

氏 名	小 菅 義 夫		
授 与 学 位	博 士 (工 学)		
学 位 授 与 年 月 日	平 成 9 年 3 月 14 日		
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項		
最 終 学 歴	昭 和 49 年 3 月 早稲田大学大学院理工学研究科数学専攻修士課程修了		
学 位 論 文 題 目	レーダの目標追尾法に関する研究		
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 阿部 健一	東北大学教授 樋口 龍雄	
	東北大学教授 猪岡 光	東北大学教授 澤谷 邦男	

論 文 内 容 要 旨

1. 研究の目的

本論文は、レーダの目標追尾法に関する研究成果をまとめたものである。ここで、目標追尾とは、レーダからのデータをもとに航空機などの目標の運動諸元（位置、速度など）の真値を推定することである。

本論文の主な目的は、追尾対象目標のみから必ず信号が得られる自由空間において演算負荷の軽い追尾法を実現すること、狭い空間内に多数の目標およびクラッタの消え残りなどの目標以外からの不要信号が存在する高密度環境での追尾法を確立すること、および、レーダネットワーク化実現のためのレーダのバイアス誤差の推定法を明らかにすることである。

2. 梗 概

本論文は、第1章の序論、第2章～第7章の本論および第8章の結論から構成されている。

第1章では、レーダによる目標追尾に関する研究・開発の歴史を振り返って、目標追尾に関する技術の流れを示す。また、従来において目標追尾が抱える課題を明確にし、本研究が行われた背景および目的を明らかにする。

第2章および第3章では、自由空間での演算負荷の軽い追尾法、第4章～第6章では高密度環境下での追尾法、第7章ではレーダのバイアス誤差の推定法、について述べる。

第2章において、自由空間で演算時間および記憶容量の少ない追尾法として、スカラー演算のみを3次元空間の各座標軸ごとに独立に行う非干渉形フィルタによる追尾法を示す。

第3章において、複数の観測ベクトルを前処理して統合データを作成し、これに対してカルマンフィルタを適用することにより、演算回数を低減する方法を示す。

第4章において、不要信号環境下における追尾法として、不要信号環境下における代表的な追尾法であるPDA (Probabilistic Data Association) を実行するうえで問題となる座標系選択の解決策を示す。

第5章において、高密度環境での施回目標対処策について述べる。この対処策として、高密度環境での追尾維持法として定評のある単一運動モデルを使用するJPDA (Joint PDA) を、複数の運動モデルを使用する場合に拡張・改良した結果を示す。

第6章において、どの観測ベクトルがどの目標と対応しているかの判定、すなわち、相関処理が困難となる高密度環境で、追尾開始、追尾維持、および誤航跡解除機能を有する多目標追尾法について述べる。この方法として、すぐれた

JPDA の追尾維持機能を有するとともに、航跡をもとに複数の相関に関する仮説を構成して追尾開始機能を強化した新たな多目標追尾法を示す。

第7章において、ネットワーク化された複数のレーダで、多数の目標を追尾する場合に、あらかじめ行うべき作業であるレーダの距離・角度のバイアス誤差の推定について述べる。この方法として、複数のレーダで同時に目標を観測して、カルマンフィルタでバイアス誤差を推定する方法を示す。

第8章は、研究全体についての成果を要約する。

3. 従来研究の概要と問題点

ここでは、本論の各章ごとに従来研究の概要と問題点を要約する。

第2章 自由空間における非干渉形フィルタによる追尾法

誤差共分散行列の算出が不要な $\alpha-\beta$ フィルタは、非干渉形フィルタ (Decoupled Filter) であるため、演算負荷が軽い。しかし、追尾精度に問題がある。一方、誤差共分散行列の算出が必要なカルマンフィルタは、干渉形フィルタ (Fully Coupled Filter) であり、どのような等速直線運動目標に対しても追尾精度が確保できる。しかし、演算負荷が重い。

目標の運動にどのような条件を適用し、どのような直交座標 (Cartesian Coordinates) を使用したら、 $\alpha-\beta$ フィルタが、厳密解であるカルマンフィルタに近似可能なのか報告されていない。

このため、 $\alpha-\beta$ フィルタによる追尾法が、カルマンフィルタによる追尾法に近似できるための直交座標および目標運動の条件を明らかにする必要があった。

第3章 自由空間における統合観測データによる追尾法

$\alpha-\beta$ フィルタを、サンプリング時刻によって観測雑音の大きさが異なる、あるいはサンプリング間隔が一定ではないレーダ追尾に適用するのは困難である。一方、カルマンフィルタは、観測雑音の大きさが異なる、あるいはサンプリング間隔が可変なレーダにも容易に対処できる。また、追尾精度を確保するためにはサンプル数を増やす必要がある。しかし、この場合、演算負荷が重くなり、実現性に問題がある。

このため、異なるサンプリング時刻の複数の観測ベクトルを、あらかじめ1個のデータに統合し、カルマンフィルタで追尾法を構成する方法を明らかにする必要があった。

第4章 不要信号環境下における追尾法

自由空間での追尾法に関し、どの直交座標を使用したら有利かの報告がある。しかし、ある直交座標を使用したPDAでの算出諸元 (目標運動諸元の推定値、その推定誤差の評価値である誤差共分散行列) が、他の直交座標を使用したPDAでの算出諸元に変換可能なかどうか、報告されていない。

このため、ある直交座標を使用したPDAでの算出諸元が、他の直交座標を使用したPDAでの算出諸元に変換可能なかどうかを明らかにする必要があった。

第5章 高密度環境下における施回多目標追尾法

施回多目標対処のため、1目標に対し1サンプリングに数個のカルマンフィルタを使用する追尾法がある。従来のこの追尾法では、各目標に対して観測ベクトルをゲートする範囲 (目標予測存在範囲) の算出に目標施回の影響が反映されていない。

このため、1サンプリングで1個のゲイン行列の算出でよい、かつ目標施回に応じゲート範囲が可変なJPDAを使用した高密度環境下での施回多目標追尾法の開発が必要であった。

第6章 航跡型MHTによる多目標追尾法

MHT (Multiple Hypothesis Tracking) は、広域の大きな問題 (すべての観測ベクトルを一括処理) を互いに独立な小さな問題に分割するため、クラスタの概念を導入している。しかし、従来のMHTでは、クラスタ分離の理論的根拠が示されていない。また、従来のMHTでは、相関に関する仮説の行列表示において、仮説と観測ベクトルを検索キーとしているため、航跡情報の抽出が繁雑であり、航跡がクラスタより分離できるか否かの判定が困難である。さらに、MHTの準最適化 (仮説数の削減) は、あまりにも自由度が大きいため、追尾維持性能が確保できる準最適化方法が不明である。

このため、追尾開始機能の理論的根拠が明確で、かつ追尾維持性能が JPDA と同等以上となる準最適化方法を有する新たな MHT の開発が必要であった。

第7章 三次元レーダのバイアス誤差の推定法

二次元レーダ（距離、方位角を観測）のバイアス誤差を線形最小自乗法で推定する方法がある。この方法はバッチ処理であり、計算機資源を多大に必要とする。また、バイアス誤差が推定可能となるための条件が報告されていない。さらに、レーダおよび航空機の幾何学的位置関係が推定精度に影響するが、推定精度の解析指標が分かっていない。

このため、レーダバイアス誤差が推定可能となるための条件および推定精度の解析指標が明確な逐次処理によるレーダのバイアス誤差推定法の開発が必要であった。

4. 本研究の概要

ここでは、上に述べた従来の方法では解決が困難だったレーダによる目標追尾の諸問題に対しての解決法を要約する。

第2章 自由空間における非干渉形フィルタによる追尾法

i) 目標が低速度、目標距離が大、あるいは、目標がレーダに向かって直進しているとき、 $\alpha-\beta$ フィルタはカルマンフィルタに近似できることを示した。

ii) 目標位置ベクトルを1軸とするレーダ座標を平滑値算出に、慣性直交座標である北基準直交座標を予測値算出に使用した $\alpha-\beta$ フィルタによる追尾法を導出した。

第3章 自由空間における統合観測データによる追尾法

i) 北基準直交座標を使用し、異なるサンプリング時刻の複数の観測データを、あらかじめ1個の観測データに統合し、カルマンフィルタで追尾法を構成する方法を示した。

ii) 統合観測データによる追尾法は、異なるサンプリング時刻ごとにカルマンフィルタを使用する追尾法に近似できることを明らかにした。

第4章 不要信号環境下における追尾法

i) 目標位置ベクトルの時刻に関する n 回までの微分値を算出する PDA がどのような直交座標を使用しても、座標変換行列が n 回微分可能ならば、その算出諸元は他の任意の直交座標を使用した PDA の算出諸元に変換可能なことを明らかにした。

ii) 異なる直交座標を使用した PDA 間での、目標運動諸元、誤差共分散行列およびゲイン行列の変換式を導出した。

第5章 高密度環境下における施回多目的追尾法

i) 等速直線運動モデルを用いる JPDA に、異なる定数加速度ベクトルを付加した複数の運動モデルを並列で使用する施回多目標追尾法を示した。また、1サンプリングで1個の 6×3 のゲイン行列の算出で実現できることを示した。

ii) 各目標に対して観測ベクトルをゲートする範囲の中心および広がり、目標の施回に応じ変化させることができることを示した。

iii) シミュレーションにより評価した結果、提案方法は追尾維持確率に顕著な改善が見られ、JPDA に比べ数倍～10倍にも達することが明らかになった。

第6章 航跡型 MHT による多目標追尾法

i) クラスタをすべての航跡の分類結果で定義し、仮説を航跡の異なる組み合わせで定義した航跡型 MHT の構成法を示した。

ii) 同一クラスタを形成していた航跡を、準最適化の処理により分離し別クラスタを形成するための必要十分条件、および分離した新クラスタの仮説作成方法を導出した。

iii) 従来の MHT のクラスタ分離方法は、航跡をクラスタより分離するための必要条件にも十分条件にもなっていないことを明らかにした。

iv) JPDA と同一の多目標追尾法となるための航跡型 MHT の準最適化方法を明らかにした。

第7章 三次元レーダのバイアス誤差の推定法

i) 地上の異なる2点に設置された2個の三次元レーダで同時に複数の航空機の位置を観測し、各航空機の観測位置

の差を利用して、6次元のカルマンフィルタで三次元レーダのバイアス誤差を推定できることを示した。

ii) 観測行列を使用して、三次元レーダのバイアス誤差が算出可能となる条件、および安定となるための条件を明らかにした。

iii) シミュレーションにより評価した結果、最低2機の航空機でレーダバイアス誤差が精度良く推定可能なこと、ならびに、観測行列を使用した最小固有値により推定精度の良いレーダおよび航空機の幾何学的位置関係が選択できることを示した。

5. まとめ

本論文の主な目的と本論の各章との対応を表1に示す。

表1 研究目的と各章との対応

目的	章	目次	内容
自由空間において演算負荷の軽い追尾法を実現すること	第2章	自由空間における非干渉形フィルタによる追尾法	α - β フィルタによる追尾法が、カルマンフィルタによる追尾法に近似可能となる条件を明らかにした
	第3章	自由空間における統合観測データによる追尾法	カルマンフィルタで追尾法を構成する場合の前処理法を明らかにした
高密度環境での追尾法を確立すること	第4章	不要信号環境下における追尾法	ある直交座標を使用したPDAでの算出諸元が、他の直交座標を使用した値に変換可能なことを明らかにした
	第5章	高密度環境下における旋回多目標追尾法	JPDAによる多目標追尾法の旋回目標対処化を実現した
	第6章	航跡型MHTによる多目標追尾法	追尾開始機能の理論的根拠が明確で、かつ追尾維持性能がすぐれた新たなMHTを開発した
レーダバイアス誤差の推定法を明らかにすること	第7章	三次元レーダのバイアス誤差の推定法	推定可能となる条件および推定精度の解析指標が明確な逐次処理によるバイアス誤差推定法を開発した

審査結果の要旨

多数の航空機を同時に監視することが要求される航空管制では、レーダによる目標追尾の高精度化およびレーダ網のオペレーションの自動化が不可欠である。著者は、目標からの信号のみが得られる環境（自由空間）とクラッタなどの目標以外からの不要信号が存在する環境のそれぞれについて、単一あるいは複数のレーダによる目標追尾法について研究を行い有用な成果を得た。本論文は、これらの成果をまとめたもので、全編8章からなる。

第1章は序論である。

第2章では、自由空間における α - β フィルタの追尾性能について論じている。 α - β フィルタは演算負荷が軽く実用的であるが、目標の位置、速度によってはカルマンフィルタほどの精度は確保できない。そこで、 α - β フィルタがカルマンフィルタと同程度の追尾精度を持つための条件を導出し、その適用範囲を明らかにしている。

第3章では、複数の観測ベクトルを前処理して統合データを作成し、これに対してカルマンフィルタを適用することにより、演算負荷を低減する方法を与えている。

第4章では、不要信号環境下の単一目標追尾に用いられる確率的データ・アソシエーション法（PDA）について、ある直交座標系を使用したPDAによるゲイン行列や誤差共分散行列などの算出諸元が、他の直交座標系を使用した場合に等価的に変換可能なことを明らかにしている。

第5章では、高密度環境下で施回する多目標の新たな追尾法を提案している。本方法は、不要信号環境下での多目標追尾法として知られる同時型PDA（JPDA）に施回の多重運動モデルを付加したものである。このことで、JPDAに見られる判定誤りを著しく改善でき、より高密度な環境での多目標追尾を可能としている。これは実用上有用な成果である。

第6章では、従来の多重仮説相関方式（MHT）を改良した航跡型MHTを提案し、その準最適化により、追尾の自動開始機能を持ち、しかもJPDAと同等の追尾維持機能も持つ新たな多目標追尾法を導出している。

第7章では、地上の異なる2点に設置された2個の3次元レーダにより、カルマンフィルタを使用してレーダのバイアス誤差を推定する方法を与えている。これは、レーダ網の構築に資する点大きい。

第8章は結論である。

以上要するに本論文は、レーダによる目標追尾に関し、従来手法の諸性質を明らかにするとともに、カルマンフィルタの理論に基づいて、不要信号環境下における単一および複数の目標の高精度の追尾法を確立したもので、制御工学ならびに情報処理工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。