

超広帯域レーダを用いた遠方界・不可視領域イメージングの研究

Shadow region and far field 3-dimensional imaging for UWB radars



木寺 正平 (Shouhei KIDERA, Ph. D.)

電気通信大学大学院 情報理工学研究科 准教授

(Associate Professor, The University of Electro-Communications, Graduate School of Informatics and Engineering)

IEEE 電子情報通信学会 電気学会

受賞：船井学術賞 (2014) 科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞 (2013) 電気通信普及財団賞 テレコムシステム技術賞 入賞 (2013) 安藤博記念学術奨励賞 (2012) Young Scientist Award at The XXX th General Assembly and Scientific Symposium of International Union of Radio Science 2011 (URSI GASS 2011) 電子情報通信学会 学術奨励賞 (2010年3月) 電気学会 優秀論文発表賞等 (2008年8月)

著書：レーダの基礎 コロナ社 (2016年末出版予定)

研究専門分野：計測工学 デジタル信号処理 電磁界解析 生体画像工学

あらまし 本研究では、災害現場・資源探査等を想定した自律型ロボットの周囲環境把握（目標位置計測・形状認識等）のための、超広帯域（UWB：Ultra Wideband）電磁波を用いた超分解能画像レーダ技術を開発する。筆者らは現在まで、超分解能・影領域画像化性能を有する立体イメージングレーダ技術（RPM法等）を独自に発展させてきた。しかし、室内計測等開口面積が制限される状況では、十分な画像再現域を確保できず、目標形状認識が困難となる。

本研究では、(1) 楕円体外挿法を用いた高精度立体画像化領域拡大手法、(2) 壁透過型目標形状認識のための画像化手法、(3) 多偏波解析を用いた任意形状目標に対する画像化領域拡大法を検討した。本研究が掲げる「レーダ立体画像の画像領域拡大」は、同分野において極めて挑戦的な課題であるが、多偏波データやRPM法という独自のアプローチを導入することで、従来の画像化領域を飛躍的かつ高精度に改善することが可能となった。

1. 研究の目的

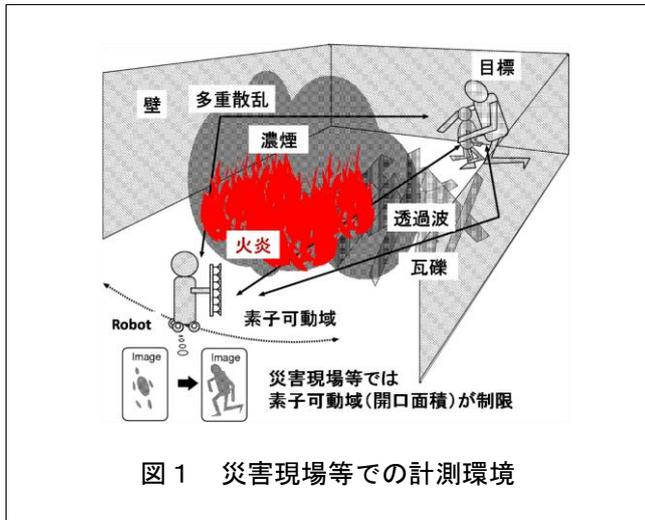
本研究では、災害現場・資源探査等を想定した自律型ロボットの周囲環境把握（目標位置計測・形状認識等）のための、超広帯域（UWB：Ultra Wideband）電磁波を用いた超分解能レーダ技術を開発することが目的である。同目的を達成するため、筆者らは超波長分解能・影領域画像化性能を有する3次元イメージングレーダ技術を開発してきた。しかし、素子稼動域（開口面積）が十分に確保できない状況では、再現可能な画像領域が不十分となり、目標形状認識が困難となる。本研究では、(1) 楕円体外挿法を用いた高精度立体画像化領域拡大手法、(2) 壁透過型目標形状認識のための画像化手法、(3) 多偏波解析を用いた任意形状目標に対する画像化領域拡大法を導入することで、従来の目標の再現領域を超え、かつ高精度・高分解能画像化を実現する手法を開発することが目的である。

2. 研究の背景

災害現場・宇宙空間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型ロボットは、幅広い用途（救助補助・資源探査・災害復旧等）に有用であり、その社会的・産業的需要は極めて高い。代表的な3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・距離推定精度の熱環境・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他、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・高圧・極低圧環境等の劣悪な測定環境下（図1）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。また、「偏波」・「誘電体透過性」・「散乱周波数特性」等の電波固有の特徴を複数利用することにより、既存の計測性能を凌駕する革新的イメージング技術を創出できる可能性が高い。

超広帯域レーダを用いた遠方界・不可視領域イメージングの研究

Shadow region and far field 3-dimensional imaging for UWB radars



2.1. 従来研究と本研究の位置づけ

従来の画像化レーダ技術は、主に合成開口処理や時間逆伝搬等の「波形積分の原理」に基づくため、特に遠方界での高分解能3次元イメージングを実現するには、膨大な計算量を要する。また、空間分解能は高々波長の半分程度であり、5GHz帯域のUWBレーダでも同分解能は約3cm程度となるため、上記の性能限界が実用化への障壁となっていた。一方、筆者らが独自に提案するレーダ技術(RPM法: Range Points Migration) [1] は、目標境界面抽出に特化することで、同処理速度を数千倍にも高め、かつUWB信号の超広帯域性を最大限に活用した周波数干渉計法により、波長限界を超える超分解能(波長の1/10の分解能及び1/100波長の位置決定精度)の画像化を実現している[2]。

しかしながら、上記手法は画像化探索領域をセンサ近傍(数波長近傍: 数十cm程度)に制約している。一般のレーダ計測では、目標存在領域が遠方になるにつれ、画像再現域は狭小化する(遠い物体ほど、見える範囲が狭くなる)。このため、目標認識に必要な画像再現域を確保するためには、広範な素子可動域(開口面積)が必要となる。しかし、図1に示す通り、実際の災害現場等においては、火炎や障害物等のために素子の可動範囲(開口面積)が制限され、目標認識が困難になる状況が頻発することが予測される。本研究課題では、狭小なレーダ開口面積で遠方領域(数十波

長: 数m程度)の目標認識を実現するために、「多重散乱波」や「誘電体透過波」を用いて、従来画像レーダ技術では再現できなかった領域(不可視領域)を再現させる手法を確立し、レーダイメージングの本質的な弱点を克服させることを目的とする。

2.2. 国内外研究の現状

既に欧米各国の大学・宇宙航空関連の研究機関により、各種3次元画像レーダ技術が提案されている。その多くは、合成開口処理(SAR: Synthetic Aperture Radar)に基づくものであり、逆合成開口処理画像(Inverse SAR)間の幾何学的空間解析に基づく手法[3]、円形走査型SAR(Circular SAR)による高分解能3次元画像化への拡張もなされている。しかし、SARの空間分解能は周波数帯域で制限され(例: 3GHz帯域で5cm程度)、また、目標対象位置が不明である状況(災害現場等)では、あらゆる空間を探索する必要があるため、計算時間及び画像データ容量が膨大になり、実時間性が要求されるロボット・セキュリティセンサには現実的に適用が困難である。他のアプローチとして、受信信号を時間的に逆方向に伝搬させ、目標形状・位置に結像させる「時間逆伝搬法」があり、多重散乱波への応用も報告されている。しかし、同手法も「波形積分の原理」に基づくため、SARと同様の問題を抱える。また、先述の「開口面積が制限される状況下」では、RPM法と同様に目標認識に十分な画像再現域が確保できない。

また、国内では京都大学の佐藤亨教授らのグループにより、セキュリティシステムのためのドップラーレーダを用いた人体検知システムに関する検討がなされている[4]。しかし、同手法は人間等の目標の各部位間の相対速度が十分に大きい場合にのみイメージングが可能であり、静止した人体やその他の静止目標等をイメージングすることは、原理上困難である(災害現場では瓦礫や火炎に埋もれた人は身動きがとれない)。

3. 研究の方法

本研究目的を実現させるため、筆者らが確立した画像化手法を中軸技術として、「回転楕円体群による外挿補間」・「多重散乱環境を用いた画像再現域拡大」・「多

超広帯域レーダを用いた遠方界・不可視領域イメージングの研究

Shadow region and far field 3-dimensional imaging for UWB radars

偏波情報を用いた画像領域拡大・「誘電体透過性を用いた RPM 法による壁透過イメージング」等を検討した。以下にその概要を示す。

3.1. 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。

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。図 2 に実空間及びデータ空間上での楕円体外挿補間結果を示す。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。

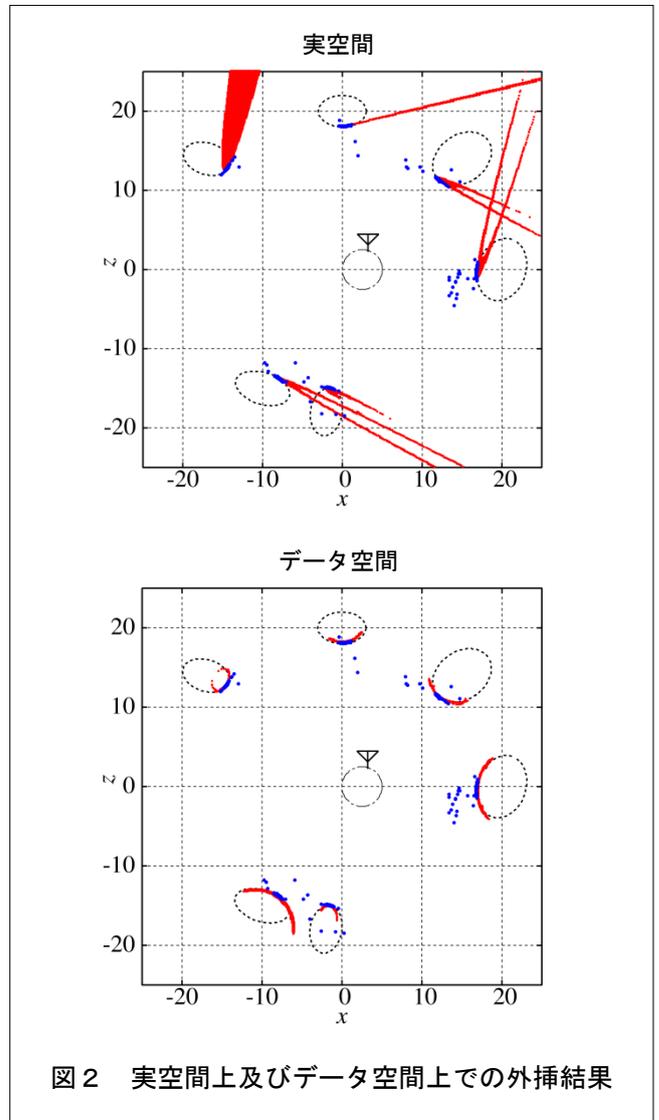


図 2 実空間上及びデータ空間上での外挿結果

3.2. 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。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、筆者ら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。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。

超広帯域レーダを用いた遠方界・不可視領域イメージングの研究

Shadow region and far field 3-dimensional imaging for UWB radars

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、3.1 節で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。

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、同距離点群の大域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、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、同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、距離点群の大域的情報を抽出して、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ている。

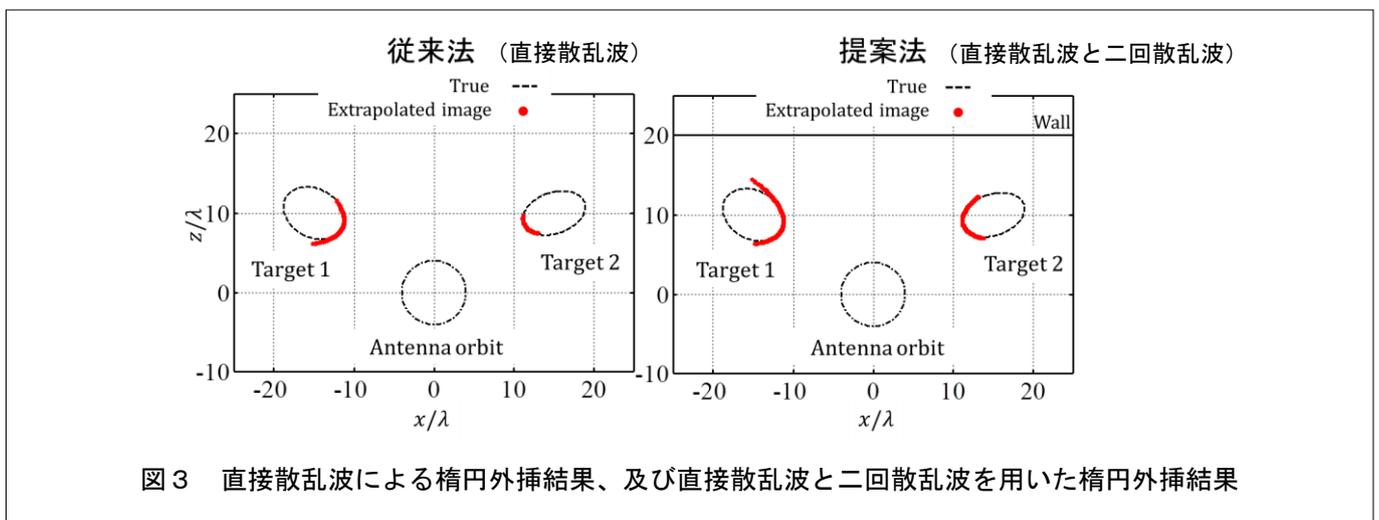
更に、二回散乱波を 3.1 節の楕円外挿法に拡張する検討も実施した。従来の直接散乱波を用いる方法では、再現領域が著しく制限されるため、楕円外挿精度は雑音に対し感度が高かったが、提案法である二回散乱波を用いることで再現領域を拡大し、同外挿精度を飛躍的に向上させた。

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、バイ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 3 に直接散乱波のみによる外挿結果、及び直接散乱波と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 として掲載されている[5]。

3.3. 多偏波情報を用いた画像領域拡大 (1) 多偏波データと画像再現領域の解析

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。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。



超広帯域レーダを用いた遠方界・不可視領域イメージングの研究

Shadow region and far field 3-dimensional imaging for UWB radars

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。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 4 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、 $SNR = 30\text{dB}$ とした。アンテナ素子は、 -2.5 波長 $\leq x \leq 2.5$ 波長および -2.5 波長 $\leq y \leq 2.5$ 波長の範囲を走査する。図 5 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 軸方向の円柱状に、 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。

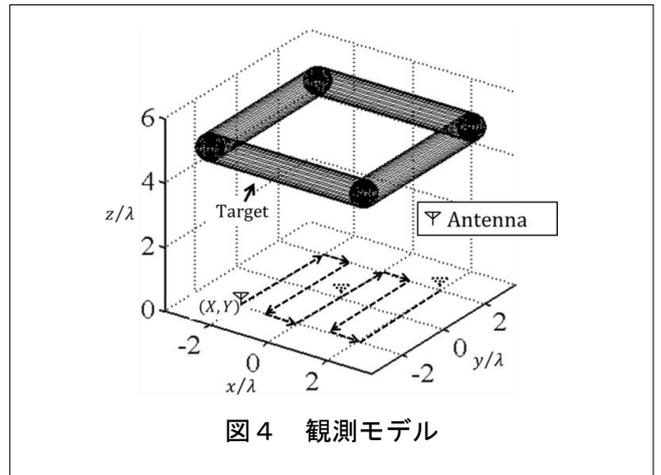


図 4 観測モデル

(2) ニューラルネットワークと多偏波データを用いた画像領域拡大法

前述の結果を踏まえ、任意の目標形状を楕円体の一部の集合で表現することで、RPM 法の画像化領域を拡大させる手法を検討する。まず、楕円体の各軸半径・回転角度のパラメータを変えて、その時の各偏波の反射時間応答をニューラルネットワークで学習させた。

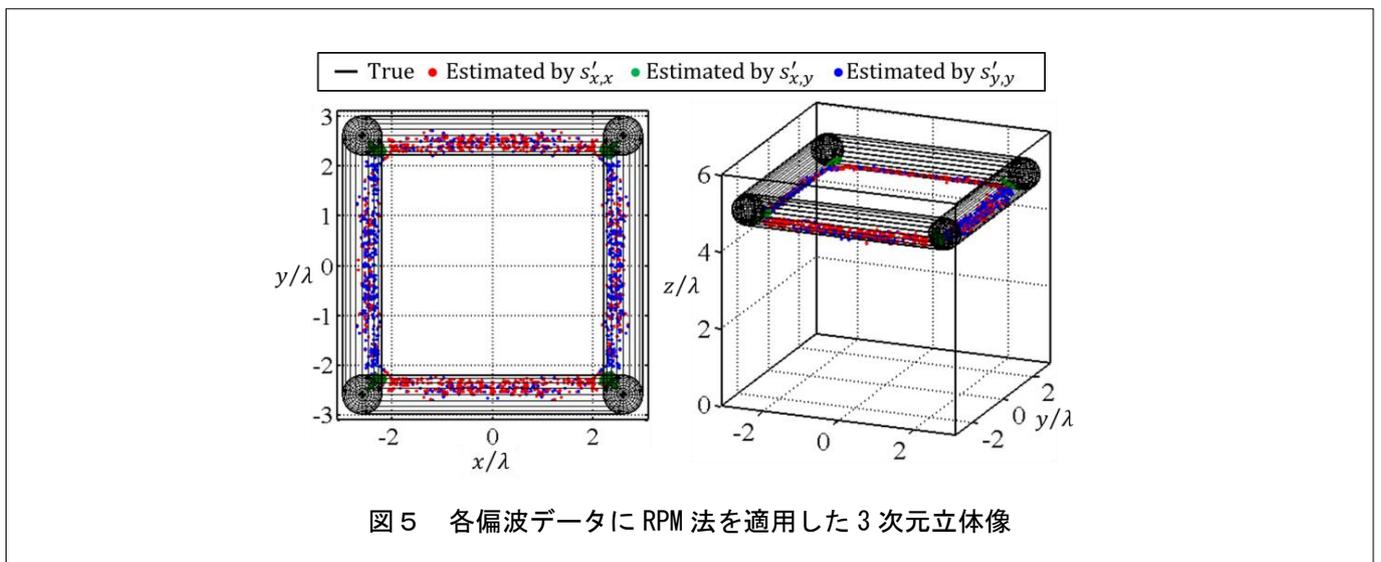


図 5 各偏波データに RPM 法を適用した 3 次元立体像

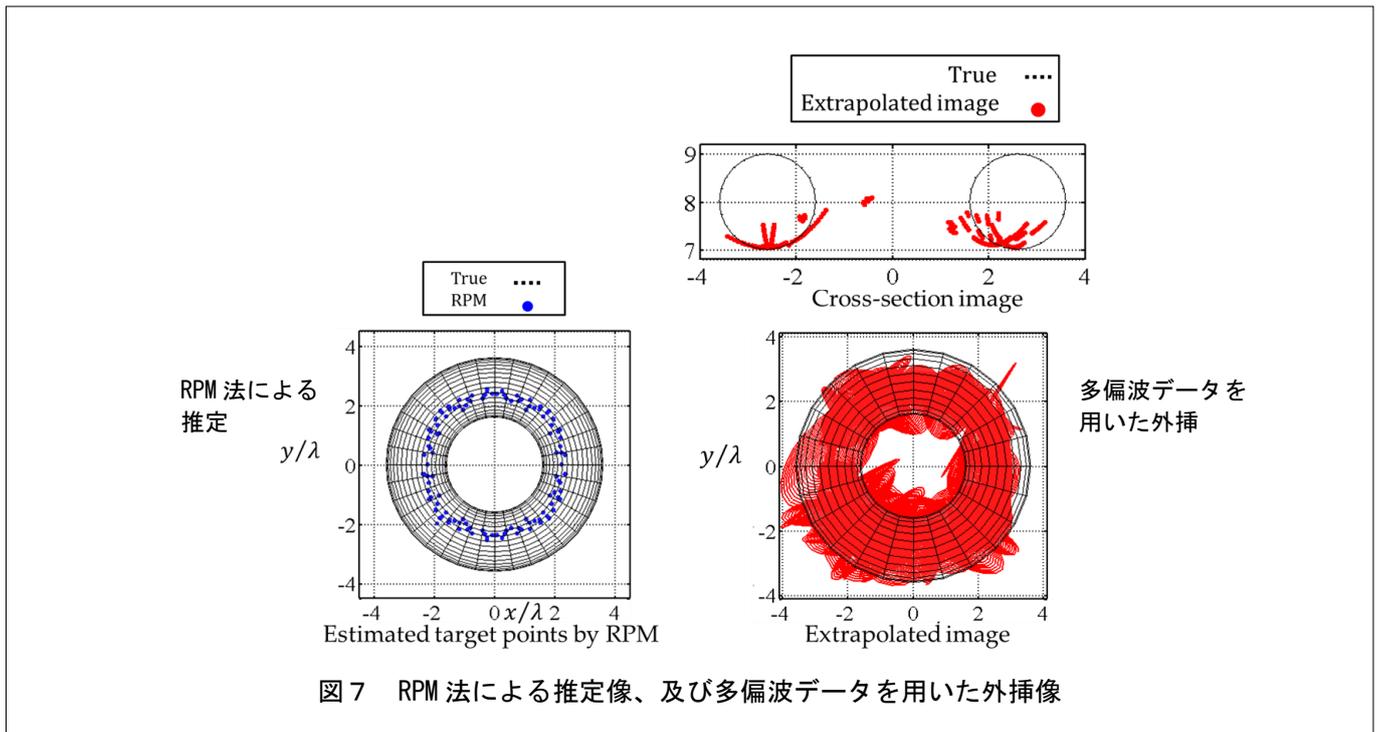
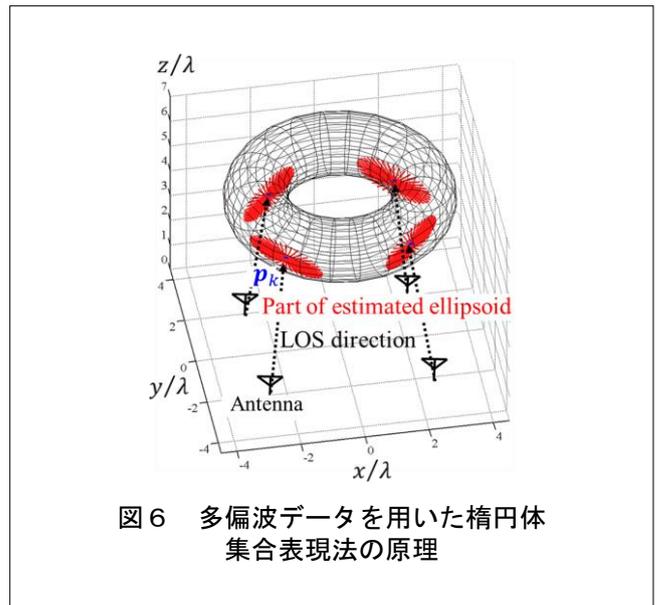
超広帯域レーダを用いた遠方界・不可視領域イメージングの研究

Shadow region and far field 3-dimensional imaging for UWB radars

特に、平衡偏波では楕円体の軸半径に、クロス偏波では同回転角度に高い相関があることを確認し、これにより、ある程度の楕円体のパラメータを推定できることを確認した。また、学習により、未知のパラメータも高精度に推定できることを確認した。

しかし、一般に目標形状は楕円体で近似できるわけではなく、エッジを有し、より複雑な形状を有していることが大抵である。これに対応するため、RPM法で得られる各推定境界点に対して、そこで定義される接平面に接するように楕円体の一部を当てはめるという処理を加える。各境界点は、ある距離点から抽出されているため、その付近の時間応答から、その応答に最も適する楕円体のパラメータを学習マシンにより推定可能である。この楕円体のパラメータをRPM法の境界点に当てはめて、目標境界を外挿する。図6に同手法の原理図を示す。これにより、楕円体は当然のことながら、トーラス形状等のより複雑な形状に対しても、目標領域を外挿することが可能となり、レーダイメージングにおける目標認識に有用な情報を抽出することになった。図7はトーラス目標に対する同手法の適用結果である。RPM法による推定像は高精度であるものの、再現領域は狭いことがわかる。これに対

し、提案法である多偏波データを用いた外挿法では、RPM法の各点に楕円体の一部を当てはめることで、楕円体とは全く異なる形状においても外挿が可能であることがわかる。同手法は、従来にはない全く新しい発想に基づく画像化領域再現法であり、独創性・新規性は高い。同成果の国際会議[6]でも論文賞を受賞するなど、当該分野での評価も高いことが例証されている。



超広帯域レーダを用いた遠方界・不可視領域イメージングの研究

Shadow region and far field 3-dimensional imaging for UWB radars

3.4. 誘電体透過性を用いた RPM 法による壁透過イメージング

災害現場等では、破砕したコンクリートや家具等の下に人体が埋もれている場合が想定される。マイクロ波帯の UWB 電磁波は、壁や木製家具等の内部への透過性が良好であるため、それらに埋もれている人体等の検知に有用である。従来の壁透過レーダとして、合成開口処理や時間逆伝搬などを利用したものが提案されているが、空間分解能、再現精度、処理速度等の点で上記応用への適用は難しいのが現状である。

既に、筆者らは誘電体内部透過性を利用し、RPM 法を拡張させた内部目標立体イメージングに関する研究を進展させている。同手法は任意の誘電体形状に適用可能であり、RPM 法の原理を用いて高速・高分解能な内部立体画像化を行うことが可能である。しかし、壁透過モデルにおいても、開口面積を十分に確保できない状況下では、目標認識に必要な画像再現領域が確保できないという問題がある。これに対して、目標形状を楕円体の集合とみなし、データ空間における楕円外挿法を適用する手法を提案した。まず、RPM 法を新たに壁透過観測モデルに拡張（拡張 RPM 法と呼ぶ）し、楕円外挿法と統合する。同手法の原理図を図 8 に示す。

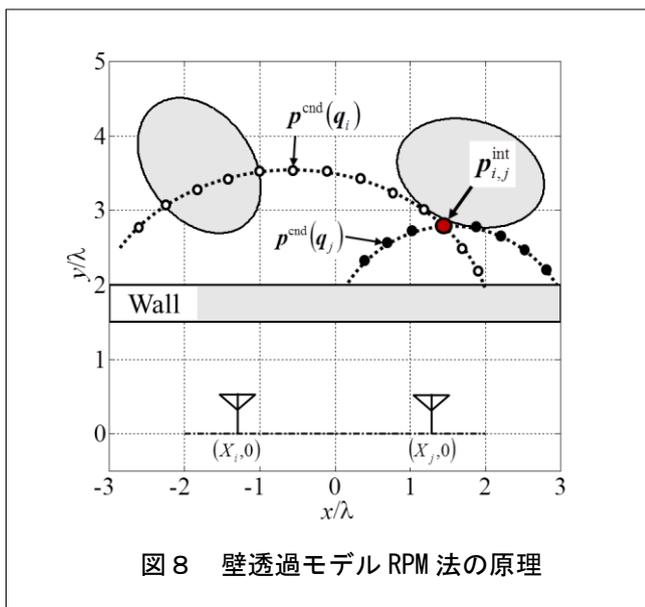


図 8 壁透過モデル RPM 法の原理

同手法では、まず、各壁面入射点における伝搬経路をスネルの法則で決定し、誘電率と観測遅延時間から

目標境界の候補点群 $p^{cnd}(q_i)$ を描く。同候補点群を距離点 q_i, q_j で描き、その交点 $p^{int}_{i,j}$ を抽出し、その集積度を評価することで、各距離点に対する目標境界点を決定する。次に 3.1 節に示したのと同様の原理に従って、データ空間での楕円外挿を行う。

図 9 に拡張 RPM 法により得られる推定点に対して、実空間及びデータ空間上で楕円外挿を行った結果を示す。

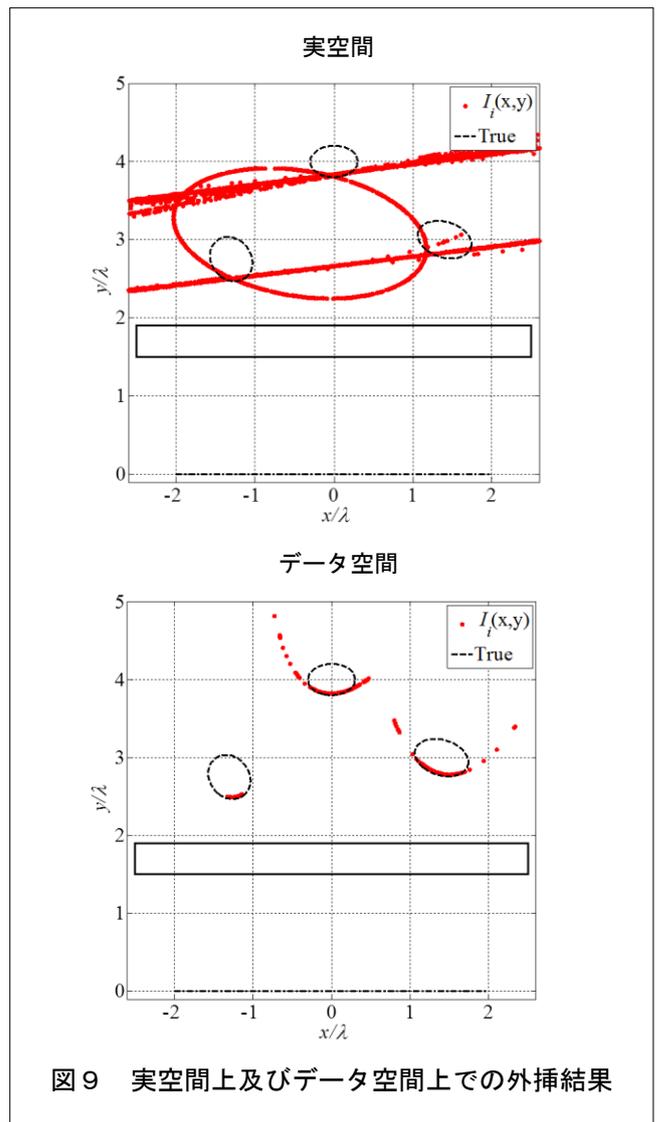


図 9 実空間上及びデータ空間上での外挿結果

ただし、素子を -2.5 波長 $\leq x \leq 2.5$ 波長の範囲で直線走査する。壁の厚さ・誘電率は既知とする。受信データは FDTD 法により生成する。同図より提案法は、実空間での楕円外挿に比べてその外挿精度を大幅に改善することがわかる。今後は、壁の厚さ及び形状を同時推

超広帯域レーダを用いた遠方界・不可視領域イメージングの研究

Shadow region and far field 3-dimensional imaging for UWB radars

定する手法を導入し、本手法の適用範囲を広げる。同成果は国内学会・国外学会で発表を実施しており [7]、今後、3次元問題及び実験的検討を実施する予定である。

4. 本研究成果の学術的意義

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、レーダ画像化問題の本質的な部分である、クロスレンジ方向の分解能・画像化範囲を高めるという点を本質的に改善できる可能性があり、当該分野で大きなインパクトを与えると予測する。また、同課題が解決されると、ロボット・セキュリティ応用のみならず、非破壊検査・非侵襲生体計測等における画像化の性能向上にも寄与すると考えられる。また、同手法は、ミリ波・テラヘルツ波等にも原理的に拡張可能であり、学術的・社会的貢献も大きいと考える。

5. 将来の展望

本研究は、マイクロ波超広帯域レーダによる人体等の目標を想定した画像化技術に関するものである。提案技術により、画像化再現域が拡大されることを確認したが、実用上においては、人体かそれ以外の物体かを認識するのみで十分な場合がある。今後、同イメージングシステムにおいて人体の動作・速度・姿勢認識等の情報を得るためには、ドップラーレーダの原理による各部位の速度推定と信号分離、及び多偏波情報を用いた誘電率・導電率推定による人体認識法などを検討している。特に、導電率に関しては、金属では数十万 S/m、壁では 0.001 S/m、人体では 1 S/m 程度に大きなコントラストで分かれるため、それらの情報が多偏解析 (Ellipsometry 等) で得られれば、人体とそれ以外の目標識別において重要な役割を果たすと考える。

今後は、本助成金の一部を充当し構築している室内環境等を模擬した実験システムを完成させ、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く予定である。

参考文献

- [1] S. Kidera, T. Sakamoto, and T. Sato, "Accurate UWB Radar 3-D Imaging Algorithm for Complex Boundary without Range Points Connections," IEEE Trans. Geosci. & Remote Sens., vol.48, no. 4, pp. 1993–2004, Apr., 2010.
- [2] S. Kidera, T. Sakamoto and T. 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.
- [3] D. L. Mensa, G. Heidbreder and G. Wade, "Aperture Synthesis by Object Rotation in Coherent Imaging," IEEE Trans. Nuclear Science Sensing., vol.27, no.2, pp.989-998, Apr. 1980.
- [4] Kenshi Saho, Takuya Sakamoto, Toru Sato, Kenichi Inoue, and Takeshi Fukuda, "Accurate and Real-Time Pedestrian Classification Based on UWB Doppler Radar Images and Their Radial Velocity Features," IEICE Transactions on Communications, vol. E96-B, no. 10, pp. 2563-2572, Oct. 2013.
- [5] Ayumi Yamaryo, Shouhei Kidera and Tetsuo Kirimoto, "Accurate Target Extrapolation Method Exploiting Double Scattered Range Points for UWB radar", IEICE Trans. Electron. (Brief paper), Vol.E97-C No.8 pp.828-832, Aug, 2014.
- [6] Ayumi Yamaryo, Shouhei Kidera and Tetsuo Kirimoto, "3-dimensional imaging method exploiting full polarimetric data for UWB short range radar", International Conference on Space, Aeronautical and Navigation Electronics (ICSANE) 2014, Mareka, Malaysia, 22-24, October, 2014
- [7] Shouhei Kidera, Cheng Gao, Takaya Taniguchi, Tetsuo 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.

この研究は、平成24年度SCAT研究助成の対象として採用され、平成25～26年度に実施されたものです。