

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 6 日現在

機関番号：82627

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14743

研究課題名（和文）位置検証と位置推定の融合：受信信号強度を例として

研究課題名（英文）Unifying Position Verification and Position Estimation: Case of Received Signal Strength

研究代表者

長縄 潤一（Naganawa, Junichi）

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・電子航法研究所・主任研究員

研究者番号：40760400

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：位置検証・位置推定を統一された枠組みで取り扱う理論を導出できた。まず、共通する前提条件を設定し、それぞれの性能である検定量分布・誤報率・検知率（位置検証）および精度（位置推定）を導出した。その上で、位置推定の結果をもとに位置検証を定式化するなど、結果の相互変換により全体として理論の統一を達成できた。また、導出した理論を航空分野のシステムであるADS-Bに適用することで、位置検証の性能向上に関する知見が得られた。具体的には、位置検証をそのまま行う「直接法」と位置推定を経て位置検証を行う「間接法」を比較し、受信局が十分ある場合には後者が優れることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

位置検証は、不正な位置情報という脆弱性に対処するための技術である。本研究の成果は位置検証の性能向上に資するものであり、社会の安心・安全に貢献するものである。特に、位置検証は位置推定と比べて新しい技術であるため、理論的な基盤を構築した意義は高い。今後、位置推定で発展した技術を取り込み、さらなる性能向上につなげることが期待される。また、本研究では理論導出のみならず、実際の航空用システムであるADS-Bへの適用も検討した。ADS-Bは今後我が国でも導入が進むため、本研究の検討結果の活用が期待される。これは航空分野における安心・安全に貢献するものである。

研究成果の概要（英文）：A theory was successfully derived to handle position verification problem and position estimation in the unified framework. Based on the common assumptions, each performance was derived separately: test statistic, probability of a false alarm, and probability of detection for position verification, and accuracy for position estimation. Then, the results were mutually converted. For example, the result of position estimation was exploited to position verification. As a result, the theories of position verification and estimation were unified as a whole. The derived theory was applied to an aviation system called ADS-B, which derived a useful insight for performance improvement. In particular, a direct approach for position verification was compared with an indirect approach, which is based on position estimation result. The latter showed a better performance when enough number of receivers are available.

研究分野：航空監視，電波伝搬

キーワード：位置検証 位置推定 受信信号強度 ADS-B

1. 研究開始当初の背景

「位置検証」は、移動体から報告された位置情報の正当性を検証するために、無線信号の特徴量と位置報告の整合性を調べる技術である。位置検証が対象とする位置報告システムの例としては、航空機による位置報告である ADS-B が挙げられ、交通管制や運航管理に用いられる。このような位置報告システムでは移動体を持つ高精度な位置情報を利用できる一方で、自己申告への依存が脆弱性となっている。すなわち、航法機器故障や意図的な不法電波によって不正な位置情報が報告される恐れがある。そのため、基地局において無線信号の受信信号強度 (RSS: Received Signal Strength) といった特徴量を観測し、報告された位置との整合性を検証する「位置検証」が不可欠である。

ところで、従来から研究されてきた類似技術に「位置推定」がある。位置推定は無線信号の特徴量から移動体の位置を推定する技術である。位置検証と位置推定は、共通点として移動体位置の取得を目的とし、無線信号の特徴量を用いるため、直感的には類似性がある。しかしながら、位置検証は位置推定と異なって必ずしも逆問題を解かなくても良いなどの違いを有する。また、位置推定は歴史的に長い蓄積を有するが、位置検証は比較して新しい技術であって、理論的な検討は必ずしも十分ではない。さらに、両者は独立して研究されてきたため、関係性は明らかではない。そのため、もし位置検証と位置推定を統一して理論を構築できれば、その理論を活用して、位置検証と位置推定の関係性の理解に繋がり、位置検証に位置推定の技術を取り込む基盤となることが期待される。また、位置検証の性能向上等に向けた知見を得ることが期待される。

2. 研究の目的

本研究は従来独立に取り扱われていた位置推定と位置検証を統一する理論を構築し、それによる有用な知見の導出を目指したものである。具体的に、本研究の目的は以下の3点である。

- (1) 位置検証と位置推定を統合した理論を構築する。
- (2) 構築した理論上で両者を評価・比較することで、有用な知見を創出する。
- (3) 理論の具体例として航空信号への応用を行い、理論の妥当性と有用性を示す。

なお、対象とする無線信号の特徴量は受信信号強度 (RSS) を想定する。

3. 研究の方法

本研究は、研究目的に対応した以下3つの異なる手法により進めた。

(1) 数学的な理論導出

位置検証・位置推定に共通する前提条件 (誤差分布等) を設定した上で、それぞれの性能を理論的に導出した。その上で、相互に結果の変換を行うことで、全体として理論の統一を試みた。

(2) 理論の数値計算による知見の創出

研究方法(1)で導出した理論を様々な条件下で数値計算するパラメータスタディにより、位置検証と位置推定を評価・比較した。これにより、性能向上に向けた両者の最適な組み合わせといった知見の創出を試みた。

(3) 実験による理論の航空応用 (ADS-B)

航空分野における位置報告システムである ADS-B に対して、理論を応用するための実験を行った。実験ではソフトウェア無線機 USRP を用いて在空機の信号を受信した。実験後のデータ解析により、観測した受信信号強度から航空機までの距離を逆算した。そして、誤差の統計モデル化を行った。得られた誤差のモデルは、研究方法(1)で構築した理論の前提の検証に利用した

ほか，研究方法(2)のパラメータの決定に利用した。

4．研究成果

(1) 位置検証と位置推定の統一された理論

位置検証と位置推定が統一された理論を構築できた。図 1 には理論の枠組みを示す。

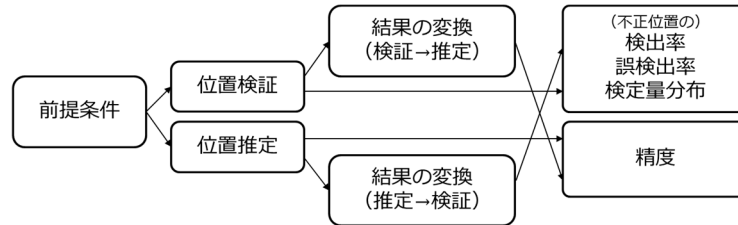


図 1. 理論の枠組み

まず，理論は共通の前提条件からスタートする。各受信局で測定した RSS から距離を逆算して利用すると仮定し，誤差分布として無相関の正規分布を仮定している。

$$\epsilon \sim N(\mathbf{0}, \mathbf{V}) \quad (1)$$

$$\mathbf{V} = \text{diag}(\sigma_1^2, \dots, \sigma_N^2)$$

ここで N は受信局数である。このような共通の前提条件下で，位置検証と位置推定に対してそれぞれの性能を導出した。位置検証の場合は検定量分布・検出率・誤検出率である。RSS から逆算した距離を報告された位置と比較することで位置検証を行うが，これを仮説検定の形で定式化した。逆算した位置と報告された位置の差について重みづけ二乗和を取ることで，次式のカイ二乗分布に従う検定量を設計できた。

$$\text{位置情報が正当なとき} : T_{\text{direct}} = X^2(N) \quad (2)$$

$$\text{位置情報が不正なとき} : T_{\text{direct}} = X^2(N, \delta_{\text{direct}})$$

ここで δ_{direct} は非心度である。非心度は位置情報の不正度合いによって増加する。したがって，検定量をしきい γ と大小判定すれば位置検証の正当・不正を判定できる。このときの誤報率・検知率は検定量が γ を超える確率として導出できた。

一方，位置推定の場合は精度が性能指標となる。従来よく知られた最小二乗法による定式化を利用すると，測位解は次式で書ける。

$$\tilde{\Delta}_l = -(A^T \mathbf{V}^{-1} A)^{-1} A^T \mathbf{V}^{-1} \mathbf{b} \quad (3)$$

ここで A は配置行列， \mathbf{b} は仮の解に対する観測値の残差である。仮の解を更新しながら(3)を繰り返し適用する。更新は解が収束するまで行う。最終的な解の精度(誤差共分散行列)は次式であることが知られている。

$$\mathbf{P} = (A^T \mathbf{V}^{-1} A)^{-1} \quad (4)$$

観測誤差の平均が 0 の場合，測位誤差の平均も 0 となる。

ここまでは，共通の前提をもとに位置検証と位置推定の導出を行った。次は，相互に結果の変換を行った。例えば，位置推定から位置検証への変換は，推定された位置をもとに位置検証に関する仮説検定を行う。式(3)を応用し，仮の解として報告された位置を代入すれば， $\tilde{\Delta}_l$ は報告された位置と推定された位置の差を表すことになる。したがって $\tilde{\Delta}_l$ をもとに，位置検証のための検定量を設計できる。具体的には，重みづけ二乗和を取ることで，次式のカイ二乗分布に従う検定量を設計できた。

$$\text{位置情報が正当なとき} : T_{loc} = X^2(3) \quad (5)$$

$$\text{位置情報が不正なとき} : T_{loc} = X^2(3, \delta_{loc})$$

ここで自由度が3なのは3次元位置を推定することに起因する。また、 δ_{loc} は非心度である。非心度は位置情報の不正度合いによって増加する。したがって、検定量をしきい γ と大小判定すれば位置検証の正当・不正を判定できる。このときの誤報率・検知率は検定量が γ を超える確率として導出できた。

位置検証から位置推定への変換は、位置検証をパスした位置情報の精度となる。閉形式は得られなかったほか、精度の向上効果は限定的であったため、数式は省略する。このような共通の前提条件の設定と結果の相互変換により、全体として理論を統一できた。

(2) 位置検証の性能向上に関する知見

成果(1)で導出した理論を数値計算するパラメータスタディを実施することで、位置検証の性能向上に関する知見の獲得に成功した。パラメータの設定には後述する航空応用に向けた実験結果を参考にし、性能指標としては不正な位置情報の検知率を評価した。成果(1)の理論を活用すると、位置推定結果を位置検証に応用する「間接法」および位置推定を経ない「直接法」を定式化できるため、それらの性能比較を行った。

計算条件を述べると、まず受信局数は4で図2の位置関係となっている。観測誤差 σ_i は全ての受信局で共通で100 mまたは20 kmとした。航空機位置としてはPosition #1およびPosition #2の2つを設定した。ただし、送信源が不正なときは航空機位置からX,Y方向に $[2\sigma_i, 2\sigma_i]$ 離れた位置から送信されるとした。高さについては、地上の送信源(Emitter #2)と飛行中の送信源(Emitter #1)の2パターンを検討した。また、位置情報が正当な場合でも、若干の誤差が含まれることを想定し、その量(共分散) W としてゼロの場合と次式の非ゼロの場合を検討した。

$$W = \text{diag}(\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2) \quad (6)$$

$$\sigma_x = \sigma_y = 37.8 \text{ m}, \sigma_z = 87.0 \text{ m}$$

表1には計算結果を示す。 $P_{D,\text{direct}}$ は位置検証をそのまま行う直接法、 $P_{D,\text{loc}}$ は位置推定を經由して位置推定を行う間接法の検知率となっている。いずれの場合も、間接法は直接法と同等かそれを超える検知率を示した。これは、位置推定の技術を位置検証に使うことで、性能改善が可能であることを示している。ただし、式(3)で示した通り位置推定は逆問題を解くため、十分な数の受信局(最低4)が無ければ間接法は失敗する。したがって、受信局数に応じた使い分けが必要であることも分かった。このように、位置検証に有益な知見の導出に成功した。

表 1. 理論の数値計算結果

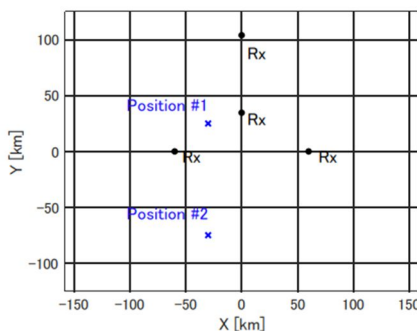


図 2. 計算条件 (位置関係)

W	σ_i	Position	Emitter	$P_{D,\text{direct}}$	$P_{D,\text{loc}}$
0	100 m	#1	#1	0.98	0.98
0	100 m	#1	#2	1.00	1.00
0	100 m	#2	#1	0.97	0.98
0	100 m	#2	#2	1.00	1.00
0	20 km	#1	#1	0.83	0.85
0	20 km	#1	#2	0.84	0.85
0	20 km	#2	#1	0.93	0.95
0	20 km	#2	#2	0.93	0.95
non-zero	100 m	#1	#1	0.93	0.95
non-zero	100 m	#1	#2	1.00	1.00
non-zero	100 m	#2	#1	0.90	0.93
non-zero	100 m	#2	#2	1.00	1.00
non-zero	20 km	#1	#1	0.83	0.85
non-zero	20 km	#1	#2	0.84	0.85
non-zero	20 km	#2	#1	0.93	0.95
non-zero	20 km	#2	#2	0.93	0.95

(3) ADS-B における誤差のモデル化と理論の前提条件の検証

成果(1)で導出した理論を航空分野の位置報告システムである ADS-B に応用するための実験を行った。実験では ADS-B 信号の受信信号強度を測定した。そして、測定した受信信号強度から距離の逆算を行った。これは成果(1)で導出した理論の前提条件に即している。距離の逆算をテイラー級数法で分析し、理論的には測距誤差が正規分布でモデル化されることを確認した。

$$\epsilon = N\left(\frac{B - \bar{B}}{C}, \frac{\Gamma^2}{C^2}\right) \quad (7)$$

ここで $B - \bar{B}$ は送信電力に関する推定誤差、 C はテイラー級数法の係数、 Γ^2 はフェージングによる電力変動の分散である。機体ごとの送信電力を精密にデータベース化しておくことで、 $B - \bar{B}$ は理想的には 0 となることが期待される。したがって、式(7)は成果(1)で述べた理論の前提条件と矛盾しないといえる。

次に、実際のデータを使って、測距誤差が正規分布となることを確認した。まず、誤差分布形状の確認を行った。コルモゴロフ・スミルノフ検定を適用した結果、259 フライト (141 機体) 中 182 フライトでは式(7)の理論分布が棄却されなかった。棄却された場合を見ると、はずれ値の影響であることが分かったため、打ち切り処理を入れたところ 214 フライトでは理論分布が棄却されない結果となった。したがって、誤差分布として正規分布は妥当であると確認できた。

そして、誤差の標準偏差を取得した。分布形状確認で使用した 259 フライト (141 機体) に加え、266 フライト (106 機体) のデータを追加測定して処理したところ、誤差の標準偏差は 17.2 km ~ 18.6 km となった。これらの値は成果(2)の数値計算においてパラメータの参考とした。

また、測距精度をさらに向上させるため、アンテナダイバーシティと移動平均フィルタによる誤差の抑制も試みた。ADS-B 信号は航空機の機体の上下に取り付けられたアンテナから交互に送信されており、過去信号も含めて複数の推定結果をスムージングすることで精度の向上が期待できる。一例では標準偏差が 14.5 km (下部アンテナのみ)・19.8 km (上部アンテナのみ) から 12.3 km まで改善した。追加測定した 266 フライト (106 機体) を評価し、同様の改善効果を確認できた。

(4) 機械学習の活用方法の検討結果

これは当初計画していなかった発展的な成果である。本研究の理論構築には古典的な手法を用いた。一方で、近年は機械学習の発展が著しく、本研究のさらなる発展には機械学習を取り入れる必要があると考えられた。そこで、サポートベクトルマシン (SVM) の適用を試みた。その ADS-B に適用した結果、不正を判定するための判定境界の自動獲得に成功した。また、判定境界により不正が疑われる位置情報 (例えば、遠方にも関わらず受信電力が強すぎるもの) を検知できることを確認した。しかしながら、判定境界の特徴を分析したところ、物理的な要因を考慮せず学習をしてしまうことが分かった。例えば、データ点が得られなかったエリアがあった場合、その理由が電波の遮蔽なのか交通流の有無かは考慮されない。これは機械学習を利用する際の注意点と言える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Junichi Naganawa
2. 発表標題 Improvement in RSSI-based Distance Estimation for Aircraft ADS-B Signal by Antenna Diversity
3. 学会等名 Multimedia University Engineering Conference 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Junichi Naganawa
2. 発表標題 受信信号強度と機械学習を用いた簡易な航空機位置検証法
3. 学会等名 電子情報通信学会 宇宙・航行エレクトロニクス研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Junichi Naganawa
2. 発表標題 A Simple Aircraft Position Verification Method using Received Signal Strength and Support Vector Machine
3. 学会等名 URSI GASS 2023 (XXXVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Junichi Naganawa, Hiromi Miyazaki
2. 発表標題 Aircraft-Receiver Distance Estimation Using ADS-B Signal Strength for Position Verification Application
3. 学会等名 2021 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Junichi Naganawa
2. 発表標題 Comparison of Direct and Localization-based Methods for Position Verification using Distance Measurement
3. 学会等名 2021 IEEE Region 10 Conference (TENCON) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Junichi Naganawa
2. 発表標題 Theoretical Analysis of Position Report Verification using Distance-based Localization
3. 学会等名 2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2020) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------