

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04015

研究課題名(和文) 超広帯域レーダのための偏波及び多重散乱波を用いた画像再現域拡大に関する研究

研究課題名(英文) Research for image expansion method using fully polarimetric data and multiple scattering signals for ultra wideband radar

研究代表者

桐本 哲郎 (Kirimoto, Tetsuo)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：10364142

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：本課題は、狭小開口面積における高分解能レーダ画像化法の構築を目的として、多偏波解析による目標外挿法、ドップラを用いた人体目標運動・形状同時推定、多重散乱波を用いた画像領域拡大法の課題を実施した。では、多偏波データ学習と高精度画像化法RPM法を統合し、画像領域拡大を実現した。では、MIMOレーダを仮定した高速人体画像化としてドップラ速度を用いたデータクラスタリングにより、精度と処理速度を飛躍的に高めた。また、では、壁透過モデルにおいて人体を画像化するため、同壁と目標間で生成される多重散乱波を利用した画像領域拡大法を提案し、電磁界解析による数値データによりその有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：This research focuses on the topic for the image expansion scheme under the limited radar aperture size. For the above purpose, three subtopics as “1. Image expansion with fully polarimetric data”, “2. Human body imaging exploiting Doppler velocity discrimination”, and “3. Image expansion using multiple scattering effect”. In the subtopic 1, we incorporated the fully polarimetric data based machine learning and the RPM method for image expansion. In the subtopic 2, we proposed the micro-Doppler based data clustering algorithm for human body imaging assuming the MIMO radar system. And, in the subtopic 3, the multiple scattering signals are accurately recognized by the Doppler velocity and the RPM image assuming the through-the-wall imaging scenario. The effectiveness of each proposed method has been basically demonstrated through realistic numerical simulation using FDTD method, and the results are overcoming the limitation of the conventional radar imaging algorithms.

研究分野：計測工学

キーワード：レーダ信号処理 画像レーダ 多偏波解析 多重散乱解析 ドップラ速度推定 壁透過レーダ

### 1. 研究開始当初の背景

災害現場・宇宙環境等の人体にとって危険または有害な環境下で活動する自律移動型ロボットは、幅広い用途(救助補助・資源探査等)に有用であり、その社会的・産業的需要は高い。UWB信号(超広帯域)を用いた画像レーダ技術は、粉塵・高濃度ガス・強い逆光・高熱環境等の劣悪な測定環境下でも適用可能であり、「偏波」「誘電体透過性」「散乱周波数特性」等の特徴量を最大限利用することにより、既存の計測性能を超える革新的イメージング技術を創出できる。しかしながら、同分野はまだ発展途上にあり、【処理速度】・【空間分解能】・【画像再現域】等の点で、上記応用に供するに十分な性能を満たす技術は確立されていない。

### 2. 研究の目的

本研究課題では、開口面積が制限された状況での目標認識を実現するために、申請者らが提案する独自の立体画像化法(RPM法)を基に、「多偏波解析」「多重散乱波」や「誘電体透過波」を組み合わせ、従来画像レーダ技術の本質的な弱点を克服する手法を確立する。具体的には以下の課題を設定する。

多偏波解析とデータ学習を用いた楕円体群による目標外挿法

マルチスタティック観測による人体目標運動・形状同時推定

壁透過レーダを仮定した多重散乱波とドップラ速度を用いた画像領域拡大法

### 3. 研究の方法

以下、各課題について研究の方法を述べる。

多偏波解析とデータ学習を用いた楕円体群による目標外挿法

一般にレーダ計測での方位方向の画像化再現域は、開口面積(素子可動域)と目標距離に依存する。例えば、5波長程度(UWB波長で約50cm)の開口面積では、数十波長(2~3m)以上離れ、大きさが波長規模の目標に対しては、有意な目標画像(目標認識に十分な画像領域)を得ることは本質的に困難である。これに対し、各目標境界面を楕円体の部分曲面の集合と見なし、RPM法の推定目標点群を楕円体群に非線形最適化等で整合させ、目標境界の不可視領域を外挿する。また、垂直・水平の両偏波を用いて観測される偏波行列は、目標の局所構造(ワイヤ・曲面・平面等)のみだけでなく、大局的な情報(有効な散乱表面積、回転軸)を含んでいることを確認している。同性質を利用し、多偏波がデータをニューラルネットワークにより学習し、任意の目標形状に対する効率的な境界外挿法を提案する。

マルチスタティック観測による人体目標運動・形状同時推定

人体等に対するリアルタイム計測が必要とされる状況では、各素子でのデータ取得を瞬時に得る必要があるため、マルチスタティック観測またはMIMOレーダを想定する必要がある。マルチスタティックモデルに拡

張されたRPM(Range Points Migration)法がすでに提案され、合成開口処理と比較して、処理速度及び精度を飛躍的に改善させることを確認しているが、しかし同手法は、目標数が増大するとともに処理量が増大するという問題点を有する。

これを改善するために人間の各部位が有する微妙な動きの違いによって生じるμドップラ速度成分を計測し、かつ同情報を用いてデータをクラスタリングし、処理速度及び精度を改善させる手法を検討する。人体の3次元モデルを用いた数値計算例などで本手法の有効性を検証する。

壁透過レーダを仮定した多重散乱波とドップラ速度を用いた画像領域拡大法

室内環境等で発生する多重散乱波は一回散乱波とは異なる伝搬経路をとるため、独立した情報を有しており、画像再現範囲を飛躍的に拡大させる可能性を持つ。多重散乱波の識別が重要になるが、これをドップラ速度を用いて識別し、かつデータクラスタリングにより効率的に画像化精度及び速度を達成する。

### 4. 研究成果

多偏波解析とデータ学習を用いた楕円体群による目標外挿法

本課題では多偏波散乱データを用いた目標領域外挿法を提案した。本手法では、様々な楕円体からの偏波散乱データをニューラルネットワークで学習し、RPM法の各推定点に対して、楕円体の一部を当てはめる。すなわち、推定点集合に対して楕円体を当てはめるのではなく、偏波特性を利用して推定点の各点に対して楕円体を当てはめることで、形状表現の自由度を高める(図1参照)。提案法ではまず、様々な楕円体目標に対する多偏波散乱データを解析・学習し、RPM法による推定点の各点に対して楕円体を当てはめる。最終的に、当てはめた楕円体の一部を切り取り、それらの集合によって目標境界を表現する。まず、各目標楕円体における有用な特徴量をNeural Network(NNと呼称)で学習し、目標形状を推定する。様々な楕円体目標における、各偏波の反射波の時系列データを事前に取得し、同データをNNで学習する。次に、同データで推定された楕円体をRPM法での推定境界点に当てはめる処理について述べる。幾何光学近似において、各素子では視線方向(Line Of Sight:LOS)と直交する目標境界面から卓越した信号を受信する。このため、RPM法の各点における法線ベクトルを基に、楕円体の各軸を回転させ、適切に当てはめを行う。また、RPM法の推定点集合の固有値解析に基づき、境界の二次曲率情報を得ることで、当てはめる範囲を適切に決定する。次に3次元FDTD法による数値検証例を示す。素子は、 $-2.5 < x, y < 2.5$  の範囲にx, y軸いずれの方向も0.5間隔でサンプルする。目標は比誘電率1の完全導体とする。図2左にRPM法による目標

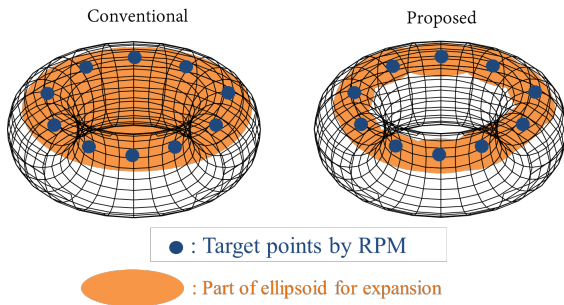


図 1 . 従来法と提案法の外挿概念図

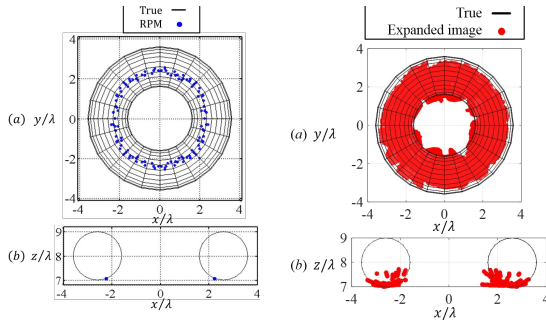


図 2 . RPM 法(左)と提案法(右)の比較

推定点を示す．図 2 右 に提案法による外挿結果を示す．図 2 左 より RPM 法は高精度な境界推定を実現するが，再現領域が不十分であることがわかる．これに対し提案法では，図 2 右 に示すとおり，楕円体目標の再現領域を高精度に拡大することが可能となる．

目標全体の面積に対する再現領域の比率  $Pa$  と定義する．各目標での RPM 法と提案法の推定結果に対する  $Pa$  値は，図 2 の Torus 目標では 7.2% , 34.9% である．両目標形状ともに，提案法により推定目標領域が飛躍的に拡大されていることが定量的にも確認される．また，RPM 法と提案法の推定誤差が 0.2 以内となる推定点の割合は，それぞれ 100% , 94% であり，精度劣化を殆ど受けずに画像化領域を飛躍的に拡大することができていることがわかる．本成果は，レーダ画像化法における本質的な問題を改善する、独創性及び新規性の高い成果であり、大きなインパクトを当該分野にもたらすと予測する．同成果は、IEEE Trans に採録され、複数の論文賞を受賞するなど、その評価は高い．

#### マルチスタティック観測による人体目標運動・形状同時推定

マルチスタティックモデルに拡張された RPM 法において，精度及び処理速度を改善させるために，ドップラ速度によるデータクラスタリング法を提案する．図 3 に提案法の原理図を載せる．同図より，同一レンジ分解能の中に入っている距離も，ドップラ速度が異なることによって分解することができる．またドップラ速度が異なると人体各部位が異なると予測されるので，ドップラ速度でクラスタリングし、クラスタごと

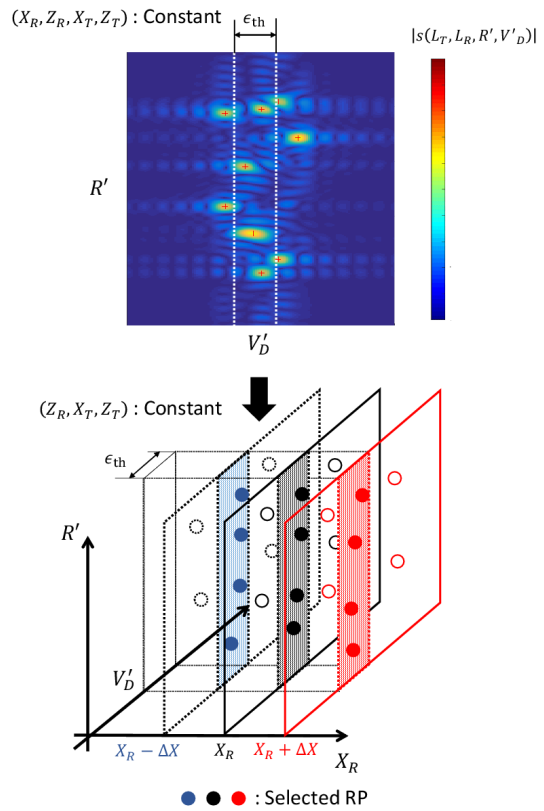


図 3 . ドップラによるデータ分類

に RPM 法を適用することで，冗長な計算時間を減らし，かつ不必要なデータを除いた形で処理できるので，精度が改善されると予測する．

以降では数値計算例について述べる．図 4 の目標・素子配置を用いる．送信素子数は 4, 受信素子数は 25 とする．搬送波周波数を 140GHz とし，パルス幅を 0.1nsec とする．受信信号の生成に幾何光学近似を用い，目標は人体を模した楕円の集合体を仮定する．各目標は一定時間内で図 4 の通り視線方向に等速運動をすると仮定する．パルス繰返し周期(PRI) を 37.5  $\mu$ s , パルスヒット数を 56 回とする．雑音は考慮しない．図 5 左 にドップラ-距離点クラスタリングを用いない手法(従来の RPM 法)，図 5 右に手法 B による推定像を示す．各点の色はドップラ速度を表す．誤差が 10 波長 以内に入る割合は従来法で 41.7% , 手法 B で 70.2% である．再現可能な目標境界点数は従来法で 279 , 手法 B で 587 と大幅に増加する．なお各部位のドップラ速度も同時に推定できるため，その特徴は目標認識等にも有用である．計算時間は手法 B が 175 秒であり，従来法，手法 A と比較して大幅な改善が得られた．画像化精度は，手法 A がより高精度である一方，本節の手法では 4 節の事前クラスタリング法と比較して，多くの推定点を用いた再構成に成功している．これはドップラ-レンジ分布の生成により従来のレンジ分布と比較して多くのドップラ-距離点の抽出が可能となったためである．更に本手法は 2 倍以上の高速化を実現している事が確認できる．

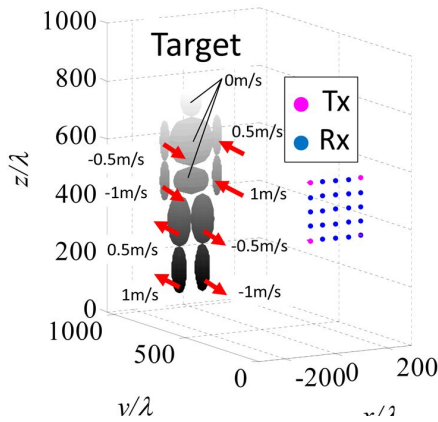


図4 . 観測モデル

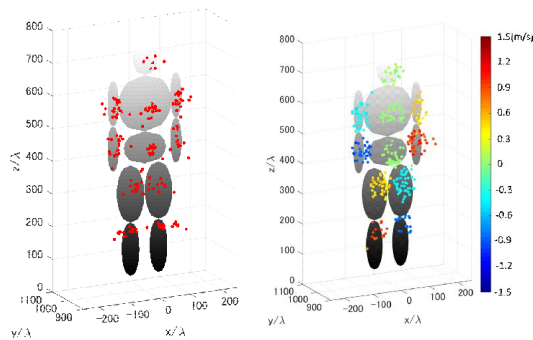


図5 . 従来法(左)と提案法(右)の推定像

**高速化アルゴリズムの導入**

上記手法の更なる高速化のために、従来の交点抽出に基づく方法ではなく、事前にサンプルされた標本点抽出法を導入した。また標本点も黄金比を用いた効率的なサンプルを用いて、むらがないようにサンプルするように工夫した。更にRPM法での評価関数を修正し、極めて簡単な演算で各推定点を計算する方法を新たに導入した。図6左は交点抽出型RPM法及び図6右は標本点抽出型RPM法である。計算緒元は図5と同様である。計算時間は、従来法の312秒に対して、提案法は6秒と50倍以上の高速化を実現させた。

上記成果は特にRPM法とドップラ速度推定の結果を紐づけできる形で画像化し、マイクロドップラ成分を判定することで人体識別が容易になり、かつ合成開口処理に比べて非常に高精度かつ高速に人体をイメージすることができる。これは実用上極めて重要な成果であり、今後の応用展開において重要な成果となる。同成果はIEEE Letters等の複数の論文誌に掲載済みであり、国際会議等でも高い評価を得ている。

**壁透過レーダを仮定した多重散乱波とドップラ速度を用いた画像領域拡大法**

既に、高精度画像化法であるRPM(Range Point Migration)法を壁透過モデルに拡張した手法を提案している。しかし同モデルにおいては、壁と目標間等における多重散乱成分によって虚像が生じる問題がある。これに

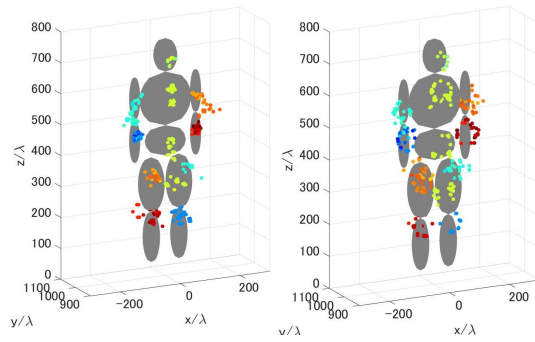


図6 . 交点抽出法(左)と標本点抽出法(右)

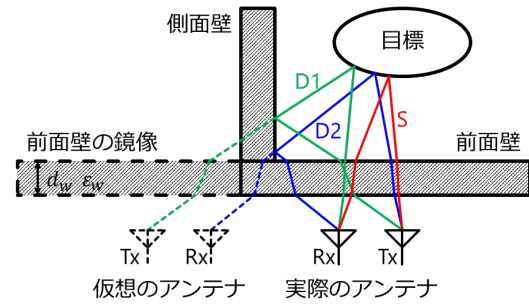


図7 . 1回と2回散乱パスの伝搬経路

対して、多重散乱の主要な成分である二回散乱をドップラ速度により識別することで、虚像の抑圧及び画像化範囲の拡大が見込まれる。提案手法では、ドップラ速度に基づいて二回散乱を識別し、同情報をRPM法へ統合して画像化精度を改善させる。

二回散乱波に対する距離点を適切に画像化するため、本手法ではドップラ速度及びRPM法による初期形状推定を用いて直接散乱と二回散乱を識別する。まず、slow time方向における前半と後半の観測データから抽出した距離点  $q_E$  及び  $q_L$  を用いて、各時刻における目標境界をRPM法により推定する。同推定点群  $p_E$  及び  $p_L$  を実空間上でクラスタリングすることで複数目標を識別し、また前後の時刻における各クラスタの重心点の midpoint と差分から各目標の位置と速度ベクトルを推定する。同推定情報を用いて、側面壁との位置関係から各目標からの直接散乱経路  $S$  と、異なる二種類の伝搬経路を取る二回散乱経路  $D1$  及び  $D2$  を決定する。図7に上記説明の概念図を示す。同経路情報と、観測される距離及び速度情報を識別する。最後に、識別された距離点  $q$  に対してRPM法を適用し、推定点  $p$  を得る。

**数値計算による評価**

受信信号はFDTD法により作成し、雑音は考慮しない。送信信号の中心波長は  $\lambda = 50\text{mm}$ 、中心周波数は  $6\text{GHz}$ 、帯域幅は  $2\text{GHz}$  とする。 $-5.0 < x < 5.0$  の範囲に25個の受信素子を配置し、 $x = 0$  の素子のみを送信素子とする。壁の厚さ、比誘電率、導電率はそれぞれ  $100\text{mm}$ 、 $5.0$ 、 $0.001\text{ S/m}$  とする。

RPM法と提案手法による目標推定点をそれぞれ図8に示す。RPM法では目標の左後方に



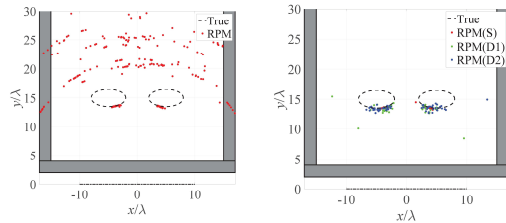


図8 . 従来法(左)と提案法(右)の推定像

二回散乱による虚像が発生している。一方、提案手法において同虚像は二回散乱の識別により抑圧されており、また二回散乱波データも適切に画像化することで画像化範囲が拡大していることがわかる。また再現誤差が50mm以下の推定点の割合はRPM法で68.4%、提案手法で95.1%である。

本成果は、多重散乱波の識別問題という一般に困難な問題を、ドップラ速度及びRPM法の特徴を活用して解消しており、室内環境や路地等の多重散乱波が多数発生する場所での虚像抑圧または画像領域拡大(分解能改善)に寄与し、自動運転や災害現場での人体検出法として有用であると考えられる。同成果は国際会議で論文賞を受賞し(ICSANE 2016)、現在学術論文誌に投稿・改訂中である。

#### 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5件)

A. Yamaryo, T. Takatori, S. Kidera, and T. Kirimoto, "Range Points Migration Based Image Expansion Method Exploiting Fully Polarimetric Data for UWB Short Range Radar", IEEE Trans. Geoscience & Remote Sensing, Vol. 56, no. 4, pp. 2170-2182, April 2018. (10.1109/TGRS.2017.2776274)(査読有)

M. Noto, F. Shang, S. Kidera, and T. Kirimoto, "Super-Resolution Time of Arrival Estimation Using Random Resampling in Compressed Sensing", IEICE Trans. Commun. Aug, 2018 (in press). (<https://doi.org/10.1587/transcom.2017E-BP3324>) (査読有)

M. Noto, A. Moro, F. Shang, S. Kidera, and T. Kirimoto, "Noise-robust Compressed Sensing Method for Super-resolution TOA Estimation", IEICE Communication Express, Vol. 6 (2017), No. 5, pp.219-224). (<https://doi.org/10.1587/comex.2017XBL0015>) (査読有)

Y. Sasaki, F. Shang, S. Kidera, T. Kirimoto, K. Saho and T. Sato, "Three-dimensional Imaging Method Incorporating Range Points Migration and Doppler Velocity Estimation for UWB Millimeter-wave Radar", IEEE Geoscience

and Remote Sensing Letters, vol. 14, no. 1, pp. 122-126, Jan, 2017. (10.1109/LGRS.2016.2628909) (査読有)

Y. Sasaki, F. Shang, S. Kidera and T. Kirimoto, "Accurate 3-dimensional Imaging Method by Multi-static RPM with Range Point Clustering for Short Range UWB Radar", IEICE Trans. Commun., vol. E100-B, no. 8, Aug., 2017.

(<https://doi.org/10.1587/transcom.2016E-BP3327>) (査読有)

[学会発表](計23件)

M. Setsu and S. Kidera, "Super-resolution Doppler Velocity Estimation by Gaussian-kernel Based Range-Doppler Conversion for UWB Radar". 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2017), Singapore, Singapore, Nov. 2017.

Y. Akiyama and S. Kidera, "Acceleration for RPM-Based Three-Dimensional Imaging for 140GHz-Band Millimeter Wave Radar", 2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2017), Phuket, Thailand, Oct., 2017.

M. Setsu and S. Kidera, "Multi-path Exploitation Method Using Doppler Based Signal Recognition for UWB Through-the-wall Radar", International Conference on Space, Aeronautical and Navigation Electronics (ICSANE) 2016, Taipei, Taiwan, November, 2016. (Young Scientist Award 受賞)

S. Kidera, Y. Sasaki, S. Fang, T. Kirimoto, K. Saho and T. Sato "Accuracy Enhanced RPM Method Using Doppler Based Range Points Clustering for 140GHz Band UWB Radar," 2016 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2016), Okinawa, Japan, Oct., 2016. (Invited)

A. Moro, F. Shang, S. Kidera and T. Kirimoto, "Noise Robust Time of Arrival Estimation Method Using Hierarchical Bayesian Based Compressed Sensing Algorithm", 2016 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2016), Okinawa, Japan, Oct., 2016.

F. Shang, S. Kidera and T. Kirimoto, "Multiple Arcs Based Image Extrapolation Method for Millimeter Wave UWB Radar," 2016 International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband (ICUBW 2016), Nanjing, China, Oct., 2016.

Y. Sasaki, F. Shang, S. Kidera and T. Kirimoto, "Accurate 3-dimensional Imaging Method by Iterative Multi-static RPM with Range Points Clustering for 140 GHz UWB Radar", International Conference on Space, Aeronautical and Navigation Electronics (ICSANE) 2015, Bangkok, Thailand,

November, 2015.

M. Noto, F. Shang, S. Kidera and T. Kirimoto, "Super-Resolution Time of Arrival Estimation Using Random Resampling in Compressed Sensing", International Conference on Space, Aeronautical and Navigation Electronics (ICSANE) 2015, Bangkok, Thailand, November, 2015.

F. Shang, S. Kidera and T. Kirimoto, "Ellipsoid fitting based imaging extrapolation algorithm for 140GHz-band multistatic radar", International Conference on Space, Aeronautical and Navigation Electronics (ICSANE) 2015, Bangkok, Thailand, November, 2015.

Y. Sasaki, S. Kidera and T. Kirimoto, "Accurate 3-D Imaging Method Based on Range Points Migration for 140GHz-band Radar", 2015 IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband (ICUWB2015), Montreal, Canada, 4-7 Oct., 2015.

A. Yamaryo, S. Kidera and T. Kirimoto, "3-dimensional Image Expansion Method by Incorporating RPM Imaging and Full Polarimetric Data for UWB Short Range Radar", 2015 IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband (ICUWB2015), Montreal, Canada, 4-7 Oct., 2015.

S. Kidera, C. Gao, T. Taniguchi, T. Kirimoto, "ELLIPSE BASED IMAGE EXTRAPOLATION METHOD WITH RPM IMAGING FOR THROUGH-THE-WALL UWB RADAR," 2015 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2015, Milan, Italy, July, 2015.

薛 雅文, 木寺 正平, "壁透過 UWB レーダのためのカーネルドップラ速度推定法による高時間分解能速度ベクトル推定法" 電子情報通信学会 総合大会, B-2-39, 東京, Mar. 2018.

秋山 繕輝, 木寺 正平, "UWB 人体検出レーダのためのマルチスタティック RPM 法の高精度化" 電子情報通信学会 総合大会, B-2-40, 東京, Mar. 2018.

林 拓海, 木寺 正平, "超時間分解能ドップラ速度推定法と CS フィルタを統合したレーダ立体画像化法" 電子情報通信学会 総合大会, BS-1-8, 東京, Mar. 2018.

薛 雅文, 木寺 正平, "UWB 壁透過レーダのためのガウスカーネル密度推定に基づく超分解能ドップラ速度推定法" 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, B-2-8, 東京都大学, Sep. 2017.

薛 雅文, 木寺 正平, "壁透過 UWB レーダのためのドップラ速度に基づく二回散乱波識別を用いた RPM 法の高精度化" 電子情報通信学会 総合大会, B-1-151, 名古屋, Mar. 2017.

秋山 繕輝, 木寺 正平, "140GHz 帯近距離マルチレーダのための評価関数近似を用いた RPM 法の高速化" 電子情報通信学会 総合大会, B-2-56, 名古屋, Mar. 2017.

佐々木 優太, 尚 方, 木寺 正平, 桐本 哲郎, 佐保賢志, 佐藤 亨, "140GHz 帯近距離レーダのためのドップラに基づく距離クラスタリングを用いた RPM 法の改良", 電子情報通信学会 総合大会, B-2-31, 九州大学, Mar. 2016.

能戸優匠, 尚 方, 木寺正平, 桐本哲郎, "位相シフトサンプリング補正を用いた圧縮センシングによる到来時間推定の高精度化", 電子情報通信学会 総合大会, B-2-45, 九州大学, Mar. 2016.

② 茂呂 彰, 尚 方, 木寺正平, 桐本哲郎, "階層ベイズモデルに基づく圧縮センシングを用いた高分解能到来時間推定法" 電子情報通信学会 総合大会, B-2-46, 九州大学, Mar. 2016.

② 木寺 正平, "超広帯域近距離レーダのための高精度立体画像領域拡大法" 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, AS-1-3, 東北大学, Sep. 2015. (招待講演)

③ 佐々木 優太, 尚 方, 木寺 正平, 桐本 哲郎, "140GHz 帯近距離レーダのための距離点クラスタリングによるマルチスタティック RPM 法の高速・高精度化" 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, B-2-23, 東北大学, Sep. 2015.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称: レーダ装置、目標形状推定方法及びプログラム

発明者: 佐々木優太, 木寺正平

権利者:

種類:

番号: 特願 2016-023620

出願年月日:

国内外の別: 国内

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.radar.ee.uec.ac.jp/>

<http://www.ems.cei.uec.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

桐本哲郎 (Kirimoto Tetsuo)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授, 研究者番号: 10364142

(2) 研究分担者

木寺正平 (Kidera Shouhei)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授, 研究者番号: 00549701