

# 研究終了報告書

## 「超高精度画像化法と多偏波解析による誘電率推定を統合した革新的マイクロ波イメージング法の創出」

研究期間：2017年10月～2021年3月

研究者：木寺 正平

### 1. 研究のねらい

本研究の目的は、マイクロ波、ミリ波、テラヘルツ波等の高周波電磁波センシング技術における、独創的な画像解析アプローチに基づく、高度データ抽出に基づく多様な情報を統合した革新的イメージングシステムの研究基盤を構築することである。申請者が独自に開発し、その有用性が実証されている画像解析法であるRPM(Range Points Migration)法を基盤とし、新たに多偏波エリプソメトリ及び逆散乱解析法に基づく誘電率推定法を導入し、多重散乱波及びドップラ情報等を、スパースモデリングや超分解能信号処理により抽出し、散乱データベース構築と機械学習による識別等と統合することで、全く新しい不可視領域センシングのためのデータ解析手法を確立させる。

具体的には、独自の逆散乱解析法であるRPM法により、従来の合成開口処理やビームフォーミング等のデータ処理法では得られなかった【空間分解能】・【再現精度】を誘電体内部画像化においても実現させ、トモグラフィ法等により対象の電気的特性の空間分布を高分解能かつ高精度に再構成する手法を開発する。更に多重散乱波やドップラ情報などを双方向に統合するデータ処理法を構築することで、対象(コンクリート内空洞・欠陥、粉塵環境下もしくはがれきに埋もれる人体、微細構造表面計測等)の識別精度を飛躍的に向上させる多元的イメージング技術を目指す。

同技術を確立させることにより、「① マイクロ波帯電磁波を利用した交通インフラの大規模非破壊計測(道路・トンネル内部の空洞・亀裂・腐食探知)」、「② 災害現場における不可視領域(粉塵・壁透過型)人体検知」等の社会的需要の高い応用に展開することが可能であり、交通インフラの大規模非破壊検査や災害現場での人体検知等への技術の実用化を促進することで、「安全・安心な社会システムの構築」に大きく貢献することができる。また、③ テラヘルツ波への高分解能画像化においては、RPM法を拡張することで、従来の画像化精度を大幅に超える $\mu\text{m}$ オーダーでの画像再現精度をデータ処理法によって達成させる。更に誘電率推定と統合することができれば、各種の計測を基盤とする研究開発のプロセスの変革をもたらすと確信する。このため、幅広い学術分野において大きなインパクトを与えるのみならず、医療応用や各種の非破壊検査等の計測技術に展開することで社会的・産業的なインパクトを与える基盤技術を創出することをねらいとする。

## 2. 研究成果

### (1)概要

#### ① 「マイクロ波非破壊検査(コンクリート内部亀裂探知)における内部目標識別法」

独自のレーダ画像化法(RPM)とトモグラフィ法であるCSI法を統合し、レーダ画像化法で絞り込まれた目標の存在領域(ROI)を非線形最適化における反復処理において更新させることにより、複素誘電率とROI(目標のサイズ・位置)の両方を高精度に推定させる双方向処理を実現させた。同手法により、数値計算においては、相対誤差10%程度の推定精度を実現させた。更に、実機実験では、厚さ200mmのコンクリート試供体内部の空洞及び水の場所を10mmの位置精度及び相対誤差20%の複素誘電率推定値で実現させた。レーダとトモグラフィの双方向処理は、他に類をみないアプローチであり、またこれを実機実験で実証したのは、本研究が世界で初めてである。

#### ② 「災害現場や自動運転等での近距離レーダによる人体検出」

従来のドップラ速度推定の速度及び時間分解能の制限を解決するWKD法を提案し、またRPM法と双方向処理することで、ドップラ速度と目標推定形状の両方の精度を改善させることを、数値計算及び実機実験等により実証した。更にミリ波レーダを想定し、高周波信号の利点を最大限に生かすため、波数空間(到来角度空間)でのデータ分離法を導入し、レーダ画像⇔ドップラ速度⇔波数(角度)の双方向処理を実現させ、従来の精度・分解能・ノイズ耐性等を格段に上回る方法を確立させた。また、自動車運転時における見通し外環境下の人体と人口構造物からの回折波を機械学習で識別させ、完全な遮蔽状況下で識別率80%を達成させた。同成果は、自動運転における影領域での衝突回避システムセンサとして有用である。

#### ③ 「テラヘルツ波帯での高分解能画像化法」

自動焦点化RPM法を導入し、更に分光情報を導入した画像化法を構築し、その有用性を実機実験により示した。また多層構造を想定した複素誘電率推定法を導入し、圧縮センシング等の超分解能法と併用することで超分解能かつ高精度な多層構造誘電率分布推定法を提案し、数値計算によりその有用性を確認した。

上記の成果は、IEEE等の国際的なトップジャーナルで5件が採録され、トップカンファレンスの論文賞(PIERS、APRASC)を受賞する等、高い評価を得ている。また本課題を基盤としたプロジェクトにより、競争的研究費及び受託研究を複数件獲得しており、今後の更なる進展に向けて顕著な進捗が得られたと評価できる。

(2) 詳細

これまでの研究概要:

研究成果の概要で述べた各課題に対して、以下に詳述する。

① マイクロ波非破壊検査(コンクリート内部亀裂探知)

2018年度までは、レーダ方式(RPM法)で得られるROIをトモグラフィ法的一种であるDBIM法において、ベイズ推定における事前分布として与えることで、空洞や各種目標の複素誘電率推定を改善させることを確認した。一方、DBIM法は高精度推定を実現できるが、計算時間が膨大となり、また実応用を想定した場合に、対象目標以外のアンテナやレーダ装置及びその他の物標もすべて適切な複素誘電率値を入れてモデル化する必要がある、非現実的であることがわかっている。

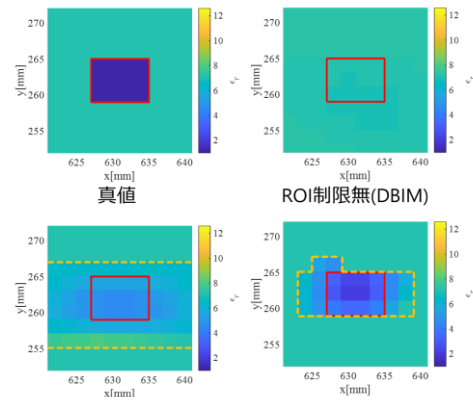


図1: ROI制限及び更新に基づくコンクリート内部空洞領域の複素誘電率再構成結果

これに対して、2019年度ではCSI法と呼ばれる新たなトモグラフィ法を導入した。CSI法は、DBIM法のように高精度な電磁界ソルバーが不要であり、データ方程式と状態方程式と呼ばれる2つのヘルムホルツ型領域積分方程式をコスト関数として、目的関数とROI内の全電界の両方を最適化する方法である。

同手法は、逐次的な電磁界解析が不要であるために高速であり、かつ周囲全ての誘電率値を予め計測する必要がないという実用上の利点を有する。本課題では、CSIにおいてRPM法における初期ROI推定からROIと複素誘電率を交互に更新するアルゴリズムを導入することで、ROI及び複素誘電率値の両方を高精度に推定する手法を確立した(図1)。

また、同手法を空洞や水を入れたコンクリートを用いた実機実験(図2)により検証しており、独自のキャリブレーション法を導入することで、ROIを制限して飛躍的に複素誘電率精度を改善させることを示した(図3)。具体的には10mm程度の

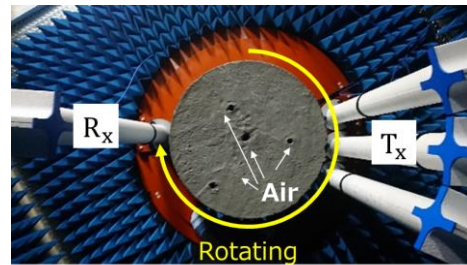


図2: 10mmの空洞を有するコンクリートターゲットにおけるマイクロ波データ取得実験

4つ空洞目標において相対誤差30%程度の再構成精度

を実現した。コンクリート内部ターゲットに対する複素誘電率推定を実験的に確認した研究成果は世

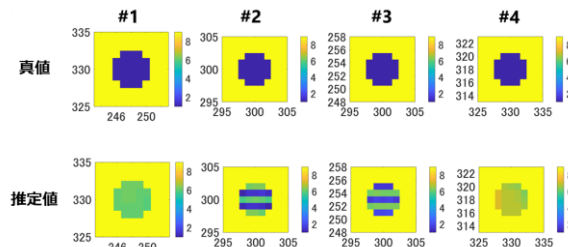
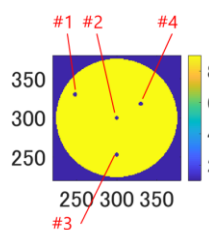


図3: 各空洞における複素誘電率推定結果

界的にも希少であり、同成果は、学術的にも応用展開に

においても非常に重要な進展であると考えます。また、2020 年度では、同研究成果を基盤として、土木研究所の関連研究員や企業との共同研究により、実道路を想定したコンクリート試供体における原理検証実験を実施し、本手法により、対象（空洞・水）の ROI と複素誘電率を一定の精度で推定できることを確認している。

② 災害現場や自動運転における近距離レーダを用いた人体検出技術

災害現場等での視界不良状況もしくは壁の向こう側または瓦礫に埋もれた状況でも生存者を検出するアプローチとして、人体の各部の動きに起因するマイクロドップラを解析すること有用である。一般的なドップラ速度推定手法としてフーリエ変換に基づく手法が挙げられる。しかしながら同手法で十分なドップラ速度分解能を得るためには、高い中心周波数の送信パルスを用いるか、長い観測時間が必要である。一方、壁への到達深度を保つためには、信号の中心周波数を低くする必要がある。また UWB は比帯域幅が広いいため、十分な観測時間を確保しても、反射パルスが距離分解能内に重複しなくなるため、ドップラ周波数分解能は改善しないという問題点がある。2018 年度までに、同問題を解決するため、抽出されたレンジ- $\tau$  ( $\tau$  は slow time) 点をカーネル密度推定により、ドップラ情報に変換する方法、重みつきカーネル密度推定(Weighted Kernel Density estimator: WKD)法を独自に提案し、従来の時間およびドップラ速度分解能を超えるドップラ速度推定を実現させた。

A. WKD 法と RPM 法の双方向処理

更に 2019 年度では、WKD 法と RPM 法の双方向処理によるドップラ速度推定及びレーダ画像の高精度化を検討した。WKD 法は Incoherent な処理に基づき、かつ対象の事前 Tracking 等が不要であり、多数目標が存在する状況でも高精度な速度推定を実現し、かつフーリエ変換等に基づく時間分解能と速度

分解能の不確定性を解消することができる。一方で、WKD 法では、各パルスヒットの距離データ (Range- $\tau$  点)を一括で処理するため、複数目標の応答が混在する場合は、精度が十分でない。同問題を解決するため、独自のレーダ画像化法である RPM 法を導入し、RPM 法の画像より、データ

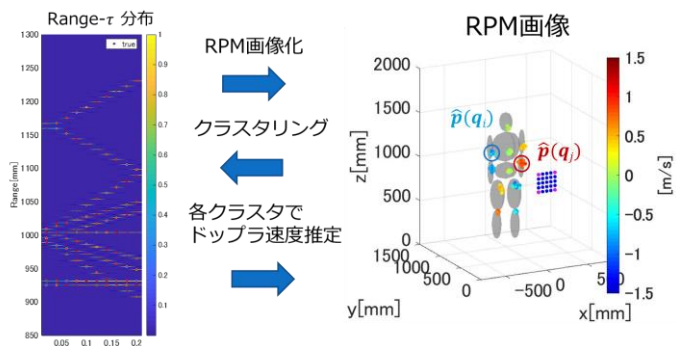


図 4 : RPM 法と WKD 法の双方向処理

を選別して WKD 法で処理することで、同処理精度を改善することを数値計算及び実験により確認した。同手法におけるドップラ速度分解能は、原理上下限はなく、時間分解能は 0.02 sec である。また距離誤差:  $\pm 10\text{mm}$ 、速度誤差  $\pm 0.1\text{m/s}$  に収まる累積確率は 34%から 87%にまで改善し、飛躍的な改善が達成されたことがわかる。またこの誤差基準は、当初のさきがけの達成目標で掲げたマイクロ波帯 ( $-10\text{GHz}$ )のレーダモデルで、位置精度:  $10\text{mm}$ 、形

距離誤差及びドップラ速度推定誤差の条件	従来法 (Wiener + フーリエ)	CS+WKD	CS+WKD $\leftrightarrow$ RPM
range : $\pm 10\text{mm}$ Doppler velocity : $\pm 0.1\text{m/s}$	2.51%	34.5%	87.3%
range : $\pm 10\text{mm}$ Doppler velocity : $\pm 0.2\text{m/s}$	8.0%	60.1%	88.2%
range : $\pm 20\text{mm}$ Doppler velocity : $\pm 0.2\text{m/s}$	15.2%	68.7%	96.6%

表 1 : 簡易人体モデルにおける各手法の距離及び速度推定誤差の評価



状推定精度:10mm ドップラ速度精度: 0.1m/s という数値目標を達成することができた。

### B. 波数空間分離に基づく超分解能画像化法の検討

RPM 法の空間分解能は基本的に距離分解能すなわち周波数帯域幅で決定される。従来の距離分解能を越える手法として圧縮センシングや Capon 法等による超分解能法が提案されているが、信号対雑音比(SNR)が十分高いという条件が必要である。2019 年度では、同問題に対応するため、波数空間分離に基づく超分解能法を導入した。観測素子位置方向にデータをフーリエ変換することで波数空間に変換・分解できる。(これは到来角度方向に分離することと等価) その分解能(角度分解能)は周波数が高い(波長が短い)ほど高く、アレイの開口面積が大きいほど高い。またコヒーレント積分処理のため、低いSNR環境下でも適用可能である。図5に超分解能法の一つである Capon 法と本手法による距離点抽出結果を示す。ただし、送信信号の中心周波数を 20GHz、帯域幅を 200MHz とする。SNR=20dB の場合を想定する。Capon 法では逆フィルタ応答を利用するため、ノイズによる精度劣化が顕著である。一方、提案法では極めて簡易な処理により、各部位の分離ができていることが確認できる。また、計算時間は Capon 法の場合は 1210 秒、提案法の場合では 2 秒となっており、データ数が 3 倍程度に増えたにもかかわらず、計算時間が飛躍的に短縮されている。また同手法の実機実験での検証も実施しており、これを含めた成果が本分野のトップジャーナルである IEEE TGRS に掲載されている。これは当初予測していなかった成果である。

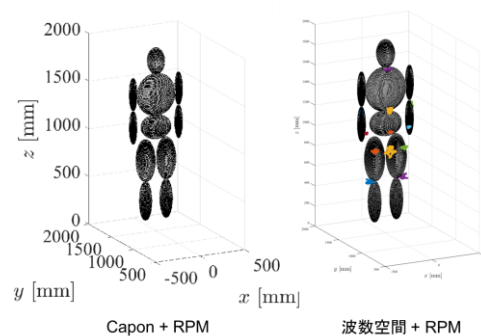


図 5 : Capon 法 (左) と波数空間(右)を用いた RPM 法によるレーダ画像

### C. 見通し外環境下における回折波データの機械学習による人体識別

見通し外環境下における、多重散乱波を用いて人体からのドップラ速度を抽出し、かつ画像領域を拡大することで見通し外における人体識別精度を高めることを想定していた。一方、見通し外環境では必ずしも多重散乱が卓越する状況にあるとは限らないこと、また人体識別には見通し外で伝播する回折波のマイクロドップラを機械学習で識別することが可能であることが実験的にわかってきたため、回折波データの機械学習による識別を検討した。本手法では、いくつかの特徴量を導入し、複素時系列データを非線形識別器 SVM(Support Vector Machine) で学習させた。特に見通し外環境で想定される低 SNR(Signal to Noise Ratio) の状況下で識別性能を改善させる。人は静止する場合でも、呼吸や姿勢制御のため体表面は僅かに変位する。同振動に特徴的な情報を抽出するため、時間及び周波数依存を有する 4 つの特徴量を導入した。

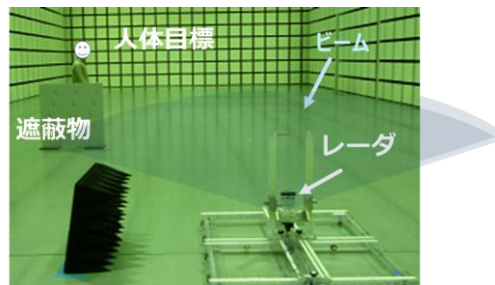


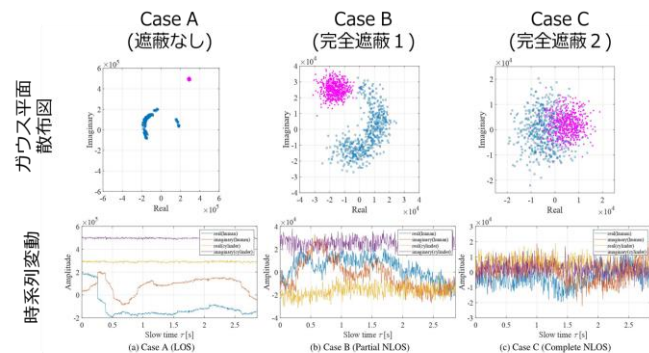
図 6 : 見通し外環境下を想定した実人体からの回折波計測実験

図6に実験における観測モデルを示す。送信信号の中心周波数 24GHz、帯域幅 700MHz の

ミリ波帯 FMCW レーダを用いる。アンテナ水平ビーム幅は± 45 度、垂直ビーム幅は± 6.5 度であり、遮蔽物により完全遮蔽状況となる。遮蔽板は金属板とする。円柱は高さ 30 cm、直径の 20cm の金属であり、人体は身長 170 cm の成人男性である。ターゲットの場所によって A: 遮蔽なし(LOS)、B:部分遮蔽(Partial NLOS)、C:完全遮蔽(Full NLOS) の 3 つケースを調べる。図7に遮蔽なしと完全遮蔽のケースでの各目標が存在する距離における複素時系列データのガウス平面分布、時系列データ及び識別率の結果を示す。データ数は 550 で、遮蔽なしの分布から静止人体においても位相において特徴的な揺らぎが確認できる。これは人間の姿勢制御のためのわずかな変位と考えられる。一方、完全遮蔽の場合は SNR が低いため判別が困難である。また時間構造を有する特徴量を利用することで、遮蔽状況が非常に強い状況でも、生データでは 60%程度であった識別率を 83%程度まで改善させることが可能となった。同成果は、静止人体であっても人口構造物とは異なる特徴量が見通し外環境下においても高い確度で識別可能であることを世界に先駆けて示した成果であり、自動運転等の車載レーダ実応用における重要な貢献である。

### ③ テラヘルツ領域での透過型イメージング法への拡張

一般的な THz 画像化システムは高い方位分解能を得るために送信機に誘電体レンズを使用している。同システムでは、事前に焦点位置の調整が必要であるため、対象の深度情報が未知の場合、空間分解能を保持することは困難である。2018 年度では RPM(RangePoints Migration) 法による自動焦点画像化法を導入し、更に 2019 年度では、同手法の飛躍的な高速化を実現させた。一方、同手法では誘電レンズ中の伝搬経路を逐次計算する必要があるため、立体画像を得るための計算量が膨大となっていた。同問題を解決するため、仮想波源モデルを用いた RPM 法を提案し、精度を保持しながら飛躍的に計算速度を高めた。具体的には、同手法では、距離点に対する散乱中心点(反射点)が、幾何光学的に決定される伝搬経路の軌跡から抽出されるマイグレーション



Case	Method	識別率				SNR [dB]	
		Feature 1 (Raw)	Feature 2 (Time derivative)	Feature 3 (Time shift)	Feature 4 (STFT)	Human	Cylinder
Case A (遮蔽なし)		100.0 %	99.0 %	100.0 %	100.0 %	27.73	35.43
Case B (完全遮蔽 1)		100.0 %	99.0 %	100.0 %	93.0 %	8.35	9.33
Case C (完全遮蔽 2)		60.0 %	64.0 %	83.0 %	81.0 %	1.51	-0.30

図 7：各遮蔽状況における人体と円柱の散乱データ（複素平面上、時系列）及び識別率の評価

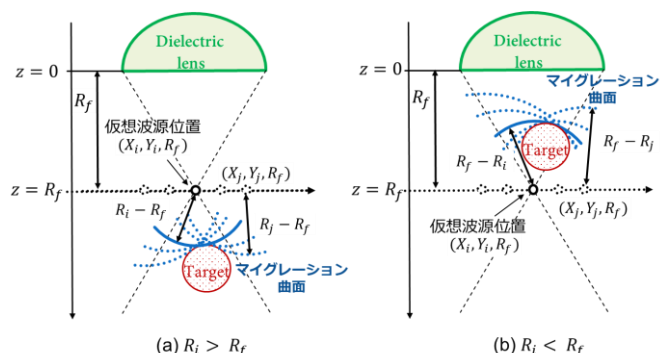


図 8：仮想波源モデルを用いた RPM 法の原理

シオン曲面と呼ばれる曲面内にあると仮定する。レンズ表面から焦点までの距離を $R_f$ とし、仮想波源位置を $(X_i, Y_i, R_f)$ とする。 $R_i > R_f$ の場合、散乱中心点は中心 $(X_i, Y_i, R_f)$ 、半径 $|R_i - R_f|$ の球面の外側包絡線上に存在し(図8(a))、 $R_i < R_f$ の場合は同内側包絡面に存在する(図8(b))。よって、仮想波源モデルを用いれば、球の交点を解析的に求めることで、想定する伝搬経路における曲面間の交点を求めることとなり、飛躍的な処理量の軽減が可能になる。

実験による性能評価: 焦点距離 25mm、直径 34mm の半球型誘電体レンズを使用した THz-TDS 測定システムで反射応答を取得する。焦点距離における送信信号は中心周波数 0.3 THz および有効帯域幅 0.3 THz である。光伝導アンテナを  $z = 0$  平面上に 0:25mm の間隔で走査する。計測目標は 1/4 インチの金属球及びアルファベット文字「U」(物性: 真鍮)を仮定し、目標表面位置をそれぞれ  $z = 15\text{mm}$  に配置する。図9に U 字型金属の光学画像を示す。従来の THz-TDS 画像では焦点位置ずれによる深さ方向の歪みが顕著であるが、提案手法では歪みを正確に補正可能であることを示している。形状推定誤差が 0.2 (0.2mm) 以内の累積確率は従来の THz-TDS 画像では 64.1 %であり、提案手法では 99.0 %である。SA 法においても二次波源モデルにより、目標境界形状を正確に推定することを確認しているが、完全な 3 次元画像を得るために必要な計算時間は 5000 秒を超える。一方で、提案法は 3 次元画像を得るための計算時間は 3 秒であり、SA 法に対する優位性を有する。同手法は任意の焦点位置における高速高精度 3 次元画像化を実現するものであり、特に深さが未知の表層内部の高精度内部画像化において非常に有用である。同成果は既に本分野のトップ

ジャーナルである IEEE GRSL に採録されている。

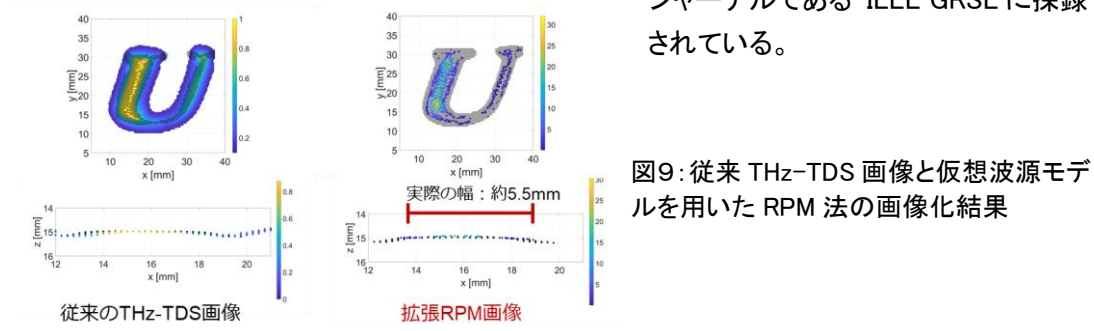


図9: 従来 THz-TDS 画像と仮想波源モデルを用いた RPM 法の画像化結果

### 3. 今後の展開

以下、各課題の今後の展開について詳述する。

#### ①マイクロ波非破壊検査(コンクリート内部亀裂探知)

複素誘電率値によって平行偏波と垂直偏波の反射係数が異なるフレネルの理論に着目し、多偏波データを含めた深層学習に基づく複素誘電率推定を双方向に組み込むことにより、従来では困難とされていた空洞や腐食の複素誘電率値推定という非常に挑戦的な課題において、本質的な解決法を見出すことができると予測している。また、非線形問題に対応するために深層学習に基づくレーダデータから直接的に複素誘電率を推定する手法を構築しており、同手法と本課題で提案する手法を統合することで、高精度かつ幅広い範囲で適用可能な技術として進化させることができると考えている。



## ②災害現場、自動運転等でのマイクロ波・ミリ波レーダによる人体検出技術

Aでは、画像化精度とドップラ速度の性能を飛躍的に高めることに成功した。またBでは、ミリ波等を想定したRPM法を提案し、角度方向への分解により、低SNRでも従来の距離分解能を大きく上回る超分解能処理が実現できることを確認した。今後は、AとBを統合させる。すなわち、ドップラと角度の両軸で距離データを分解することで、分解能を高め、またドップラ、波数、画像の3つの双方向処理により、更なる高精度化を目指す。また後半ではCの課題において、A及びBの課題で抽出可能な特徴量(ドップラ、角度、画像)を導入し、更に雑音抑圧する各種のフィルタを導入することで、劣悪な見通し外環境においても高い識別率で人体を識別する手法を確立する。特に各応用での現実的な観測環境下での実人体を想定した実験データにより、本手法の性能を評価し、当初目標を達成させることを計画している。

## ③テラヘルツ領域での透過型イメージング法への拡張

波長が数百 $\mu\text{m}$ から数十 $\mu\text{m}$ のサブミリ波・テラヘルツ波においてRPM法と逆散乱解析法及び分光解析を統合し、分散特性などを含めた誘電率分布を再構成することで、対象の電気的・化学的性質を同定する技術を現在検討中である。特に多層構造解析においては、圧縮センシング等の超分解能法の分解能や精度が、反射波形(周波数特性)に依存することがわかっており、逆に分解能を高めるような波形補正を導入することで、超分解能性と正確な分光情報の両方を得ることができる。同研究の延長線上には、特に皮膚がん検知等の医学分野、高分子定量分析や薄膜計測等の化学分野において、様々な学術的・産業的なブレークスルーが期待されると考え、関連分野の研究者・メーカーと協働しながら、研究を進めていきたい。

### 全体の展開:

本研究課題では、マイクロ波・ミリ波イメージングにおける複素誘電率推定、ドップラ速度、レーダ画像及び多重散乱波等の双方向処理に基づく全く新しい多角的画像解析法を創出した。本手法は、自動運転時における衝突回避センサ、災害現場での生存者検知、道路・トンネルの非破壊モニタリング、テラヘルツ分光イメージング等への展開のみならず、マイクロ波による乳がん検知や治療における医療応用、空港等における危険物探知技術、バイタルサイン計測等のヘルスケア応用等、様々な応用に展開し、多角的な識別や判断をユーザに提供できる新しい技術を創出していきたい(図13)。

## 4. 自己評価

本課題は、マイクロ波・ミリ波による社会的需要の高い応用を想定した研究課題であり、その問題点を主に信号処理、統計処理等の情報科学の観点から解決を試みたものである。課題の当初は、誘電率推定法に多偏波エリプソメトリ法を導入することを検討していたが、複素誘電率分布推定が可能であるトモグラフィ法を導入する方針へ転換した。報告者はレーダ方式に関して知見を有していたが、トモグラフィ法に関する知見・経験等は持ち合わせていないため、ほぼゼロからの出発であった。

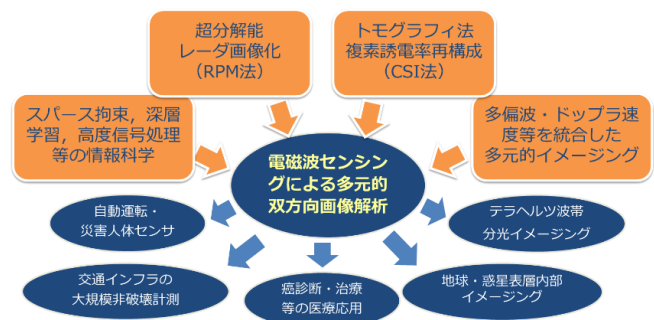


図13: 多角的電磁波センシング基盤の生成と応用展開



しかし、最終的にはレーダとトモグラフィ法の双方向処理という今までにない全く新しい発想を得ることができた。更にそれをマイクロ波コンクリート非破壊モデルという、我が国が直面する重要な課題の一つである、老朽化した交通インフラの高信頼性モニタリングという、現実的な問題において、有効性を実証できたのは、本課題における最大の成果であり、予想外の進捗であった。

また、領域独自の戦略目標の以下の部分

「(1)計測対象の特徴量解析技術の構築

例えば、シグナル対ノイズ比の低いスペクトルや画像等からの特徴量抽出技術やより少ないデータから有用な情報を引き出す情報再構成技術、異種情報の統合解析技術を構築する。」において、以下に示す通り、本課題の特徴を生かすことができたと評価する。

・「より少ないデータから有用な情報を引き出す情報再構成技術」

①「コンクリート非破壊計測での誘電率再構成問題」において、ROI 制約(スパース)やベイズ正則化に基づく逆散乱解析法を導入し、従来法では困難であった非破壊計測モデルにおいて、空洞等の複素誘電率及び存在領域を高精度に推定することが可能となった。

・「異種情報の統合解析技術」

②「ミリ波・マイクロ波レーダによる人体検出」において、ドップラ速度、多重散乱波、レーダ画像、複素情報を双方向に処理することで全く新しい多元的イメージング・識別法を創出することが可能となった。特に異種情報を単に統合するのではなく、それぞれの物理的か関係性を利用することで双方向的に情報を更新し、性能を高めることが可能となった。

#### 研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果

自動運転技術は、産業及び社会に与える影響の大きい技術分野である。その安全性を確保するために計測・センサ技術は極めて重要な位置付けとなっている。その中で、課題②において発見された、静止人体における特徴的な揺らぎが見通し外環境下で探知・識別できることを示したことは、本課題におけるもう一つの重要かつ予想外の進展であった。上記の成果は、子供等の飛び出しにおける事故やドライバの不注意による事故の確率を、大きく改善することができる技術に結び付くと考え、更に深層学習や統計処理等の情報科学のアプローチを取り入れることで、同分野における科学技術イノベーションのシーズに十分になりえると考える。また①マイクロ波非破壊検査技術においては、従来技術では実現させることが難しかった複素誘電率情報をレーダ画像に統合させるという点において同分野のモニタリング技術にイノベーションを起こすことができると予測する。またミリ波・テラヘルツ波帯においても同技術は拡張可能であり、多様な科学技術計測分野において重要な進展をもたらすことも考えられる。

#### さきがけにおける取組・研究者交流等の評価

本領域における領域会議でのアドバイザーやさきがけ研究者との交流により、ベイズ推論やスパース拘束等の最適化理論を取り入れることで、分解能や精度等の点で従来を大きく上回る性能を得ることができたことは特筆すべき点である。

一方、領域会議等では研究者交流を積極的に実施し、一部課題では共同で研究を実施したが、予測したような進展が見られなかったことは反省すべき点であると考え。また、多偏波解析を導入する部分においてハードウェア的な制約により、その課題の優先度を下げざるを得ず、当初の計画を変更させざるを得なかったことも反省すべき点である。

今後は、新たな研究プロジェクト等に参画し、情報科学のみならず多様な分野の研究者との

双方向での研究協働を実施し、これまでに発想しなかった課題・アプローチ等について、積極的に挑戦したいと考えている。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数:26件 (原著論文:7件、国際会議論文:19件)

1. Y. Akiyama, T. Omori, and S. Kidera, "k-Space Decomposition Based Three-dimensional Imaging with Range Points Migration for Millimeter Wave Radar", IEEE Trans. Geoscience & Remote Sensing, Vol. 60, 2021 (in press).

RPM 法のミリ波帯レーダへの問題点である角度分解能の問題を波数空間でデータ分離することで解決する手法を提案。超分解能法の一つである Capon 法では低 SNR 環境下では精度が著しく劣化するが、提案手法は低 SNR 下でも高精度に目標形状を推定する。同性能は数値計算及び実機実験により、実証されている。

2. M. Setsu, T. Hayashi, J. He, and S. Kidera, "Super-Resolution Doppler Velocity Estimation by Kernel-Based Range- $\tau$  Point Conversions for UWB Short-Range Radars", IEEE Trans. Geoscience & Remote Sensing, Vol. 59, 2020 (in press).

人体等のマイクロドップラ解析では従来はフーリエ変換やラドン変換等のコヒーレント積分に基づく手法がとられていたが、時間と速度分解能の両立が困難であった。同論文では、重み付きカーネル密度推定に基づく全く新しいドップラ速度推定法を提案した。同手法は、インコヒーレント処理に基づくため、従来の分解能の問題を本質的に解決させた。また圧縮センシング法等の超分解能法と併用することで、距離・速度・時間という3つの分解能を同時にかつ飛躍的に高めることを示した。

3. T. Matsui and S. Kidera, "Virtual Source Extended Range Points Migration Method for Auto-focusing hree-dimensional Terahertz Imaging", IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2020 (in press).

テラヘルツ波画像化において、RPM 法に基づく自動焦点化法を導入した。二次波源モデルを新たに導入することで、合成開口処理に比して、数百倍の速度改善を実現させ、任意の深度における3次元画像において高い精度を保持することを実際の THz-TDS システムによる実験データにより実証した。

### (2) 特許出願

研究期間累積件数:1件(特許公開前のものも含む)

1	発 明 者	木寺正平、鷹取龍緒、工藤高裕、黄勇
	発 明 の 名 称	非接触形状・誘電率測定装置
	出 願 人	電気通信大学、富士電機株式会社
	出 願 日	2018/3/27
	出 願 番 号	特願 2018-33708
	概 要	マイクロ波非破壊検査のための多偏波エリプソメトリによる誘電率計測に関する発明

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

受賞:

2019年6月20日 PIERS 2019 Rome, Student Paper Competition, Honorable Mention (Top 5)  
Takumi Hayashi and Shouhei Kidera, "Iterative Data Clustering Algorithm of Doppler-Associated RPM Imaging for UWB Human Body Imaging Radar" 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2019), Rome, Italy, June, 2019.

2019年3月14日 APRASC 2019 Student Paper Competition, Finalist, Shuto Takahashi and Shouhei Kidera, "Incorporation Algorithm with RPM and DBIM in Bayesian Framework for Microwave Non-destructive Testing," 2019 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC 2019), New Delhi, India from March, 2019.

2018年11月21日 IEEE AP-S Japan Student Award,  
Shuto Takahashi and Shouhei Kidera, "Acceleration of Range Points Migration Based Microwave Imaging for Non-destructive Testing," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 17, No.4, Apr., 2018.

著作物:

センサフュージョン技術の開発と応用事例 ～自動運転車、協働ロボットへ向けて～, 技術情報協会, 共著 (第3章 レーダーを用いたセンシング技術、第3節 超広帯域(UWB)レーダーを用いた近距離センシング技術 担当), 2019年1月31日発行

木寺 正平, "マイクロ波イメージングによる複素誘電率推定—レーダとトモグラフィの融合—", 可視化情報学会誌 (Journal of the Visualization Society of Japan), vol. 40, no. 159, pp. 136-139, Oct., 2020(招待論文).