

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2016

課題番号：26709030

研究課題名(和文)超広帯域電磁波による超分解能誘電体内部イメージング法の研究

研究課題名(英文)Research for super-resolution microwave imaging method for ultra-wideband radar system

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・准教授

研究者番号：00549701

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 17,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、マイクロ波を用いた非破壊計測および医療画像診断及び治療のための、高精度内部画像化法を構築するため、申請者が提唱する画像化法(RPM法)を誘電体場内部画像化に拡張し、従来の合成開口処理を超える精度を実現させた。具体的には、コンクリート内部の金属目標を、波長の1/100程度の再現精度で形状を再現した。またRPM法を生体固有の不均質・分散性媒質に拡張し、がん細胞等の形状を高精度に推定し、更にマイクロ波アブレーション治療における実時間モニタリング法を提案し、既存手法の性能を大きく改善させることを、実際の乳房MRI画像をベースにしたFDTDによる数値電磁界解析データにより検証した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we have developed an accurate and high resolution imaging method for microwave ultrawideband imaging applications for non-destructive testing issue and bio-medical diagnosis or treatment especially for breast cancer. In particular, we extended the range points migration method for object buried in dielectric media, e.g. concrete, and achieved a high accuracy for shape reconstruction, compared with that obtained by synthetic aperture based method. In addition, we developed the advanced RPM method corresponding to heterogeneous and dispersive media assumed in breast by using FDTD based wavefront extraction. Furthermore, microwave monitoring scheme of microwave based ablation treatment for cancer, we have developed the real-time, accurate and noise-robust imaging algorithm based on time difference of flight (TDOA) approach. We have demonstrated the effectiveness of our proposed method using the numerical simulation and experimental data.

研究分野：計測工学

キーワード：超広帯域信号 レーダ信号処理 マイクロ波イメージング 非破壊検査 乳がん検査 Range Points Migration法 マイクロ波アブレーション

1. 研究開始当初の背景

マイクロ波帯のUWBレーダは、特に医療画像診断において、従来の内部計測技術における問題点を解決する技術として注目を集めている。特に、癌細胞の誘電率・導電率が正常細胞のそれと著しく異なることを利用し、乳癌の早期発見・治療のための画像診断技術に有望である。また同技術は、災害後の水道管・ガス管破裂探知や老朽化した道路や橋の亀裂腐食探知等の災害予防・復旧技術としても有用であり、社会的需要も極めて高い。しかし現時点では、「空間分解能」・「位置決定精度」・「処理速度」等において、上記応用の要求性能を満たす技術は確立されておらず、革新的なレーダ内部センシング技術が待望されている。

2. 研究の目的

本研究では、申請者が独自に提案する「周波数干渉計を用いた波長限界を超える超分解能画像化法(RPM法:Range Points Migration法)」と「多重散乱波を用いた不可視領域イメージング原理」を内部画像化へ拡張し、領域積分方程式に基づく逆散乱問題解析等と融合させることで、特に多層誘電体構造において「1/10波長分解能」及び「1/100波長精度」を実現する内部レーダセンサ技術を開発する。また、偏波や散乱周波数特性等の特徴量から、対象(癌細胞等)の電磁気的・化学的情報量を抽出する手法も提案し、革新的な誘電体内部計測技術を確立させる。

3. 研究の方法

申請者は既に空間計測を対象として、以下の画像化手法を構築している。

(1)RPM(Range Points Migration)法: RPM法は目標境界面における反射点と距離点(観測距離と素子位置のセット)が一対一に対応することに着目し、同逆問題を目標境界面抽出へと転化させ、かつUWB信号の超広帯域性に着目した周波数干渉計により、波長限界を超える超分解能(波長の1/10の分解能・1/100波長の位置決定精度)画像化を実現する。

本研究では()の手法を適切に内部画像化技術へ拡張する。特にRPM法(境界抽出に特化)の「距離点群積分」原理を内部画像化に導入することで、波長限界を超える内部の誘電体層構造の画像化を実現し、SARやビームフォーマ法に比して、空間分解能・精度(SARの分解能:1/2波長程度)を本質的に超えることができると考える。また、生体・壁等の誘電体内部計測においては、多層構造の誘電率分布が想定されるが、先述の通り、従来の領域積分方程式に基づく逆問題解析法では、特に層境界部分の不連続性に起因する精度劣化が問題となる。これに対し、RPM法及びRPM-HD法は誘電体境界構造(及び内部一層目の構造)を高分解能(1/10波長程度)かつ高精度(1/100波長程度)に推定可能であり、同境界位置情報を領域積分方程式の境界条件

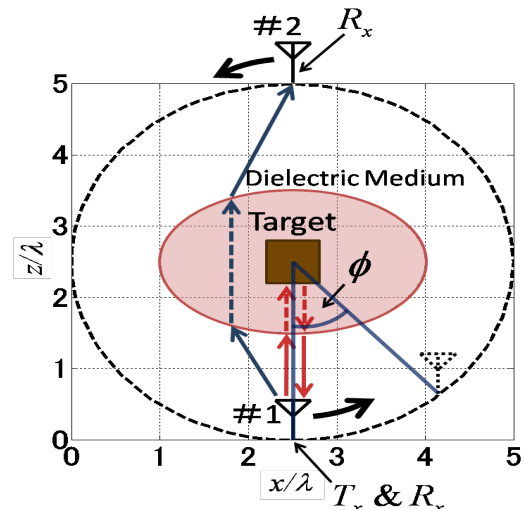


図1. 観測モデル

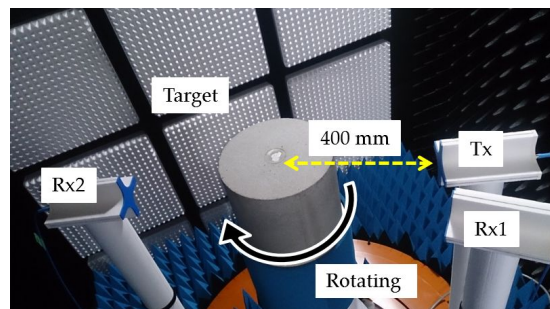


図2. 実験外観

等に組み入れることで、複数層構造を超波長分解能で推定し、かつ誘電率分布推定精度及び収束速度を大きく向上することが可能と考える。

4. 研究成果

**(1)コンクリート内部非破壊検査を想定した高分解能内部画像化の確立**

以下の課題毎に、その成果の詳細を述べる。

**RPM法とFDTD法を用いた高精度誘電率推定法の提案と実験的検証**

既にRPM法を均質誘電体内部目標の境界推定に拡張しているが、誘電体内の平均誘電率を既知としている。本課題では、RPM法の推定点群及び同法線ベクトルを用いた伝搬経路推定に基づく高速な誘電率推定法を提案する。図1に観測モデルを示す。一般に素子で観測される信号には透過波の他に、外部誘電体境界を回り込む表面波(クリーピング波)が受信される。外部誘電体形状によっては、同表面波が透過伝搬遅延推定に深刻な影響を及ぼす場合がある。

同問題に対応するため、表面波抑圧手法を導入する。具体的には、RPM法により高精度に推定される外部誘電体境界と同法線ベクトルを用いることによって、各素子で受信される表面波伝搬経路を求める。同伝搬経路で推定される伝搬遅延量を観測伝搬遅延量から除去することで、誘電体透過に起因する伝搬遅延量のみを抽出し、透過伝搬遅延量を計算する。本手法では更に、初期推定誘電率と推

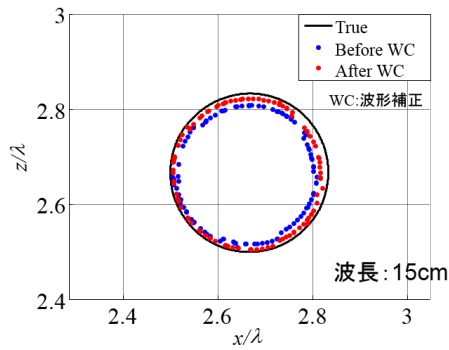


図3．内部金属中再現結果

定誘電体境界を用いて FDTD 法により受信データを再生成し，同波形との相関処理によって同距離誤差を補正し，同補正量より誘電率を再計算する。

#### 実験による特性評価

実験図2に実験外観を示す．垂直に設置したダイポールアンテナを用いる．外部誘電体はセメント，内部目標はアルミである．両方の形状は円柱であり，高さは25cmである．VNA(Vector Network Analyzer)により，50MHzから5.55GHzまでを10MHz刻みで周波数掃引する．実効中心波長は15cmであり，距離分解能は7.5cmである．素子を固定し，目標を回転させることで等価的に円周上での素子走査を実現する．回転中心から素子までの距離は40cmである．外部誘電体誘電率真値を9.07とする．波形補正前の推定誘電率は8.56(推定誤差5.3%)，波形補正後の推定誘電率は8.84(推定誤差2.5%)であり，波形補正が有効であることが実験でも示された．図3に波形補正前後で推定された誘電率を用いてRPM-HD法により推定された内部境界を示す．同図より提案法が高精度な内部目標推定像を実現していることが確認できる．波形補正前後の目標境界の推定誤差RMS値はそれぞれ $1.98 \times 10^{-2}$ 波長， $0.97 \times 10^{-2}$ 波長であり，極めて高精度な推定が可能であることが確認できた．これは当該分野では実施者が調べた限り報告されていなかったレベルの再現精度であり，本研究成果の重要な一部である．

#### 不均質媒質に対するRPM法とFDTD法を併用した高精度誘電率推定法

従来の不均質誘電体媒質の誘電率推定法として，Born近似に基づいて領域積分方程式を再帰的に解く手法(BIM: Born Iterative Method)が各種提案されている．しかし，BIM法では，被積分電界を真空と仮定した入射電界によって近似(Born近似)するため，真空と誘電体の誘電率のコントラストが大きい場合には，推定値が発散しその精度が大きく劣化する問題がある．また，空間分解能を保持するには最適化変数の次元を増やす必要があり，計算時間が膨大となるほか，誘電率分布が不連続となる領域では精度が保持できないという問題を有している．

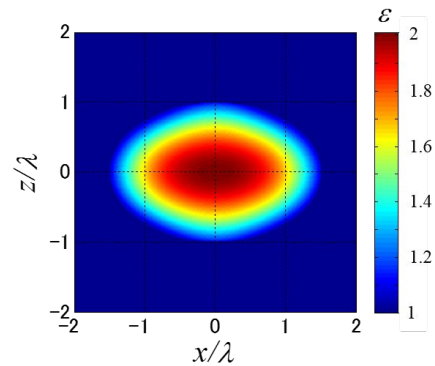


図4．真の誘電率分布

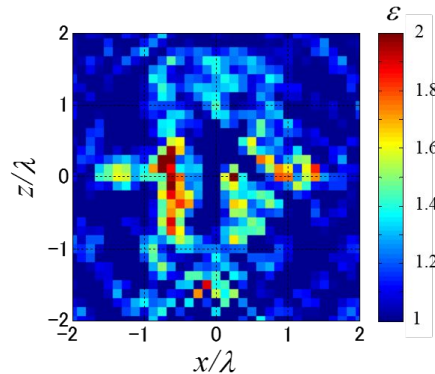


図5．BIM法による推定結果

上記問

題を改善するため，本稿では，RPM法による誘電体境界推定法とレイトレーシング及びFDTD法を用いた誘電率分布推定法を提案する．本手法では，誘電率分布を基底関数の線形混合で表現することで次元数を減らし，収束速度を速める．また，多次元最適化問題に対して効率的に最適解に到達可能な粒子群最適化(PSO: Particle Swarm Optimization)を導入する．透過伝搬遅延推定には，始めにレイトレーシングを導入し，最適解に近付けた後，FDTD法に切り替え，効率的かつ高精度な誘電率推定を目指す．

図4に観測モデルを示す．誘電体内部は非分散損失性不均質媒質であるとする．無指向性送受信素子を円周上に等間隔に配置する．各送信素子からの信号を全ての素子で受信するマルチスタティックモデルを構成する．送信素子をTx，受信素子位置をRxとする．図4に本手法で推定する真の誘電率分布を仮定する．導電率は $0.001\text{S/m}$ で一定とする，RPM法による誘電体境界推定では送受信素子36個を等間隔に配置する．

図5に従来のBIM法(領域積分方程式を再帰的に解く手法)による推定結果を示す．BIMの入射電界の更新にはFDTD法を用いており，更新回数は10回である．Xeon 2.8GHz，メモリ6.0GBを用いた場合，計算時間は約25時間40分である．同図より境界及び誘電率分布が正確に推定できないことがわかる．図6にレイトレーシングとFDTD法を併用した場合(提案法)の誘電率推定分布を示す．この場合レイトレーシングの更新回数31回

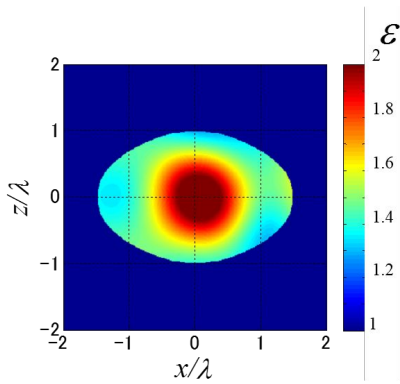


図6．提案法による推定結果

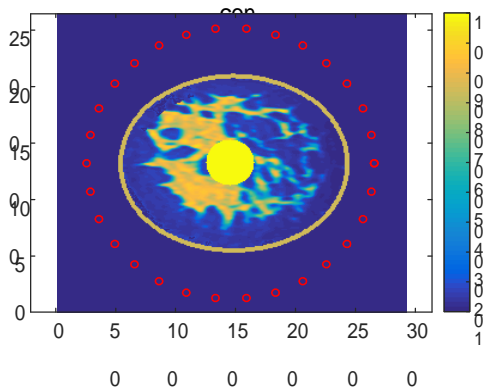


図7．乳房媒質とがん細胞の配置

で計算時間は約 33 分，FDTD 法の更新回数 11 回で計算時間は約 8 時間 33 分であり，合計計算時間は約 9 時間 6 分である．同図より，真の誘電率分布にほぼ近い分布を再現することが可能である．また，境界の不連続性を考慮するため，境界領域での精度劣化を抑えることができる．本手法は，提案する多層誘電体構造推定法と組み合わせることで更に一般的な誘電体構造推定問題へと拡張することが可能である．

本研究成果は誘電率分布が連続及び不連続的に変化するような生体等の誘電率推定にとって有用である．RPM 法は申請者が独自に構築した手法であり，この特徴を積極的に利用した誘電率分布推定法は，本研究が初めてである．同性能は従来手法に比べて，計算速度・再現精度・不連続性の考慮等の複数の点において本質的なアドバンテージを有しており，当該分野で注目を集める手法であると確信する．

## (2) マイクロ波による乳癌検知及び治療のための画像化法

不均質媒質における RPM 法を用いた超分解能画像化法

まず RPM 法を不均質・分散性媒質へ拡張した．癌細胞は特徴的な形状（針葉状，突起状形態）を有していることが報告されており，同形状を正確に抽出することはがん細胞検知精度の向上に直接的に寄与すると考えられる．しかし，一般に背景媒質が不均質・分

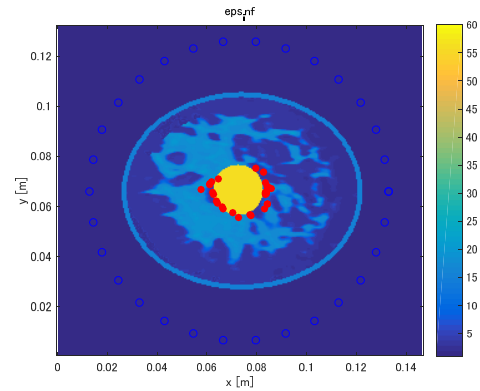


図8：提案法による推定結果

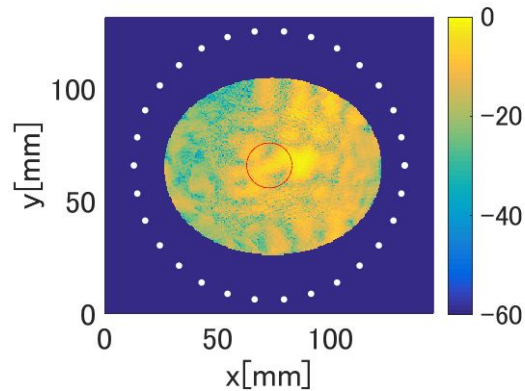


図9：ビームフォーミングによる画像化例

散性媒質における画像化は非常に難しい．これは背景媒質の誘電特性に応じて伝搬モデルを決定する必要があるためであり，今までにこれに対する有効な手段は考案されていない．同問題に対して，背景媒質が既知であるもしくはデータベース化された典型的なモデルに近いという条件のもとで，申請者が独自に提案する RPM 法を用いて目標形状を高精度に推定する方法を検討する．

送受信一体型のモノスタティック計測においては，位相停留となる伝播経路は往復で同じ経路をとることがわかっているため，同遅延時間の半値は，送信点から放射された電磁界分布の等位相面が目標境界に到達した時間に相当することがわかる．この性質に着目し，高精度な電磁界解析法 FDTD 法を用いて到達時間における電界分布を計算し，同電界分布の等位相面を抽出する．ひとつの等位相面のみでは，反射点がどこにあるかを決定することができないため，複数の送受信位置での遅延時間についても同様の処理により電界分布から等位相面を求める．同等位相面から本来の反射点を抽出するために，RPM 法の原理を導入する．RPM 法は候補となる曲線から，適切な点を抽出するために，他の候補曲線（等位相面）との交点の集積度を評価することで，統計的に優位な点を抽出することができる．これにより，各送受信位置において得られる反射点をその位置と紐付けをしながら，がん細胞境界を表現し，形状推

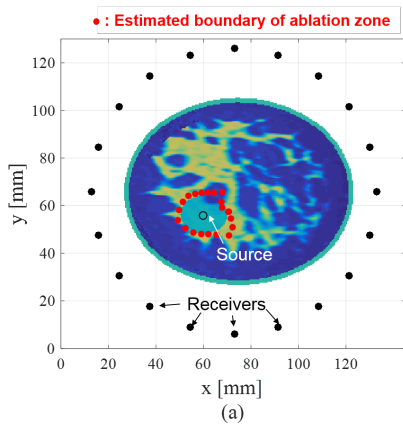


図 10 : RPM 法による画像化

定を可能とする。

数値計算による性能評価について述べる。中心周波数 2.45GHz, 帯域幅 2.7GHz ガウス変調パルスを送信波形とする。2次元問題, TE 波 (Transverse Electric) を仮定する。図 1 に想定する乳房の導電率分布 (MRI 画像から作成) を示す。図 7 に示すように MRI ベースの画像により決定される誘電特性を用いた精緻な乳房モデル (Class 3) を仮定する。Class 3 は乳腺が発達した乳房であり, 不均質性が強く非常に画像化難しい例の典型である。各組織の複素誘電率の周波数特性は, 単極 Debye モデルを仮定した分散性 FDTD 法を用いて散乱データを取得する。図 8 右に FDTD 法による到来は面抽出に基づく RPM 法を用いたがん細胞形状推定例を示す。同図から再現された反射点は真のがん細胞境界付近に推定され, 同形状・サイズを正確に把握できることがわかる。一方, 図 9 は従来のビームフォーミングによる手法での再現結果である。同手法では背景媒質が完全に既知であると仮定し, 処理をしている。同図より, 背景クラッタが完全に抑圧され, かつ背景媒質の完全な情報を与えているにもかかわらず, 同画像化による形状推定は非常に困難であることがわかる。同結果より提案手法が形状推定及び画像分解能, 精度の面において, 従来の性能を大きく上回ることがわかる。具体的には目標境界推定精度: 1/100 波長 (1mm) 及び 同処理時間: 約 5 分 を実現している。

マイクロ波アブレーションモニタリングのためのリアルタイムイメージング法の開発

生体組織は導電率が高いため, マイクロ波のエネルギーを吸収し, 熱に変換される。がん細胞は特に導電率が高いため, マイクロ波を照射することで対象領域を焼灼し, がん細胞を死滅させることができる。これは Microwave ablation という治療法であり, 最小限の侵襲施術でがん細胞を確実に除去できるため, 有望ながん治療法として注目されている。一方で, がん細胞以外の正常細胞を焼灼しないため, 同領域の範囲を逐次モニ

タリングして, エネルギー量を調整しなければならない。誘電体の誘電特性 (誘電率・導電率) は温度依存性を有しており, それを推定することにより, 生体内の温度上昇率や, またマイクロ波焼灼の空間的広がりや温度分布も推定することができる。具体的には, 組織の温度が 100 度近くに達すると, その誘電率及び導電率は本来の 60~70% 程度に減少することが報告されている。

本課題では, 相互相関による各周波数での位相回転量, 即ち到来時間差 (TDOA: Time Difference of Arrival) を基に焼灼範囲を推定する手法を新たに開発した。

具体的には, アブレーション前の時間応答とアブレーション後の時間応答の相互相関関数のピーク値より, RF プロブから各受信センサへの到来時間の差 (TDOF) を推定する。同遅延時間差から, ソースから発生した電磁波がアブレーション境界に到達した時間を算出できる。アブレーション領域は一般に乳腺組織であるので, 同組織の誘電率から伝搬速度がわかる。このため, 同伝搬速度と前後の誘電率の変化量を温度でモニタリングすることで, 高精度にアブレーション境界を推定することができる。

図 10 に領域推定例を示す。アブレーション領域の温度は 99 度とし, その際の誘電率変化は元の 60% 程度として文献値を参考に決定する。同図より, 境界を正確に抽出できることがわかる。同誤差の RMSE は, SNR0dB という劣悪な雑音環境下でも約 2mm 程度を保持し, ロバスト性と精度を両立することを確認した。また計算時間は通常の PC で 0.1 秒以内であり, リアルタイム性も十分に確保できることが確認された。

本成果は, 当初の研究計画にないものであるが, 報告者の信号処理に関する知見と共同研究先のアブレーションに関する知見が適切に融合した成果であり, 国際会議では非常に高い評価を受けている (Best paper Finalist に選出)。また同手法は非常に実用性が高く, マイクロ波によるアブレーションと同モニタリング技術を大きく前進させる成果であると確信する。

アブレーションの温度が低い場合にはコントラストが小さく推定が発散する可能性がある。これに対しては, 導電率の違いによる振幅比を用いることで同発散を抑える手法を検討する。更に周波数分散性を考慮した Green 関数に基づく波形補正フィルタ等を用いることで, 現状の推定精度を改善する手法も検討することも今後の課題である。

## 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 2 件)

Toshiki Manaka, Shouhei Kidera and Tetsuo Kirimoto, "Experimental Study on Embedded Object Imaging Method with Range Point

Suppression of Creeping Wave for UWB Radars", IEICE Trans. Electron Vol.E99-C, No.1, pp.-, Jan. 2016., (Brief paper) (in press).

Takuya Niimi, Shouhei Kidera and Tetsuo Kirimoto, "Dielectric Constant and Boundary Extraction Method for Double-Layered Dielectric Object for UWB Radars", IEICE Trans. Electron. Vol.E98-C, No.12, pp.-, Dec. 2015.

〔学会発表〕(計 14 件)

Shouhei Kidera, Luz Maria Neira, Barry Van Veen and Susan C. Hagness

"TDOA-Based Microwave Imaging Algorithm for Real-Time Monitoring of Microwave Ablation," 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), パリ(フランス), 2017 年 3 月 25 日

Risako Tanaka and Shouhei Kidera,

"Double-layered Boundary Extraction Using Extended Envelope with Multi-static UWB Radars," 2016 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2016), 沖縄コンベンションセンター(沖縄県・宜野湾市), 2016 年 10 月 24 日

Fuki Endo and Shouhei Kidera, "Accuracy Enhanced Beamforming Method Based on Envelope Surface Extraction for Non-contact UWB Breast Cancer Radar," 2016 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2016), 沖縄コンベンションセンター(沖縄県・宜野湾市), 2016 年 10 月 24 日

Shouhei Kidera, "Accurate Boundary Extraction and Dielectric Constant Estimation Method for UWB Internal Imaging Radar", URSI Commission B, International Symposium on Electromagnetic Theory (EMTS 2016), Espoo(Finland), 2016 年 8 月 15 日 (invited)

Yuta Sasaki, Shouhei Kidera and Tetsuo Kirimoto, "Accurate 3-D Imaging Method Based on Range Points Migration for 140GHz-band Radar", 2015 IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband (ICUWB2015), モントリオール(カナダ)2015 年 10 月 5 日

Takuya Niimi, Shouhei Kidera and Tetsuo Kirimoto, "Experimental Study on Dielectric Constant and Boundary Estimation Method for Double-layered Dielectric Object for UWB Radars", 2015 IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband (ICUWB2015), モントリオール(カナダ)2015 年 10 月 5 日

Shouhei Kidera

"SUPER-RESOLUTION AND ACCURATE 3-DIMENSIONAL IMAGING METHOD BY COMBINING EM COMPUTATIONAL ANALYSIS IN SHORT RANGE UWB RADAR," URSI Atrantc Radio Science Conference (AT-RASC 2015)2015, グランカナリア(スペイン)2015 年 5 月 21 日(招待講演)

Shouhei Kidera, Yoshihiro Niwa, Tetsuo Kirimoto, "HIGH-SPEED AND ACCURATE DIELECTRIC CONSTANT ESTIMATION METHOD USING RPM BOUNDARY EXTRACTION AND FDTD BASED ANALYSIS," URSI Atrantc Radio Science Conference (AT-RASC 2015)2015, グランカナリア(スペイン)2015 年 5 月 21 日

Toshiki Manaka, Shouhei Kidera, Tetsuo Kirimoto, "Experimental Study on Permittivity Estimation Method for UWB Internal Imaging Radar," 2014 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2014), カオシюн(台湾)2014 年 12 月 2 日

Takuya Niimi, Shouhei Kidera, Tetsuo Kirimoto, "Accurate Permittivity Estimation Method for Double-layered Dielectric Object for UWB Radars," 2014 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2014), カオシюн(台湾)2014 年 12 月 2 日

則武和輝 木寺正平"マイクロ波マンモグラフィのための FDTD 法による波形歪補正を用いた高精度乳房表面形状推定法", 電子情報通信学会 総合大会, C-2-101, 名城大学(愛知県・名古屋市), 2017 年 3 月 25 日

高橋蹴人, 木寺正平 "マイクロ波非破壊立体イメージングのための交点抽出型拡張 RPM 法", 電子情報通信学会 総合大会, C-2-99, 名城大学(愛知県・名古屋市), 2017 年 3 月 25 日

遠藤芙蓉 木寺正平 "マイクロ波 UWB レーダによる乳癌検知のための Envelope 法と FDTD 法を用いた表面波抑圧法" 電子情報通信学会 総合大会, C-1-10, 九州大学(福岡県, 福岡市), 2016 年 3 月 14 日

田中理紗子, 木寺正平 "マルチスタティック型 UWB レーダによる拡張 Envelope 法を用いた二層誘電体媒質境界推定法" 電子情報通信学会 総合大会, C-1-13, 九州大学(福岡県, 福岡市), 2016 年 3 月 14 日

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

○取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

[http://www.ems.cei.uec.ac.jp/non\\_invasive.html](http://www.ems.cei.uec.ac.jp/non_invasive.html)

メディア掲載:

○2014 年 8 月 4 日 建設通信新聞 "電磁波 インフラ管理に活用"

○2014 年 5 月 21 日 日刊工業新聞 "拓く 30 人(30) 高分解能レーダで立体画像化"

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所・准教授 研究者番号: 00549701