

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760364

研究課題名(和文) 自律移動型ロボットのための準遠方領域・超波長分解能レーダセンサの研究

研究課題名(英文) Research for quasi-far field and super-resolution radar imaging method for autonomous mobile robot

研究代表者

木寺 正平 (KIDERA, SHOUHEI)

電気通信大学・情報理工学(系)研究科・助教

研究者番号：00549701

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、災害現場等を想定した自律型ロボットの周囲環境計測のための、超広帯域(UWB)電磁波を用いた準遠方領域(10～100波長域と定義)レーダ技術を開発する。報告者は現在まで、超波長分解能・影領域画像化性能を有するレーダ技術を独自に発展させてきた。しかし、同技術は近傍界領域(10波長以内)を想定しているため、準遠方領域では画像再現性の狭小化により、目標形状認識が困難となる。本研究では同問題に対し、楕円体群補間・多重散乱波による画像化拡大・マルチスタティックモデルによる移動目標推定・偏波解析に基づく画像領域拡大等に基づく手法を提案し、従来技術に対する優位性を数値計算等により示した。

研究成果の概要(英文)：This research project aims at developing the quasi-far field and super-resolution imaging techniques for UWB radar. The UWB radar is promising for innovative measurement technique for rescue or resource exploration autonomous robots, where the optical sensor cannot be applied. While we have developed the original super-resolution and shadow region imaging method, this method faces the difficulty for target recognition in the case that an insufficient aperture size is obtained, where the conventional methods including our methods suffers from an insufficient imaging region. To solve the above problem, we have developed several novel approaches, based on the ellipse fitting method on data space, image expansion method using multiple scattering signal, moving target imaging method using multistatic observation model, image expansion scheme exploiting full polarimetric data, and their validations have been achieved through the numerical simulations.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 計測工学

キーワード：レーダ信号処理 立体画像化 超分解能画像化 多重散乱波 壁透過レーダ マイクロ波

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・工学的需要は高い。代表的な三次元距離センサである TOF (Time Of Flight) カメラ(赤外線パルス)は、毎秒 30 フレーム程度の距離画像化を実現するが、環境光に対する誤差感度が高く、また 2~3m 程度の計測範囲で推定誤差は 10cm 程度まで劣化する。一方、超音波距離計測は分解能が高く、計測機器も安価なため、近距離センサとして有用である。しかし、高周波領域の強度減衰・距離精度の熱環境・気圧依存性等の問題点を有し、偏波の利用が不可である。

これに対し、UWB 信号(500MHz~10GHz)の周波数帯域:2002 年以来、米国 FCC 等の各国で認可)を用いたレーダ技術は、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、その測距性能(数 mm)は、遠方領域でも保持される(表 1 参照)。このため、各種ロボットの三次元センサに有用であり、その応用・実践研究は、欧米各国で急速に発展している。しかし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】等の点上記応用の要求性能を満たす技術は確立されていない。

上記問題に対し、報告者らは【超波長分解能】・【実時間処理性能】・【多重散乱波による画像再現域拡大】を実現する複数の手法を、独自に提案してきた。しかし上記手法は、画像化探索領域を近傍界(数波長近傍:数十 cm 程度)に限定している。一般のレーダ計測では、目標存在領域が遠方になるほど、画像再現域は狭小化する。このため、目標形状同定に必要な画像化領域を確保するためには、広範な観測領域(開口面積)が必要となる。しかし、特に救助ロボット等においては、火災や障害物等のために行動(観測)範囲が制限され、目標認識が困難となると予測される。

2. 研究の目的

本研究課題では、狭小な観測領域で準遠方領域(数十波長:数 m 程度)の目標認識を実現する革新的レーダ技術を開発し、従来レーダ技術の本質的な弱点を克服させる。具体的には、報告者が独自に開発してきた【超波長分解能画像化法(RPM法)・多重散乱波による画像域拡大法】に、偏波やマルチスタティック計測等を統合させ、従来性能(分解能・画像再現域)を超える目標認識レーダ技術を開発する。

3. 研究の方法

本研究目的を実現させるため、報告者が確

立した画像化手法を中軸技術として、「楕円体群近似に基づく外挿補間」・「多重散乱波による画像化領域拡大」・「マルチスタティック計測による移動目標形状・位置同時推定」・「偏波情報を用いた画像領域拡大及び形状識別」・「透過性を利用した壁透過画像化法」等を検討する。以下にその概要を示す。

回転楕円体群による外挿補間

観測領域が制限される状況下で有意な目標形状を再現するため、まず目標境界の外挿補間法を導入する。本課題では、目標形状を回転楕円体の集合(人体目標を想定)と近似し、従来手法(RPM:Range Points Migration法)で与えられる高精度目標点群を用いて、目標を楕円体群で外挿補間する。同補間の最適化は、実空間のみではなく、適切な空間上で等価処理を適用し、安定性と精度を保持させる。

多重散乱環境を用いた画像再現域拡大

室内環境(壁等が存在)では、各素子で多重散乱波が観測される(図 1)。虚像の要因となる多重散乱波は、従来では除去対象となっていた。しかし、同散乱波を壁反対側(鏡像位置)にある仮想素子からの放射波とみなし、等価的に開口面積を増大させることで画像再現範囲の拡大が可能である。既に報告者は多重散乱波を用いた高速画像域拡大技術を開発している(図 2)。同技術は目標モデル化及び周囲環境の先見情報が不要であるため、本課題の設定条件に適する。壁面や床で構成される室内での多重散乱波を利用し、準遠方領域かつ狭小な実開口面積でも、広範な目標画像再現域を確保する手法を開発する。更に検討した楕円外挿法についても多重散乱波を利用した手法を考案する。

マルチスタティック計測による移動目標形状・位置同時推定

RPM法は静止目標を仮定している。移動目標計測に拡張するために、瞬時に複数のデータを取得するため、マルチスタティックモデル(一点送信、多点受信)を導入する。同モデルは、異なる位置での散乱点情報を瞬時に取得できるため、移動目標推定に有効である。次に得られた受信データから RPM法により目標境界を推定し、各時刻のイメージを追跡することにより移動量と目標形状・位置を同時かつ高精度に推定する手法を開発する。

RPM法の高速度化及び偏波情報を用いた画像領域拡大

RPM法は、複雑・複数の目標に対応することができるが、最適化処理が必要である。度最適化精度は探索変数(到来方向等)の離散化幅に依存し、特に比較的遠方の 3 次元問題では、同精度を保持するためには、膨大な計算量が必要となり、精度と計算量の間にトレードオフが存在する。RPM法のアルゴリズム

を改良し、同問題を本質的に解決する。

また同 RPM 法を水平・垂直方向の偏波データ(full polarimetric data)に対して適用し、単一偏波では再現できなかった領域を再現し、画像化領域を拡大させるとともに、その散乱行列解析により特徴量を抽出する手法を検討する。

回転楕円体群による外挿補間

本課題では、まず目標形状を近似的に複数楕円体の集合とみなし、限られた推定境界点から楕円体による目標外挿補間を行う手法を提案した。同手法では、雑音環境下におけるデータ空間の補間誤差が、実空間上の補間誤差に対して著しく低いことを発見し、データ空間上に写像された変形楕円体に対してデータを整合させることで、安定性及び精度を飛躍的に改善させた。

更に、複数目標に対応するために、実空間での RPM 法による推定像のクラスタリングを導入した。RPM 法は複数の目標に対して高精度に目標形状を推定する。またデータ空間上の距離点と実空間上の RPM 法による推定点の間には一対一対応が成立する。このため、実空間上でクラスタリングされた推定点を基に、データ空間上でも複数楕円体目標に対するクラスタリングが可能となる。一般にデータ空間上での距離分布は、実空間に比べて複雑となるためにクラスタリングが容易ではない、この問題を RPM 法の特徴を利用して解決した。

数値計算による性能評価を以下に示す。実空間上へ写像された像は、データ及び画像化に関する誤差を含んでおり、再現領域が狭小な状況では、その僅かな誤差が大きな外挿誤差となる。一方、データ空間上での補間は、データの誤差のみが補間精度に影響するため、補間誤差が軽減される。同成果は、従来レーダでの画像化制限を改善するものであり、複数の物体に対しても高精度に補間可能であることから、従来技術に対する複数のアドバンテージを有する。これに関連した研究業績として、学術論文 1 件、国際会議 2 件、国内会議 2 件がある。

多重散乱環境を用いた画像再現域拡大

既に二回散乱波を用いた影領域イメージング法を提案している。しかし同手法は、二重散乱波の距離微分を用いており、同微分処理は干渉及び不規則雑音に対する誤差感度が高く、目標形状が複雑な場合または雑音が無視できない環境下では画像化精度が著しく劣化するという問題がある。

同問題を解決するため、同距離点群の大局的性質を利用した影領域画像化法を提案した。まず、RPM法を一回散乱距離点群に適用し、

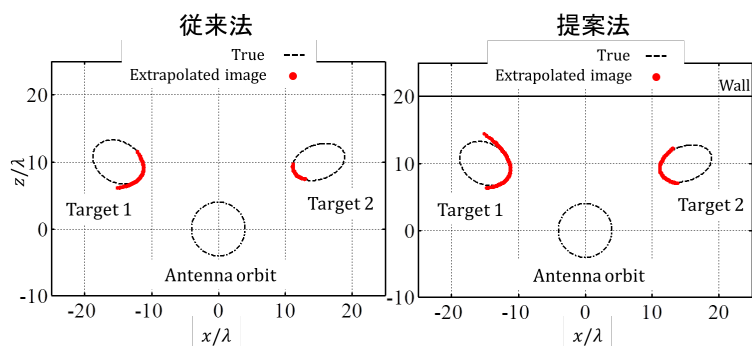


図 1 . 直接散乱波による楕円外挿結果 (左) 及び直接散乱波と二回散乱波を用いた楕円外挿結果 (右)

同目標推定点を一回散乱位置の候補点とする。二回散乱距離点群に対応する一回散乱位置を候補点群の交点の集積度を評価することで決定する。これは RPM 法の原理を二重散乱波に応用したものであり、距離点群の大局的情報を抽出して、影領域をイメージングするため、雑音・干渉に対しても画像化精度を保持できる。数値計算により精度を評価し有効性を示した。同成果は、学術論文 1 件、国際会議 2 件、国内会議 2 件の業績を伴う。

また、二回散乱波を用いた楕円外挿法に拡張する検討も実施した。従来の直接散乱波を用いる方法では、再現領域が著しく制限されるため、楕円外挿精度は雑音に対し感度が高かったが、提案法である二回散乱波を用いることで、再現領域を拡大し、同外挿精度を飛躍的に向上させた。

具体的には、楕円外挿精度を高めるため、壁と目標間で生じる二重散乱波の距離情報を利用する。ここで、二重散乱波はある素子の鏡像位置を送信、実位置を受信とした場合の直接散乱波と等価であり、パスタティック観測となる。同モデルに RPM 法を拡張することで、二回散乱波に対する目標画像化が可能となる。直接散乱波及び二回散乱波による推定目標境界点をクラスタ化し、同クラスタをマージすることで両散乱波のデータを合成し、かつデータ空間で外挿を行うことで雑音・干渉に対する推定精度劣化を軽減させる。

図 1 左に直接散乱波のみによる外挿結果及び同図右に二回散乱波を統合した外挿結果を示す。信号対雑音比 $S/N=30\text{dB}$ とする。同図より二重散乱波を用いることで、外挿領域を高精度に拡大することが確認できる。同手法は国内学会及び国際会議で各 1 件ずつ発表済みであり、IEICE Trans. Electron. に Brief Paper として採録が決定している。

マルチスタティック計測による移動目標形状・位置同時推定

移動目標計測に対応するため、マルチスタティック観測 (一点送信、多点受信) モデル

を用いた画像化手法を提案した．本手法では特に複数目標における干渉抑圧を実現するため，RPM法のイメージを用いて目標をクラスタリングし，また目標境界点と距離点が一対一対応することに着目して，異なるクラスタのイメージに対応する距離点を干渉ポイントから除去する方法を導入する．また，特に回転運動の推定精度を向上させるため，目標境界上の法線ベクトルを評価関数に導入する．これはRPM法の目標上の各点の法線ベクトルが空間差分等を用いることなく直接的に計算できるという特徴を活かしたものである．

幾何光学近似に基づく実際の測定環境を模擬した数値計算により，運動および形状位置の推定精度は約百分の一波長を保持すること示した．同手法は2件の国際会議で論文賞を受賞する他，IEICEで一件の学術論文の掲載が決定する等，当該分野で高い評価を得ている．

RPM法の高速化及び偏波情報を用いた画像領域拡大

3 - で述べる通り，従来のRPM法の精度は探索変数（到来方向等）の離散化幅に依存し，特に比較的遠方の3次元問題では，同精度を保持するためには，膨大な計算量が必要となり，精度と計算量の間トレードオフが存在する．同問題を本質的に改善するため，球の交点分布の集積度に関する評価値をRPM法に導入し，高速性と精度を保持する手法を開発した．具体的には，3つの球の交点自体に集積度を評価する評価値を与え，その交点群の中から散乱中心位置として適切な点を抽出する．これにより，探索変数の離散化や探索範囲等の問題が解消され，計算時間は解析領域に依存せず，従来のトレードオフを本質的に改善した．

数値計算に基づく評価により，従来法で確保可能な精度を実現するためには，同計算時間が4.5時間程度必要となるのに対し，提案法では同精度を確保するのに必要な処理時間は，270秒程度に抑えられることを示した．本手法は従来RPM法に存在する計算量と再現精度のトレードオフを本質的に解決し，その処理速度を約40倍程度高速化するなど，特に遠方領域の立体計測に非常に有用である．同成果はIEEE GRS Letterに採録が決定され，また，国際会議1件，国内会議1件で発表を行った．

更に送受信で偏波を切り替えることによって得られる多偏波データに上記の高速化RPM法を適用し，その性能について調査した．具体的には，x方向及びy方向での直線偏波を送受信で切り替えて得られる多偏波(full polarimetric)データから距離点を抽出し，各距離点にRPM法を適用する．数値計算では，部

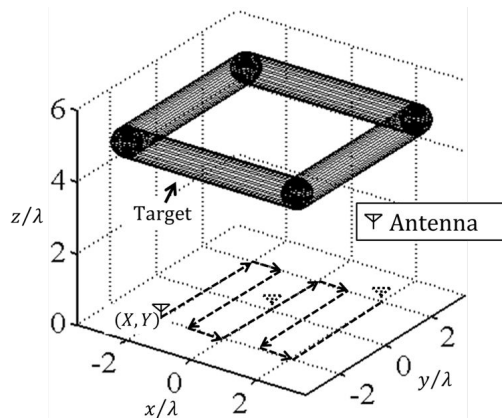


図2．観測モデル

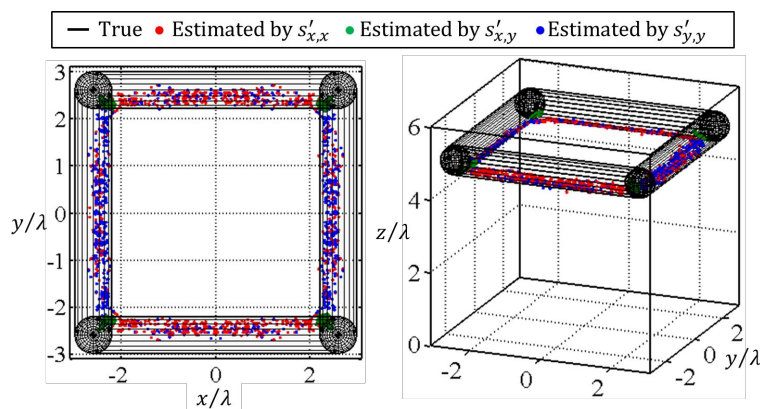


図3．各偏波データにRPM法を適用した3次元立体像

分的に各偏波の散乱特性が顕著となる立体目標を想定した．図2に示す観測モデルを想定する．無指向性送受信素子を $z = 0$ の平面上で走査する．x方向及びy方向の直線偏波を送受信側で切り替え，合計4種類の偏波データを得る．受信信号の生成にはFDTD(Finite Difference Time Domain)法を用い， $S=N = 30\text{dB}$ とした．アンテナ素子は， $-2.5 \leq x \leq 2.5$ および $-2.5 \leq y \leq 2.5$ の範囲を走査する．図3に各偏波データに対するRPM法による推定像を示す．同図より，xx偏波からの推定点は，x軸方向の円柱状，yy偏波からの推定点は，y軸方向の円柱上に多数分布することが分かる．これより，各偏波が散乱中心付近の目標形状に依存し，再現できる目標領域が異なることが確認出来る．また，目標の四隅では，xy偏波からの推定点が分布している．これは，同部分の形状が偏波変換特性を有しており，クロス偏波による散乱が卓越することに起因する．本研究成果は，多偏波データが近距離立体イメージングにおいて，特に画像領域拡大や局所的な形状情報を与える特徴を有していることを示したものであり，形状認識等において有用なデータであることを例証している．同成果は国内学会で発表しており，今後，偏波行列解析等を導入することで

更に詳細な形状情報を抽出することを検討している。

研究成果のまとめ

本課題では、救助活動等のロボットの立体センサとして、超広帯域電磁波による画像化技術のための信号・画像化処理法を提案してきた。特に開口面積が制限される中で、目標の画像再現領域を増大させることはレーダ画像化における本質的な課題であり、一般に難しい課題である。本プロジェクトでは、同課題に対し、楕円体外挿法、多重散乱波及び偏波や壁透過性などの多角的なアプローチを提案し、その有効性を主に数値計算により示してきた。これらの成果は、ロボットセンサ等において、上記の問題点を本質的に改善できる可能性があり、引き続きこれらの手法の更なる発展を予定する。特に室内環境等を模擬した実験システムを構築し、これらの手法の原理検証を行うとともに、実際上の問題に対しての各種の改良法も検討していきたい。

4. 研究成果

〔雑誌論文〕(計8件)

- [1] Ayumi Yamaro, Shouhei Kidera and Tetsuo Kirimoto, "Accurate Target Extrapolation Method Exploiting Double Scattered Range Points for UWB radar", *IEICE Trans. Electron. (Brief paper)*, E97-C, 2014 (in press).
- [2] Shouhei Kidera and Tetsuo Kirimoto, "Efficient 3-Dimensional Imaging Method Based on Enhanced Range Points Migration for UWB Radars", *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 10, no. 5, pp. 1104-1108, Sep., 2013.
- [3] Ryo Yamaguchi, Shouhei Kidera and Tetsuo Kirimoto, "Accurate Imaging Method for Moving Target with Arbitrary Shape for Multi-static UWB Radar", *IEICE Trans. Commun.*, vol. E96-B, no. 7, pp. 2014-2023, Jul., 2013.
- [4]. Shouhei Kidera and Tetsuo Kirimoto, "Robust and Accurate Image Expansion Algorithm Based on Double Scattered Range Points Migration for UWB Imaging Radars", *IEICE Trans. Commun.*, Vol. E96-B, No. 4, pp.1061-1069, Apr., 2013.
- [5].Shouhei Kidera, Hiroyuki Yamada and Tetsuo Kirimoto, "Accurate 3-dimensional Imaging Method Based on Extended RPM for Rotating Target Model", *IEICE Trans. Commun.* vol. E95-B, no. 10, pp. 3279-3289, Oct., 2012.
- [6]Yoriaki Abe, Shouhei Kidera and Tetsuo Kirimoto, "Accurate Image Expansion

Method Using Range Points Based Ellipse Fitting for UWB Imaging Radar", *IEICE Trans. Commun.*, vol. E95-B, no. 7, pp. 2424-2432, July, 2012.

- [7]. Yoriaki Abe, Shouhei Kidera, Tetsuo Kirimoto, "Accurate and Omni-directional UWB Radar Imaging Algorithm with RPM Method Extended to Curvilinear Scanning Model", *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 9, No. 1, pp. 144-148, Jan., 2012.
- [8]. Ken Akune, Shouhei Kidera, Tetsuo Kirimoto, "Acceleration for Shadow Region Imaging Algorithm with Multiple Scattered Waves for UWB Radars", *IEICE Trans. Commun. (Letter)*, vol. E94-B, No. 9, pp.2696-2699, Sep., 2011

〔学会発表〕(計19件)

- [1] 山領 歩, 木寺 正平, 桐本 哲郎, "UWBレーダのための多偏波RPM法による立体イメージング法" 電子情報通信学会総合大会, B-2-24, 新潟大学, Mar. 2014.
- [2] 谷口 貴耶, 木寺 正平, 桐本 哲郎, "壁透過レーダのための高精度楕円目標外挿法" 電子情報通信学会 総合大会, B-2-34, 新潟大学, Mar. 2014.
- [3] Ayumi Yamaro, Shouhei Kidera, Tetsuo Kirimoto, "Extended Imaging Method Using Range Points Based Ellipse Extrapolation with Double Scattered Waves for UWB radars," 2013 Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR), Tsukuba, Japan, September, 2013. (査読有)
- [4] 山領 歩, 木寺 正平, 桐本 哲郎, "UWBレーダのための多重散乱環境を利用した目標境界外挿法" 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, B-2-29, 福岡工業大学, Sep. 2013.
- [5] 山口 亮, 木寺 正平, 桐本 哲郎, "マルチスタティックUWBレーダのための移動目標立体像再構成法" 電子情報通信学会 総合大会, B-2-43, 岐阜大学, Mar. 2013.
- [6] Ryo Yamaguchi, Shouhei Kidera and Tetsuo Kirimoto, "NON-PARAMETRIC IMAGING METHOD FOR MULTIPLE MOVING TARGETS WITH MULTI-STATIC UWB RADAR", International Conference on Space, Aeronautical and Navigation Electronics 2012, International Symposium on Remote Sensing 2012, Korea, October, 2012. (査読有)
- [7] Shouhei Kidera, Tetsuo Kirimoto, "Efficient 3-Dimensional Imaging Algorithm Using PI Extraction Based RPM for Quasi-Far Field UWB Radars", 2012 IEEE International Conference on

Ultra-Wideband ICUWB 2012, Syracuse, New York, U.S.A, 17-20 Sep., 2012. (査読有)

[8] Ryo Yamaguchi, Shouhei Kidera and Tetsuo Kirimoto, "Nonparametric and Accurate Imaging Algorithm for a Target with Arbitrary Motion Using Multi-static UWB Radar", 2012 IEEE International Conference on Ultra-Wideband ICUWB 2012, U.S.A, Sep., 2012. (査読有)

[9] 木寺 正平, 桐本 哲郎, "交点導出型 RPM 法による UWB レーダ高速立体像推定法" 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, B-2-24, 富山大学, Sep. 2012.

[10] 山口 亮, 木寺 正平, 桐本 哲郎, "マルチスタティック UWB レーダを用いた複数移動目標イメーシング法" 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, B-2-23, 富山大学, Sep. 2012.

[11] Shouhei Kidera and Tetsuo Kirimoto, "Experimental Study on Accurate 3-Dimensional Imaging Method Based on Extended RPM for Rotating Target", 2012 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, Germany, 22-27 Jul., 2012. (査読有)

[12] 阿部 頼明, 木寺 正平, 桐本 哲郎, "UWB レーダのための距離点群を用いた高精度楕円体境界外挿法" 電子情報通信学会 総合大会, B-2-25, 岡山大学, Mar. 2012.

[13] 木寺正平 桐本 哲郎 "超広帯域信号を用いた近距離レーダイメーシング,"第4回横断型基幹科学技術研究団体連合(横幹連合)コンファレンス, 北陸先端技術大学, 石川県 Nov. 2011

[14] Shouhei Kidera and Tetsuo Kirimoto, "Accurate Shadow Region Imaging Algorithm Based on Doubly Scattered Range Points Migration for UWB Radars", International Symposium on Antennas and Propagation, ISAP 2011, Jeju, Korea, 25-28th, Oct., 2011. (査読有)

[15] Ryo Yamaguchi, Shouhei Kidera and Tetsuo Kirimoto, "Nonparametric UWB Radar Imaging Algorithm for Moving Target Using Multi-static RPM Approach", Asia-Pacific International Conference on Synthetic Aperture Radar (AP SAR) 2011, Seoul, Korea, 26-30th, Sep., 2011. (査読有)

[16] 山口 亮, 木寺 正平, 桐本 哲郎, "マルチスタティック RPM 法を用いた移動目標レーダイメーシング" 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, B-2-14, 北海道大学, Sep. 2011.

[17] Shouhei Kidera and Tetsuo Kirimoto, "Accurate 3-dimensional Image Expansion Algorithm Using Range Derivative of Double

Scattered Signals for UWB Radars", The XXX General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI), Istanbul, Turkey, 13-20 Aug, 2011. (査読有)

[18] Yoriaki Abe, Shouhei Kidera and Tetsuo Kirimoto, "Accurate Shadow Region Imaging Algorithm Using Ellipse Extrapolation Based on Distorted Hyperbola Fitting for UWB Radars", The XXX General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI), Istanbul, Turkey, 13-20 Aug, 2011. (査読有)

[19] Shouhei Kidera and Tetsuo Kirimoto, "Fast and Accurate Shadow Region Imaging Algorithm using Range Derivatives of Doubly Scattered Signals for UWB Radars", 2011 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2011, Sendai, Japan, 1-5 Aug, 2011. (査読有)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木寺 正平 (KIDERA SHOUHEI)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・助教

研究者番号 : 00549701