

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 30 日現在

機関番号：82642

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820117

研究課題名(和文) 航空監視システムにおける電波伝搬解析のための超高速広域計算アルゴリズムの開発

研究課題名(英文) Development of Rapid Computational Algorithm of Radio Propagation for Surveillance System

研究代表者

本田 純一 (Honda, Junichi)

国立研究開発法人電子航法研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：10643348

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、高速かつ広域の電磁界計算を可能とする計算アルゴリズムを開発し、それを民間航空分野で発生する種々の問題に応用することにある。本研究は、広域計算を得意とするレイトレーシング法(RTM)を応用したアルゴリズムを開発した。建物や航空機を面で離散化し、送信点から受信点までの電波の光線探索方法を単純化することにより計算時間の短縮を図った。計算手法を三次元解析まで拡張し、航空機からの散乱波解析、空港内のマルチパス解析等へ応用し、得られた数値結果と実験結果を比較してその精度を確認した。計算時間については伝搬環境に依存するが、通常の解析手法と比べて70～90%の計算時間を達成した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to develop an algorithm for rapid computation of electromagnetic fields in large analytical region. We considered the numerical method based on the ray tracing method (RTM) which is generally applied to computation in large area. In order to reduce computation time, we discretize obstacles by faces and simplify the procedure of ray searching. Moreover, the algorithm was expanded to three dimensional problems and was applied to follows: (1) scattered field caused by aircraft and (2) multipath in airport. We confirmed the field accuracy of the proposed method in comparison with the experimental results. The computation time is achieved saving about 70%-90% of conventional method.

研究分野：電磁界解析

 キーワード：航空機監視 電波伝搬 散乱波 レイトレーシング法 レーダ マルチラテレーション 計器着陸装置
 高速計算

1. 研究開始当初の背景

近年、航空需要の高まりを受け、航空機の大型化、空港の整備、新たな監視技術の開発が進められている。しかし、空港および空港周辺の開発は不要な電波を発生させる要因となり、航空無線施設の性能低下につながる可能性がある。例えば、空港内の航空機位置検出に利用されるマルチラテレーション (MLAT) は、機体から送出される信号を利用するが、ターミナルビルや大型格納庫等で発生するマルチパスによって検出率低下が生じる。また、物体からの反射信号を用いて位置検出を行うマルチスタティックレーダ (MSPSR) は、どこにどのような散乱波 (反射波、回折波) が発生するかその振る舞いを把握することでシステム要件を算出する必要がある。これら電波の振る舞いを知るとは、運用上の問題点を明らかにし、また、これから開発するシステムにとって最適な受信機配置や機器性能要件を算出し効率的な運用を図る上でも重要となる。

電波伝搬特性の解析は古くからの研究課題であり、近年では携帯電話や地上デジタル放送波に関連して多くの議論が行われている。一方、高い安全性が求められる航空分野への応用はあまり見られない。空港内に限らず飛行中の航空機までを含めた散乱解析には、解析領域が広大となるため限定的な数値解析となっていた。さらに空港内の建物や航空機の形状が複雑となり、これらを全て考慮した数値解析を実施すると膨大な計算時間を必要とする。よって、運用者からの要望に迅速に対応するためにも計算の高速化が求められる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、民間航空分野において広く活用されるための高速広域の電磁界解析を可能とした計算アルゴリズムを開発することである。

MSPSR は、既存レーダの代替技術として注目を集める新しい監視技術である。地上から送出する電波の航空機で散乱する電波を利用するため、機体でどのように散乱するか推定する必要がある。また、MLAT や計器着陸システム (ILS) では、建物で発生するマルチパスが装置に影響を及ぼす可能性があるため、その振る舞いを推定することが求められる。上記は全て物体からの散乱問題を含んだ電波伝搬問題を抱えており、受信機的位置推定や使用するシステムへの影響を明らかにするためには、この知見からの伝搬解析が必要となる。さらに、これらを航空分野に応用するためには、航空機の形状や姿勢に加えて数十キロに及ぶ広域かつ精度良い数値解析が求められる。本研究は、これらの問題に対応するための数値解析アルゴリズムを開発した。

3. 研究の方法

本研究は、広域の数値計算を得意とするレイトレーシング法 (RTM) を応用したアルゴリズムを開発した。本研究担当者は、過去に地面に沿う電波伝搬特性を解析するため上記手法を用いた経験があり、その手法を改良し航空分野への応用を試みた。

通常、RTM は下記の手順にて実施される。

(1) 送受信間の電波の航跡 (レイ) を探索

(2) レイ情報に基づいた電磁界計算

図1のように、まず送信点から受信点までの経路を探索する。このとき、送信点から受信点に到達する経路に障害物があるかないかを判定し反射点と回折点を決定する。次にレイ情報に基づいて電磁界を計算する。

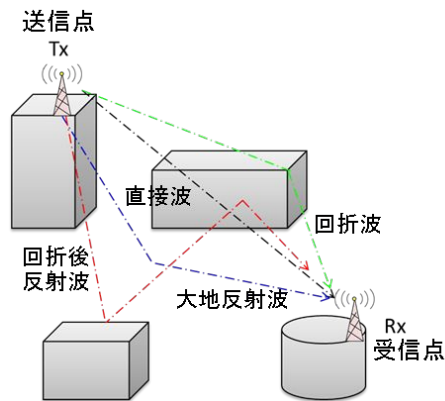


図1. マルチパスの例

通常、電磁界の解析には膨大な計算時間を必要とする。また、目的に合わせて最適な計算手法を選択する。本研究は、RTM を基本として航空無線分野の問題を近似的に取り扱うこととした。しかし、散乱対象となる物体が複雑でかつ広域の解析となると、RTM を用いたとしても相当な計算時間を要する。そこで、上記(1)の探索手順を簡単化することで計算を高速化し、広域計算を可能とした。提案手法の優れた点は、汎用の PC でも十分計算可能ということである。

全体の計算時間は、おおよそレイ探索に 9 割、電磁界計算に 1 割 (以下) となる。そのため、いかにレイ探索時間を削減するかが、計算時間短縮のポイントとなる。RTM では障害物が複雑で、さらに対象物体の数が多いと指数関数的に計算時間が増大する。そこで提案手法では、下記の近似を採用した。

(i) 物体を線分 (2D) か面 (3D) で近似

(ii) レイ探索手順の簡単化

(i) は物体の離散化である。このとき、離散化した線分もしくは面の大きさは使用する波長以上とする。これは、回折波の計算で波長以下のものに適用した場合には精度が落ちるためである。線分・面近似によって作成されたモデルはレイ探索時間に大きく影響する。線分・面のサイズが小さいと計算時間を必要とし、また波長以下の場合には精度が落ちる。よって、基本的には離散した線分・面は波長以上として、計算時間の短縮と計算精

度を保つようにする。

次に(ii)レイ探索手順の簡単化である。通常、経路上にある反射点と回折点の探索には、離散化された線分・面上のどこにこれらが存在するか逐次探索する必要がある。しかし、この方法では、スネルの法則を満足する反射波の有無、送受信点を最短経路で結ぶ回折波の探索にかなりの時間を要する。そこで、経路探索を簡単化する方法を試みた。

提案手法は大きく次の2つの手順を踏む。まず(a)離散化した線分・面上の代表点を決定し、次に(b)代表点と送受信点および代表点同士が見通し内(LOS)か見通し外(NLOS)かを事前に判定する。代表点は面のサイズに合わせて適当な数を配置するが、多くの場合は1つとする。最初に送受信間および代表点が見通し内(LOS)の関係にあれば、正しい伝搬路であるかどうかは関係なく、レイを生成する。しかし、このレイは近似的で実際に存在する伝搬経路とはなりえない。そこで、得られた近似レイにイメージング法を適用することで正しい反射波を算出する。仮に離散化した線分もしくは面上に反射点がない場合は、次の点までの最短経路をなす点で回折波が存在すると仮定する。通常、回折波は送受信間が最短経路となるように構成する。

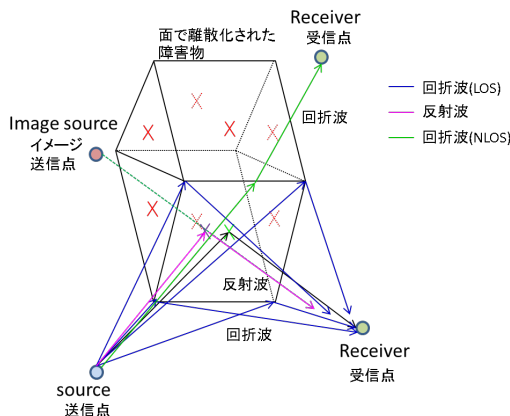


図2. レイ探索例

図2はレイ探索のイメージ図である。三角形と四角形で離散化した物体の各面にxで示した代表点を取っている。この図の場合は、一番手前の面の代表点が送受信間にそれぞれLOSとなるため、黒の矢印で示すように近似レイを作成する。次に、対応する面にイメージ点を取って反射点を決定し、反射波を構築する。一方、過去の研究から円筒に対する電磁界計算では、LOSでは見通し内全ての面の端点からの回折波を考慮することで精度が保たれ、またNLOSでは最短経路となる回折波で精度が保たれることが分かっている。よって、本研究でも送受信間がLOSとなる場合は、端点からの全ての回折波を考慮し、NLOSでは最短距離の回折波を考慮する方法を採用した。提案手法は非常に簡単な処理であるが、コンピュータメモリをさほど必要とせず、汎用のPCでも計算が可能である利点がある。この方法を航空分野の各種問題に応

用し、精度の確認と計算時間について検証した。

4. 研究成果

- 提案手法を下記の航空分野に応用した。
- (1)航空機からの散乱波(レーダ断面積)
 - (2)空港内のマルチパス問題

【レーダ断面積の解析】

まず航空機からのレーダ断面積(RCS)の解析結果を示す。数値解析では羽田空港に着陸する航空機を想定して、東京湾周辺で得られる散乱強度を計算した。図3は対象とした簡易航空機モデルで、大きさはB777クラスとした。

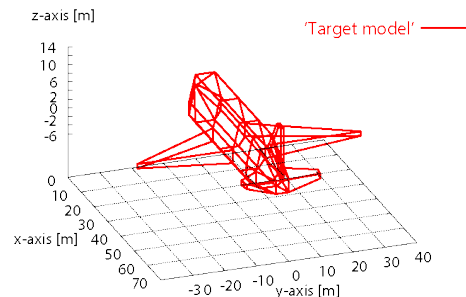


図3. 簡易航空機モデル

このモデルが東京湾上空にある場合に、地上に到達する散乱強度を計算した結果の一例が図4となる。この問題はMSPSRにおいて、地上デジタル放送波を使ったレーダシステム開発の一助とするべく解析した結果となる。この例では、東京タワーから送出される電波が図3のモデルで散乱して得られる受信強度を示す。

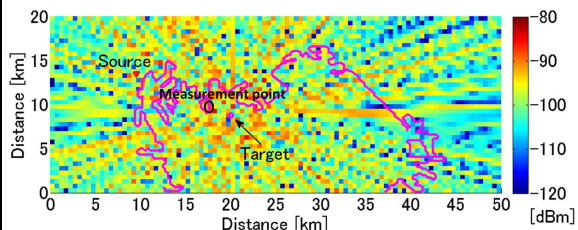


図4. 散乱強度分布

上記の計算精度を確認するため、羽田空港周辺で実測を行った。図5は実験の様子を示す。この実験では21chの放送波を利用した。図6は実験で得られた受信電力である。なお測定場所は図4中の測定場所(Measurement point)に対応する。図の横軸は測定時間、縦軸は受信電力である。移動物体がアンテナ前方を通過すると散乱波を受信することが示されている。

次に図4と図6を比較し、計算精度を検証した。この結果、機体通過時の受信電力は計算結果と1~3dBの違いでかなり良好であると判断した。よって、提案手法による数値計算結果は、概ね良い精度を持っていることが分かった。なお、数値解析は50km x 20kmの広

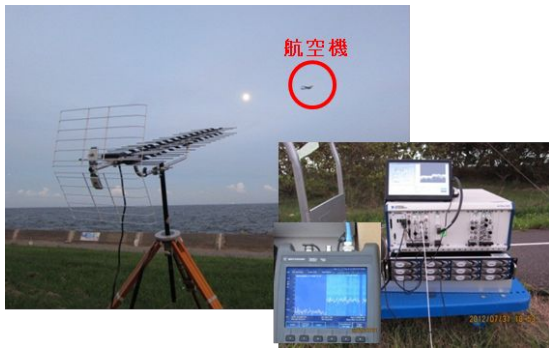


図 5 . 実験の様子

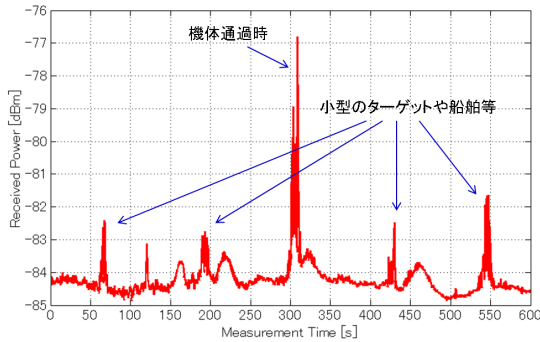


図 6 . 受信電力

大な解析領域にも関わらず、簡単な問題とはいえ計算時間は5分以内となり、かなり早い計算時間を達成したと言える。

本数値解析手法を改良して羽田空港に着陸する航空機の東京湾周辺における検出率を推定した。図7は検出率の一例である。受信機の最低受信電力を-105dBmと仮定して、移動物体が図中の東から西に移動した時の検出率を色の濃淡で示している。このときの検出率は図中右側の方で最大84%となるが、他はこの例ではロストする可能性が高い。よって、より性能の良い受信機や指向性アンテナ等を利用する必要がある。

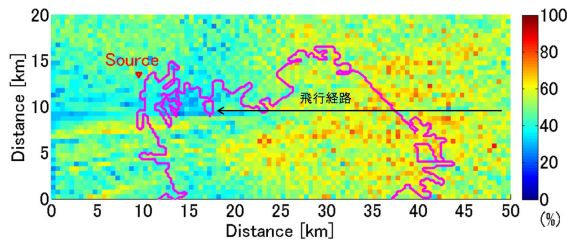


図 7 . 航空機検出率

【空港内マルチパス解析】

次に空港内のマルチパス問題について MLAT と ILS の2つの観点から検証した。

MLAT では航空機から放出された信号を空港内の複数の受信機で受信し、信号の到来時間差から位置を算出する。このとき、ターミナルビルや格納庫等でマルチパスが発生し、遅延信号が信号の歪や測位計算の誤差要因となる。そこで、実際の空港を想定した空港モデルを作成し空港内のマルチパスを解析した。ILS もマルチパスが性能劣化に直結するため、同様の解析を実施した。

MLATのマルチパスによる検出率低下要因
 図8は、実際の空港をイメージして作成したモデルである。この図では、建物に囲まれたエリアを航空機が通過したとき、放出された信号が建物で反射・回折する様子を示している。このように建物に囲まれたエリアでは多数のパス(経路)が存在するため、もとの信号を歪ませる要因となる。図9は、図8のレイ情報から得られた遅延プロファイルである。遅延信号が航空機の送信する信号長内(最大120μs)で多数入るため信号歪みの原因となる。

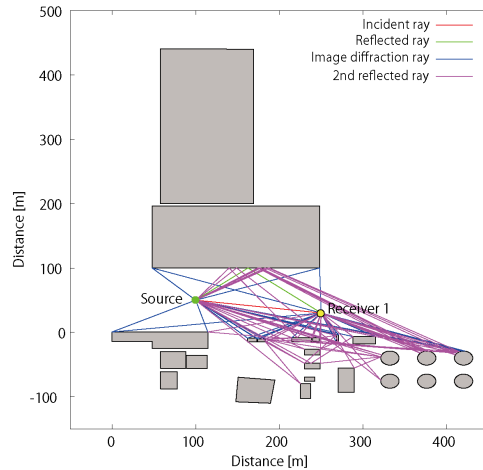


図 8 . 建物周辺のマルチパス

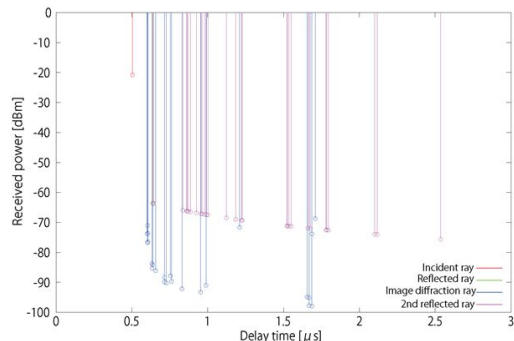


図 9 . 遅延プロファイル

提案手法を応用して精度劣化指数(DOP)のシミュレーションを実施した。本研究担当者は別テーマで新型 MLAT の性能評価を担当している。その研究では、仙台空港に実験装置を展開し性能評価を進めている。ここでは、実験モデルに対応した数値解析を実施した。図10は空港に展開した8つの受信局によって作られるDOP値である。DOP値は値が小さいほど測位精度が良い。この図では空港全体を取り囲むように受信局を配置しているためDOP値が良い。ただし、空港内の建物は考慮していない。一方、図11はターミナルビル等を考慮し現実環境を想定したDOP値である。理想的な場合と比べて場所ごとに値が複雑に変化している。これは建物によって送信局間がNLOSとなるためである。

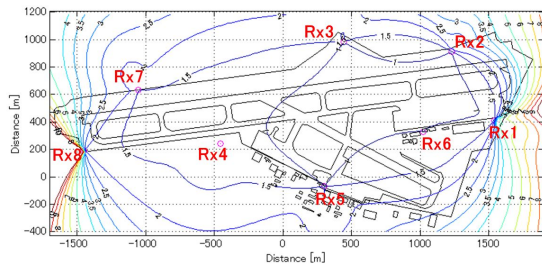


図 10 . 理想的な DOP 値

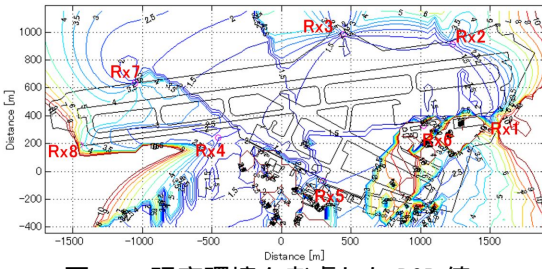


図 11 . 現実環境を考慮した DOP 値

更に、計算値の信頼性検証と実験システムの問題点を明らかにするために、実験値との比較を行った。図 12 は実験用車両に送信機を搭載して空港内を走行したときに得られた測位結果である。図中の赤丸が測位データとなるが、良好な結果を示していることが分かる。しかし、青色の点線で囲まれたエリアについては、測位誤差や未検出のエリアが見られた。この場所は図 11 で示した DOP 値が悪化したエリアと概ね一致する。これは、建物で遮蔽されるなど送受信間の見通しが取れなくなったためである。数値計算結果と実験の両方で値が悪いエリアが一致したことから、計算結果は精度が良く、また実験結果は数値計算結果から検出率低下の一要因が明らかとなった。

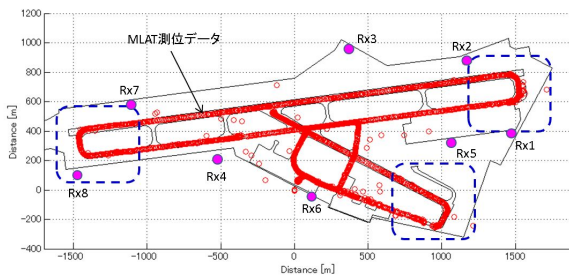


図 12 . MLAT の実験結果

ILS のマルチパスによる性能低下要因

最後に本手法を ILS の解析に応用した。ILS は航空機を着陸誘導するためのもので、着陸経路上を考慮すると数十キロ程度の解析領域を必要とする。本研究では ILS の一つであるローカライザ (LOC) に着目して解析を行った。LOC は機体に滑走路からの水平方向のずれを知らせる地上の航法施設である。空港周辺を想定して、図 13 の建物モデルを使用した。図 14 は送信点から受信点までのレイ分布の一例を示す。滑走路周辺の建物から多数の散乱波が発生している。

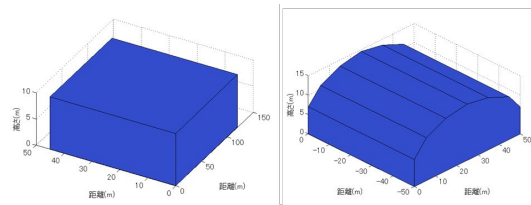


図 13 . 三次元建物モデル

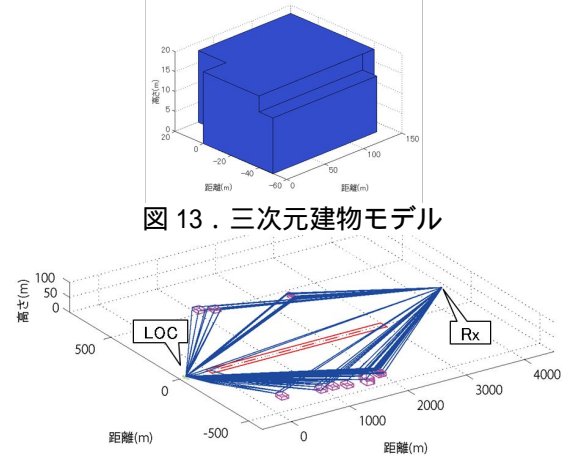


図 14 . レイ分布

ILS LOC はキャリアとサイドバンドの 2 つの信号を出しており、双方の位相差を見ることで滑走路からのずれを算出する。それぞれ、滑走路方向と滑走路に対して左右対称に放出する信号となる。図 15 および図 16 は散乱波の影響を三次元的に示したものである。図から分かるように周辺構造物から反射波や回折波が発生していることが分かる。

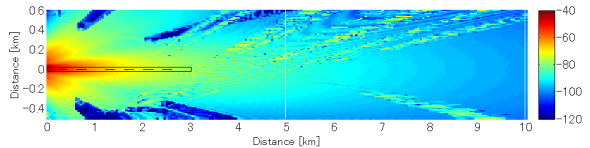


図 15 . キャリア受信電力分布

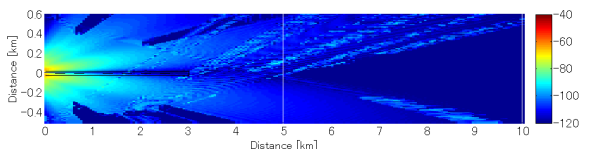


図 16 . サイドバンド受信電力分布

滑走路延長上の着陸経路の電磁界を計算し、受信機性能を考慮すると LOC の性能指数を示す変調度の差 (DDM) を算出することができる。図 17 は DDM の計算結果である。DDM は国際民間航空機関によって規定値が定められており、大きく 3 つのカテゴリー (CAT I, II, III) に分類される。数値結果では、CAT I は規程を満足しているが、CAT II は一部規定値を満たさないという結果になった。

【総括】

開発した数値計算アルゴリズムによる数値結果は、実験値との比較によって概ね伝搬特性の傾向が合っていることを確認した。また計算時間については解析する環境によって大きく異なるが、図 4 で示すような簡単な

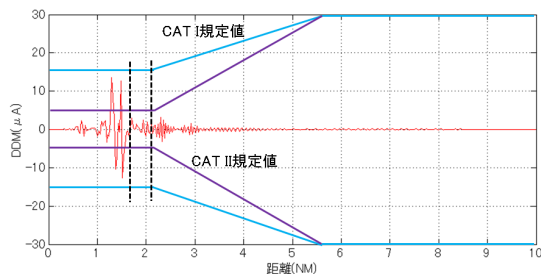


図 17 . DDM 値

モデルでは最大で半分程度まで計算時間の短縮ができた。一方、図 8 や図 12、13 のように複数の経路（直接波、1 回反射、1 回回折、大地反射、大地反射後の反射波、大地反射後の回折波、反射後回折波など）を考慮したときは、レイ探索時間を単純化したとしても相当な計算時間(数十分～数時間)を必要とした。図 8 では商用ソフトと比較した場合に 8 割程度となった。通常、複雑な電磁界計算を実行するときには数時間や数日もしくは数週間といった計算時間を要することもある。そのような観点から考えると、提案手法による計算時間は十分高速化できたと判断できる。しかし、計算時間短縮の代わりにやや精度が落ちることを述べておく。それでも、実験値との比較では良好な傾向を示しており十分に活用できるレベルにあると判断した。

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2 件)

- [1] J. Honda and T. Otsuyama, "Feasibility Study on Aircraft Positioning by Using ISDB-T Signal Delay," IEEE Antenna and Wireless Propagation Letters, DOI.10.1109/LAWP. 2016, (in press).
- [2] J. Honda and T. Otsuyama, "An estimation algorithm of scattered powers caused by a moving aircraft," IEICE Communications Express, Vol.2, No.11, pp.490-495, 2013.

[学会発表](計 10 件)

- [1] J. Honda and T. Otsuyama, "Experimental Study of Aircraft Positioning by DTTB Signal Delay," Proc. Int. Sym. on Enhanced Solutions for Aircraft and Vehicle Surveillance Applications, 5_1, pp.1-3, April 2016.
- [2] J. Honda and T. Otsuyama, "Positional Estimation of Obstacles and Aircraft by Using ISDB-T Signal Delay," Proc. the 30th IEEE Int. Conf. Advanced Info. Networking and Applications, pp. 346-351, March 2016. (Best Paper

Award)

- [3] J. Honda, "Influences of Scattered Field Caused by Buildings to ILS Localizer in Airport," Proc. Int. Symp. Antenna and Propagation, Nov. 2015.
- [4] J. Honda, Y. Kakubari and T. Koga, "DOP Simulation Considering LOS/NLOS for Aircraft Positioning on Airport Surface," Proc. the 2015 IEEE 5th Asia-Pacific Conf. Synthetic Aperture Radar, pp.773-776, Sept. 2015.
- [5] J. Honda and T. Otsuyama, "Preliminary Experimental Result of Aircraft Positioning by Using ISDB-T Delay Signal," Proc. the 2015 IEEE AP-S Symp. on Antennas and Propagation and URSI/USNC Joint Meeting, pp.981-982, July 2015.
- [6] J. Honda, "Application of DRTM to Aircraft Landing System," Proc. Progress In Electromagnetics Research Symposium, pp. 2120, July 2015.
- [7] J. Honda and T. Otsuyama, "Experimental results of aircraft positioning based on passive primary surveillance radar," Proc. Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles, pp.147-150, Sept. 2014.
- [8] J. Honda and T. Otsuyama, "Estimation of Target Detection Rate in Aircraft Surveillance System," Proc. the 17th Int. Conf. on Network-Based Info. Sys., pp.561-565, Sept. 2014.
- [9] J. Honda and T. Otsuyama, "Rapid Computation Algorithm for Radio Wave Propagation Characteristics on Airport Surface," Proc. the Eighth Int. Conf. on Complex Intelligent and Software Intensive Sys., pp.302-306, July 2014.
- [10] J. Honda and T. Otsuyama, "Rapid Ray Tracing Analysis of Scattered Field from an Aircraft Model in Super Wide Area," Proc. 2013 Eighth Int. Conf. on Broadband and Wireless Comput., Commun. and Applications, pp.173-183, Oct. 2013.

6 . 研究組織

(1)研究代表者

本田 純一 (Junichi Honda)

国立研究開発法人 電子航法研究所・

監視通信領域・研究員

研究者番号：10643348