

多重散乱波と超高分解能画像化を統合した 見通し外領域ミリ波センシングの研究

所属：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

助成対象者：木寺 正平

共同研究者：

概要

ミリ波センサは、昼夜・全天候型の環境ロバストな周囲センシング技術として有望である。本課題では、ミリ波センサにおける空間・速度・時間分解能の問題点を、独自の超分解能画像・速度推定法にドップラ速度や波数空間分離を導入することで解決する。更に多重散乱波と深層学習を融合させることで、見通し外に存在する目標を、リアルタイムかつ高精度に識別する手法を構築した。既存の79 GHz帯レーダによる電波暗室及び実道路環境において、孤立系の目標及び歩行人体目標に対して、10mmの距離精度、0.1 sの時間分解能、0.1 m/sの速度分解能を実現し、速度・方向の情報が紐づけされた多元的画像化を実現させた。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。

Abstract - Millimeter-wave sensors are promising as an environmentally robust sensing technology being applicable to day/night and all-weather conditions. In this project, we remarkably enhances the spatial, velocity, and temporal resolution in millimeter-wave sensors by introducing Doppler velocity and wavenumber space decomposition into our original super-resolution image and velocity estimation method. Furthermore, by combining multiple scattered waves and deep learning, we have developed a real-time and highly accurate identification scheme of targets that exist outside the line of sight. Through numerous test, we have achieved range accuracy of 10 mm, temporal resolution of 0.1 s, and velocity resolution of 0.1 m/s for isolated targets and pedestrian targets in an anechoic chamber using existing 79 GHz radar and on a real road environment, and have realized multidimensional imaging with information on speed and direction. In addition, using multiple scattered waves between parked vehicles on a real road, the three-class identification problem of bicycle, human body, and dummy was successfully solved with an accuracy of more than 90%.

研究内容

研究背景

近年、自動運転や先進運転支援システム(ADAS: Advanced Driver-Assistance Systems)等における歩行者や自転車等への衝突回避センサの開発は最重要課題となっている。同センサにはレーザやカメラによる光学的なセンサがあるが、視界不良・悪天候・見通し外環境下では、波長が数10mm程度のミリ波センサが有望であり、国内外でミリ波センサによる周囲環境センシング技術の開発が急速に進んでいる。一方、5m程度の前方の目標を想定したミリ波センサ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100mm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。

研究目的

上記の問題点を解決するため、本課題では申請者が独自に構築している超分解能画像化法

(Range Points Migration 法 : RPM 法)に, ドップラ速度及び波数空間分離を導入する [1,3] ことで, 従来空間, 速度及び時間分解能の限界を超える革新的な超分解能画像化技術を確立する. また, 駐車車両の裏側や狭い路地を想定した見通し外領域の人体識別センシング (図 1) として, 回折波のみではなく, 壁や道路等と目標の間で生じる多重散乱波を用いる. 既に予備的な実験により, 上記の有用性を実証しており, 多重散乱波を用いた深層学習による識別・予測と超分解能画像化法を統合することで, 光学カメラ等では視認できない見通し外領域から飛び出す歩行者や自転車を素早く検出・画像化する技術を確立させる. 本課題では, 実走行車両にミリ波センサを搭載し, 同技術の有効性を検証するとともに各種の問題点を解決し, その完成度を高める. 同課題は, 高度に情報化された自動運転や交通システムにおいて, 安全安心な社会を実現するために不可欠な要素技術として位置づけられる.

研究方法と結果

各課題の実施方法と結果を以下に示す.

① 【波数・ドップラ空間分離に基づく高分解能レーダ画像化法の確立】

アレイレダでは, データを素子平面上でフーリエ変換 (波数空間に変換) することで到来角度方向に分解できる. また, 歩行人体各部位の動きが異なることを利用し, ドップラ速度方向にもデータを分解することができる. 具体的には, まずアレイレダの各素子位置で観測された, 各時刻のデータを 4 次元高速フーリエ変換 (4D-FFT) し, 波数 - 速度空間へ写像する. 人体の各部位は異なる到来角度及び速度を有しているため, 同空間上でデータを分解し, 各分離データに対して RPM 法を適用する (図 1). また RPM 法の画像 (Point cloud: 推定点群) は, それぞれ波数 (k)-ドップラ速度 (v_d) に一対一で紐づけられるため, 多元的な目標画像を得ることができる. これにより, 従来では実現困難な超分解能・多次元人体イメージングを実現させる.

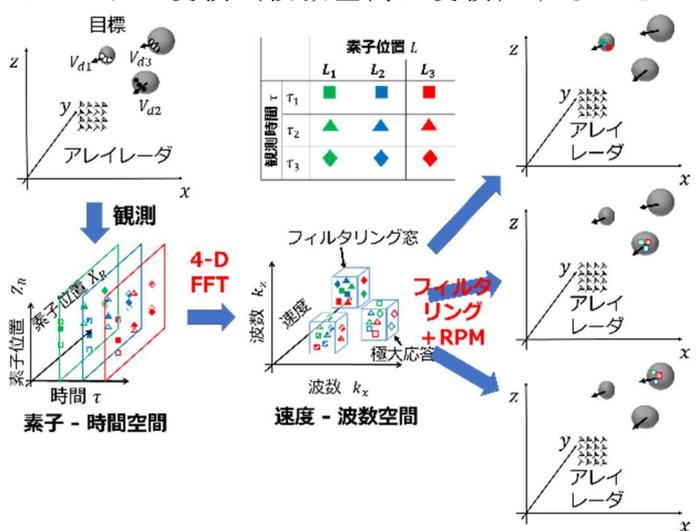


図 1 : 波数・ドップラ分離と RPM 法の統合

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. 本課題において, 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.

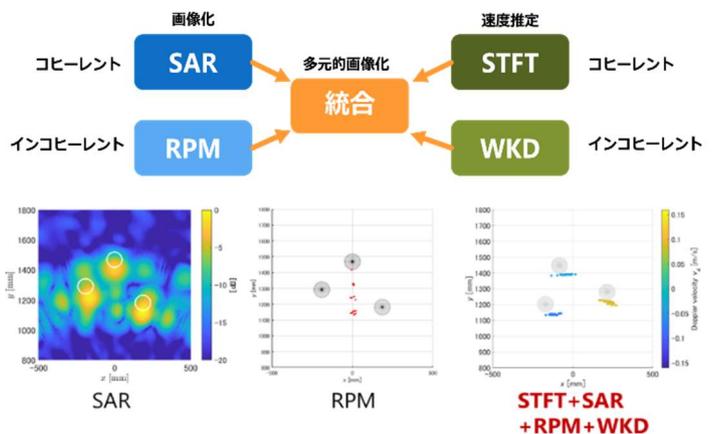


図 2 : コヒーレント処理とインコヒーレント処理の統合と適用例 (79 GHz 帯ミリ波)

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。

更に実環境下においては、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ている (図 2)。上記から、当初目標である、速度分解能:0.1 m/s 及び精度: 0.05 m/s, 時間分解能: 0.1 se を実現した。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 2 件が掲載され、国際会議で複数の論文賞を受賞するなど、当該分野において世界トップレベルの研究成果として評価されている。

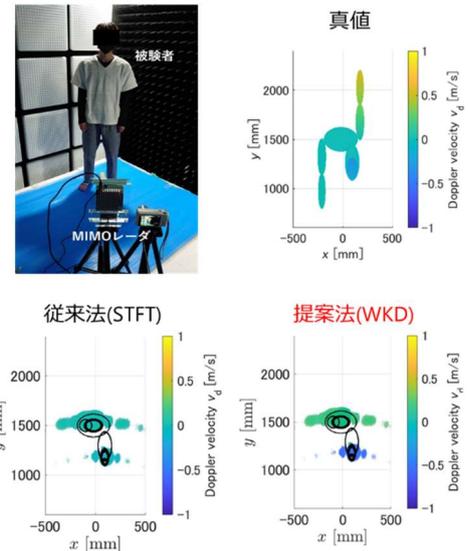


図 3 : 歩行人体における速度・画像統合例

② 【多重散乱波の深層学習に基づく見通し外領域識別法】

車載レーダにおける駐車車両背後からの子供の飛び出し検知等を想定したシナリオでは、光学カメラの不可視領域 (見通し外と呼称) で、人体を検出することができれば事故防止に非常に有用である。マイクロ波・ミリ波帯の電磁波見通し外でも回折波や多重散乱波により、ターゲットからの信号を得ることができる。既にミリ波レーダを用いた基礎的な実験により、人工構造物 (円柱) と実人体 (静止) では、その複素回折波応答の振幅や位相変動に決定的な違いがあることを世界に先駆けて実験的に確認しており、ミリ波レーダを用いた基礎的な実験により、人工構造物 (円柱) と実人体 (静止) では、その複素回折波応答の振幅や位相変動に決定的な違いがあることを実証している。

一方、強い遮蔽環境等では回折波信号が極めて小さくなるため、ロバストな識別が困難である。このため、多重散乱波データを活用した識別を検討する。実際の走行環境では、車両以外にガードレール、電柱、他の車両、壁面などの様々な反射物体が存在する。人体等の目標との間にはこれらの物体との多重散乱波が含まれるが、これは見通し外環境においては、回折波よりも卓越した応答になる。この多重散乱波応答の特徴量を識別することで、強い遮蔽環境でも目標を識別させる。

同課題では、まず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、静止人体と人工構造物 (円柱) を識別することが可能になった (図 3)。

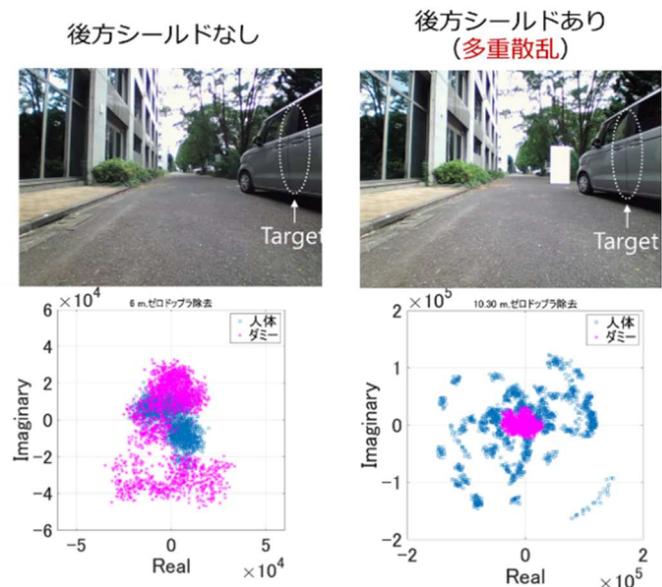


図 3 : 多重散乱環境における人体とダミーの散乱応答 (24 GHz 帯ミリ波)

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高い人体識別率を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するなど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も格段に向上し、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 % 程度の精度を得ることが可能であることを実証し（既存手法では 60-70% 程度）ている。

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）。

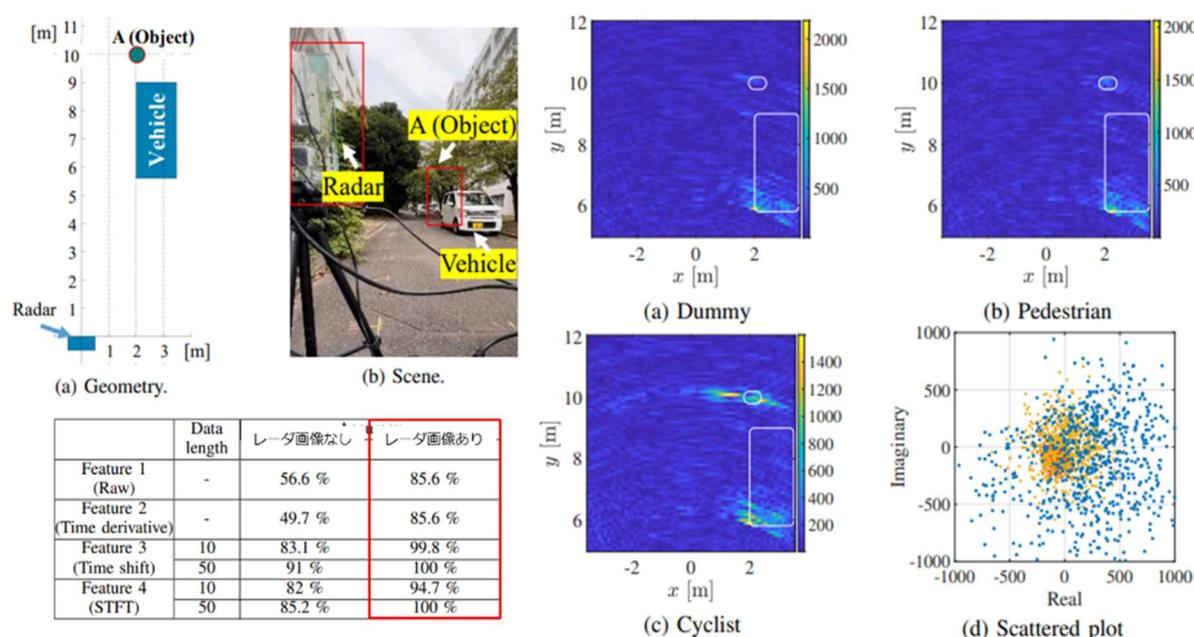


図 4：レーダ画像に基づく目標位置・物標の同時識別例（ダミー vs. 自転車 vs. 歩行者）

今後の課題

自動運転及び ADAS 技術は近年急速に発展しており、各電気・自動車メーカーが積極的な研究開発投資をしている。一方、周囲環境にロバストでかつ高い空間分解能をリアルタイムで実現するセンサは現状では確立されていない。これに対し、波長数 mm 程度を有するミリ波センサが有望であるとされているが、特に 10 m 程度の遠方において空間分離能が不十分であることが指摘されている。本課題では、「ドップラ速度」、「多重散乱波」、「レーダ画像」等のデータを有機的に相互作用させた多元的画像化法を導入しており、従来技術に対する複数の優位性を示している。

今後は、上記で構築した上記画像化において、新たに【複数レーダによる協調・統合処理】、【レーダ移動を用いた合成開口に基づく高分解能イメージング】を導入し、コヒーレント処理とインコヒーレント処理を統合したリアルタイム高分解能人体イメージングを実現していくことを検討している。また見通し外識別及び予測においては、時系列深層学習やベイズ推定等に基づく予測手法を確立させることで多重散乱波等を用いた見通し外で

の目標識別及び予測を実現させることで、安全・安心な自動運転技術等のための次世代センシング技術の実用化に貢献していく。

本助成に関わる成果物

[論文発表]

[1] Yoshiki Sekigawa and Shouhei Kidera, " Doppler Velocity Decomposition Based Radar Imaging by 79 GHz Band Millimeter Wave Radar", IEICE Trans. Commun., (in press), 2024.

[口頭発表]

国際会議論文（査読有）：

[2] Jianghaomiao He and Shouhei Kidera, "Radar Image Based Pedestrian Recognition in NLOS Area for Millimeter Wave Radar", The 2023 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Kuala Lumpur, Malaysia Oct., 2022.

[3] Junya Okazaki, Jianghaomiao He, and Shouhei Kidera, "Multiple Scattering Based Pedestrian Identification in NLOS Scene With Millimeter Wave Radar", The 2023 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Kuala Lumpur, Malaysia Oct., 2022.

[4] Yoshiki Sekigawa and Shouhei Kidera, "Accurate Doppler Velocity Associated Imaging Method for 79 GHz Millimeter Wave Band Radar", The 2023 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Kuala Lumpur, Malaysia Oct., 2022.

国内学会発表（査読無）：

[5] 李 承宰, 木寺 正平, "ミリ波近距離レーダの人体形状推定に特化したアレイ配置最適化法", 電子情報通信学会 総合大会, B-2-10, 広島大学, 東広島市、広島県, March, 2024.

[6] 松岡 毅流, 木寺 正平, "ミリ波レーダによる人体衝突回避のための時系列深層学習を用いたレーダ画像予測", 電子情報通信学会 総合大会, B-2-15, 広島大学, 東広島市、広島県, March, 2024.

[ポスター発表]

なし

[その他]

受賞：

2023年11月1日 IEEE ISAP 2023, Student Paper Competition, Finalist (Top 6), Junya Okazaki, Jianghaomiao He, and Shouhei Kidera, "Multiple Scattering Based Pedestrian Identification in NLOS Scene With Millimeter Wave Radar", The 2023 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Kuala Lumpur, Malaysia Oct., 2022.