

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 30 日現在

機関番号：34315

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2014～2015

課題番号：26880023

研究課題名(和文)超広帯域レーダを軸としたセンサ融合による目標追尾法の確立

研究課題名(英文)Development of moving object tracker based on sensor fusion centered on ultra-wideband radar

研究代表者

佐保 賢志 (Saho, Kenshi)

立命館大学・理工学部・助教

研究者番号：00732900

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、超広帯域信号を用いるレーダにより観測される高精度な移動体の位置情報に、ドップラーセンサと加速度センサのデータを融合することによる高精度追尾法について検討した。従来の位置のみでなく、速度と加速度を観測地として用いる移動体追跡手法を定義し、その性能と最適な設計方法を理論的に解明した。さらに、レーダ及び広帯域超音波センサと、加速度センサとドップラーレーダが通信可能なシステムを構築し、取得した実データを用いて開発した追跡手法の有効性を実証した。

研究成果の概要(英文)：This study developed tracking techniques based on data fusion of accurate position measured with ultra-wideband radars, and velocity/acceleration obtained with Doppler sensors and accelerators. Tracking methods using not only the position but also the velocity/acceleration were newly defined. Then, their performance was analyzed and optimal design methodology was established based on theoretical analyses. Further, experiments using the radars, the ultrasonic sensors, the Doppler radars, and the accelerators were conducted and a practicality of the developed tracking techniques is verified in realistic environment.

研究分野：レーダ/ソナー信号処理

キーワード：超広帯域レーダ センサ融合 移動目標追尾 速度・加速度観測 追尾フィルタ 超音波距離センサ

1. 研究開始当初の背景

ロボット等のモニタリングや ITS (Intelligent Transport Systems)において、人体やロボット等の移動体の正確なセンシングが渴望されている。特に衝突防止のため、目標の識別と追尾が非常に重要となる。このような応用には光学的画像処理技術が主に検討されているが、精度が照明条件に大きく依存する、高い距離分解能を得るために複雑なシステムや処理が必要となる等が問題となっている。これに対し、レーザレンジファインダー等の距離分解能が高いセンサも検討されてきたが、十分な測定範囲の確保や実時間性と分解能の両立が困難である。

これらの問題点を解決するため、以下の2つの技術が注目されている。一つは、複数・複数種のセンサのデータを適切に融合することで、各センサ単独では達成できない性能を実現するセンサ融合技術である。もう一つは、従来のレーダと比較して帯域幅の広い信号を用いるため高い距離分解能を実現できる UWB ドップラーレーダ技術であり、応募者の先の研究において人体等の移動体の運動と概形状のセンシングに成功している。しかし、これらの技術を組み合わせた移動体の測位・追尾技術については殆ど検討されていなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、UWB レーダにより得られる目標の位置データと、ドップラーレーダ及び加速度センサ等により得られる速度と加速度のデータとを融合した追尾フィルタによる、移動目標の高精度追尾法の確立である。具体的な問題点と達成すべき課題は以下の2点である。

(1) 位置・速度・加速度を入力値とした追尾フィルタの理論特性解明

図1に従来及び本課題で検討する追尾フィルタの違いを示す。従来の追尾フィルタの理論はレーダや GPS を想定し、ほとんどが位置のみを観測値としていた。速度等の他の観測値を考慮した検討は少なく、従来のセンサ融合追尾システムは経験的に設計されている。そこで、本課題では速度と加速度も観測値とする追尾フィルタについて、センサ融合を考慮した各種追尾システムの特性を考慮した理論検討により、その精度及び最適なフィルタ係数を明らかにする。

(2) UWB レーダ干渉計とドップラー・加速度センサの融合による追尾システムの実験検証

課題(1)で調べた理論特性に基づき、各センサから得られる観測データを適切に融合し、高精度な移動目標追尾を実現する。UWB レーダ干渉計と、ドップラーレーダ、及び加速度センサのデータを課題(1)の理論に基づき融合することで高精度追尾シス

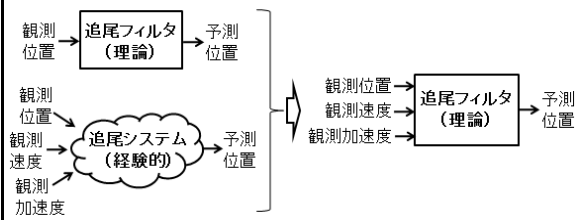


図1: 従来(左)・本課題(右)の追尾フィルタ

テムを構築すると共に、実環境下での特性を明らかにする。

3. 研究の方法

研究の目的において述べた各課題(1)及び(2)について、それぞれ以下の方法で研究を遂行した。

課題(1)の研究方法について述べる。実用的な追尾フィルタである - - フィルタ、- - - フィルタ、及びカルマンフィルタを仮定した、各種観測値の誤差及びフィルタ係数と、追尾誤差の関係の解析及び数値計算を行った。- - フィルタは解析と実装が共に容易な追尾フィルタであり、制御理論に基づきその性能指標を閉じた形で導出することが出来る。従来の同フィルタは位置観測のみを考慮していたため、本研究では位置と速度、位置と加速度、そして位置・速度・加速度を観測値(入力パラメータ)とする - - フィルタを定義し、その特性を理論的に解析した。さらにその最適なフィルタ係数を Minimum Variance フィルタ及びカルマンフィルタの両理論に基づき解明した。さらに同様の検討を位置と加速度を観測値とする 2 状態固定係数追尾フィルタである - - フィルタについても行い、従来全く明らかになっていなかった同フィルタの特性の解明を試みた。加えて、上記の検討においては単一目標の追尾を仮定したが、同様の検討を複数目標へ拡張することを試みた。従来の位置のみを観測値とする追尾フィルタを、本課題におけるシステムに適用する方法を解明した。さらに、その設計パラメータの最適化を行った。

課題(2)の研究方法について述べる。課題2において仮定した位置・速度同時計測システムを図2に、位置・加速度同時計測システムを図3に示す。図2のシステムでは、UWB ドップラーレーダ干渉計により位置を観測し、もう一台のドップラーレーダを利用することで速度を観測する。図3のシステムでは、目標が加速度センサを有し、このセンサとレーダの通信が可能であるため、両観測値が同時に得られる。これらのシステムを構築し、計測を行うことで、実環境下での観測精度、及び課題(1)で検討した最適フィルタ係数による追尾精度の評価を試みた。また、UWB レーダと同様に高精度な位置・速度計測が可能である広帯域超音波距離センサを用いた

実験も行い、上述のセンサ融合システムを物理サイズが小さくかつ低コストなシステムで実現可能かを調べた。

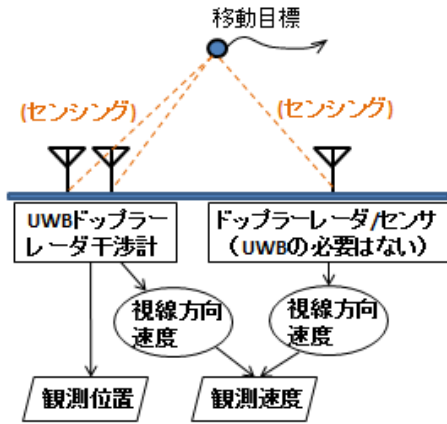


図2: 位置・速度同時計測システム

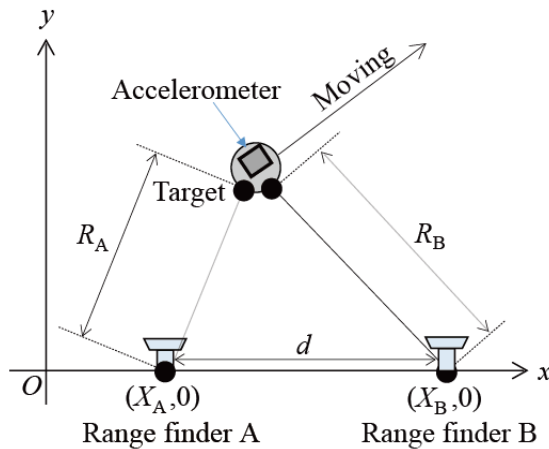


図3: 位置・加速度同時計測システムの実装例

4. 研究成果

図4に、各種フィルタの精度を理論解析した結果を示す。横軸はフィルタ係数で決まる追従性能である。ただし、POMは従来の位置のみを観測するフィルタ、PVM-AVは位置と速度を観測するフィルタ、PAMは位置と加速度を観測するフィルタ、そしてPVAMはこれら全てを観測するフィルタを表している。また、 R_v 及び R_a は位置の観測誤差分散を1とした場合の、速度及び加速度の観測誤差分散（ただし、サンプリング間隔で正規化している）である。同図の通り、速度、加速度、及びその両者を観測値として加えることで、追従性能が良い場合は従来のPOMフィルタより高い精度を実現できることが分かる。ただし、追従性能が悪い場合はPOMフィルタの精度が良い傾向が見られ、実用上注意すべき点であることがわかる。

また、図5には従来のフィルタと、速度観測値を用いるフィルタに

ついて、性能解析を行った結果を示す。同図に示す結果より、最適な従来フィルタと比較しても提案するフィルタが高い性能を実現することを確認した。このように、各種フィルタの性能を定量化することに成功し、今後のセンサ融合追尾フィルタの設計に活用することが期待される。

図6に2台のUWBドップラーレーダ干渉計と計測対象目標の真の軌道を示す。この目標に対し、開発した位置-速度観測フィルタと、従来の位置のみを観測するフィルタによる推定精度を比較した結果を図7に示す。同図の通り、現実的な環境下においても提案するフィルタが有効であることが確認できる。また、フィルタと従来の位置観測のみのフィルタを比較した結果を図8に示す。同図の通り、速度観測で大幅にレーダ追尾精度を改善できることが分かった。また、位置と加速度を観測する小型移動ロボット追跡システムについて、図9に示す広帯域超音波距離センサを用いた実験系で実験を行った。その結果を図10に示す。同図の通り、小型移動ロボット追跡においても、提案するフィルタの有効性が確認された。また、UWB信号の超音波計測への有効性も実証した。

以上より、理論解析と実験検討の双方において、UWBレーダによる位置計測に速度・加速度を併用することの有効性が確かめられ、追尾システム設計に利用可能であることを示した。今後の展望は、本研究では主にUWBレーダ及び広帯域超音波センサを軸として研究を行ったが、これをさらに多種のセンサへと発展させることである。レーダ・カメラ・レーザ・超音波に加え、速度や加速度を直接センシング可能なセンサからなるネットワークを構築し、これらを最大限に活用する超高精度移動体追跡法の実現を目指した研究を今後も継続していく方針である。

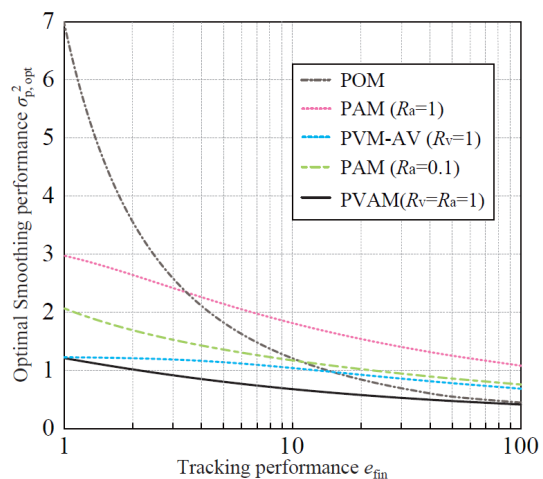


図4: 位置・速度・加速度観測を仮定する各種フィルタの理論性能

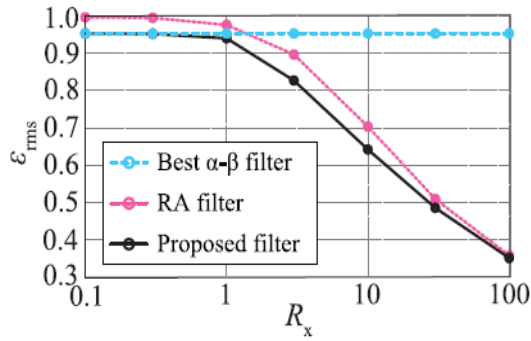


図5: 最適な α - β フィルタと提案する α - β フィルタの性能比較 (縦軸は理論誤差)

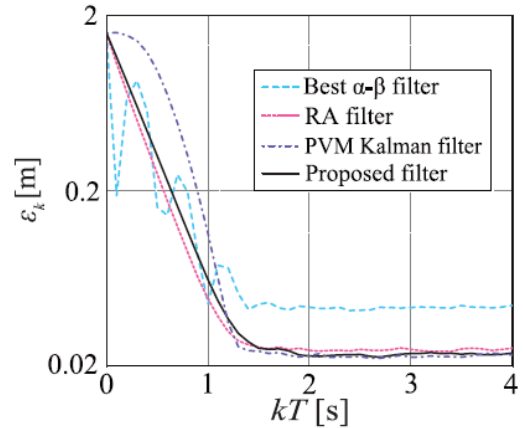


図8: 最適な α - β フィルタと提案する α - β フィルタの追尾誤差評価結果

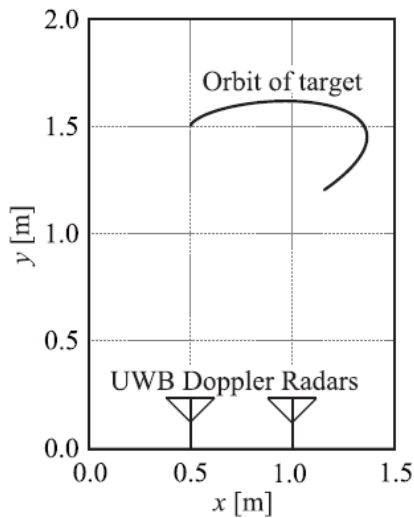


図6: UWB ドップラーレーダを想定した追尾性能評価システム及び真の目標軌道

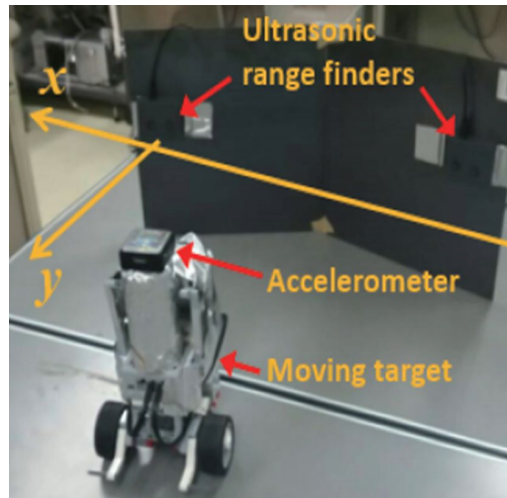


図9: 広帯域超音波距離センサと加速度センサを用いた移動ロボット追跡実験系

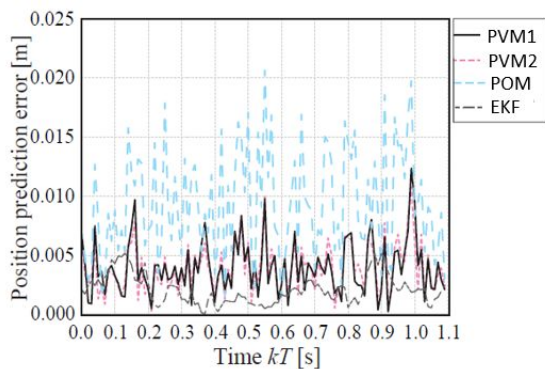


図7: 位置・速度観測 α - β フィルタ及び従来の POM フィルタによる追尾誤差評価結果

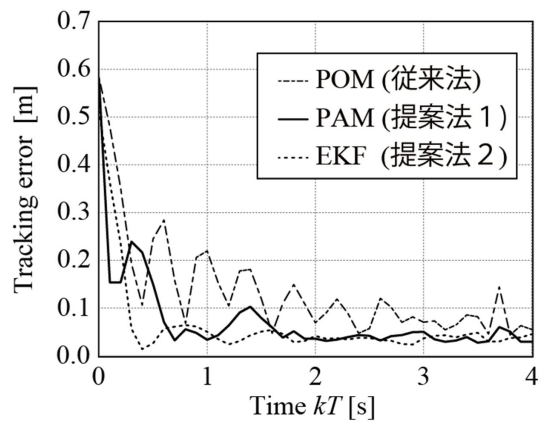


図10: 図9の実験系による追尾誤差評価結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

Kenshi Saho, Masao Masugi,
Alpha-beta-gamma tracking filters
using acceleration measurements,
SpringerPlus, 査読有、第 5 巻、2016、
305-1 - 305-8
DOI:10.1186/s40064-016-1960-8

Kenshi Saho, Masao Masugi,
Velocity/Shape Estimation Algorithm
Using Tracking Filter and Data Fusion
of Dual Doppler Radar Interferometers,
Int. J. Computer and Electrical
Engineering, 査読有、第 7 巻、2015、
283 - 295
DOI:10.17706/IJCEE.2015.7.5.283-295

Kenshi Saho, Masao Masugi,
Automatic Parameter Setting Method for
an Accurate Kalman Filter Tracker Using
an Analytical Steady-State Performance
Index, IEEE Access, 査読有、第 3 巻、
2015、1919 - 1930
DOI: 10.1109/ACCESS.2015.2486766

Kenshi Saho, Masao Masugi,
Performance Analysis of
Alpha-beta-gamma Tracking Filters
using Position and Velocity
Measurements, EURASIP J. on Advances in
Signal Processing, 査読有、vol. 2015
(第 9 巻)、2015、35-1 - 35-15
DOI: 10.1186/s13634-015-0220-3

〔学会発表〕(計 11 件)

佐保 賢志, 後藤 義和、馬杉 正男、
UWB ドップラーレーダによる移動物体の
超分解能形状計測、第 2 回 VLSI センター
シンポジウム、2016 年 1 月 15 日、立命館
大学 (滋賀県・草津市)

高橋 悠祐、佐保 賢志、馬杉 正男、
超音波距離センサと加速度センサの融合
による高精度移動体追尾、第 2 回 VLSI セ
ンターシンポジウム、2016 年 1 月 15 日、
立命館大学 (滋賀県・草津市)

佐保 賢志、馬杉 正男、
目標の加速度情報を用いた最適なパルス
レーダ追跡法、電子情報通信学会 I T S
研究会、2015 年 12 月 18 日、
沖縄産業支援センター (沖縄県・那覇市)

Kenshi Saho, Masao Masugi,
High-Resolution Remote Sensing
Technique of Moving Objects for
Next-Generation 140 GHz Radars,
World Engineering Conference 2015、

2015 年 12 月 1 日、
京都国際会館 (京都府・京都市)

佐保 賢志、馬杉 正男、
少数固定アンテナで構成したパルスドッ
プラーレーダによるエッジ及び平面を有
する凸形状運動目標の形状推定、
平成 27 年電気学会 基礎・材料・共通部
門大会、2015 年 9 月 17 日、金沢大学
(石川県・金沢市)

佐保 賢志、馬杉 正男、
パルスレーダと加速度計測を用いた移動
体測位・追尾法、電子情報通信学会
ITS 研究会、2015 年 8 月 24 日、稚内北星
学園大学 (北海道・稚内市)

Kenshi Saho,
[Invited] Ultra Wideband Doppler Radar
Signal/Image Processing for Human
Motion Recognition, The 6th
International Conference on Integrated
Circuits, Design, and Verification
(ICDV 2015)、2015 年 8 月 11 日、
Ho Chi Minh City (Vietnam)

Kenshi Saho, Masao Masugi,
Tracking and Shape Estimation of
Multiple Moving Targets using Dual
Micro-Doppler Radar Interferometers,
International Conference on Electrical
Engineering (ICEE2015)、
2015 年 7 月 8 日、Hong Kong (China)

佐保 賢志、馬杉 正男、
2つのUWBドップラーレーダ干渉計を用い
た複数運動目標の分離追尾及び形状推定、
電子情報通信学会 総合大会、2015 年 3 月
10 日、立命館大学 (滋賀県・草津市)

Kenshi Saho, Masao Masugi,
Velocity/Shape Estimation Algorithm
Using Tracking Filter and Data Fusion
of Dual Doppler Radar Interferometers,
3rd International Conference on
Intelligent and Automation Systems
(ICIAS2015)、2015 年 2 月 7 日、
Ho Chi Minh City (Vietnam)

佐保 賢志、馬杉 正男、
マイクロドップラーレーダを用いた人
体の高次センシング、第 1 回 VLSI セン
ターシンポジウム、2015 年 1 月 28 日、
立命館大学 (滋賀県・草津市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐保 賢志 (SAHO, Kenshi)
立命館大学・理工学部・助教
研究者番号: 00732900