

氏名	野本 弘 平		
授与学位	博士（工学）		
学位授与年月日	平成7年10月11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58年3月 慶應義塾大学大学院工学研究科計測工学専攻前期課程修了		
学位論文題目	レーダー目標データの情報処理に関する研究		
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

第1章 序 論

航空管制等の分野で、航空目標を監視するためには、その目標を観測して運動の予測等を行う必要があり、その処理は、図1に示すように、レーダー個別の処理と各目標ごとの情報処理から成る。この内、レーダー個別の処理には、受信信号から目標を探知してその距離と角度を観測データとして出力する信号処理と、その受信信号を得るために送受信する電波ビームの走査等を行うビームマネジメントがある。また、各目標ごとの情報処理には、この観測データを目標ごとに整理し、時系列的に処理を行うことにより、目標の運動の推定・予測を行う目標追尾と、機種を推論を行う目標類別がある。各目標ごとの情報処理は、従来は人間の判断によるが多かったが、最近では、監視システムの巨大化に伴う自動化の要求や、レーダーの特性を活かした追尾、目標経路の長期予測等の新たな要求により、その重要性がますます高まっている。

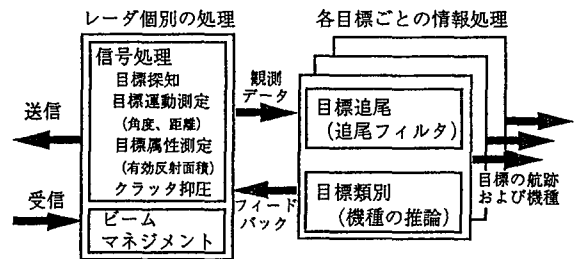


図1 レーダー個別の処理と各目標ごとの情報処理

本論文は、目標監視用レーダーの開発等に伴う運用的な要求に基づいて行った各目標ごとの情報処理に関する研究をまとめたものである。

第2章 目標のマニューバ推定による適応追尾法

第2章では、目標追尾における目標運動のモデル化について考察し、適応追尾を実現する方法について述べた。

目標追尾では、目標の位置と速度を要素として状態を定義し、観測値からこの状態を推定し予測することにより、航跡を確立する。その際に問題となることは、マニューバと呼ばれる目標の非正常な運動変化に追従しつつ、この追尾の精度を保つことである。本章では、追尾フィルタにおけるマニューバのモデルを工夫することにより、このマニューバに対処する適応追尾法について検討を行った。

従来の追尾フィルタでは、マニューバは観測者側からは未知の量であるので、目標の状態の動的変化を表すシステム方程式において、零平均正規白色のシステムノイズとしてモデル化されていた。しかし、実際には、目標が旋回等のマニューバを行っている場合には、一定の方向に対して持続的な力が加わっているはずである。そこで、このマニューバ

を未知のバイアスとしてモデル化し、これを区分的な時間内で一定であるものと仮定した。そして、仮の確定入力によりカルマン予測を行い、このときの予測された観測値と実際に得られた観測値との差であるイノベーション過程から、マルコフ推定によりこのバイアスを推定する方法を明らかにした。さらに、このバイアスの推定値を用いて目標の状態の予測値を修正し、推定値を求めるアルゴリズムを示した。このアルゴリズムにより、常にマニューバを推定しながら、その影響を考慮した位置と速度を推定・予測する適応追尾法が実現された。

第3章 サンプリング間隔の適応化による追尾法

第2章では、各目標ごとの情報処理の中の目標追尾の範囲内で目標のマニューバに対処する適応追尾法について示したが、第3章では、レーダ個別の処理へのフィードバックを利用した適応追尾法について述べた。

レーダとしてフェーズドアレイレーダを用いた場合の目標追尾の特徴は、ビームの電子走査により目標の観測を任意の時刻に行えることである。したがって、1台のレーダで捜索と多目標追尾を行う際には、この特徴を活かして、目標の追尾精度は維持しつつも、1目標当たりの冗長な観測頻度は節約して、その分のビームを捜索や他の目標の追尾に利用することが考えられる。本章では、レーダ個別の処理の中のビームマネジメント情報をフィードバックすることにより、サンプリング間隔を目標の運動に応じて変化させる適応追尾法について検討を行った。

目標追尾では、目標が等速直線運動を行っている場合には、過去の運動の慣性の影響を重視した重いフィルタリングにより、高精度の追尾を行うことが望まれる。また、目標がマニューバを行っている場合には、新しく得られた観測値を重視した軽いフィルタリングにより、目標の運動に追従することが望まれる。しかし、フィルタリングの重さを目標の運動に応じて変化させるだけでは、等速直線運動時には必要以上の精度となる一方、マニューバリング時には精度が劣化する。これは、マニューバリング時には、過去の運動特性を信頼できない分だけ予測誤差が増大するからである。そこで、マニューバリング時には観測頻度を増やすことにより、精度の劣化を防ぐことが考えられる。本章に示した適応追尾法は、フィルタリングの重さと連動させて観測時間間隔をも目標の運動に応じて変化させるものである。この適応追尾法により、目標が等速直線運動を行っている場合には、フィルタリングを重くして長時間間隔のサンプリングを行うことにより、冗長なサンプリングを節約し、目標がマニューバリングを開始した場合には、これを検知してフィルタリングを軽くして短時間間隔のサンプリングを行うことにより、追尾精度を維持することが可能となった。

第4章 最適コヒーレント積分回数の推定による適応追尾法

第3章では、レーダ個別の処理の中のビームマネジメントへのフィードバックを利用した適応追尾法について示したが、第4章では、レーダ個別の処理の中の信号処理へのフィードバックを利用した適応追尾法について述べた。

次世代のレーダとして研究が進められているディジタルビームフォーミング (DBF: Digital Beamforming) レーダでは、電波がアンテナで受信された段階で数値化し、計算機内で処理を行うので、マルチビームを形成したり、そのビームごとに信号処理の内容を変化させることが可能である。レーダとしてこのDBFレーダを用いた場合の目標追尾の特徴は、追尾中に信号処理におけるコヒーレント積分回数を変化させることが可能なことである。本章では、このことを利用して、目標追尾から信号処理へ情報のフィードバックを行うことにより、目標の運動に応じてコヒーレント積分回数を変化させる適応追尾法について検討を行った。

本章では、追尾における予測誤差の標準偏差が、マニューバの大きさ、目標までの距離、観測データの精度、および、この観測データの時間間隔より決定されることを明らかにした。これらのパラメータの内、マニューバの大きさと目標までの距離は、目標によって決まり、観測者側からは操作不可能な量である。これに対し、観測データの精度とこの観測データの時間間隔は、信号処理におけるコヒーレント積分回数により変化する。つまり、コヒーレント積分回数を大きく設定すれば、観測データの精度は高く、その時間間隔は長くなり、これを小さく取ればその逆になる。しかし、目標追尾の側からは、観測データの精度は高く、その時間間隔は短い方が望ましい。そこで、マニューバの大きさと目標までの距離に応じて、予測誤差の標準偏差を最小とするコヒーレント積分回数を解析した。この適応追尾法により、信号処理と目標追尾から成る追尾系全体の最適化を図る方法が明らかになった。

第5章 地形を考慮した予測による追尾法

第2章から第4章では、目標が常に観測可能で、周期的に観測データが得られる場合の適応追尾法について示した。これに対し、第5章では、観測データが得られない場合の目標経路の長期予測について述べた。

目標が低対地高度で飛行を行う場合には、目標が地形の陰に隠れるために観測データが途切れるので、目標追尾を維持するためには経路の長期予測が必要となる。この場合、観測データは得られないが、目標の経路は地形の制約を受けするため、レーダ個別の処理からの観測データの代わりに地形データを利用することができる。本章では、飛行体の立場に立ち、地形データを利用した経路計画問題として経路の長期予測を行う方法を検討した。

従来の低対地高度飛行の経路計画法として、DP (Dynamic Programming) を用いて探索的に経路計画を行う方法が研究されていた。しかし、この方法では、飛行体の動特性が反映されない不自然な経路となるという問題があった。そこで、本章では、直接に経路を求めるのではなく、目標と地形との関係から特徴量を抽出し、この特徴量に対して飛行体が取べき操舵量をファジィ推論により求めて、この操舵量により飛行体の状態を外挿することにより経路を生成する方法を示した。さらに、操舵量を求めるファジィ推論のメンバーシップ関数を、規範となる経路から学習する方法を示した。この経路計画法により、地形の制約と飛行体の動特性を考慮した低対地高度飛行目標の長期予測が可能となった。

第6章 目標類別法

第2章から第5章では、目標ごとの情報処理のうち、目標追尾について示した。これに対し、第6章では、目標類別について述べた。

目標類別では、目標に関する特徴量からその目標の機種を推論する。この特徴量として、有効反射断面積等の属性情報の他に、飛行速度等の追尾情報も利用することができる。本章では、目標ごとの情報処理において、目標追尾の情報も利用した目標類別法について検討を行った。

本章では、目標機種を原因、特徴量を結果と考え、これらの間の因果関係をファジィ関係行列でモデル化し、ファジィ後向き推論により特徴量から目標機種を推論する方法を示した。ファジィ後向き推論を目標類別に利用するためには、特徴量が時系列的に得られるたびに、推論を更新し、常にその時点で最良の機種の推論値を出力しなければならないので、ファジィ後向き推論を逐次型アルゴリズムとして実現した。また、従来のファジィ後向き推論は、わずかな数値誤差により解を見失うことがあったので、区間値ファジィ量を導入したアルゴリズムとすることにより、この問題を解決した。さらに、逐次型アルゴリズムの収束を評価するための指標を示した。この逐次型ファジィ後向き推論による目標類別法により、候補の機種それぞれの可能性を、特徴量の入力たびに更新し、目標機種を絞り込む方法が明らかになった。

第7章 結 論

本論文では、レーダを用いて得られた観測データから目標に関する情報を推定する情報処理について述べた。この情報処理には、目標追尾と目標類別があるが、目標追尾については第2章から第5章に、目標類別については第6章に、それぞれ示した。第2章では、目標追尾の範囲内で実現する適応追尾法、第3章では、目標追尾からビームマネジメントへのフィードバックによる適応追尾法、第4章では、目標追尾から信号処理へのフィードバックによる適応追尾法、第5章では、観測データが得られない場合の目標経路の長期予測法についてまとめ、最後に、第6章で、目標追尾の情報も利用した目標類別の方法について検討した。

実際のレーダシステムにおいて、目標データの情報処理は重要性を増してきている。本論文の研究は、今後、この分野の製品開発における理論的基礎となるとともに、最適設計に関する指針を与えるものとなることが期待される。

審査結果の要旨

航空交通管制の分野では、レーダシステムの多機能化に伴い、レーダ・データ情報処理の自動化の要求が高まり、目標とする飛行体の正確な追尾、類別の技術を確立することが重要な課題になってきている。著者は、目標の追尾誤差を除去するための適応フィルタおよびファジイ推論による目標の経路予測と類別に関する研究を行った。本論文は、その成果をまとめたもので、全編7章からなる。

第1章は、序論である。

第2章では、目標とする飛行体の非定常な運動変化（マニューバ）をシステム雑音のバイアスとしてモデル化し、カルマンフィルタにおけるイノベーション過程の変化からそのバイアスを適応的に除去する追尾フィルタを提案している。このフィルタは、少ない事前情報で高い推定精度を維持することができ、優れた方法である。

第3章では、フェーズドアレーレーダが電子走査により目標の観測を任意の時間に行えることを活かし、フィルタリングの重みと観測間隔とをマニューバに応じて変化させる適応追尾フィルタを提案している。この方法により、追尾精度を維持しつつ、冗長な観測を節約することができ、観測の余力を他の目標の追尾や類別に振り向けることが可能となる。

第4章では、デジタルビームフォーミングレーダ（DBFレーダ）による追尾システムにおいて、レーダのコヒーレント積分回数を制御することにより、レーダと追尾フィルタの追尾系全体の最適化が可能であることを明らかにしている。このことは、次世代のレーダとして注目されているDBFレーダの高度利用に資するものであり、高く評価できる。

第5章では、目標が地形の陰に隠れて観測値が得られない場合の対処法として、地形情報を利用した、ファジイ推論による経路予測法を提案している。また、この予測法の設計パラメータを学習により自動的に設定する手法も提案している。

第6章では、目標類別法として、ファジイ後ろ向き推論により目標に関する特徴量の情報の統合を行い、目標機種を逐次的に絞り込む手法を提案している。この類別法は、リアルタイム性に優れ、区間値ファジイ量を取り入れているため後ろ向き推論の数値的不安定性が解消できるなど興味深い特長を有している。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、レーダ目標の追尾を類別とに関し、高精度でかつリアルタイム性に優れた諸手法を開発し、レーダシステムにおける情報処理の自動化に関して有用な知見を与えたものであり、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。