

多元情報の双方向処理に基づく超分解能レーダ画像化法の創出

Super-resolution radar imaging based on bi-directional processing among multi-physical information



木寺 正平 (Shouhei KIDERA, Ph. D.)

電気通信大学 情報理工学研究科

情報・ネットワーク工学専攻 教授 博士(工学)

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

IEEE, URSI, 電子情報通信学会, 電気学会, 応用物理学会

受賞: RIEC Award 本賞 (2023 年), KDDI Award 貢献賞 (2023 年), 船井学術賞 (2014 年), 文部科学大臣表彰 (若手科学者賞) (2013 年), 電気通信普及財団賞 テレコムシステム技術賞入賞 (2013 年), 安藤博記念学術賞 (2011 年) 他

著書: レーダの基礎, コロナ社出版 (2017 年) 他

研究専門分野: 電気電子工学, 計測工学, 生体医学工学

の利便性を向上させるのみならず、交通環境に関する安全性を飛躍的に高めることができる。同技術の実用化のためには、歩行者や自転車等への衝突回避のための高機能センサの開発が極めて重要な課題となっている。現在、レーザレーダやカメラ等の周囲モニタリングセンサが開発されているが、視界不良環境（夜間・悪天候等）や見通し外領域のセンシングでは、透過性の高いミリ波（波長：数 10 mm）センサが有望であり、同技術の開発が急速に進んでいる。

一方、10 m 程度の前方の目標を想定したミリ波レーダ^{*1} による従来の合成開口等によるレーダ画像では、空間分解能は高々 500 mm 程度である。これは光学センサに比べて波長が著しく長いこと、前方目標に対しての車両移動による開口面積が確保できないこと、また電波法やアンテナ等の特性の制限により、周波数帯域幅が数 GHz 程度しか得られないことに起因する。特に路上に飛び出す歩行者や自転車等をいち早く検知し、ブレーキなどによる回避行動をとるシステムの開発が急務であるが、既存のミリ波センサでは上記要求を満たすことができない。

あらまし

本課題では自動運転等を想定したミリ波レーダによる画像解析法において、距離・速度・角度・多重散乱等の複数の情報を双方向に統合した多元的画像化法を構築し、更にコヒーレント及びインコヒーレント方式を統合することで、従来では実現が困難であった超分解能画像化及び速度推定法を構築した。また駐車車両の裏側等の見通し外領域における人体識別法として多重散乱信号における人体特有の位相変動等を活用した機械学習に基づく高精度見通し外人体識別法を構築した。上記手法の性能は、24 GHz 帯及び 79 GHz 帯の実機レーダによる実験データにより検証されており、従来の距離・時間・速度分解能を超えた多元的画像解析を実現するとともに、世界で初めてミリ波多重散乱波を用いた見通し外領域の人体識別が可能であることを実証した。

1. 研究の背景

自動運転や先進運転支援システム (ADAS: Advanced Driver-Assistance Systems) の技術は、我々の暮らし

2. 研究の目的

上記の問題を解決するため、本課題では、申請者が提唱する独創的な画像化法 (RPM: Range Points Migration 法[1]) と、ドップラ速度推定 (WKD: Weighted Kernel Density 法[2]) 及び多重散乱波等データを双方向処理することで、上記の分解能^{*3} 及び精度の限界を超える革新的な人体画像化法を開発する。具体的には、1/100 波長精度を実現する RPM 法を基盤として、ドップラ速度及び多重散乱波の情報を、スパースモデリング等の高度な信号処理法で双方向に処理することで、従来とは全く異なる 多元的イメージング法 を開発することが目的である。特に人体は、歩行中においてその各部位が異なるドップラ成分（マイクロドップラ^{*2}）を有しているために、独自の超分解能ドップラ推定法 (WKD 法) を導入し、速度情報を RPM 法に統合することで、人体の識別精度を格段に向上させる。また狭い路地等では、壁や道路等と目標の間で生じる多重散乱波が生じる。同多重散乱波は、ゴースト（虚像）を生成する要因となるので、同虚像を抑圧するための処

多元情報の双方向処理に基づく超分解能レーダ画像化法の創出

Super-resolution radar imaging based on bi-directional processing among multi-physical information

理が各種提案されていた。一方、多重散乱波は直接散乱波とは異なる伝搬経路を取るため、等価的な開口面積が増大し、影領域のイメージングが可能となり[3]、狭い路地等での物陰に隠れている人体等を見通し外で検出することが期待できる。また人体からのミリ波散乱信号からは、心拍や呼吸または姿勢制御に起因する mm 程度の体表面の変動を高感度に抽出できることが確認されており[4]、同信号に基づく機械学習等によって見通し外領域での高精度な目標を実現することが可能となる。

本研究課題では、上記の研究目的を達成するために「ドップラ速度」「多重散乱波」「レーダ画像」「多偏波データ」等のデータを単に統合するのではなく、同データを有機的に作用させる双方向処理を導入し（図1）、従来の空間・時間・速度分解能等を飛躍的に改善し、また見通し外領域における歩行者を高精度に識別するデータ解析法を構築する。

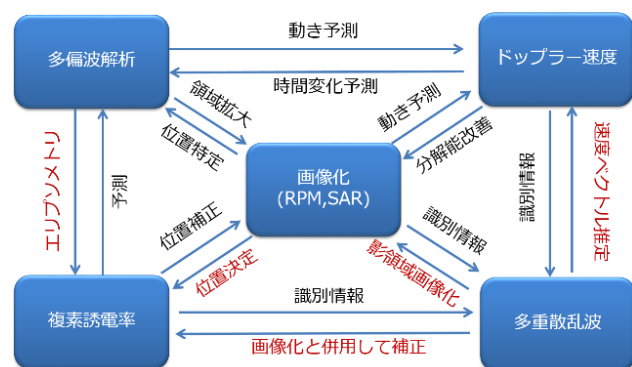


図1 双方向データ処理による多元的画像化

3. 研究方法と成果

3.1 レーダ画像 (RPM 法) ⇔ ドップラ速度 (WKD 法) ⇔ 波数空間分離 の双方向処理の確立

まず上記課題において、コヒーレント処理とインコヒーレント処理に基づくレーダ画像化と速度推定法を融合させることで、これまで難しかった、時間・速度・空間の3つの分解能において従来の制限を超えたレーダ画像化法と速度推定法の多元的画像化法を構築した。具体的には、ミリ波等の高周波域の特徴を生かすため、多次元フーリエ変換によって信号を波数・ドップラ速

度方向に分解し、同空間でクラスタリングすることで分解能を高める。次に同クラスタに対して、インコヒーレント処理である RPM 法及び WKD 法による画像・速度推定を適用することで、時間・速度分解能制限のないかつ波長の 1/10 程度の画像化精度を実現することを可能にする。本課題では同手法の理論とアルゴリズム構築を実施し、それをミリ波モデルに基づく数値解析データ及び、現在主流となっている 24 GHz 帯及び 79 GHz 帯のミリ波レーダを用いた実機実験データにより、有効性を示した。まず 24GHz 帯ミリ波 MIMO レーダを用いた実歩行人体や回転金属球の実験検証により実施した。同実験検証により、0.1 s の時間分解能と 0.1 m/s の速度分解能を実現することを示した。また、コヒーレント積分効果を利用することで SNR=0dB という極めて劣悪なノイズ環境でもノイズなしと同等の性能を保持することを示した。

更に 79 GHz 帯ミリ波 MIMO レーダにおいて、回転球及び実歩行人体データを取得し、本手法により、従来の速度範囲 (± 0.1 m/s) や速度・時間分解能、及び画像化精度を大幅に超える性能を実現し（図2）、速度分解能:0.1 m/s 及び精度:0.05 m/s、時間分解能:0.1 sec を同時に実現させることを示した。一方、処理時間 0.1 秒以内は達成できていない。提案法の処理は FFT 等の高速処理に基づくため、個々の処理時間は短い、全体の処理時間としては数十秒程度が必要になっている。このため、今後は計算時間の短縮や複数レーダによる高分解能化が必要になると考える。本成果はトップジャーナルである IEEE に 3 件、IET に 1 件、IEICE に 2 件掲載されるなど、当該分野において高い評価を得ている。

多元情報の双方向処理に基づく超分解能レーダ画像化法の創出

Super-resolution radar imaging based on bi-directional processing among multi-physical information

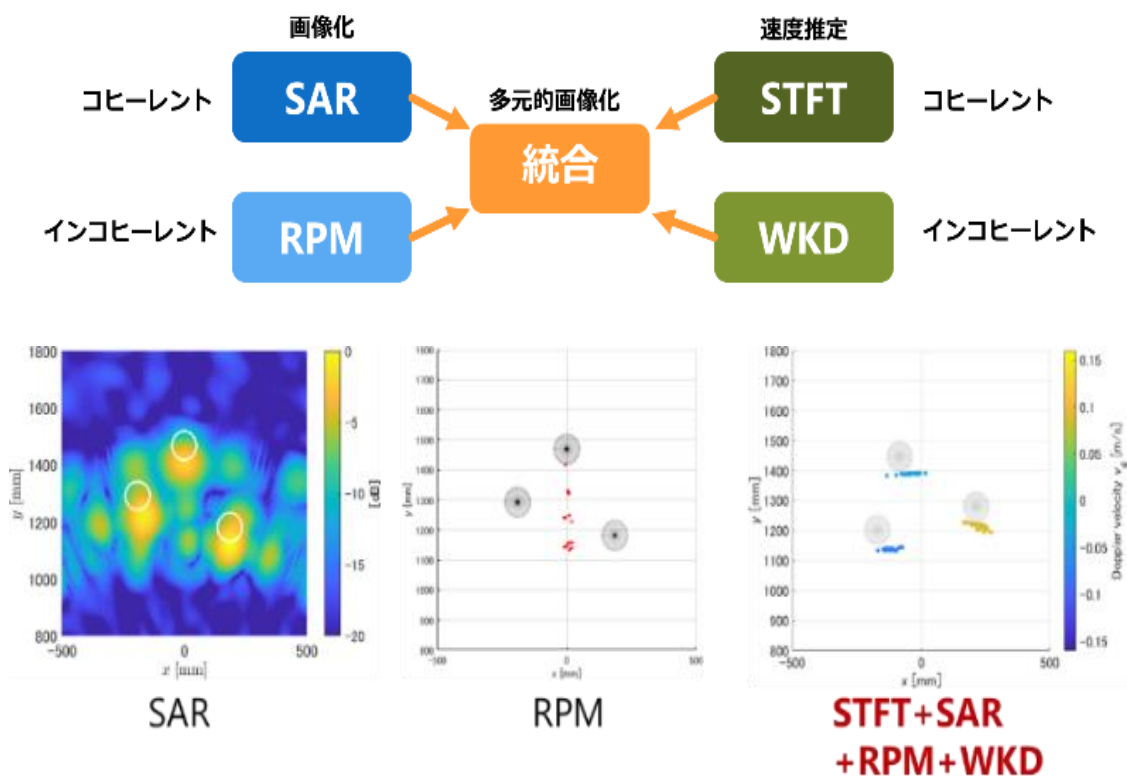


図2 コヒーレント処理とインコヒーレント処理の統合と適用例(79 GHz 帯ミリ波)

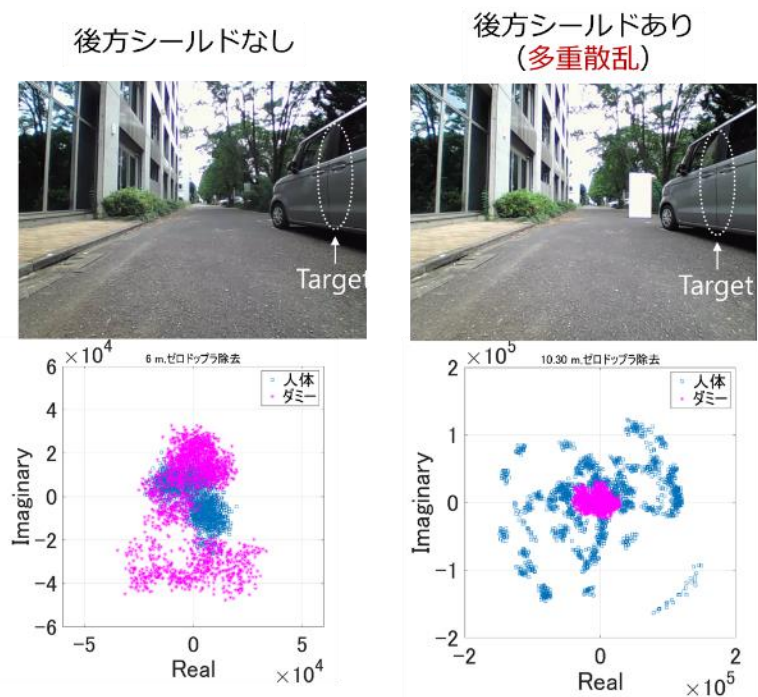


図3：多重散乱環境における人体とダミーの散乱応答(24 GHz 帯ミリ波)

多元情報の双方向処理に基づく超分解能レーダ画像化法の創出

Super-resolution radar imaging based on bi-directional processing among multi-physical information

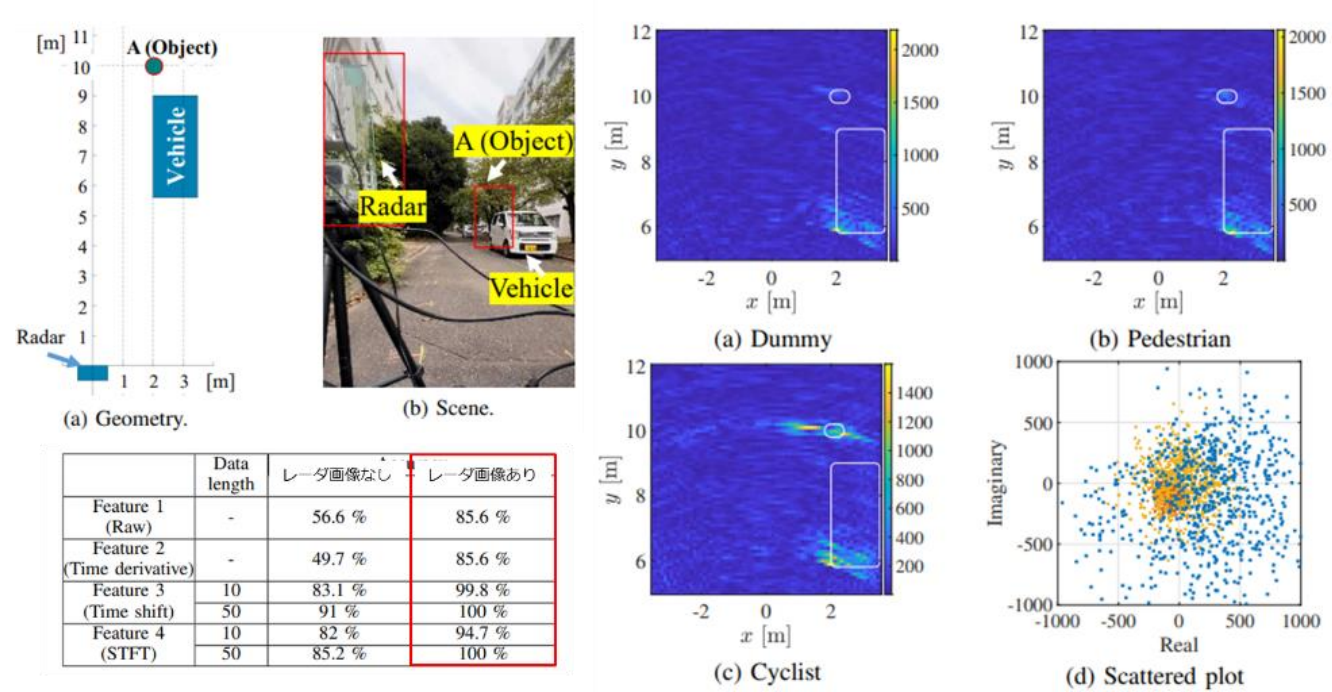


図 4：レーダ画像に基づく目標位置・物標の同時識別例（ダミー vs. 自転車 vs. 歩行者）

3.2 回折波・多重散乱波・ドップラを統合した機械学習による見通し外人体識別法

同課題では、多重散乱波やレーダ画像の時間的特徴量を用いた、駐車車両等の見通し外領域での人体識別法を構築した。まず多重散乱波の有用性を確認するため、大学構内における実道路環境において、24 GHz 及び 79 GHz の両方のレーダデータを取得した。大学構内の実車道に車両等の遮蔽物を配置し、レーダから遮蔽される領域（5m 付近）に静止人体と NCAP（ヨーロッパ等の標準規格）ダミーを配置し、車両後方にパーティションを配置することで、多重散乱波の識別への有用性を検証した。特に、車両とその後方のシールドとターゲット間で発生する多重散乱波を用いて機械学習をする場合、単散乱波のみでは 60%程度の識別率（静止人体とダミーの識別）であったが、多重散乱波を用いることで 90% 以上の識別率で、静止人体と人口構造物（円柱）を識別することが可能になった（図 3）。これは極めて遮蔽状況が強い状況でも多重散乱波によっ

て人体識別が実現できることを世界で初めて実証した成果として、国際会議で論文賞を受賞（2023 ISAP Student Paper Award）する等、高い評価を得ている。

上記の手法では、特定の距離に存在する目標応答を抽出し、同応答の複素時間変動から機械学習によって識別をしている。一方、特に 79 GHz 帯では、目標が 10 m 遠方になると SNR が低下するため、従来の特徴抽出法では識別精度が確保できなかった。これに対して、合成開口処理に基づくレーダ複素画像から識別に必要な入力データを抽出する方法を導入した。79 GHz 帯レーダは、距離と方位角度分解能が高いため、10 m 程度の遠方であっても、ターゲット位置と車両等を高分解能に分離することができる。またレーダ画像化においては複素解析信号をコヒーレントに積分処理するため、ノイズに対するロバスト性が格段に向上し、SNR を飛躍的に改善できる。同特徴データを活用することで、従来では抽出が難しかった 10 m 先の目標応答から、自転車・歩行者及びダミーの 3 クラス識別問題で、0.1 秒以内の観測データから、約 90 %程度の精度を得

多元情報の双方向処理に基づく超分解能レーダ画像化法の創出

Super-resolution radar imaging based on bi-directional processing among multi-physical information

ることが可能であることを実証した（既存手法では60-70%程度）。またレーダから10mの位置に2つ車両を駐車させるより現実的なモデルにおいて、その間に人体・自転車・ダミーを配置して、多重散乱波を活用した識別法を検証した。79 GHz 帯レーダを用いることで、車両遮蔽環境においても、歩行人体・自転車・ダミーの3つのクラスを80%で識別できることを示した（図4）。これは実応用において目標の位置・形状・物標識別を同時に実現する重要な基盤となる。

まとめ

本課題では、自動運転等を想定したミリ波による人体識別を目的として、ドップラ及び波数空間分離に基づく、超分解能マイクロドップラ・画像解析法を構築した。特にコヒーレント画像化（合成開口処理、フーリエ解析法）とインコヒーレント画像化（RPM法、WKD法）の両方の利点を保持する手法を構築し、車載レーダ等で想定される24GHz帯及び79GHz帯ミリ波レーダ装置を用いて、孤立系の目標及び歩行人体目標に対して、10mmの距離精度、0.1sの時間分解能、0.1m/sの速度分解能を実現した。特に速度・方向の情報が紐づけされた多元的画像化を実現し、それを実人体モデルで検証したことは特筆すべき成果である。また、見通し外での人体識別において、人体と人口構造物の複素レーダ応答に内在する本質的な特徴の違いを見出し、また実道路を想定した駐車車両間の多重散乱波を用いて、自転車・人体・ダミーの3クラス識別問題を90%以上の精度で識別することに成功した。これまで、レーダ画像を経ずに、多重散乱波を用いた見通し外での人体識別を成功させた例はなく、同分野における先導的な成果を提示している。

4. 将来展望

本課題では提唱している多元的雙方向イメージング法は「ドップラ速度」「多重散乱波」「レーダ画像」「多偏波データ」等のデータを単に統合するのではなく、同データを有機的に作用させる雙方向処理を導入するものである。同解析法は、世界に類を見ないアプローチであり、独創性が高く、革新的なレーダイメージング法を創出する可能性が高い。また、これが確立され

ることにより、「多重散乱波による見通し外（壁越し）での画像化の実現」、「高精度に抽出された人体マイクロドップラ成分とリアルタイム画像化を統合した人体検出」等を実現させ、更に各特徴量の統計モデルを構築して数秒後の衝突をリアルタイムで予測させる技術へと展開することも可能であり、社会的需要の高い安全・安心な自動運転技術に大きく貢献すると考える。また、上記以外にも様々な応用分野（例：災害現場等での壁越しやがれきに埋もれる生存者検出、空港等のセキュリティゲート（透過性を利用した不審物検知）、プライバシーに配慮した高齢者見守りセンサ等）にも展開することが可能である。

用語解説

- *1 ミリ波レーダ：24 GHz、60 GHz、76 GHz、79 GHz 帯等の電磁波によるレーダシステムであり、車載等に搭載され、従来よりも高い空間分解能を得ることが期待されているレーダ方式。
- *2 マイクロドップラ：歩行人体等において各部位が異なる速度を有することから、そのドップラ速度の時間的な変動をマイクロドップラと呼称する。人体の動作解析等に有用。
- *3 レーダ画像の空間分解能：近接する目標を空間的に分解できる下限の距離、波長と距離に比例し、アレイ開口長に逆比例する。

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. Geoscience and Remote Sensing*, vol.48, no. 4, pp.~1993--2004, Apr., 2010.
- [2] M. Setsu, T. Hayashi, J. He, and S. Kidera, "Super-Resolution Doppler Velocity Estimation by Kernel-Based Range- τ Point Conversions for UWB Short-Range Radars", *IEEE Trans. Geoscience & Remote Sensing*, Vol. 59, 2020.
- [3] Shouhei Kidera and Tetsuo Kirimoto, "Fast and Shadow Region 3-dimensional Imaging Algorithm with Range Derivative of Doubly Scattered Signals for UWB Radars", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol.60, No. 2, pp. 984--996, Feb, 2012.
- [4] Jianghaomiao He, Shota Terashima, Hideyuki Yamada, and Shouhei Kidera "Diffraction Signal Based Human Recognition in Non-line-of-sight (NLOS) Situation for

多元情報の双方向処理に基づく超分解能レーダ画像化法の創出

Super-resolution radar imaging based on bi-directional processing among multi-physical information

Millimeter wave Radar", *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 14, pp. 4370-4380, 2021.

関連文献

Tomoki Ohmori and Shouhei Kidera* "Doppler Velocity Enhanced Range Migration Algorithm for High Resolution and Noise-Robust Three-dimensional Radar Imaging", *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 18, pp. 20616-20628, 15 Sept.15, 2021.

Takumi Hayashi, Takeru Ando, and Shouhei Kidera "Three-dimensional Doppler Associated Radar Imaging Method Based on Bi-directional Data Processing", *IET Radar, Sonar & Navigation*, Volume16, Issue1 Pages 145-160 January 2022.

Takeru Ando and Shouhei Kidera, "Accurate Micro-Doppler Analysis by Doppler and k-space Decomposition for Millimeter Wave Radar", *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 15, pp. 2503-2518, 2022.

Takumi Hayashi, Takeru Ando, and Shouhei Kidera "Accurate Doppler Velocity Estimation by Iterative WKD Algorithm for Pulse-Doppler Radar", *IEICE Trans. Commun.*, Vol. E105.B, No. 12 pp. 1600-1613, 2022.

Takeru Ando and Shouhei Kidera, "k- and Doppler Velocity Decomposition Based Range Points Migration for Three-dimensional Localization with Millimeter Wave Radar", *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 23, pp. 22850-22864, 1 Dec.1, 2022.

Yoshiki Sekigawa and Shouhei Kidera, " Doppler Velocity Decomposition Based Radar Imaging by 79 GHz Band Millimeter Wave Radar", *IEICE Trans. Commun.*, vol. E107-B, no. 12, pp. 981-988, December 2024.

この研究は、令和２年度ＳＣＡＴ研究助成の対象として採用され、令和３～５年度に実施されたものです。