

ADS-B 位置検証技術の性能概算

監視通信領域 ※長縄 潤一，宮崎 裕己，田嶋 裕久，古賀 禎，北折 潤，角張 泰之

1 まえがき

我が国では次世代の航空機監視システムとして自動位置情報伝送・監視機能 ADS-B (Automatic Dependent Surveillance—Broadcast)の導入が計画されている。ADS-B は航空機が自身の位置などを自発的に放送し、それを地上側で受信することで航空監視を実現するものである。ADS-B は地上側設備を簡素化できる一方で、監視情報を航空機からの自己申告に頼っていることから、なりすまし等による不正な位置情報への対策が求められる[1]。

これまでに電子航法研究所では ADS-B の位置情報を検証する技術（位置検証技術）に取り組んできた。具体的な手法としては信号到達時間差（TDOA: Time Difference of Arrival）を用いた手法（以下、TDOA 法）[2-13]や信号到来角（AOA: Angle of Arrival）を用いた手法などである[12-14]。これら手法に関して、理論の構築、実験的な評価、システム設計法による性能概算などを行ってきた。

本稿ではこれまでの取り組みのうち、システム設計法[11,12]について研究成果を報告する。本手法はシステム計画段階における性能概算や性能に影響を与える要因を分析するために利用できる。本手法による性能概算手順を説明し、計算例の分析結果を報告する。なお、紙面の都合上 TDOA 法のみに限定する。

2 TDOA 法による位置検証

2.1 判定の動作

2局以上の受信局により TDOA を測定できる。TDOA を利用して ADS-B 信号に含まれる位置情報の正当性を確かめるのが TDOA 法である。ここでは簡単化のため2局のみを考える。

具体的な手順としては、まず、受信局2局により ADS-B 信号を受信し、受信時間を精密に測定する。受信時間の差が TDOA である。TDOA の実測値は送信源と受信局の位置関係で決まるものである。一方、信号に格納された

ADS-B 位置を読み出し、ADS-B 位置と受信局の位置関係から TDOA の予測値も計算できる。ADS-B 位置が正しい場合、すなわち送信源位置に十分に近い場合、TDOA の予測値は実測値と一致するはずである。予測値と実測値の差を検定量とし、事前に決めたしきい値と比較することで、正当性を判定できる。本稿では検定量

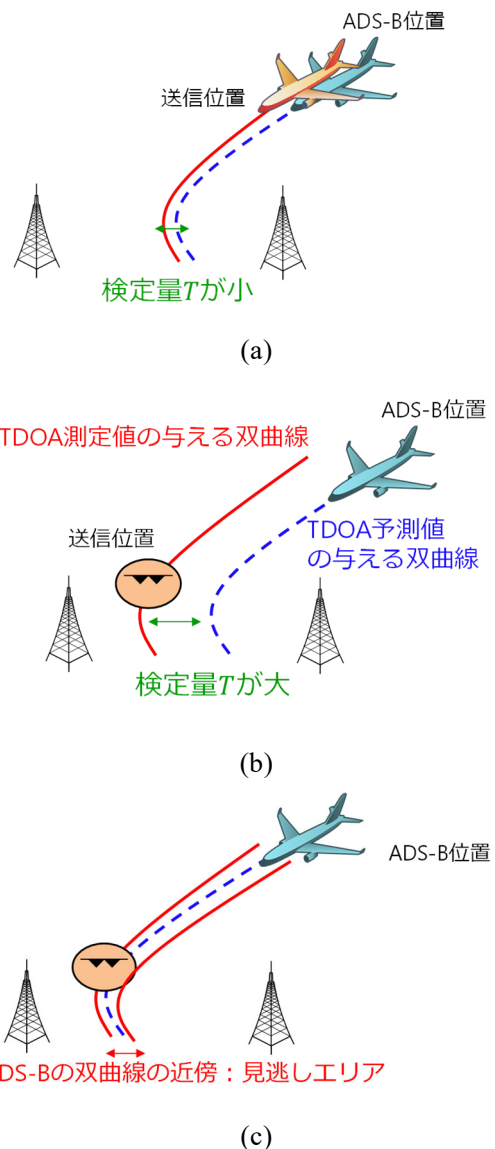


図1 TDOA 法による判定の様子：(a) 正当な位置を検証できる場合，(b) 不正な位置を検知できる場合，(c) 不正な位置を見逃す場合

およびしきい値をそれぞれ T および γ と書くことにする。

図1ではTDOA法による判定の原理をより詳しく説明する。TDOA実測値は送信源の存在する双曲線を示す。一方、ADS-B位置から計算されたTDOA予測値はADS-B位置を通る双曲線を示す。検定量 T は双曲線間の最小距離差に相当する。図1(a)のようにADS-B位置が正当なときは双曲線の差が小さくなる。同図(b)のようにADS-B位置が不正のときは双曲線の差が大きくなって検知が成功する。しかしながら、同図(c)のように予測値と実測値が一致する位置関係も稀に存在し、その場合は検知が失敗する。本稿で述べるシステム設計法は位置関係を網羅的に調べることで、検知が成功する確率（検知率）を概算するものである。

2.2 性能指標：検知率・誤報率

位置検証システムで重要となる性能指標としては前述した不正の検知率のほかに、誤報率も挙げられる。検知率は不正な位置を不正だと検出する確率であり、高いほど良い。一方、誤報率は正当な位置を不正だと誤って判定する確率であり、低いほど良い。一般的に、検知率と誤報率にはしきい値で決まるトレードオフの関係がある。なお、ADS-Bの位置検証における検知率と誤報率に関する国際的な性能要件は現在のところ決められていない。また、本稿では確率の0%~100%を0~1の数値範囲で表現する。

3 性能概算のためのシステム設計法 [11,12]

3.1 概要

位置検証の性能指標である検知率と誤報率は、受信局の位置、監視覆域（ADS-Bを取得する位置）、送信源の位置に応じて変化する。したがって様々な組み合わせを計算することが必要である。また、送信源については事前に特定の位置を想定することは難しい。そこで提案するシステム設計法では、送信源の発生確率は想定された範囲内で一様だと仮定し、平均的な検知率（平均検知率）を計算する。計算方法としては、まずADS-B監視が求められる覆域範囲、不正な送信源が想定される範囲を与えておき、それらを細かく刻むことで、覆域点と送信点の

集合（点群）を得る。そして、覆域点と送信点の組み合わせ全てに検知率を計算し、その平均を取ったものを平均検知率とする。なお、誤報率はしきい値の設定において織り込む。計算の流れを書き出すと以下の通りとなる。

1. 計算条件の設定
覆域範囲、不正な送信源の想定範囲、受信局位置などを与える。
2. 覆域点群・送信点群の生成
覆域を覆域点の集合（点群）に刻む。覆域点の数を N_a 、覆域点番号を $k = 1 \dots N_a$ とする。同様に、送信源の想定範囲を送信点群に刻む。送信点の数を N_t 、送信点番号を $l = 1 \dots N_t$ とする。
3. しきい値・検知率計算
ある覆域点 k と送信点 l の組み合わせ (k, l) に対して、所望の誤報率を達成するようなしきい値 γ を計算した上で、検知率 $P_D(k, l)$ を計算する。
4. 平均化
 (k, l) に関する全ての組み合わせにわたって平均を取り平均検知率 $P_{D,avg}$ を計算する。

各ステップの詳細は以降で解説する。

3.2 ステップ1（計算条件）

計算条件として設定するのは以下のパラメータである。

1. 受信局位置
2. 覆域範囲
3. 不正な送信源の想定範囲
4. 点群生成ための刻み幅
5. 受信局性能（精度 σ_t と時刻同期性能 $\Delta\mu$ ）
6. しきい値計算に必要なパラメータ（誤報率等、後述）
7. 平均化での除外範囲等（後述）

3.3 ステップ2（覆域点群・送信点群の生成）

与えられた範囲を緯度・経度上で等間隔に刻むことで格子状の点群を生成する。高度は一定とし、覆域点は飛行中の高度、送信点は地上とする。このように生成した覆域点群と送信点群の一例を図2に示す。

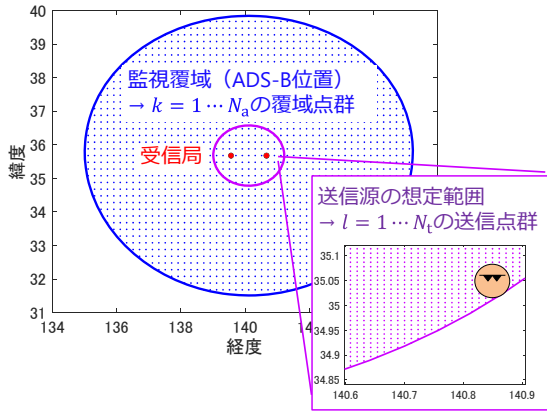


図2 覆域点群と送信点群の例

なお、後述する計算で利用するため、数式上の記号を導入しておく。覆域点 k の位置は緯度 $\phi_{a,k}$ 、経度 $\lambda_{a,k}$ 、高度 $h_{a,k}$ とする。送信点 l の位置は緯度 $\phi_{t,l}$ 、経度 $\lambda_{t,l}$ 、高度 $h_{t,l}$ とする。 i 番目の受信局位置について、緯度 $\phi_{r,i}$ 、経度 $\lambda_{r,i}$ 、高度 $h_{r,i}$ とする。また、検知率の計算にあたって直交座標系への座標変換が必要である。本稿では、受信局間の中間点を座標系中心としたENU(East-North-Up)座標系を利用するとし、受信局位置 $(\phi_{r,i}, \lambda_{r,i}, h_{r,i})$ 、覆域点 $(\phi_{a,k}, \lambda_{a,k}, h_{a,k})$ 、送信点 $(\phi_{t,l}, \lambda_{t,l}, h_{t,l})$ を直交座標系に変換したものをそれぞれ $(x_{r,i}, y_{r,i}, z_{r,i})$ 、 $(x_{a,k}, y_{a,k}, z_{a,k})$ 、 $(x_{t,l}, y_{t,l}, z_{t,l})$ と書く。

3.4 ステップ3 (しきい値・検知率計算)

覆域点 k と送信点 l の組み合わせごとにしきい値と検知率を計算する。

まず、しきい値 γ を誤報率が所望の値 ($P_{FA,u}$ とする) より小さくなるように決定する。正当な ADS-B 位置に対する検定量 T の分布をもとに γ を決定すればよい。例えば受信局の精度のみを考える場合、TDOA 誤差の分散 $2\sigma_t^2$ および正規分布 N を使って、 $T \sim N(0, 2\sigma_t^2)$ と書けるため、 γ を次式で決定できる。

$$\gamma = \sqrt{2}\sigma_t Q^{-1}\left(\frac{P_{FA,u}}{2}\right) \quad (1)$$

しかしながら、実際には正常な ADS-B 位置が含む誤差も考慮する必要がある。どのように T の分布を取得するかは、導入のフェーズに応じて、理論式、数値シミュレーション、測定を

表1 しきい値計算のパラメータ

変数	意味 (全て最悪値)
$P_{FA,u}$	所望の誤報率
$\mu_{l,u}$	ADS-B 遅延の平均
$\sigma_{l,u}$	ADS-B 遅延の標準偏差
v_u	飛行速度
$\mu_{x,u}$	測位誤差のバイアス成分 (平均)
$\sigma_{x,u}$	測位誤差のばらつき成分 (標準偏差)
$\sigma_{t,u}$	受信局の測定誤差 ($2\sigma_{t,u}^2$ が TDOA の分散)
$\Delta\mu_u$	受信局の時刻同期誤差

使い分けることが望ましい。本稿では、事前検討に適する理論式をベースにした方法[7,11,12]を取る。この方法は、表1に示すパラメータのように、各種 ADS-B 位置の誤差要因について最悪値を仮定するものである。受信局の位置関係を考慮しつつ、所望の誤報率を達成するしきい値を計算できる。詳細については[7,11,12]を参照されたい。なお、受信局の時刻同期誤差について[7,11,12]では受信局ごとに与えたが、本稿では1項にまとめている。

しきい値 γ を決定できたら、検知率を計算する。準備として、 i 番目の受信局からの距離を与える関数 f_i 、TDOA を与える関数 g を次式で定義する。

$$f_i(x, y, z) = \sqrt{(x - x_{r,i})^2 + (y - y_{r,i})^2 + (z - z_{r,i})^2} \quad (2)$$

$$g(x, y, z) = \frac{f_2(x, y, z)}{c} - \frac{f_1(x, y, z)}{c} \quad (3)$$

ここで c は伝搬速度である。ADS-B 位置が不正のとき検定量 T は次式のようにモデル化できる。

$$T \sim N(\mu_1, 2\sigma_t^2) \quad (4)$$

$$\mu_1 = g(x_{t,l}, y_{t,l}, z_{t,l}) - g(x_{a,l}, y_{a,l}, z_{a,l}) + \Delta\mu$$

ここで $2\sigma_t^2$ は受信局の TDOA 精度、 $\Delta\mu$ は受信局間の時刻同期誤差の効果を表す。式(4)の意味するところは、測定誤差によるばらつきのた

め T は正規分布に従うが、その中心位置 (μ_1) は主に ADS-B 位置と真位置の差によって 0 ではない値になる（したがって不正が検知可能）ということである。 $|T|$ がしきい値を超える確率が検知率となり、正規分布の上側の裾である CCDF (Complementary Cumulative Distribution Function) を Q としたとき次式で計算できる。

$$P_D(k, l) = Q\left(\frac{\gamma - \mu_1}{\sqrt{2}\sigma_t}\right) + Q\left(\frac{\gamma + \mu_1}{\sqrt{2}\sigma_t}\right) \quad (5)$$

この計算を全ての覆域点 k と送信点 l の組み合わせに対して行う。

3.5 ステップ4 (平均化)

$P_D(k, l)$ について送信点群・覆域点群にわたって平均を取る。これは次式で表現できる。

$$P_{D,avrg} = \frac{1}{N_a N_t} \sum_l \sum_k P_D(k, l) \quad (6)$$

しかしながら、必ずしも全ての k, l を組み入れることが適切ではない場合もある。例えば、受信局から見通し外の覆域点は除外する必要がある。また、ADS-B 位置と送信源が一致する場合は原理的に除去できないほか、必ずしも不正な位置情報とも言い切れないため、計算から除外する考え方もありうる。送信源と ADS-B 位置が一定距離以上離れたものを検知対象とするなら、そのような k, l の組み合わせだけが計算対象となる。上記の点を考慮して得られた k, l の組み合わせの集合を C とすれば、平均化は次式のように書ける。

$$P_{D,avrg} = \frac{1}{|C|} \sum_{l, k \in C} P_D(k, l) \quad (7)$$

4 計算例と分析結果

本節では提案したシステム設計法による結果例を紹介したのち、これまでに得られた分析結果を報告する。

4.1 基本条件

まず、基本となる計算条件を述べる。受信局のうち一方は電子航法研究所にあるとし、他方を 50 km 東に離れた地点とした。この離隔距離は航空路 WAM の状況を念頭に設定した。受信

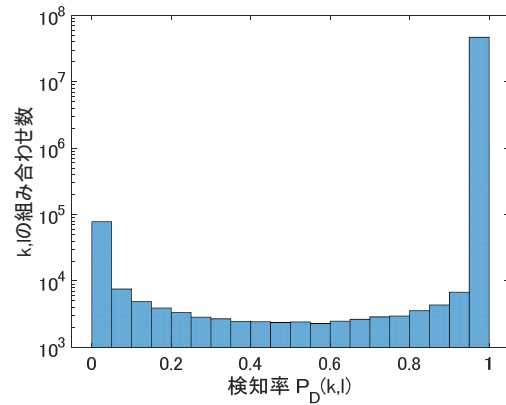


図3 基本条件での $P_D(k, l)$ の分布

局間の中心を座標原点とし、監視覆域は中心から 250 NM とした。覆域内の緯度・経度を 0.2° 刻みで分割し、 $N_a = 1675$ の覆域点群を得た。高度は巡航中を想定し 40,000 ft とした。受信局の精度については $\sigma_t = 30$ nsec とした。しきい値計算に必要なパラメータとしては [7, 11, 12] と同様にした。所望の誤報率は 0.05 とした。

不正な送信源が発生すると想定した範囲は中心から 半径 100 km の円形範囲とした。送信源範囲を緯度 0.009° 、経度 0.0115° 刻みで分割し $N_t = 30225$ の送信点群を得た。前述した図 2 はこのように生成した送信点群・覆域点群である。

なお、説明の分かりやすさ等を改善するため [7, 11, 12] からパラメータを調整しているが結果の傾向は同じである。

4.2 基本条件の計算結果

4.1 で述べた条件での計算結果を説明する。まず検知率 $P_D(k, l)$ の分布は図 3 のようになった。縦軸のスケールが対数となっていることに注意されたい。大多数の組み合わせで $P_D(k, l)$ は 0.9 以上となった。すなわち、TDOA 法は送信源位置と ADS-B 位置に関する特定の条件下を除き、ほとんどの場合で不正を検知できることが分かる。式 (7) によって、見通し内の平均を取ると $P_{D,avrg} = 0.998$ となって高い性能を確認できた。

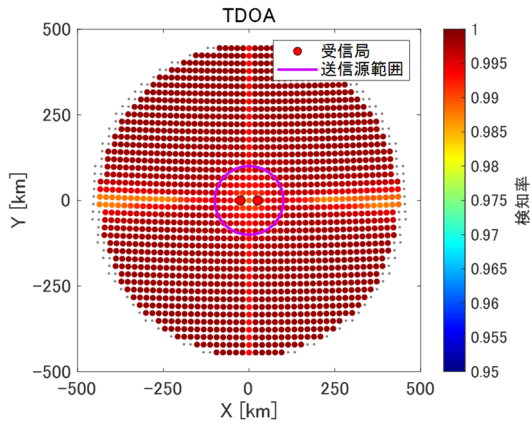


図4 基本条件での検知率空間分布

表2 変化時のパラメータ

測定精度(σ_t)	30 nsec, 300 nsec
受信局間距離	0.5 km, 1.0 km, 5.0 km, 10.0 km, 50.0 km, 100.0 km, 150.0 km
所望の誤報率	0.05, 0.01, 0.005, 0.001
高度	5,000 ft, 10,000 ft, 20,000 ft, 30,000 ft, 40,000 ft
送信源の範囲 (半径)	10 km, 30 km, 100 km

また、計算結果を可視化する一手法として、各覆域点 k に対して送信点 l にわたる平均を取ったもの（検知率の空間分布）を次式で計算した。

$$P_{D,avrg}(l) = \frac{1}{N_t} \sum_l P_D(k,l) \quad (8)$$

図4には基本条件における検知率の空間分布を示し、全体的に0.98以上の値となっていることが分かる。

4.3 性能の支配的要因

平均検知率を決める支配的な要因は受信局間の距離、測定精度である。それ以外のパラメータ、具体的には送信源範囲、所望の誤報率、高度は前述の2要素と比較して影響の度合いが少ない（ただし、極端に変化させない場合に限る）。具体的な例として、パラメータを表2の

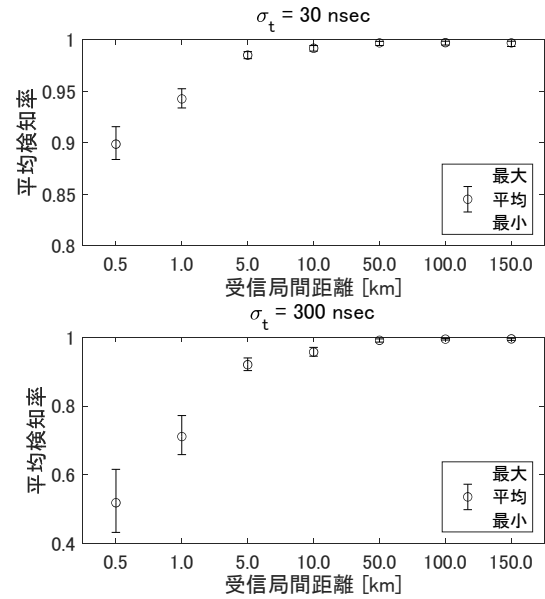


図5 パラメータを変化させたときの平均検知率

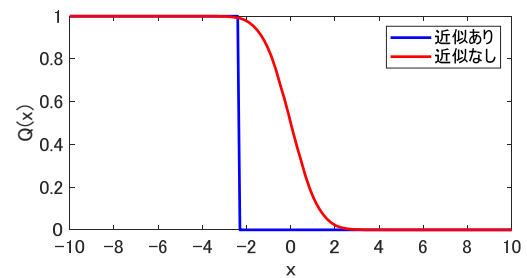


図6 関数Qの近似

ように変化させた結果を図5に示す。様々な条件下での計算結果を受信局間の距離および測定精度でグループ分けし、各グループの最小・平均・最大をエラーバー形式で表示している。全体的な傾向を見ると、受信局間距離と精度に応じて平均検知率が大きく変化することが分かる。特に、受信局間距離が小さく、かつ測定精度が悪いとき検知率が顕著に低下している。どちらか一方の場合は低下量が限定的である。また、バーの幅は所望の誤報率・高度・送信源範囲を変化させたときの振れ幅を示している。バーの幅は精度と距離による変化量に比べて狭い。したがって、所望の誤報率・高度・送信源範囲の影響度合いは相対的に小さく、受信局間距離と測定精度が決まれば、おおよその性能が決まる。

4.4 実装の簡単化

式(5)は関数 Q を利用しているが、実装を容易にするための単純化も検討した。具体的には以下の近似を試みた。

$$P_D(k,l) = \begin{cases} 1 & \text{(10)または(11)が成立} \\ 0 & \text{それ以外} \end{cases} \quad (9)$$

$$\frac{\gamma - \mu_1}{\sqrt{2}\sigma_t} < -2.3263 \quad (10)$$

$$\frac{\gamma + \mu_1}{\sqrt{2}\sigma_t} < -2.3263 \quad (11)$$

式(9)~(11)は関数 Q を図6のように近似することで得たものである。 -2.3263 は関数 Q がほぼ1とみなせる0.99となる数値である。

近似の妥当性を検証するため、基本条件において式(5)と式(9)を用いた結果を比較した。 $P_{D,avg}$ は近似なしで0.998、近似ありで0.997となり、実用上は一致とみなせる結果が得られた。

5 むすび

本稿では ADS-B 位置検証のための TDOA 法についてシステム設計法による性能概算を説明し、その分析結果を報告した。システム設計法は平均検知率を計算するもので、その性能は精度と受信局間距離によっておおむね決まることが明らかになった。また、実装の簡単化として関数の近似が有効であることを示した。

謝辞

本研究にご協力を頂いている関係者の皆さまに深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] M. Strohmeier, et al (2015), "On the security of the automatic dependent surveillance-broadcast protocol," IEEE Commun. Surveys & Tuts., vol.17, no.2, pp. 1066-1086.
- [2] 長縄, 宮崎, "TDOA を用いた ADS-B 位置検証における遅延の考慮," 信学技報, SANE2018-44, pp.1-6, 2018年10月.
- [3] 長縄, 宮崎, 田嶋, "ADS-B 位置検証技術の評価," 令和元年度(第19回)電子航法研究所研究発表会 講演概要, pp.16-24, 令

和元年6月.

- [4] 長縄, 宮崎, "ADS-B 位置検証の技術," 航空無線, 第101号, pp.18-21, 令和元年9月.
- [5] 長縄, 宮崎, "TDOA を用いた航空機位置検証法の実験的評価," 信学技報, SANE2019-75, pp. 29-34, 2019年11月.
- [6] 長縄, 宮崎, "ADS-B 位置検証技術の実用化に向けた考察," 令和2年(第20回)電子航法研究所研究発表会講演概要, pp. 19-24, 2020年9月.
- [7] J. Naganawa and H. Miyazaki, "Theory of automatic dependent surveillance-broadcast position verification using time difference of arrival," IEEE TAES, vol. 57, no. 3, pp. 1387-1404, June 2021.
- [8] 長縄, 宮崎, "複数 TDOA を用いた航空機位置検証法に関する理論検討," 信学技報, SANE2022-6, pp. 27-32, 2022年5月.
- [9] J. Naganawa and H. Miyazaki (2022), "Comparison of ADS-B verification methods: direct TDOA and MLAT," IEEE Access, vol. 10, pp. 97276-97288.
- [10] 長縄, 宮崎, 田嶋, 古賀, 北折 (2023年3月), "無線信号特徴量を使った航空機位置情報(ADS-B)の検証," 日本 AEM 学会誌, 31 巻 1 号 p. 25-29.
- [11] 長縄, 宮崎, 田嶋, 古賀, 北折, "ADS-B 位置検証技術に関する研究," 第60回飛行機シンポジウム, 2022年10月.
- [12] 長縄, 宮崎, 古賀, 田嶋, 角張, "TDOA と AOA を用いた航空機位置検証法のシステム設計に関する検討," 信学技報, SANE2021-14, pp.29-34, 2021年6月.
- [13] J. Naganawa, et al, "TDOA and AOA measurement system for investigating aircraft position verification," in ICSANE2021, Nov. 2021.
- [14] J. Naganawa, et al, "ADS-B anti-spoofing performance of monopulse technique with sector antennas," in 2017 IEEE CAMA, Tsukuba, Japan, Dec 2017.