

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：27101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760371

研究課題名(和文) マイクロ波/ミリ波を用いたUWB車載レーダのためのレーダシステムモデルの開発

研究課題名(英文) Development of Radar Simulator for Next Generation Automotive Radar

研究代表者

松波 勲 (Isamu, Matsunami)

北九州市立大学・国際環境工学部・准教授

研究者番号：70583219

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：ミリ波レーダや車載カメラが主軸となる自動運転支援システムの研究開発を支援するため、体系的なシステム評価及び環境やシステム諸元にあわせた信号処理手法の開発が可能なレーザシミュレータの開発を行った。まずフィールド実験で計測した目標信号以外の不要反射信号を統計的にモデル化し、様々な環境を想定したシミュレーション環境を構築した。次に目標である様々な車両のレーダ反射断面積を計測し、シミュレーション環境に実装することで直進、右折、左折といった運動モデルも考慮したレーダシミュレータを構築した。最後にシミュレータの信号処理ライブラリ開発に向け、フィールド計測にて検証を行い、その有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：We developed a novel radar simulator for supporting the development of an Advanced Driver Assistance System (ADAS). First of all, we modeled an undesired signal (clutter) other than a target signal statistically, and then structured the radar simulation environment included a variety of driving environment. Secondly, we measured the Radar Cross Section (RCS) of various target vehicles, and then developed the radar simulator considering various driving models such as the right and left turn. Finally, for developing a signal processing library, we confirmed effectiveness of clutter reduction, multiple target detection, target classification and trucking algorithm by field measurement.

研究分野：計測工学

科研費の分科・細目：ITS

キーワード：ミリ波レーダ 自動車レーダ レーダシミュレータ RCS クラッタ ITS

1. 研究開始当初の背景

近年、安心安全な車社会の実現に向け、周辺車両、障害物、歩行者など複数の移動体を検知・識別するマイクロ波・ミリ波を用いた26GHz及び76GHz帯超広帯域(Ultra-wideband:UWB)周辺監視レーダが注目を集め研究開発が行われている。しかし広角レーダであるため人工建造物からの不要反射波(固定クラッタ)の影響が大きく、その中から複数車両を検知・識別することは難しい。そのため様々な環境で実験的にレーダ受信特性を評価する必要があるが、安全上の問題や計測システム(一式5千万円程度)が非常に高価であることから、系統的なシステム評価及び様々な信号処理手法の開発が可能なレーダシミュレータの開発が望まれている。しかしながら、シミュレーションに必要なクラッタの統計的性質、目標物からの散乱波特性(レーダ反射断面積)であるRCSなどは解明されておらず、目標物の検知・識別技術に関しても検討されていない。

2. 研究の目的

(1) 様々な環境におけるクラッタ統計的性質の解明及びモデル化

クラッタの統計的性質を調査しモデル化することで様々な環境を想定した伝送路モデルを構築することができるが、限定的な環境における統計的性質は調査しているものの、UWBレーダで観測されるクラッタのモデル化は報告されていない。そこで様々な環境をモデル化(市街地、郊外、住宅地、高速道路)し、各環境においてクラッタの計測を行い、クラッタ受信強度がどのような分布に従うかAICにより定量的に評価する。

(2) 様々な目標物及びクラッタのRCSの調査及びモデル化と信号推定技術の開発

RCSは目標物やクラッタからの電波散乱特性であり、レーダシステム設計において送信出力、最大・最小探知距離等を決定する重要であり目標物の推定に欠かせないパラメータである。しかし26GHz及び76GHz帯レーダにおけるRCSの調査及びモデル化に関する報告はない。そこで様々な目標物やクラッタ(各種自動車、バイク、自転車、歩行者、ガードレール、樹木等)のRCSをモデル化することで、ハードウェア特性を考慮したレーダ受信信号推定技術を確立する。

(3) 信号処理技術の開発

(1)、(2)を明らかにすることで、計算機上で検知・誤警報確率を算出できる。しかし様々なレーダアプリケーションを実現するための自由なソフトウェア開発支援のためには、検知特性の向上を目的とした必要最低限の信号処理技術をシミュレータのライブラリとして組み込む必要がある。そこで移動目標物の検知・識別アルゴリズムをより一般的かつ普遍的なアルゴリズムに改良することで、計算機上で複数目標物の検知・識別性能の評価が行えるようなレーダシステムモデルとレーダ信号処理技術を確立する。

3. 研究の方法

(1) 研究計画

平成23年度の研究計画を以下に示す。

- ① 様々な目標物のRCS計測と様々な環境でのクラッタ計測
- ② 路上で複数車両、バイク、自転車、歩行者を走行させ実測データを取得(開発するシステムモデルとの比較検討用)

③ 取得したデータから複数目標物検知・識別技術を開発

平成24年度から平成25年度の研究計画を以下に示す。

- ① RCS及びクラッタのモデリングとレーダ受信信号推定技術の開発
- ② 複数目標物検知・識別技術の改良
- ③ RCS及びクラッタのモデルから、様々な環境の伝送路モデルを構築
- ④ 構築した伝送路モデルと実測データの比較検討及び評価

(2) 研究方法

平成23年度の研究方法を以下に示す。

① RCSの計測

車両だけでなく人や小型目標物(ガードレール、街灯、電柱等)のRCSを計測するが、車両(セダンタイプ、ワゴンタイプ、ハッチバックタイプ、軽タイプ、軽トラックタイプ)はレンタルする。また小型目標物は模擬したものを作成する。

② クラッタ統計的性質の調査

様々な環境(市街地、郊外、住宅地、高速道路)をモデル化し、各環境におけるクラッタの統計的性質を調査及びモデル化する。その際、赤池情報量基準(AIC)による定量的な評価を行う。

③ 実測データの計測

①、②は梶原教授が所有するベクトルネットワークアナライザにて距離方向の電力分布特性(レンジプロファイル)を計測し解析を行う。

次に平成24年度、平成25年度の研究方法を以下に示す。

④ クラッタのモデル化

UWB通信分野で広く用いられているS-Vモデルを参考にし、各種パラメータを実測データであるレンジプロファイルから統計的に導出する。理論検証を購入予定の電波伝搬解析ソフトと比較することで定量的に行う。

⑤ RCSのモデル化

豊田中央研究所が行ったRCS像に関する研究⁷⁾を参考にし、UWBレーダにおけるRCS解析法・推定法を確立しモデル化を行う。理論検証をフリーの電磁波解析ソフトと比較することで定量的に行う。

⑥ 伝送路モデルの構築

シミュレーション比較用の実測データと電波伝搬解析ソフトを用いて定量的に評価を行う。

⑦ 目標物の検知・識別性能の評価

電波伝搬モデルに信号処理技術を組み合わせシミュレーションを行う。また、実測データに信号処理を適応した結果と比較検討することで総合的な評価を行う。

⑧ レーダシステムモデルの構築

実測データと電波伝搬解析ソフトと比較検討を行い、開発するシステムモデルの性能を総合的に評価する。最終的に構築するレーダシステムモデルのブロック図を図1に示す。

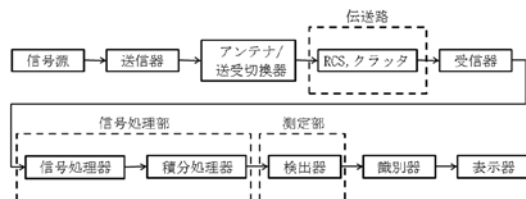


図1：開発するレーダシステムモデルのブロック図

4. 研究成果

主要な研究成果を以下に示す.

(1) 複数移動目標物の検知・識別・追尾に関する研究成果

① 研究概要

近年, 超広帯域車載レーダ (以後, UWB 車載レーダ) による次世代全周囲安全監視システムの開発に注目が集まっている. 本システムでプリクラッシュから歩行者検知までの様々な要求を実現するには, 不要反射波であるクラッタと複数車両または歩行者を正確に識別し, 各移動目標車両等を追尾すること (Multiple Target Tracking: MTT) が重要な課題となる. そこで UWB 車載レーダの MTT 方式について検討する. ここでは, 複数移動目標を一括で検出できるハフ変換を用いた複数反射物識別法と, 検知確率の改善及び追尾が期待できる荷重パルス積分法を組み合わせた車載レーダのための MTT 方式を提案している. またその有効性を走行実験により確認し, 低 S/C 環境下において初期捕捉率及び速度位置推定精度を評価している.

② 車載レーダのための MTT 方式

図 2 は提案する MTT 方式の基本システムである. 以下にその信号処理の流れを示す.

- (i) 図 3 に示すレンジプロファイル単一では複数の目標車両とクラッタを分離識別することが難しいため (実験風景: 図 4), パルス繰り返し周期で観測したレーダ画像 (図 5) をハフ変換処理で各目標を初期捕捉し, 取得した目標情報で各目標の関連付けを行う.
- (ii) 目標情報でゲーティング処理後, 目標情報推定精度及び検知確率を改善しながらゲート内の目標追尾を行う.
- (iii) 追尾で得られる目標情報をトラックファイルに保存し, 初期捕捉で得られた目標情報と比較を行う.
- (iv) 目標が追尾から外れたり, 新規反射物がゲート内外に現れた場合は, 関連付けられた目標情報が更新され, 追尾と並列処理で再度初期捕捉が行われる.

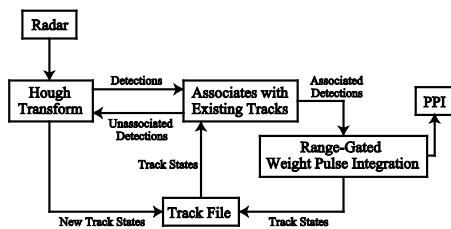


図 2 : MTT 方式の基本システム

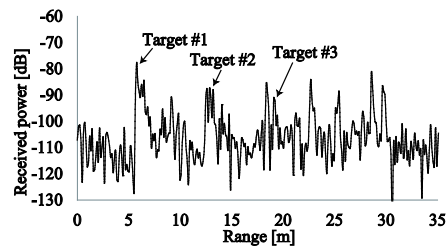


図 3 : レンジプロファイル例



図 4 : 実験風景 (写真内は移動目標車両)

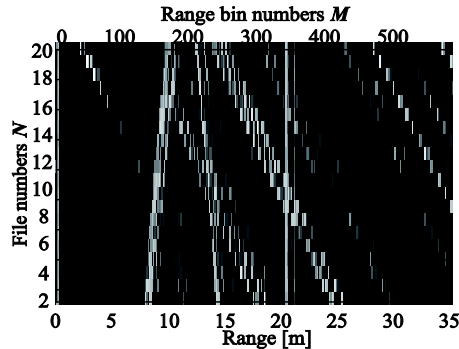


図 5 : レーダ画像

③ レンジゲート荷重積分

提案する MTT 方式の基本検討(ii), (iii)の主要技術であるレンジゲート荷重積分について説明する.

まず, 初期捕捉で推定した目標情報で各目標のゲーティング処理を行う. 次に, 荷重パルス積分によりゲート内の残留及び新規クラッタを抑圧し, 目標情報推定精度と検知確率を改善しながら追尾を行う (以下, レンジゲート荷重パルス積分).

④ 初期捕捉率と目標情報推定誤差の研究結果

まず, 初期捕捉のためレンジプロファイルを一定時間観測し, 図 5 に示すレーダ画像を構成してハフ変換を行った. その結果の一例を図 6 に示す. ここでは集積数の多い直線から上位 5 本を選択した. 各直線の傾きから速度を算出した結果, Line#1~#5 でそれぞれ 108km/h, 77.5km/h, 89.5km/h, -0.5km/h, -0.5km/h であった. ここで, 本研究ではクラッタを固定物からの反射波信号と定義しており, 計測車両は 90km/h で走行しているので, Line#4, #5 はクラッタ, それ以外の Line#1~#3 は走行車両と判定できる.

次に, target#1~#3 の初期捕捉率 $P_{d \text{ hough}}$ が 100% のときの速度推定誤差率 e_v (速度誤差の絶対値÷実速度×100), 位置推定誤差率 e_d (位置誤差の絶対値÷実位置×100) を表 1 に示す. 本研究では, 各目標で $P_{d \text{ hough}}=100\%$ となるために必要なファイル数は $N=20$ であった. その結果, 速度・位置推定精度には 5% 以下ではあるが誤差が生じている. これはハフ変換で検出できなかったクラッタや雑音の影響を受けたからである. ここで, ファイル数 N を増やすことで推定精度の改善が期待できるが, 観測時間だけでなく演算時間も増大する. そこで, レンジゲート荷重パルス積分によりリアルタイムに目標情報推定精度と検知確率を改善し, 追尾を行う.

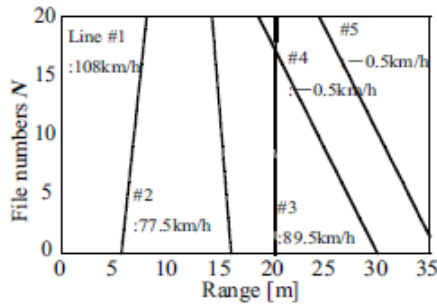


図 6 : クラッタと各目標の軌跡直線

表 1 : 速度・位置推定誤差率

	e_v [%]	e_d [%]
Target#1	3.56	4.03
Target#2	2.36	3.38
Target#3	3.10	2.22

⑤ 目標情報推定精度と検知確率の改善に関する研究結果

目標情報から target#1~#3 をゲーティング処理する. target#1~#3 は 70km/h 以上で走行しているため車両と判定し, ゲート長を 5m とした. 図 7 にゲーティング処理後のレンジプロファイルを示す. 図より, Range-Gate#1~#3 の 6m, 16m, 20m 付近にある信号は, 目標情報から関連付けされた target#1~#3 と判定できる. 一方, Range-Gate#3 の 23m 付近にある大きな信号はクラッタである. ここで, ゲート内に残留もしくは新規クラッタが存在すると誤警報確率が悪化してしまう. また, 正確な追尾を行うためには目標情報推定精度も改善しなければならない. そこでレンジゲート荷重パルス積分により残留・新規クラッタを抑制しながら高精度な複数移動目標追尾を行う.

まず図 8 に, 積分回数 $L=8$, $T_{wpi}=80\text{msec}$ のときのレンジゲート荷重パルス積分結果の一例を示す. 尚, 閾値は $L=8$ で誤警報確率 $P_{fa}=10^{-3}$ を満足する $Th=-93.6\text{dB}$ に設定し, 閾値を基準に正規化した. その結果, 図 12 と比べてクラッタが十分に抑制され目標を正確に検出できている. また, 各レンジゲートの距離も目標の移動に合わせて変化していることが確認できる. そこで, 次にレンジゲート荷重パルス積分の観測時間における検知確率 $P_{d,wpi}$ と目標情報推定精度 e_v , e_d の改善結果を図 9, 10 に示す. 尚, ここでの数値は 3 目標の平均値であり, 算出における試行計測は 50 回である. その結果, $T_{wpi}=80\text{msec}$ 以降, わずか $L=8$ 以上で, $P_{d,wpi}=100\%$ を実現している. 以上より, 提案する MTT 方式の有効性を実験により確認することができた.

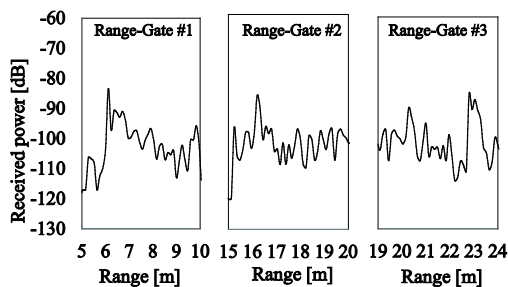


図 7 : ゲーティング処理後のレンジプロファイル

イル例

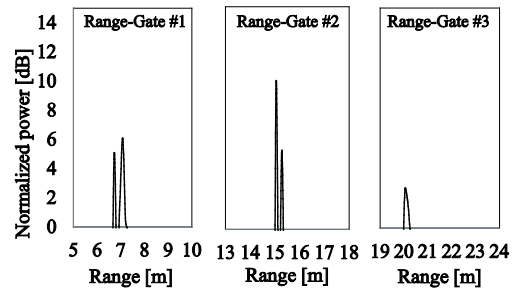


図 8 : レンジゲート荷重パルス積分後のレンジプロファイル

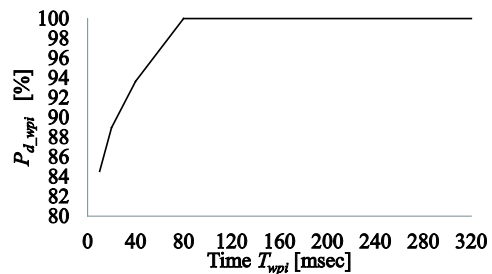


図 9 : 検知確率

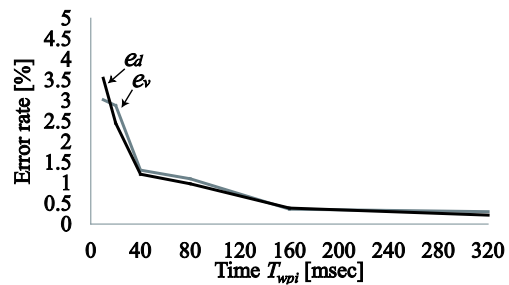


図 10 : 速度・位置推定誤差率

(2) 様々な伝送路モデルの構築とレーダシステムモデルの構築に関する研究成果

① 交差点環境を想定したレーダシミュレーションモデル

表 2 と図 11 にシミュレーション諸元及びシミュレーションモデルを示す. 本研究では, 提案手法の基本特性を評価するため, 一例として住宅地等における狭い交差点環境においてレーダ車両の対向車であるワンボックス車が右折, 左折の走行を行う状況を想定してシミュレーションを行った. 運動開始位置の座標 $(x[\text{m}], y[\text{m}])$ をレーダ車両 $(6.5[\text{m}], 8.0[\text{m}])$, ワンボックス車 $(10.0[\text{m}], 23.0[\text{m}])$ と設定し右折, 左折のシミュレーションを行った. パルス繰り返し周期は 5ms とし, 各車両速度, レーダ車両とワンボックス車の座標から距離と回転角 ϕ を算出し, それに対応した $\sigma(\phi)$ をレーダ方程式に代入し, 各状態における状態プロファイルを導出した. ここで, レーダ車両とワンボックス車の速度はそれぞれ 7.2km/h, 14.4km/h である.

表 2 : シミュレーション諸元

中心周波数	$f_c=26\text{GHz}$	
レーダ方程式	P_t	1mW(0dBm)
	G	24dBi
	λ	$1/f_c$
	$\sigma(\phi)$	実測値
	R	初期値: 16m
車両速度	レーダ車両	7.2km/h
	レーダ目標車両	14.4km/h
PRI	5ms	
シミュレーション回数	500 回	

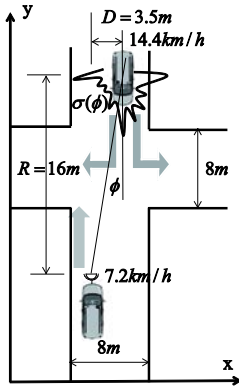


図 1 1 : 狭い交差点を想定したシミュレーションモデル

② シミュレーション結果

各状態における状態プロファイルを図 12 に示す. ここで目標車両からの反射波信号強度を x_{oi} とすると, PRI 毎に一定時間観測した状態プロファイルは $X_o=[x_{o1}, \dots, x_{oN}]$ となる. 図より, 0.5s からそれぞれの走行状態に入る. 図 13 より, 右折の場合は交差点に入る後, 正面, 角といった角度変化を伴うため約 0.8s で大きくなる. また, 0.8s 以降では RCS の小さな角を向けるため信号強度は減少傾向となっている. 次に左折の場合, 交差点に進入後, 角, 側面といった角度変化を伴う. そのため, 約 1s までに RCS の小さな角を向けるため信号強度は小さくなっていることが図より視認できる. 以上の結果から各状態で最も変化が顕著にあらわれる角度において, 状態プロファイルからこれらの特徴的な強度変化を抽出できれば各状態の推定が可能である.

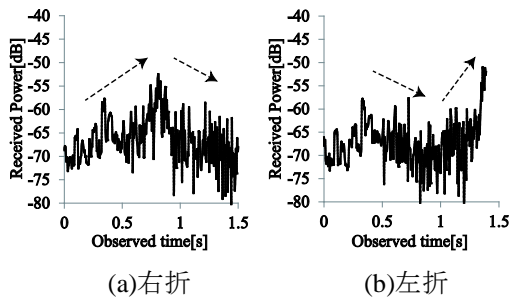


図 1 2 : 状態プロファイル

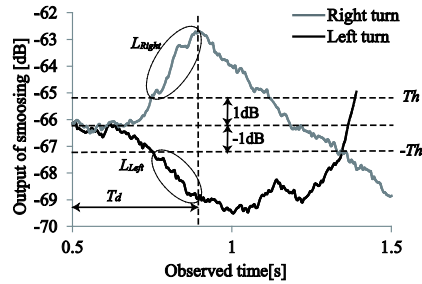


図 1 3 : 平滑化状態プロファイル

x 軸方向の車間距離を $D=3.5, 4.5\text{m}$, y 軸方向の車間距離を $R=16.0, 26.0\text{m}$ の 4 パターンにおける推定時間のシミュレーションを行った. その結果を表 3 に示す. 尚, シミュレーション回数は 500 回で, 推定時間はその平均値である. 表より, すべてのパターンにおいて約 500ms 以内で各状態推定が可能であることが確認できた.

表 3 : シミュレーションによる判定時間

各状態に入ってから判定時間 T_d [ms]			
R[m]	D[m]	右折	左折
16	3.5	350	360
16	4.5	440	360
26	3.5	190	520
26	4.5	295	275

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 6 件)

以下, 全て査読あり.

- ① 大津貢, 中村僚兵, 梶原昭博, “ステップド FM による超広帯域電波センサの干渉検知・回避機能,” 信学論(B), vol.J96-B, no.12, pp.1398-1405 (2013 年 12 月)
- ② 松波勲, 梶原昭博, “UWB 車載レーダによる複数移動目標追尾のための実験的検討” 信学会 B, Vol.J95-B, No12, pp.1662-1667, Dec.2012.
- ③ 岡本悠希, 松波勲, 梶原昭博, “車載用広帯域レーダにおける複数車両検知・識別技術に関する実験的検討” 信学会 B, Vol.J95-B, No8, pp.976-979, Aug.2012.
- ④ 松波勲, 梶原昭博, “車載用超広帯域レーダにおける荷重パルス積分によるクラッタ抑圧” 信学会 B, Vol.J94-B, No4, pp.655-659, April.2011.
- ⑤ 中村僚兵, 中畑洋一朗, 太田恭平, 松波勲, 梶原昭博, “セダン車内における超広帯域無線伝搬特性 - 乗客の影響と車外への漏洩 -,” 信学論 B, Vol.J94-B, No2, pp.300-303, Feb.2011.
- ⑥ 中村僚兵, 梶原昭博, 「ステップド FM 方式を用いた超広帯域マイクロ波センサ」, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J94-B, No.2, pp.274-282, 2011 年 2 月.

[学会発表] (計 3 1 件)

(1) 国際会議発表 (査読あり)

- ① I.Matsunami, R. Nakamura, and A. Kajiwara, “Target State Estimation Using RCS Characteristics for 26GHz Short-Range Vehicular Radar,” Proc. of

- 2013 International Conference on Radar (RADAR2013), (Adelaide, Australia), Sept. 2013.
- ② I.Matsunami, Y.Okamoto and A.Kajiwara, "RCS Measurement for Vehicles and Pedestrian at 26 and 79GHz," Proc. of IEEE ICSPCS2012, (Sydney, Australia), Dec.2012.
- ③ Y.Okamoto, I.Matsunami, A.Kajiwara, "Pedestrian and Two-wheeler Detection Using Ultra-Wideband Vehicular Radar", Proc. of IEEE Sensor Applications Symposium (SAS2011), (USA), Feb. 2012.
- ④ I.Matsunami, Y.Okamoto and A.Kajiwara, "Multiple Target Detection and Classification Using Range Gated Weight Pulse Integration for UWB Automotive Radar," Proc. of International Conference on Space, Aeronautical and Navigational Electronics 2011, Bali(Indonesia), Oct.2011.
- ⑤ Y.Yamaguchi, Y.Kosuge and I.Matsunami, "Collision Avoidance nspp (n step predicted position) Filter for Aircraft," Proc. of International Conference on Space, Aeronautical and Navigational Electronics 2011, Bali(Indonesia), Oct.2011.
- ⑥ M.Syahmi, Y.Kosuge and I.Matsunami, "Comparison of Aircraft Tracking Response between a Kalman Filter and A Linear Least Squares Filter," Proc. of International Conference on Space, Aeronautical and Navigational Electronics 2011, Bali(Indonesia), Oct.2011.
- ⑦ Y.Okamoto, I.Matsunami, A.Kajiwara, "Moving vehicle discrimination using Hough transformation", Proc. of IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS2010), pp.367-370, (USA), Jan. 2011.
- (2) 国内会議発表 (査読なし)
- ① 佐々木恵理子, 松波勲, 梶原昭博, "小型ステップドFM-UWB電波センサの研究開発,"電子情報通信学会総合大会(新潟市)(2014年3月)
- ② 久保山静香, 松波勲, 梶原昭博, "ステップドFM-UWBセンサにおける強度法と測距法の測距精度比較,"電子情報通信学会総合大会(新潟市)(2014年3月)
- ③ 若杉博幸・小菅義夫・松波勲, "車載レーダにおける複数目標追尾に関する検討,"宇宙航行エレクトロニクス研究会(長崎)(2014年1月)
- ④ 匂梅和也・小菅義夫・松波勲, "等加速度運動モデルを使用した不定サンプリング非干渉形フィルタの過渡応答用性能評価,"宇宙航行エレクトロニクス研究会(長崎)(2013年1月)
- ⑤ 呂楠・小菅義夫・松波勲, "TOA(Time of Arrival)追尾の基礎検討,"宇宙航行エレクトロニクス研究会(長崎)(2013年1月)
- ⑥ 松尾健太・小菅義夫・松波勲, "位置・速度を観測値とする九次元追尾フィルタ,"宇宙航行エレクトロニクス研究会(長崎)(2013年1月)
- ⑦ 若杉博幸・松波勲・小菅義夫・梶原昭博, "交差点環境における走行車両の状態推定,"ワイドバンドシステム研究会(京都)(2012年10月)
- ⑧ 松波勲・中村僚兵・梶原昭博, "レンジゲート下荷重パルス積分法を用いたUWBレーダ,"ワイドバンドシステム研究会

- (岩手)(2012年5月)
- ⑨ 岡本悠希・松波勲・梶原昭博, "UWB車載レーダの前側方監視に関する実験的検討～歩行者・二輪車検出について～,"ワイドバンドシステム研究会(長崎)(2011年12月)
- ⑩ 松波勲・岡本悠希・梶原昭博, "UWB車載レーダにおける複数目標物の検知・識別に関する一検討,"ワイドバンドシステム研究会(高知)(2011年7月)
- 他, 14件

[図書](計1件)

- ① A.Kajiwara, R. Nakamura, "Patient-Care Sensing and Monitoring Systems (Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook 2nd. Ed.)" CRC Press, pp.62-1-62-11 (Jan, 2014)

[産業財産権]

○取得状況(計4件)

名称:超広帯域パルス・センサ
 発明者:梶原昭博
 権利者:財団法人北九州産業学術推進機構
 種類:公開特許公報(A)
 番号:2012-108109
 取得年月日:2012年6月7日
 国内外の別:国内

名称:超広帯域パルス・センサ及びその干渉回避方法
 発明者:梶原昭博
 権利者:財団法人北九州産業学術推進機構
 種類:公開特許公報(A)
 番号:2012-88141
 取得年月日:2012年5月10日
 国内外の別:国内

名称:クラッタ抑圧装置とレーダ装置
 発明者:梶原昭博, 松波勲
 権利者:財団法人北九州産業学術推進機構
 種類:公開特許公報(A)
 番号:2011-257204
 取得年月日:2011年12月22日
 国内外の別:国内

名称:動体監視方法及びその装置
 発明者:梶原昭博
 権利者:財団法人北九州産業学術推進機構
 種類:公開特許公報(A)
 番号:2011-96198
 取得年月日:2011年5月12日
 国内外の別:国内

6. 研究組織

(1)研究代表者
松波勲 (ISAMU Matsunami)
 北九州市立大学・国際環境工学部・准教授
 研究者番号:70583219

(2)連携研究者
梶原昭博 (AKIHIRO Kajiwara)
 北九州市立大学・国際環境工学部・教授
 研究者番号:00292475