

# アンテナ特性に起因した異方性を軽減する自己組織化マップを用いた 1 次元アレイ アンテナ式地雷可視化システム

電気電子工学科 廣瀬 (明) 研究室

学部 4 年 03-120472 小山 英利香

## 1 研究背景と目的

電磁波を用いた地中探査レーダ (Ground-Penetrating Radar: GPR) は埋設物探査や地下水調査など多くの分野で用いられており、プラスチック地雷の探査にも活用できる技術として研究の対象となっている [1] [2]。我々は GPR の散乱波により得られた地雷特有のテクスチャの特徴量を複素自己組織化マップ (Complex-valued Self-Organizing Map : CSOM) によって特定することで、地雷を可視化するシステムを実現させた [3]。しかし本システムには、計測やメンテナンスに時間がかかる、反復使用で寿命が短い、直接結合の影響が大きい、という課題が残されていた。

本稿では上記課題を解決した新型となる 1 次元アレイアンテナ式地雷可視化システムに起因する問題をソフトウェア面で解決する手法を提案する。

## 2 地雷可視化システム

### 2.1 1 次元アレイアンテナ式

新しい 1 次元アレイアンテナ式地雷可視化システムの概略は図 1 の通りである。アンテナを 1 列に配置し、アンテナ数とメカニカルスイッチ数を削減した。配線数、高周波用コネクタの数も大幅に削減し、信頼度が向上した。

また、データはアンテナ配列方向を  $x$  方向とし、アクチュエータにより直交方向 ( $y$  方向) にアンテナを動かすことで、2 次元で従来のフロントエンドと同程度の情報量を得ることができる。

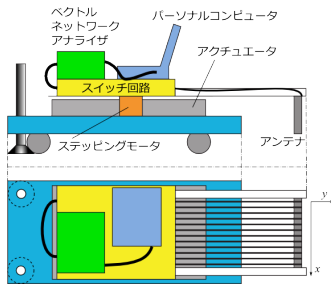


図 1: 1 次元アレイアンテナ式地雷可視化システム

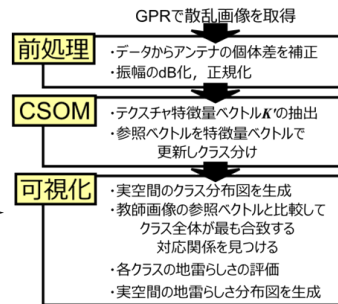


図 2: データ取得から地雷可視化までの流れ

### 2.2 可視化処理

図 2 にシステムの可視化処理の流れを示す。事前に補正用のデータを取得しておき、補正用データを用いて直接結合を減算し、補正後のデータを得る。その後、振幅を  $\log$  スケールにして dB で表し、正規化する。ここまでを前処理とし、得られたデータを SOM に掛ける。

まず、 $L \times L$  ピクセルの局所ウィンドウを設定して、テ

クスチャ特徴量を抽出する。位置  $(x, y)$  における  $K(x, y)$  は、空間的なテクスチャ特徴量  $K_m$ 、 $K_s$  と周波数領域のテクスチャ特徴量  $K_f$  からなる。空間的なテクスチャ特徴量は、各  $(l_x, l_y)$  の複素素値の平均  $K_m$ 、 $(l_x, l_y)$  の自己相関  $K_s(0, 0)$ 、 $(l_x, l_y)$  と  $(l_x, l_y + 1)$ 、 $(l_x + 1, l_y)$ 、 $(l_x + 1, l_y + 1)$  との相互相関  $K_s(0, 1)$ 、 $K_s(1, 0)$ 、 $K_s(1, 1)$  をとる。

$$K_s = \begin{bmatrix} K_s(0, 0) & K_s(0, 1) & K_s(1, 0) & K_s(1, 1) \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

ただし  $T$  は転置を表し、 $l_x$ 、 $l_y$  は局所ウィンドウの中の座標であり、 $N$  は周波数領域で使用する画像の数である。また周波数領域での特徴量として、 $f_{\text{int}}$  高い周波数での同じ位置との相互相関  $K_f$  をとる。これらの特徴量を式 (2) のように 1 つのベクトルにまとめている。その後、 $(x, y)$  について掃引し、特徴量ベクトル  $K(x, y)$  を次のように得る。

$$K = \begin{bmatrix} K_m & K_s & K_f \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

これを SOM に代入する。最終的に生成された SOM はクラスごとに色分けされた区分画像となっている。

## 3 異方性を軽減する自己組織化マップ

### 3.1 異方的重み付け

今回発生した縦縞ノイズの影響を抑えるために縦方向の変化に敏感になるように CSOM の自己組織化ダイナミクスに異方性をとり入れた。(発表文献 [1]) まず、全ての  $(x, y)$  について特徴量ベクトルの分散共分散行列  $\Sigma$  を算出する。次に、特徴量ベクトルの要素のうち異方性があると判明しているものを選定する。今回は、 $K_s(0, 1)$ 、 $K_s(1, 0)$ 、 $K_s(1, 1)$  の 3 要素の間に異方性があると考えた。 $\Sigma$  からこの 3 要素同士の共分散行列を抽出し、行列  $\Sigma_w^{-\frac{1}{2}}$  を取得する。これを用いて重み付けを行う。

$$\Sigma_w = \begin{pmatrix} I_2 & 0 \\ & \Sigma_3 \\ 0 & I_9 \end{pmatrix} \quad (3)$$

勝者クラスを決定する際に従来はユークリッド距離を用いていた。

$$\tilde{c}_E = \arg \min_c \|K - w_c\| \quad (4)$$

これを重み付けすると、 $\Sigma_w^{-\frac{1}{2}}$  はエルミート行列であるので以下のように変形できる。

$$\tilde{c}_E = \arg \min_c \|\Sigma_w^{-\frac{1}{2}} (K - w_c)\| \quad (5)$$

$$= \arg \min_c \sqrt{(K - w_c)^\dagger \Sigma_w^{-1} (K - w_c)} \quad (6)$$

この式から分かるように、異方性のある要素においてはユークリッド距離ではなくマハラノビス距離となっている。

### 3.2 複素内積での勝者クラス決定法

CSOM で各特徴量ベクトルの入力に対して勝者クラスを決定する方法として、特徴量ベクトルと参照ベクトルの複素内積をとり最大となるクラス  $\tilde{c}_I$  を選択する方法 [4] を導入する。

$$\tilde{c}_I = \arg \max_c \left( \left| \frac{\mathbf{K}^\dagger \cdot \mathbf{w}_c}{\|\mathbf{K}\| \|\mathbf{w}_c\|} \right| \right) \quad (7)$$

従来の地雷可視化システムでは式 (4) を選択していた。しかし、本報告で提案するシステムではコヒーレンスにより敏感な本手法が有効であると予想できる。

次に、本手法で前項で説明した異方的重み付けを行う場合の条件式を以下に表す。

$$\tilde{c}_I = \arg \max_c \left( \left| \frac{\left( \Sigma_w^{-\frac{1}{2}} \mathbf{K} \right)^\dagger \cdot \left( \Sigma_w^{-\frac{1}{2}} \mathbf{w}_c \right)}{\|\Sigma_w^{-\frac{1}{2}} \mathbf{K}\| \|\Sigma_w^{-\frac{1}{2}} \mathbf{w}_c\|} \right| \right) \quad (8)$$

## 4 模擬地雷計測実験

### 4.1 実験方法

外径 40cm の立方体型の植木鉢を用意し、そこに湯いた土を入れ模擬地雷を埋設した。土には小石や小枝などの他の散乱源も多数存在している。

### 4.2 計測結果

図 3、図 4 は、GPR からベクトルネットワークアナライザを通じて得られた振幅と位相のデータを補正前の段階で画像として表示したものである。アンテナの個体差が縦縞となって表れているのが確認できる。図 3 は模擬地雷を埋設した地面を計測したもの、図 4 はアンテナ下 90cm に何も遮るものがない空間を計測したものである。図 4 のデータを直接結合の補正として用いて補正した結果が図 5 である。前処理では縦縞を軽減することはできるものの、完全に除去することはできなかった。

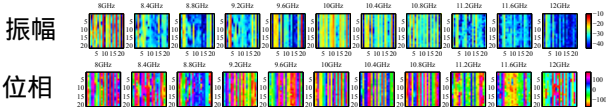


図 3: 模擬地雷を埋設して計測したデータ

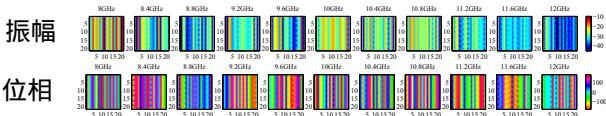


図 4: 空中を計測したデータ

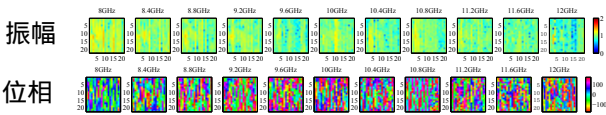
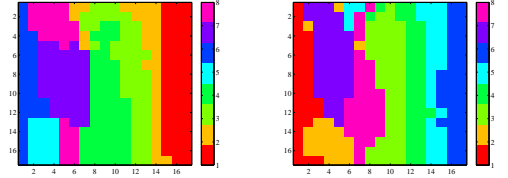
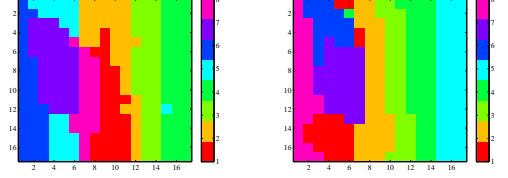


図 5: data を補正した後の画像



異方的重み付けなし 異方的重み付けあり  
図 6: ユークリッド距離と異方的重み付け



異方的重み付けなし 異方的重み付けあり  
図 7: 複素内積と異方的重み付け

### 4.3 2つの新手法と区分画像

前処理を適用し補正した後の画像に対し、異方的重み付けと複素内積での勝者クラス決定法を試した。まず、ユークリッド距離で勝者クラスを決定する従来の手法で異方的重み付けを行った SOM の結果が図 6 である。次に、複素内積を用いた結果が図 7 である。

## 5 考察と今後の課題

### 5.1 勝者クラスの決定法の選択

異方的重み付けを行うことにより、図 6 において縦縞の影響が軽減されたことを確認した。しかし、ユークリッド距離においては異方的重み付けを行うことで地雷クラスの形状が歪んでしまっていた。

複素内積による勝者クラス決定法は、異方的重み付けを行わない場合には、ユークリッド距離による勝者クラス決定法よりも形状が歪んでいるが、異方的重み付けを行った際には最も地雷の形状を適切に判断できている。以上より、4 手法の比較において、異方的重み付けを行いつつ複素内積による勝者クラス決定法を用いるのが適切であると言える。

### 5.2 今後の課題

継続して計測速度を改善しつつ、アンテナ部の機構を見直し性能を向上させる。また、データ数を増やして実際に未知画像を取得し地雷の判別率を算出、実用性を検討する。

## 参考文献

- [1] Jeroen Groenenboom, Alexander Yaroyov, "Data Processing and Imaging in GPR System Dedicated for Landmine Detection," Subsurface Sensing Technologies and Applications, vol.3, no.4, pp. 387-402, 2002.
- [2] M. Sato, K. Takahashi, "Development of Dual Sensors and Deployment in Mine Affected Countries," in Anti-personal Landmine Detection for Humanitarian Demining, pp. 27-44, 2009.
- [3] Y. Nakano and A. Hirose, "Improvement of plastic landmine visualization performance by use of ring-csom and frequency-domain local correlation," IEICE Transactions on Electronics, vol. E92-C, no. 1, pp. 102-108, January 2009.
- [4] A. Hirose and S. Yoshida, "Generalization Characteristics of Complex-Valued Feedforward Neural Networks in Relation to Signal Coherence," IEEE Neural Networks and Learning Systems, vol.23, no.4, 541-551, April 2012.

## 発表文献

- [1] E. Koyama, K. Matsuyama, A. Ejiri, and A. Hirose, "Landmine visualization system using complex-valued self-organizing map with one-dimensional array antenna," IEICE Neurocomputing, Technical Report, vol.113, no.500, pp. 69-74, March 2014.