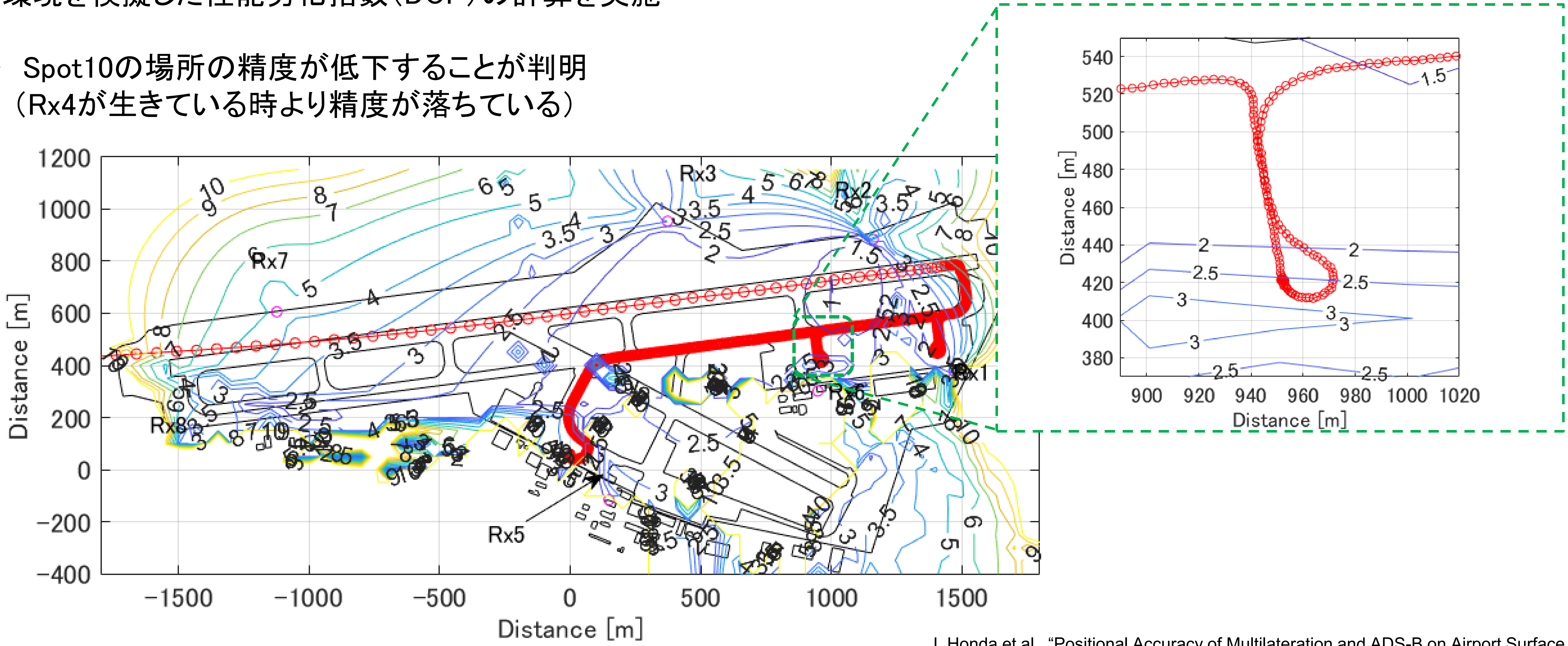
J. Honda,et al., “Positional Accuracy of Multilateration and ADS-B on Airport Surface Through Flight Experiment,” Proc. ISAP2025, Fukuoka, Oct. 2025. (submitted)

© Electronic Navigation Research Institute. All rights reserved.

性能低下の要因

実環境を模擬した性能劣化指数(DOP)の計算を実施

→ Spot10の場所の精度が低下することが判明
（Rx4が生きている時より精度が落ちている）



J. Honda,et al., “Positional Accuracy of Multilateration and ADS-B on Airport Surface Through Flight Experiment,” Proc. ISAP2025, Fukuoka, Oct. 2025. (submitted)

© Electronic Navigation Research Institute. All rights reserved.

測位結果の選択・統合

パラメータ
- 航跡 $f_n(t)$
- 誤差 $\Delta f_n(t)$
- 更新率 u_n
- 分散 σ_n
- 重み W_n

センサ①:n=1

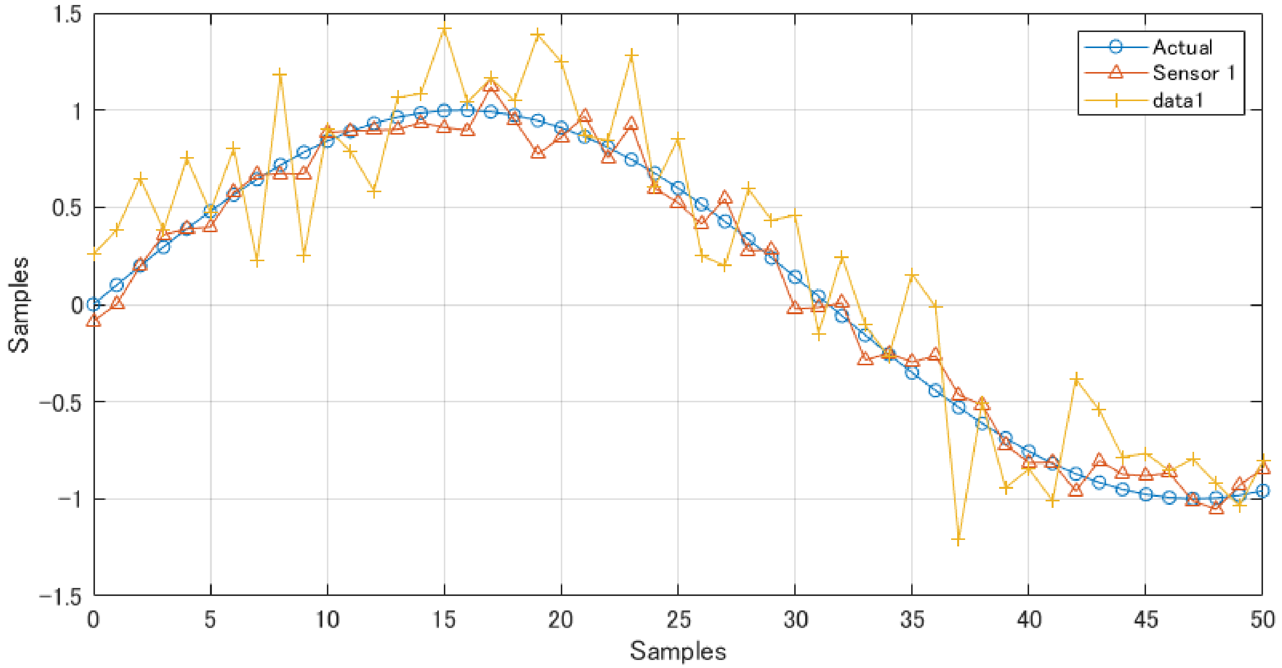
$P_1(t)=f_1(t)\Delta f_1(t)$

センサ②:n=2

$P_2(t)=f_2(t)\Delta f_2(t)$

誤差は分散 σ_n の正規分布に従うと仮定
W_n は誤差の割合で決定される

シミュレーションによる選択方式・統合方式の確認



真値と誤差を持った2つの航跡の比較

© Electronic Navigation Research Institute. All rights reserved.

測位結果の選択・統合

パラメータ

- 航跡　$f_n(t)$
- 誤差　$\Delta f_n(t)$
- 更新率　u_n
- 分散　σ_n
- 重み　W_n

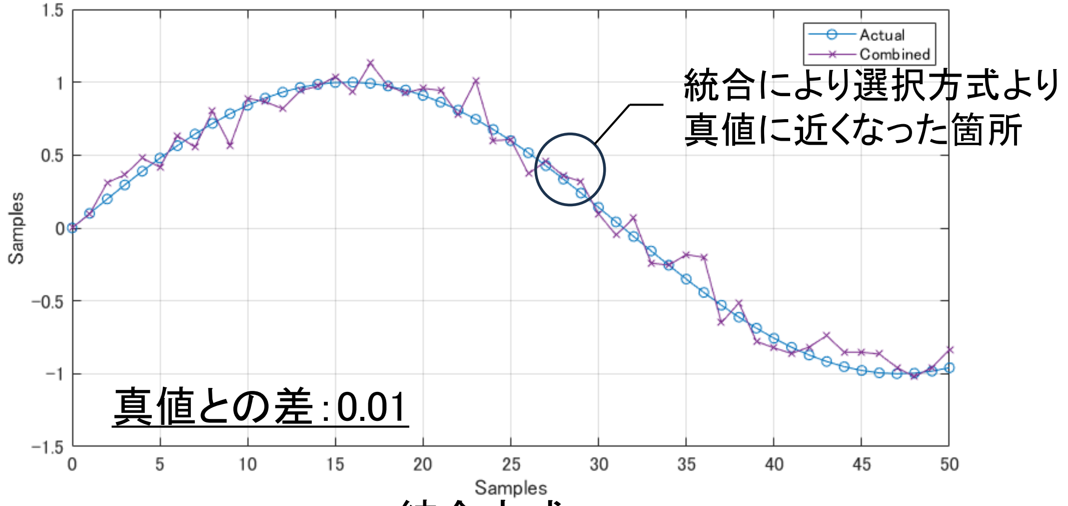
センサ①:n=1

$P_1(t)=f_1(t)\Delta f_1(t)$

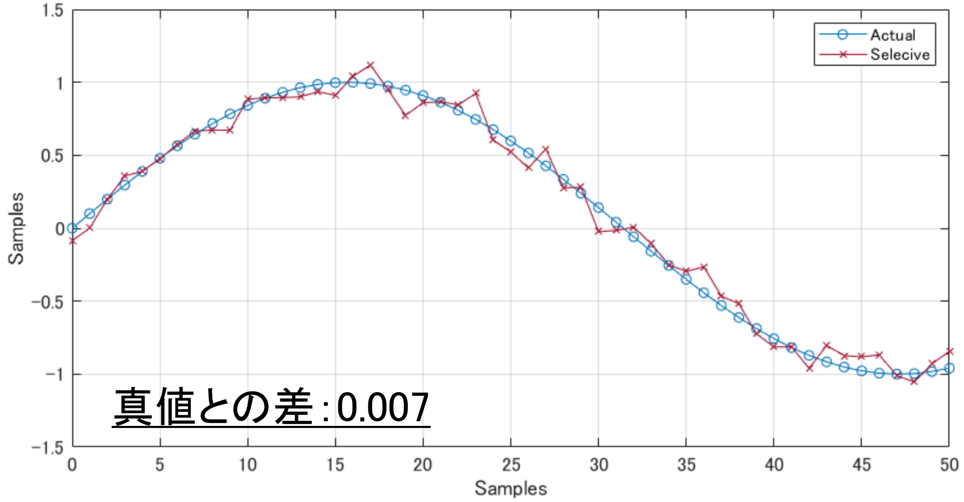
センサ②:n=2

$P_2(t)=f_2(t)\Delta f_2(t)$

誤差は分散σ_nの正規分布に従うと仮定
W_nは誤差の割合で決定される



統合方式



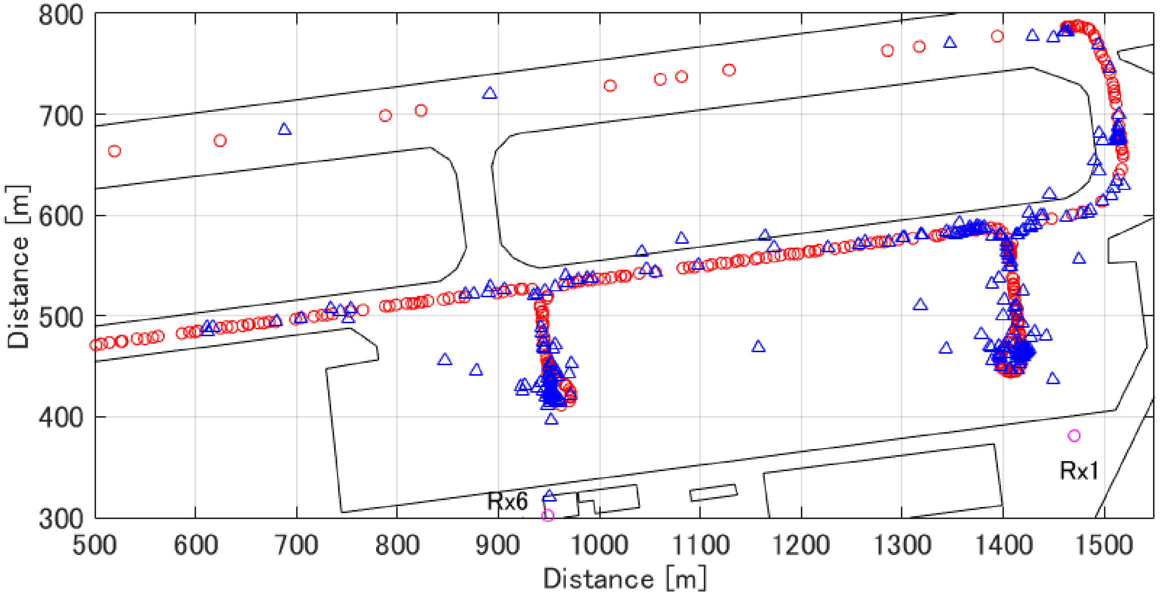
選択方式

© Electronic Navigation Research Institute. All rights reserved.

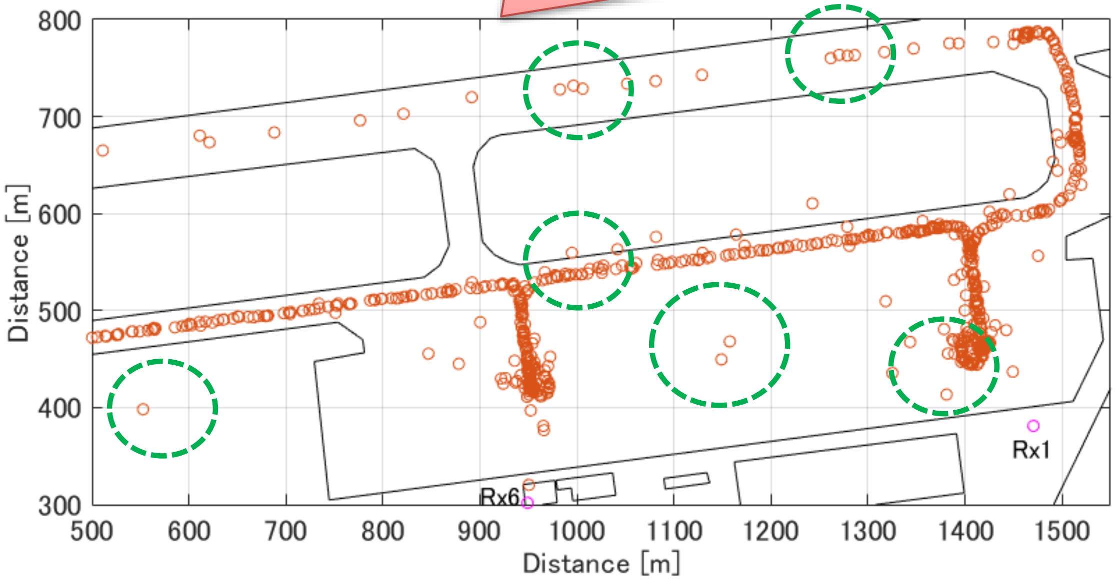
統合方法の違いによる航跡図

手順:
1. 安定性の観点からADS-Bを優先して出力するように設定
2. 同時刻帯のデータのうち、
   1) 選択方式はADS-BかMLATのいずれかの値を抽出
   2) 統合方式は重みづけして2つの航跡を合わせた結果で出力

選択方式に比べるとエラーと見られる測位点が多いように見える



選択方式による航跡統合



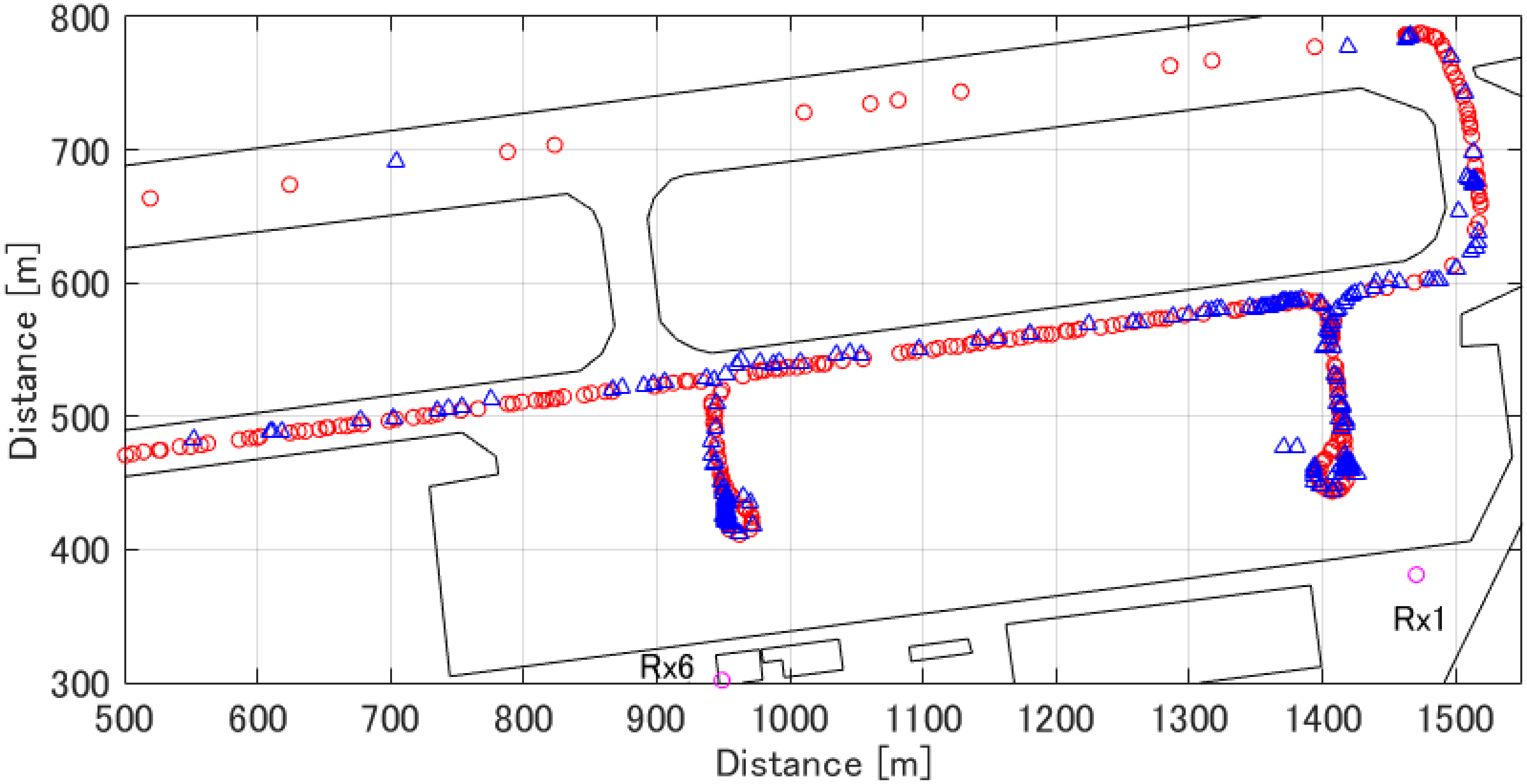
統合方式による航跡統合

© Electronic Navigation Research Institute. All rights reserved.

統合後の航跡図

手順
1. フィルタの適用
2. 最新値の航跡を抽出

Note: ICAOのPBSSGの監視性能要件(RSUR: Required Surveillance)に関する議論でも、監視画面に最新値を使用する方法を述べられている。



選択方式による航跡統合(フィルタ適用)

© Electronic Navigation Research Institute. All rights reserved.

発表内容

1. 背景・目的

2. 監視性能要件

3. 実験結果
   - 位置精度検証
   - 航跡統合

4. まとめ

© Electronic Navigation Research Institute. All rights reserved.

まとめ

- 空港面における2つの協調監視システム（MLAT, ADS-B）の位置精度について飛行実験を通して得られた結果から性能評価を実施した。
  - MLAT:　誤差は幾分大きいが更新頻度は高い
  - ADS-B: 位置精度の安定性は極めて高いものの更新頻度が劣る
- 複数の監視システムで得られた航跡統合について、選択・統合方式の観点から議論した。
  - 選択方式の場合は精度が悪い結果に引っ張られることがない
  - どんな形であれスムージングは必須と考えられる

（今後の課題）

- 一次監視レーダ系を含めた航跡統合を行う
- マルチ監視時の性能評価の方法を提案する

© Electronic Navigation Research Institute. All rights reserved.