

機関番号：12612

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009～2010年度

課題番号：21860036

研究課題名（和文）超波長解像度 UWB レーダ技術の先駆的研究

研究課題名（英文）Pioneering research for super-resolution UWB radar techniques

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

研究成果の概要（和文）：

UWB レーダシステムは、光学計測技術を超える測距性能（数 mm）を有し、粉塵環境・暗闇・誘電体内部等での画像化が可能である。このため、特に災害救助、資源探査等の各種ロボットセンサや非侵襲人体計測に有用である。本研究課題では、同応用に適する高度レーダ技術を開発する。特に超波長分解能を保持する RPM(Range Points Migration)法及び多重散乱波を積極的に利用した画像化技術の性能を高め、各種用途のための実践研究を行う。

研究成果の概要（英文）：

UWB radar system has higher range resolution at the order of mm, which cannot be accomplished by the optical techniques, and is suitable for the sensors in dusty air, darkness or internal region of dielectric objects. Therefore, this is promising as high grade sensors to, in particular, rescue, or resource exploration robots or non-invasive human inspection. In order to be suitable for various radar applications, this projects focuses on the further performance enhancement for the super-resolution RPM algorithm and the shadow region imaging method positively employing the multiple scattered signals.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,080,000	324,000	1,404,000
2010 年度	980,000	294,000	1,274,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,060,000	618,000	2,678,000

研究分野：レーダ信号処理，リモートセンシング，UWBセンサ

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：超広帯域レーダ，超波長精度，影領域イメージング，多重散乱波

1. 研究開始当初の背景

超広帯域 (Ultra-Wideband: UWB) レーダシステムは、レーザ計測技術を超える測距性能（数 cm～数 mm）を有する。また光学・超音波における不可視領域（暗闇・粉塵環境・誘電体内部等）での画像化が可能であり、ロボット・車両等の空間精密計測、人体内部画像化による医療応用等、幅広い応用に有望である。同レーダ技術に対して、申請者は従来の画像処理性能を上回る各種の画像化手法を

提案してきた。特に多重散乱波を積極的に用いる技術は、従来では不可視領域となる目標側面を再現し、災害現場等での限れた観測領域においても、画像化領域を拡大することで、目標形状認識精度を飛躍的に向上させることができる。しかし、同手法は受信信号の多重積分を含むため、膨大な計算量を必要とするという問題点を有する。また、超波長分解能を実現する手法として R P M (Range Points Migration) を提案しているが、同手

法は直線走査及び平面走査のみに特化しており、ロボット等への実用には、任意曲線上走査に基づく全方向レーダを開発する必要がある。また、従来の誘電体内部画像化技術では、誘電体外部境界を単純形状のみに制限しており、多様な誘電体形状への対応が困難であるという問題点を有する。

2. 研究の目的

本課題では、UWBレーダ技術の更なる高機能化を目的とし、高度信号処理法を多角的に導入しながら、各種応用のための要素技術を確認する。具体的には、超波長分解能イメージングを実現するRPM法をロボットセンサに対応させるため、全方位探索・任意曲線上走査へと拡張する。また、多重散乱波イメージングの高速化・高精度化も検討する。更にRPM法を、任意境界面を持つ誘電体内部イメージングへ拡張し、各種用途へ実現可能なイメージングレーダのための要素技術を確認する。

3. 研究の方法

1) 多重散乱波を利用した不可視領域画像化の高速・高精度化

従来の多重散乱波イメージング法は、受信信号をアンテナ位置及び空間上の各点において積分する必要があるため、特に3次元問題では各ボクセル毎で五重積分が必要になり、3次元画像を得るのに数十時間以上の計算時間が必要である。これに対し、まず積分領域の効果的な削減を検討する。これには既に開発済みのRPM法を導入することが有用である。多重散乱波イメージングには、単散乱波による通常のSAR画像が必要であるが、これをRPM法での画像に置換する。SAR画像はボクセル毎に定義されるが、RPM法の推定像は、抽出された有意な距離点に対応する目標点群で表現されるため、画像化精度を保持したまま、処理量を飛躍的に削減することができる。と予測する。

また、別アプローチとして、二重散乱波の距離微分を利用する手法を考案する。既に単散乱波イメージングにおいては、到来角度と距離波面の微分との解析関係が成立することが分かっており、これを二重散乱波にも拡張することが可能と予測する。同微分を利用することによって、多重積分を利用しない全く異なる影領域イメージングアルゴリズムが実現される可能性があると考えられる。特にこれはRPM法の拡張とも対応するため、SARと比較して極めて高精度な境界推定も実現すると予測する。

2) RPM法の任意曲線上走査、全方向探索イメージングへの拡張

既に超波長精度イメージング技術として、RPM法を提案しているが、同手法は2次元問題では直線走査に特化しており、また画像化探索範囲を制限している。しかし、実際のロボット等では、アンテナは微分不可能な点を含む任意の曲線上で走査することが必須であり、また全方向の目標をイメージングする必要がある。本研究では、まずRPMを任意の曲線上探索に拡張する。更に、探索方向制限を解除することによって生じる虚像除去・実像再生法も検討する。本手法の特性評価には、数値計算を利用する。電磁界解析手法であるFDTD (Finite Difference Time Domain) 法を利用することで、多重散乱波や形状による散乱波形変化等を全て含む受信信号を生成可能であり、現実モデルに最も近い解析が可能である。

3) 誘電体目標のための高解像度内部センシング画像化

まず、RPM法を誘電体内部イメージングへ拡張する。従来の誘電体内部イメージングでは、平面構造や円等の単純な形状のみを有する誘電体境界を想定していた。これは、誘電体内部の伝搬歪みを計算する際に同境界上の勾配情報を正確に計算する必要があるため、通常では画像を微分する必要があるため、雑音に対して感度が高いことに起因する。同問題に対して、RPM法の特質を利用した手法を導入する。RPM法は誘電体境界面上の点を高精度に推定するのみならず、同境界面上の法線ベクトルを直接的に推定することができる。これは、RPM法が、卓越した散乱波は目標境界面と直交する条件を満たす時に観測されるという条件を利用するためである。同法線ベクトルにより、誘電体境界内の伝搬歪みを高精度に計算することが可能となり、またRPMの原理を誘電体内部目標境界推定に拡張することで、超波長精度の内部イメージングを実現する手法を開発する。

4. 研究成果

1) 多重散乱波を積極的に利用した見通し外イメージングの高速・高精度化について検討した。多重散乱波は複数次散乱中心の情報を持っているため、画像領域拡大に極めて有用である。以前に二重散乱波の合成開口処理により、画像再現範囲を飛躍的に増大させることに成功したが、同手法は受信信号の多重積分に基づくため、特に3次元問題では、数十時間程度の膨大な計算量が必要となる。これに対し、本課題では、まずRPM法を初期画像に用いることで、同多重積分を縮退させることに成功した。またRPM法にはSARで

生じるサイドローブに起因する虚像等がないため、同画像精度も向上させることが可能となった。

また別アプローチとして、二重散乱波の距離波面の素子に関する偏微分と2つの散乱中心への到来角度の余弦の和が一致することに着目し、全く異なる影領域イメージングを考案した。同手法では、RPM法の特徴を最大限に利用し、二重散乱波から抽出される距離情報のみを用いて、高速に目標境界点群へ写像させる。これにより、目標境界点群を1/100波長規模の精度で再現できるだけでなく、約10秒程度で3次元の画像を得ることができるため、従来の問題点を飛躍的に改善することが可能である。同手法は高速処理が可能であるため、再帰的画像領域最適化等への拡張も可能であり、多重散乱波イメージングに関する可能性を劇的に高めることから、極めて重要な研究成果である。

2) 十分な目標画像化領域を確保するため、

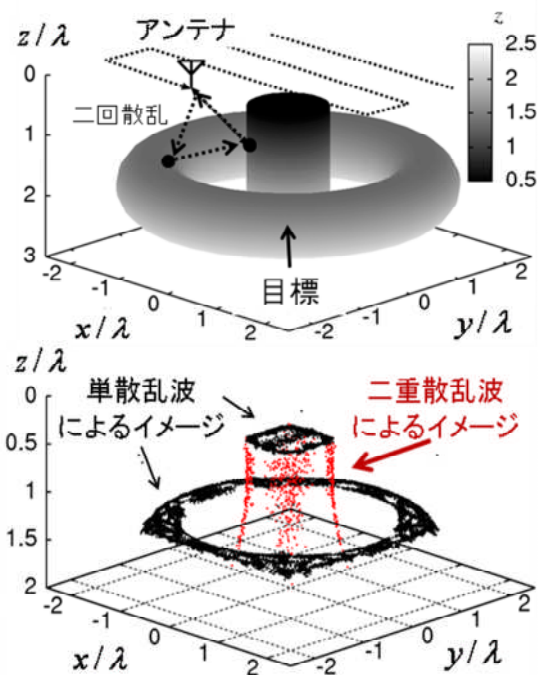


図1：真の目標境界（上）
提案手法による画像化例（下）

既存の超波長分解能画像化手法(RPM法)を、任意のアンテナ走査軌道に拡張させ、目標画像化領域を十分に確保するとともに、同拡張によって生じる虚像抑圧技術を開発した。特に虚像の生成は、本拡張で本質的な問題となり、一般に解決は困難であるが、本研究は虚像と実像の空間的に局在性の違いに着目し、到来方向推定範囲を制限することで、虚像を

取り除くと同時に同虚像を実像へと写像させることに成功した。これにより、ロボット等の多種多様な素子移動を想定したアプリケーションへの応用が可能になり、同レーダ技術の実用性を著しく高めると考えられる。

3) 高精度誘電体内部イメージングを実現するため、RPM法の特徴を生かしたアルゴリズムを開発した。同手法ではまず、第一到来波に対応する距離点群を用いて、RPMにより誘電体境界を推定する。同推定点ではアンテナとの位置関係により法線ベクトルが直接的に計算可能である。同法線ベクトルと比較誘電率からスネルの法則により伝搬パスを決定する。但し、誘電体境界上の点で位相停留となる入射点を探索する必要がある。このため、RPM法での各点と第二到来波以降の距離点群を用いて、内部境界を表現する目標候補点群を描く。更に同点群を、アンテナ位置を変えることによって、空間干渉計の原理により目標境界面を定める。既にFDTDを用いた数値計算により、同手法がランダムな境界面を持つ誘電体境界内部の目標形状を1/100波長の精度で再現可能であることを確認している。また、計算時間は数秒程度であり、SAR等の他の内部イメージング技術に対して、高速性・精度の点で本質的なアドバンテージを有する。

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6件)

- ① Ken Akune, Shouhei Kidera, Tetsuo Kirimoto, "Acceleration for Shadow Region Imaging Algorithm with Multiple Scattered Waves for UWB Radars", IEICE Trans. Commun. vol. E94-B, 2011 (in press).
- ② Shouhei Kidera, Takuya Sakamoto and Toru Sato, "Extended Imaging Algorithm Based on Aperture Synthesis with Double Scattered Waves for UWB Radars", IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, (in press).
- ③ Shouhei Kidera and Tetsuo Kirimoto, "Multi-Static UWB Radar Approach Based on Aperture Synthesis of Double Scattered Waves for Shadow Region Imaging", IEICE Trans. Electronics, vol. E94-C, 2011 (in press).
- ④ Shouhei Kidera, Takuya Sakamoto and Toru Sato, "Super-Resolution UWB Radar Imaging Algorithm Based on Extended Capon with Reference Signal Optimization", IEEE

Trans. Antennas & Propagation, vol. 59, no. 5, pp. 1606--1615, May, 2011.

⑤ Shouhei Kidera, Takuya Sakamoto and Toru Sato, "Accurate UWB Radar 3-D Imaging Algorithm for Complex Boundary without Range Points Connections", IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, vol. 48, no. 4, pp. 1993--2004, Apr., 2010.

⑥ Shouhei Kidera, Takuya Sakamoto and Toru Sato, "High-Resolution 3-D Imaging Algorithm with an Envelope of Modified Spheres for UWB Through-the-Wall Radars", IEEE Trans. Antennas & Propagation, vol. 57, no. 11, pp. 3520--3529, Nov., 2009.

[学会発表] (計 14 件)

① Shouhei Kidera and Tetsuo Kirimoto, "Super-resolution UWB Radar Imaging Algorithm based on Frequency Domain Interferometer," International Workshop on Modern Science and Technology 2010 (IWMST 2010), Kitami, Japan, 4-5, Sep, 2010.

② Ken Akune, Shouhei Kidera, Tetsuo Kirimoto, "Acceleration for Shadow Region Imaging Algorithm with Multiple Scattered Waves for UWB Radars," International Workshop on Modern Science and Technology 2010 (IWMST 2010), Kitami, Japan, 4-5, Sep, 2010.

③ Yoriaki Abe, Shouhei Kidera, Tetsuo Kirimoto, "Accurate UWB Radar Imaging Algorithm Using Curvilinear Scanning of Antenna," International Workshop on Modern Science and Technology 2010 (IWMST 2010), Kitami, Japan, 4-5, Sep, 2010.

④ Shouhei Kidera, Takuya Sakamoto and Toru Sato, "Experimental Study on Super-Resolution 3-D Imaging Algorithm Based on Extended Capon with Reference Signal Optimization for UWB Radars", URSI Commission B, EMTS, International Symposium on Electromagnetic Theory, EMTS 2010, Berlin, Germany, 16-19, August, 2010.

⑤ Shouhei Kidera, "Shadow Region Imaging Algorithm Using Array Antenna Based on Aperture Synthesis of Multiple Scattered Waves for UWB Radars", 2010 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2010, Honolulu, Hawaii, USA, 25-30 July, 2010.

⑥ Shouhei Kidera, Takuya Sakamoto and Toru Sato, "Super-Resolution UWB Radar Imaging Algorithm based on Extended Capon with Reference Signal Optimization", European Conference on Antennas and Propagation 2010, EuCAP2010, Barcelona, Spain, 12-16 April, 2010.

⑦ Shouhei Kidera, Takuya Sakamoto and Toru Sato, "Experimental Study of Shadow Region Imaging Algorithm with Multiple Scattered Waves for UWB Radars", Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS), Moscow Technical University of Radio Engineering, Electronics and Automatics, Moscow, Russia, 18-21, Aug., 2009.

⑧ Shouhei Kidera, Takuya Sakamoto and Toru Sato, "Shadow Region Imaging Algorithm with Aperture Synthesis of Multiple Scattered Waves for UWB Pulse Radars," The 2009 IEEE International Symposium on Antenna and Propagation and USNC/URSI National Radio Science meeting, Charleston, South Carolina, USA, 1-5 Jun, 2009.

⑨ 阿久根 憲, 木寺 正平, 桐本 哲郎, "誘電体内部目標に対する高速・高精度 UWB レーダイメージング法" 電子情報通信学会 総合大会, C-1-32, 東京都市大学, 14-17, Mar. 2011.

⑩ 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目標境界楕円外挿法" 電子情報通信学会 総合大会, C-1-38, 東京都市大学, 14-17, Mar. 2011.

⑪ 木寺 正平, 桐本 哲郎, "UWB レーダのための二重散乱波の距離微分を用いた立体影領域・高速イメージング法" 電子情報通信学会 総合大会, B-1-49, 東京都市大学, 14-17, Mar. 2011.

⑫ 木寺正平, "二重散乱波の距離点群を用いた高速・高精度影領域レーダイメージング法" 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, C-1-22, 大阪府立大学, 14-17, Sep. 2010.

⑬ 阿部頼明, 木寺正平, 桐本哲郎, "曲線走査軌道を用いた高精度 UWB レーダイメージング法" 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, C-1-21 大阪府立大学, 14-17, Sep. 2010.

⑭ 木寺正平, "アレイアンテナを用いた多重散乱波 SAR に基づく UWB レーダイメージング法" 電子情報通信学会 総合大会, C-1-8, 東北大学, 16-19, Mar. 2010.

⑬阿久根憲, 木寺正平, 桐本哲郎, “多重散乱波を用いた UWB レーダ影領域イメージング法の高速化” 電子情報通信学会 総合大会, B-2-49, 東北大学, 16-19, Mar. 2010.

⑭木寺正平, 阪本卓也, 佐藤 亨, “参照波形最適化に基づく拡張 Capon 法を用いた高解像度 UWB レーダイメージング法” 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, C-1-8, 新潟大学, 15-18, Sep. 2009.

〔その他〕

ホームページ等

2011 年 8 月 The XXX URSI General Assembly Scientific Symposium 2011, Young Scientist Award (内定)

2010 年 8 月 18 日 URSI Commission B, 20th International Symposium on Electromagnetic Theory (EMTS) 2010, Young Scientist Award

2010 年 3 月 17 日 電子情報通信学会 学術奨励賞

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