

## 論文の内容の要旨

論文題目 複素ニューラルネットワークによる複素テクスチャ識別  
ミリ波コヒーレントイメージングシステム  
(Millimeter-wave Coherent Imaging System Discriminating  
Complex Texture using Complex-valued Neural Networks)

氏 名 有馬 悠也

ミリ波はプラスチックや衣服、紙などに対する高い透過性を持つ。そこで、空港などで従来の金属探知機では探知できない、衣服の下に隠し持った液体爆弾などの非金属性の危険物を検知する全身ボディスキャナーに利用されている。しかし、これらのシステムでは対象をそのシルエットで判断するために高い解像度が必要となり、長い走査時間や衣服を透過することによるプライバシー上の問題が生じてしまう。また、ミリ波のような高周波を取り扱う回路は減衰に対する設計コストが高く、装置全体のコスト増大につながる。そこで、我々は新幹線改札などに設置し、通過する乗客などの移動する対象を可視化する、リニアアレイアンテナと複素自己組織化マップ (CSOM) を組み合わせたミリ波アクティブイメージングシステムを提案した。受信アンテナアレイに我々の研究室で開発されたBulk LTSAを使用し、振幅変調したミリ波連続波を照射信号として包絡線位相検波 (EPD) と組み合わせることで高速な計測とシステムの低コスト化を実現する。さらに、画像処理にCSOMを用いることで低解像度のデータからでも適応的に可視化を行うことで、高速な計測の実現とプライバシーの問題の解決を図る。

アクティブイメージングの照射信号としてGunn発振器で発生させた34GHzのミリ波を信号発生器で発生させた800から1000MHzの正弦波で振幅変調したものをを用いる。ホーンアンテナから送信された信号は対象に当たって反射・散乱され、bulk-LTSAで受信され、アンテナに直結された包絡線検波回路で整流されて変調周波数にまで落とされる。これにより、ミリ波を直接取り扱う範囲を限定することができ、ミリ波帯のアンプの使用を減らしシステムコストを抑えることが可能となる。その後、信号は増幅され、IQ復調器で変調信号とのホモダイン検波によって変調周波数に対応する位相変化と振幅として

観測される。変調周波数を高速に切り替えて測定を行うことで、周波数多重化した測定データを取得している。この包絡線位相検波（EPD）によって、ミリ波の直進性と透過性を利用しながら、変調信号の30cm前後の波長を利用することができ、人体やペットボトル程度の大きさを検出するのに最適な位相情報を得ることができる。

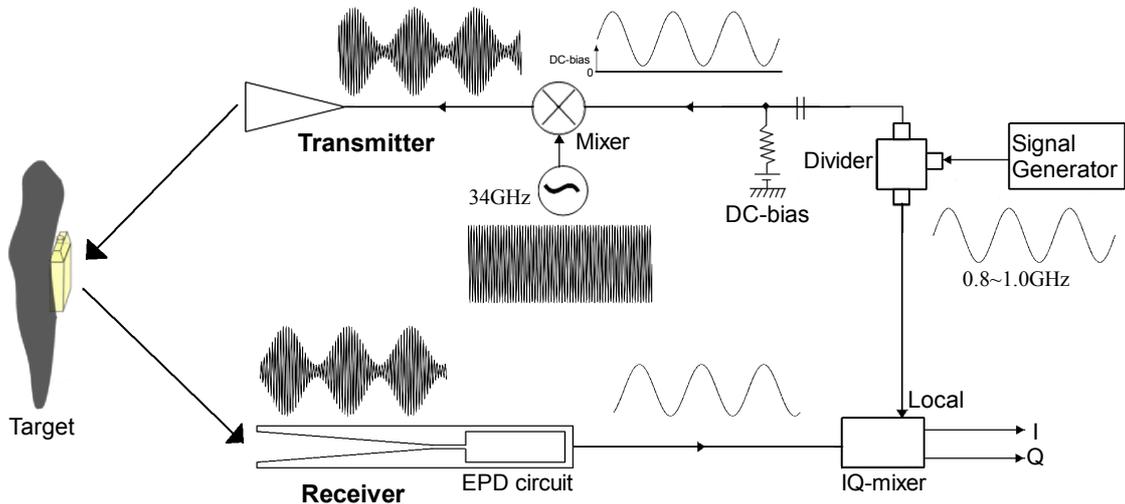


図 1 振幅変調と包絡線位相検波（EPD）による検波の模式図

プライバシーの問題と計測時間の長さを解決するために、我々のシステムでは低解像度の画像からでも可視化できるようCSOMを利用する。CSOMは地中に埋まった地雷を可視化する地中レーダ(GPR)システムにおいて有効であった。石や土、金属片、地雷の反射率の値は非常に近いが、GPRにおいて我々はそれらの複素振幅テクスチャの差異に注目した。これは現在の乗客の状況と類似している。液体爆弾の入ったPETボトルは人体とほぼ同じ反射率を持つ。そこで、我々は位相情報あるいは複素振幅全体のテクスチャに注目する。局所領域の複素テクスチャは測定データを一定の大きさのウィンドウで区切り、実空間上と周波数空間上の相関を計算することで抽出される。抽出された特徴量はCSOMに入力されて区分される。我々のシステムではニューロンが円形に並んだRing CSOMを用い、入力した特徴量をその類似度に基づいて一次元のクラスに区分する。区分結果を色相環上の色として、元データの位置に出力することで色分けされた可視化画像を得る。この際、CSOMの持つ参照ベクトルの勝者を決めるために複素内積のメトリックを用いる。複素内積のメトリックを用いることで、ユークリッド距離を用いる場合に比べ、より位相情報を重視した区分が可能となる。

実験では水の満たされた500mLのPETボトルを測定対象とした。計測された振幅と位相のデータではノイズによって対象物の形状ははっきりとしていない。しかし、CSOMによる区分を行うことで、背景と対象のクラスを分離し可視化が可能であった。また、薄い布による遮蔽があっても対象の可視化が可能であるということも示した。

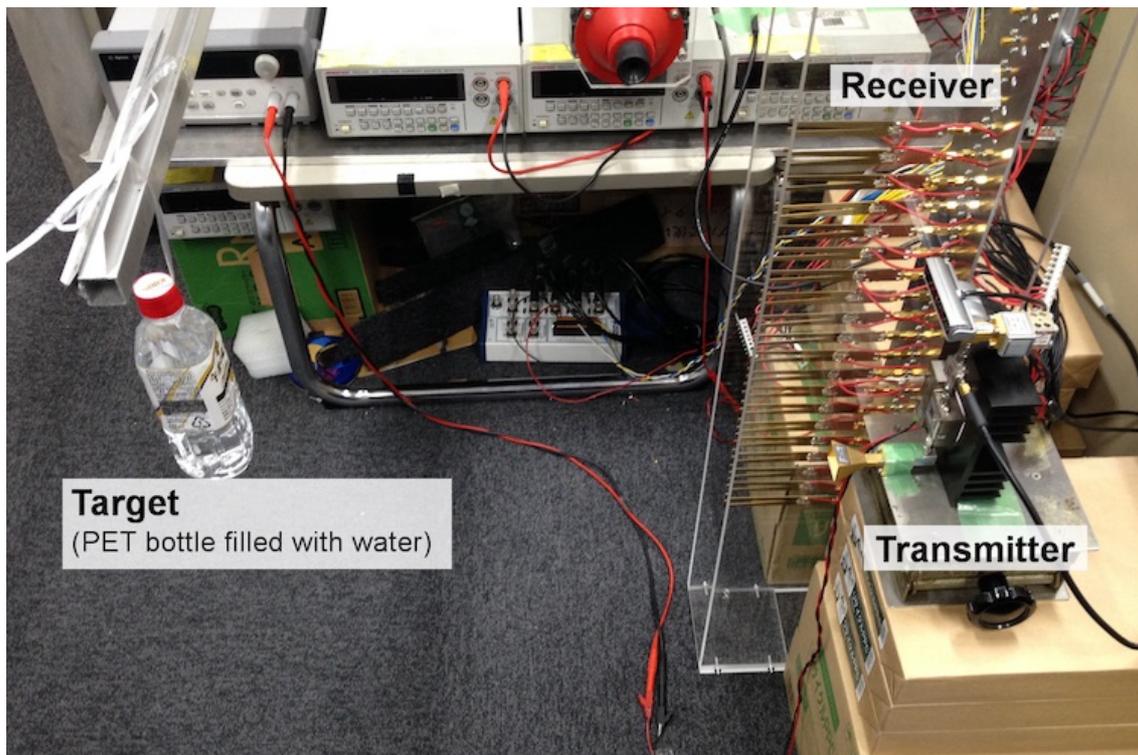


図 2 水の入った PET ボトルを対象とした測定のセットアップ

装置の構成や測定、画像処理において設定すべきパラメータは数多く存在し、最終的に得られる可視化画像の精度に影響を与える。そこで、いくつかのパラメータについて実験を通して検証を行った。

リニアアレイアンテナで移動する対象を測定するため、対象の移動方向の分解能は対象の移動速度と、装置の計測頻度によって決定される。照射信号の変調周波数を高速で切り替えながら測定を行い、周波数多重化したデータを取得しているため、計測頻度は変調周波数のステップ数にほぼ反比例することになる。そこで、周波数ステップ数を減らして計測を高速化する余地について検証するために、周波数ステップ数による可視化精度への影響を実験した。その結果、現状の手法では可視化精度を保つためには十分な周波数ステップ数を維持する必要がある、可視化精度と測定頻度とのトレードオフの関係となることを確認した。

CSOMで処理する局所領域のテクスチャ特徴量を抽出するウィンドウサイズが可視化精度に与える影響について検証した。アンテナとの距離の異なる複数の対象を用いた実験により、アンテナと対象との距離と可視化精度を最大化するウィンドウサイズの間には相関があることが判明した。さらなる検証により、特定の対象を観測出来るアンテナエレメントの本数とアンテナの指向性、測定対象までの距離による幾何的な関係式を導出した。このことから、ウィンドウサイズの設定という画像処理段階でのパラメータ設定による特定の距離にのみ焦点を当てた可視化の可能性を示した。

提案するシステムでは移動する対象をコヒーレンス性の高い信号で測定するため、計測時の干渉の悪影響 (harmful effects) を受けやすく振幅変動や位相歪を生じやすい。このような振幅変動や位相歪はCSOMによる可視化において偽画像を発生させ、精度に悪影響を与える。これまでは、異なる変調周波数で測定したデータを組み合わせることや特徴量を抽出するウィンドウサイズを大きくとることによって、特徴量ベクトルにおける個々の振幅変動や位相歪の影響を小さくし、可視化精度を保ってきた。しかし、それらの手法は解像度の点で問題があった。そこで、今回は特徴量抽出過程に複素オートエンコーダによる特徴量の精製を導入する手法を提案した。オートエンコーダは入力層と出力層のニューロン数が同じく、隠れ層のニューロン数がそれより小さい砂時計型の構造をしており、入力と教師に同じ信号を与えて逆伝搬で学習することにより、隠れ層では対象データの特徴をより少ない次元で効果的に表す表現形式を自動的に獲得することとなる。学習が完了したオートエンコーダの隠れ層の値を取り出すことで対象データの特徴を保ったまま次元の削減を行うことができる。複素テクスチャとして抽出された特徴量ベクトルを複素オートエンコーダに入力し、隠れ層の出力を新たな特徴量としてCSOMに入力して区分を行う。オートエンコーダの隠れ層のニューロン数や学習過程の違いによる影響について実験により検証を行った。その結果、適切な隠れ層ニューロン数を持つ複素オートエンコーダを用いて、特徴量を精製することで、干渉による振幅変動や位相歪の影響下でも適切な特徴表現が可能となり、CSOMでの可視化精度の向上に繋がるということを示した。

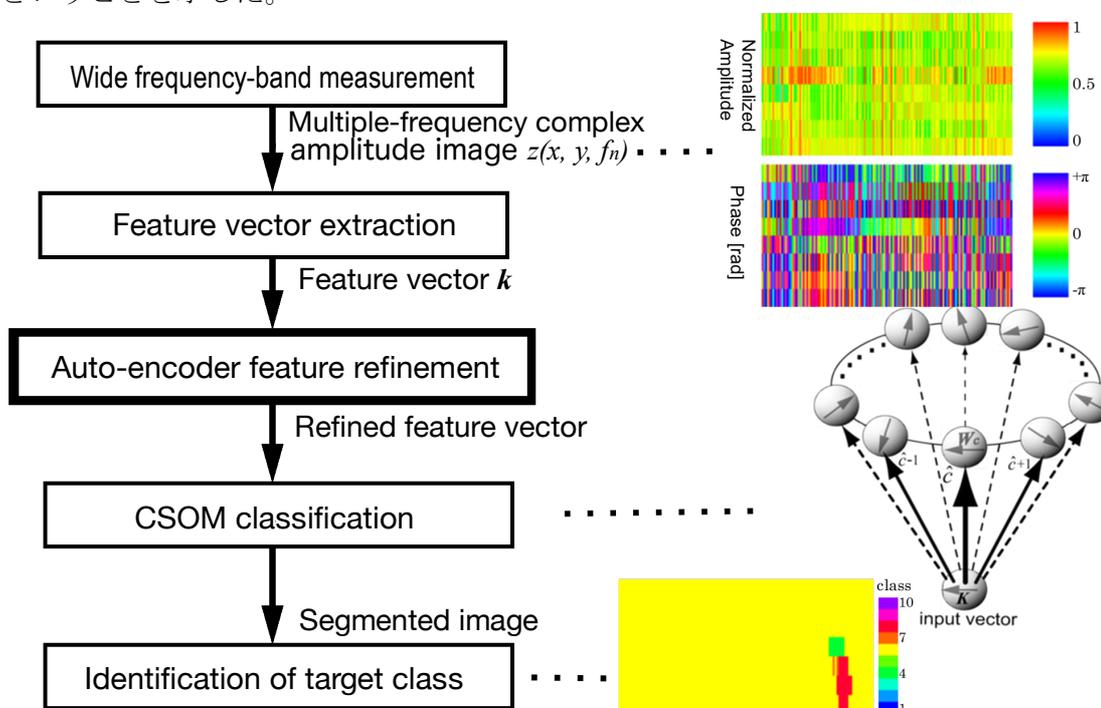


図 3 オートエンコーダによる特徴量精製を挟んだ画像処理の流れ