



INTERVIEW

電気通信大学 大学院情報理工学研究科 木寺 正平教授 インタビュー



自動運転に向けて、見通し外の歩行者を識別 するミリ波センシングを

自動運転時代の到来により、衝突回避・周囲環境モニタリングの需要が高まっています。雨や霧、夜間などで視界が制限されていても、障害物の向こう側である見通し外でも、ミリ波センシング技術の進展により、歩行者を画像化、および識別することが可能になってきました。電磁波の計測技術と信号処理・画像解析・機械学習などの情報科学を融合させることで、従来のセンシングの分解能や精度を超える革新的な研究に取り組まれている木寺正平教授にお話を伺いました。

目には見えないけども、作用を持つ電磁波に 魅せられて

■研究者の道を選ばれた経緯をお聞かせください

京都大学では、当初、真面目に授業を受けておらず、アルバイトや旅行などに熱中していたのですが、留年が確定した時にこ

のままではいけないと思い、意識を切り替えて、一生懸命勉強しました。講義に没頭して、学問の深さに感銘を受けました。電磁場は目には見えないけど存在していて、光の速度で伝搬しながら、様々な作用を持つことに興味がありました。私が学部生として佐藤亨先生の研究室に配属された当時、超広帯域信号というものが通信分野で注目を集めていました。

佐藤先生は、その技術をセンシングに適用してみようという、新しい研究テーマを提案され、その先進性が非常に面白そうだと思います。

学部の研究段階から、「自由に取り組んでみてはどうか」と言われ、このときに画像化する方法のアイデアを出して受け入れられたこともあり、自分のオリジナリティを発揮できることに惹かれて、研究者の道に入りました。

■木寺研究室のホームページには、マイクロ波による医療診断・治療、コンクリート非破壊検査、人体センシングなど、幅広い分野の研究内容が掲載されています。研究テーマはどのように選定されていますか？

電気通信大学に入って間もない頃は、レーダ画像化法の基盤的な研究に注力しており、従来の画像化性能を超えるいくつかの手法を提案していましたが、それらの具体的な応用先は特に定めていませんでした。研究費助成に応募する際に応用先を意識しながら申請書を作成しているうちに、様々な応用展開に目を向けるようになったことがきっかけかと思います。

マイクロ波やミリ波などの電磁波は、光が透過しない領域でも透過するという特徴があります。これにより生体や道路下の内部のモニタリングが可能となり、車に搭載すれば視界不良時でも周囲を把握できます。様々な社会的、産業的需要の高い応用展開があることを改めて認識し、これまで独自に構築してきた研究手法を応用すれば、各分野でイノベーションを創出できるかもしれないと考えて、約10年前から応用を見据えた形で研究を進めています。

ミリ波レーダにより、見通し外の歩行者を識別

■SCAT 研究費助成では、ミリ波による人体検知の研究に取り組まれていました。どのようなご研究でしょうか？

自動運転では、可視光が届かない環境でも周囲を検知するため、レーザ・レーダ・カメラの併用が不可欠です。特にミリ波レーダは、距離と速度を正確に感知する点で優れています。私は、それまでのミリ波の画像化性能にはない付加価値が与えられないかと様々なアプローチを考えながら、高分解能画像化と見通し外人体識別を実現する独自のイメージング技術を提案しました。(図1)

1つ目のRPM法(Range Points Migration)についてお話しします。レーダが電波を出している方向の距離分解能は数十cmから数cmです。しかし、水平方向の角度分解能は、遠く離れば悪くなっていきます。たとえば、79GHz帯のミリ波レーダで100mm程度のアレイの開口長の場合、10mぐらいでは約50cmになってしまいます。周波数を高くすると分解能を高めることができますが、光に比べてミリ波は波長が長く、波長限界により分解能が制限されます。通常、レーダは対象までの距離を測定するとともに、複数素子での位相変動量を用いて到来角度を決めます。RPM法は、観測される距離点群(Range Point)を反射点群に写像することで、位相を使わずに角度を推定できるため、特定の条件では、従来の分解能制限を超えることができます。従来までのレーダ画像は、強度を連続的な空間分布と

して表示することが主流でしたが、RPM法では、目標境界上の反射点の点群集合をレーダ画像として提示するという、従来とは全く異なるアプローチに基づきます。

2つ目は多重散乱波による影領域イメージングです。たとえば、室内壁面の表面粗さは光の波長(数百nm)に比べて十分大きいので、壁は鏡にはなりません。ミリ波の波長(数mm)では壁は鏡面のような働きを担い、壁と目標との間で発生する多重反射波から、ターゲットの側面や裏側の部分まで見ることができます。この多重散乱波は虚像の要因となるため、従来では抑圧する方向にしか処理がなされていませんでしたが、逆にこれを積極的に活用することで、これまで見えていなかった見通し外領域を画像化できるようにした、という点に革新性があったように思います。

また、これらのイメージング技術で得られた画像に、速度情報を加えると、人を識別しやすくなります。歩行時には人体の各部位が異なるドップラ成分(マイクロドップラ)を正確に推定するために、独自の超分解能ドップラ推定法WKD法(Weighted Kernel Density)を導入しました。これにより得られた速度情報をRPM法に統合することにより人の識別精度を向上させることに成功しました。通常のレーダ画像では人の形がぼんやりとしか見えませんが、動く速度の違いを色で表して重ねることで、腕や脚などの動きを分離して表現でき、人らしい形状として明確に描き出すことが可能になります。(図2)

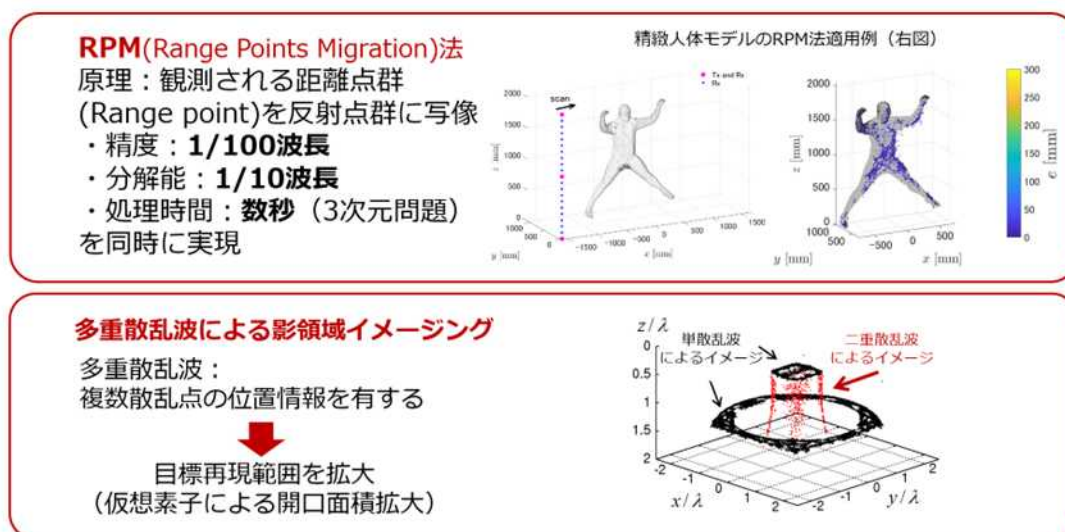


図1 独自のイメージング技術

レーダの特徴：対象の**ドップラ速度**を高分解能・高精度に推定可能
 ⇒歩行者の各部位の動きに起因する**マイクロドップラ**によるレーダ画像解析

提案技術：**マイクロドップラ解析+イメージング**による人体識別
 ⇒ 多面的な情報の統合による**目標識別の高精度化**

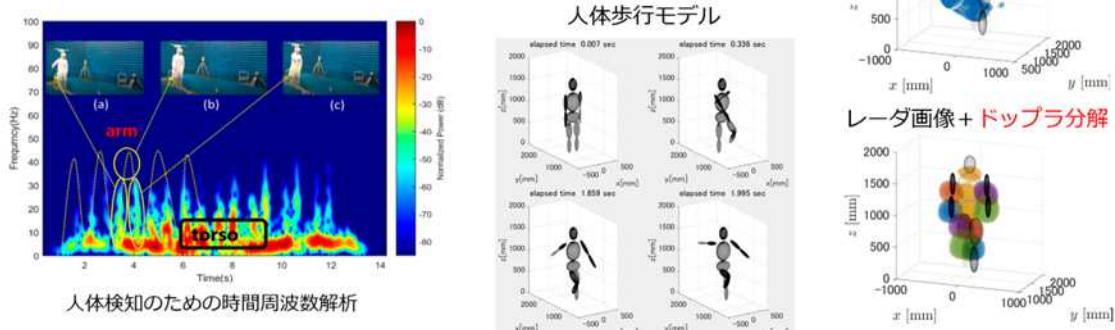


図2 ドップラ速度とレーダ画像の統合

**コヒーレント/インコヒーレント統合による革
 新的イメージング法**

■駐車車両の隙間から突然出てくる子供の飛び出しを検知することは喫緊の課題ですね。分解能や精度を高めるために、どのような工夫をされているのでしょうか。これまでミリ波レーダ画像・速度処理では、位相情報に基づくコヒーレント処理が主流でした。

一方で、コヒーレント処理では位相不確定性に起因する分解能や推定範囲制限等がありました。このため、我々は位相情報を使うコヒーレント処理と振幅のみの情報を使うインコヒーレント処理を統合することで、互いの長所を最大限に引き出して、従来の分解能や精度を大幅に超える画像と速度との統合イメージング技術を提案しています。(図3)

- 車載レーダの帯域
1. 77GHz帯(帯域幅：1GHz, 比帯域：1.3%)
 2. 79GHz帯(帯域幅：4GHz, 比帯域：5.6%)
 3. 24GHz帯(帯域幅：200MHz, 比帯域：0.8%)
- 高い周波数帯では、インコヒーレント処理(RPM, WKD)のメリットが生かせない

目的：**コヒーレント処理(SAR, STFT)**と**インコヒーレント処理(RPM, WKD)**の統合 + ドップラと画像化の統合



図3 車載レーダを想定したミリ波イメージング

従来技術として知られる、画像化の SAR 法 (Synthetic Aperture Radar) と速度推定の STFT 法 (Short-Time Fourier Transform) は、コヒーレント処理です。SAR 法には、分解能の制限があることや、位相不確定性による虚像が生じるといった課題が挙げられます。また、STFT 法には、時間分解能と周波数分解能に

トレードオフの関係があるため、両者を同時に高められないといった制約があります。一方、先に紹介した画像化の RPM 法と速度推定の WKD 法は、インコヒーレント処理であり、上述のコヒーレント処理の課題を本質的に克服することができます。しかしながら、車載レー

ダの帯域幅は、79GHz帯では4GHz、77GHz帯では1GHzに限られており、比帯域(=帯域幅/中心周波数)が小さい制約があります。このような高周波数帯では、RPM法とWKD法の推定精度が低下するといった課題がありました。

これを解決するため、我々の技術では、角度・時間・速度方向のデータ分離はコヒーレント処理(SAR, STFT)で行い、その後の画像化・速度推定をインコヒーレント処理(RPM, WKD)で行います。コヒーレント処理で発生する虚像を抑圧し、さらにインコヒーレント処理で比帯域が小さい際に生じる分解能の制約を解消することができます。これらの統合は、同分野では世界的にも例をみない独創的な処理法であると考えています。

■車載レーダの分解能を改善するためにどのような工夫をされているのでしょうか。

レーダ移動と複数レーダを組み合わせることで、遠距離でも高精度に識別できる高精度・高分解能イメージングを提案しました。

レーダ移動を利用して有効開口長を拡大し、斜め前方方向に対する分解能の向上を図ることができます。加えて、複数のレーダを送信パルスの波長以上の間隔で配置するスパースアレイ構成を用いることで、さらに分解能を高めることができます。スパースアレイ構成では、位相の不確実性により虚像が発生するという課題がありますが、レーダを移動させながら取得した複数の画像をコヒーレントに重ね合わせる(位相情報を保持したまま加算する)ことにより、虚像を抑圧することができます。

(図4)

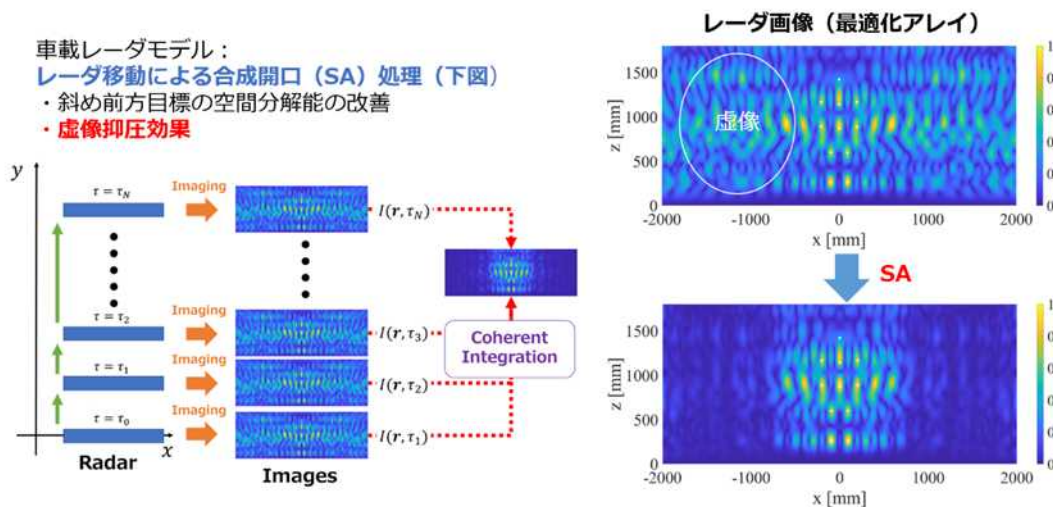


図4 レーダ移動に基づく高精度・高分解能イメージング

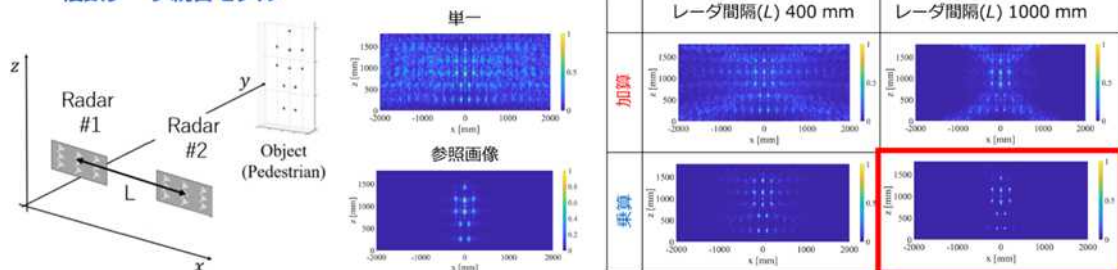
加えて、車のフロントに2台のレーダを約1m間隔で設置して、ある時点の画像を単純に加算または乗算することで、虚像を抑圧するとともに空間分解能を向上させました。(図5) レーダ移動によって得られた時系列の画像を重ね合わせるとともに、同一タイミングで取得した複数レーダの画像を合成することによ

り、より高品質な画像生成を実現することができます。高速走行中の車両でも人の動きをリアルタイムに検出するには、今後もたゆまぬ研究が必要です。将来的には、急に飛び出してくる子供の動きを予測し、運転者に警告を発することで、事故を未然に防ぐことを目指しています。

移動レーダによる合成開口処理の課題：
 ・軌道誤差(mm級)に対する分解能劣化
 ・前方方向の角度分解能不足(特に10m以上の距離)

解決策：
 ・複数レーダによる虚像抑圧
 + 空間分解能の改善
 ⇒高精度自己位置推定が不要

複数レーダ統合モデル



虚像抑圧 + 空間分解能の改善

図5 複数レーダ統合による高分解能・虚像抑圧

助成によって育まれた研究の芽と若手支援 への期待

■これまでに SCAT 研究費助成を2回にわたって受けていただいています。応募理由をお聞かせください。

電磁波系を研究していたので、情報通信分野を助成対象としている SCAT を応募先として選びました。電気通信大学に着任した当初、研究予算が必要となり、若手研究者の支援の実績があった点が決め手となりました。

■SCAT の助成はどのように役立ちましたか？

解析系ですので、サーバを頻繁に利用します。助成金は、サーバの購入や性能向上のためのメモリ増設などに充てました。電磁波解析のシミュレーションは1週間かかることがありますが、GPU を使えば1日で終わります。このような基盤的な解析ソフトウェアの購入にも利用しました。

■SCAT の助成についてどのような印象を持たれましたか？

助成団体によっては、研究計画通りに進捗しているかを厳しく確認されます。しかし、研究は実際に進めてみないと方向性が分からないことがあります。柔軟性を認めていただいたことは助かりました。

■公的助成と SCAT 助成を同時に受けていらっしゃいましたが、相乗効果はありましたか？

公的助成は、申請したテーマに厳密に関連する範囲にしか使用できません。一方で、私は様々な研究テーマに取り組んでいますので、公的助成だけで必要な費用をすべて賄うのは難しい状況でした。関連性がある他の研究にも活用でき、公的助成を補完する形で相乗効果がありました。

■SCAT の助成金が最も効果を発揮するのは、どのようなフェーズですか？

最初の助成は、基盤的な研究テーマであったので、採択されたときにとてもうれしく感じました。この助成をきっかけに、研究が発展したと思います。具体的な応用先がなくても、将来性を評価していただけることは、大きな励みになりました。最近では、若手研究者が短期間で成果を求められる傾向が強まり、その分プレッシャーも大きくなっています。こうした状況は問題があると感じています。挑戦的・独創的な課題に対して、100万円、200万円といった支援をいただけることは、資金面だけでなく、研究者のモチベーション向上につながります。今後も、このような立ち上げ期の若手研究者の支援を期待しています。

新しい発想を生む分野交流の場への期待

■分野交流の場を設けてほしいという要望を先生方からいただいています。分野交流をどのような形で進めるとよいか、ご意見をお聞かせください。

私は科学技術振興機構（JST）の創発的事業に参加しており研究者は多くのグループに分かれています。その中でグループ間の交流会が開催され、いわゆる「融合の場」と位置付けられています。そこでは、ポスターと発表やプレゼンテーションが行われ、普段接点のない研究者と交流でき、刺激になります。いろいろな方面からコメントがあり、そこでコラボレーションの可能性も生まれてきます。形式は何でもよいと思いますが、こうした議論や交流の場があると、さまざまな新しいアイデアの芽が生まれます。

プロフィール

2003年京都大学工学部電気電子工学科卒業。2005年同大学院情報学研究科修士課程修了、2007年同博士課程修了。博士（情報学）。同年京都大学大学院情報学研究科、日本学術振興会 特別研究員(兼任)、2009年 電気通信大学助教。2014年同准教授、2016年 University of Wisconsin Madison 訪問研究員、2017年科学技術振興機構、戦略的創造研究推進事業、さきがけ研究員(兼任)、2023年電気通信大学大学院 情報理工学研究科 教授、現在に至る。