

卒業論文中間報告チェックシート

所属学科：電子情報工学科 学生証番号：03-183007 氏名：今井 隆太

論文題目：圧縮センシングを用いた高速な地雷可視化システム

中間報告提出前に以下の各項目を点検し、指導教員の確認をもらった後、中間報告書と一緒に（先頭にして）に提出すること。

（□にレ印を付けて点検すること）

<チェック項目>

- ☒ 論文題目は指導教員と相談して決めたか？
- ☒ 中間報告書の内容について提出前に指導教員と十分議論したか？
- ☒ 中間報告は10ページ前後か？（ただし、表紙、目次は除く）
- ☒ 1段組となっているか？
- ☒ 表紙の学生証番号、氏名に誤りはないか？
- ☒ 指導教員の名前に誤りはないか？
- ☒ 提出日に誤りはないか？

<指導教員の確認>

指導教員名：廣田 明 署名

卒業論文中間報告

圧縮センシングを用いた高速な地雷可視化 システム

2020 年 10 月 1 日提出

指導教員 廣瀬 明 教授

電子情報工学科
03-183007 今井隆太

目次

1	序章	3
1.1	背景	3
1.2	目的	4
2	従来手法と基本原理	4
2.1	計測方法	4
2.2	特徴量ベクトルの抽出	5
2.3	圧縮センシング	6
3	圧縮センシングを用いた高速な地雷可視化の提案	6
3.1	高次元特徴量データを扱うときのスパースティの表現	7
3.2	圧縮センシングの適用	8
3.3	適応的な計測	9
4	実験結果	9
4.1	CSOM とモデル内の特徴ベクトルの類似度の比較	9
4.2	少数の計測値から補間を行った際の評価	9
5	今後の予定	10

1 序章

1.1 背景

1.1.1 地中探査レーダによる地雷探査

電磁波を用いた地中探査レーダ (Ground-Penetrating Radar:GPR) は探査対象への非接触・非破壊探知が可能のため、埋設物探査や地下水調査など多くの分野で用いられている [1][2]。同様に、プラスチックなどの非金属で製作された地雷の探査にも活用できる技術として、広く研究の対象となっている [3][4][5][6] [7][8]。

しかし GPR を用いた地雷探査には以下の難点がある。

1. 対象となる地雷が小型である
2. 金属に比べて反射率が低い
3. 地中の浅い部分を探査するために地表面の影響が相対的に大きい
4. ほかの散乱体が存在する

これらの要因により、散乱波の位相と振幅のデータだけで埋設された地雷を直接特定することは難しい。

1.1.2 地雷可視化システム

先述の問題に対して、本研究室では GPR の散乱波により得られた地雷に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 (図 1) [9][10][11][12]。

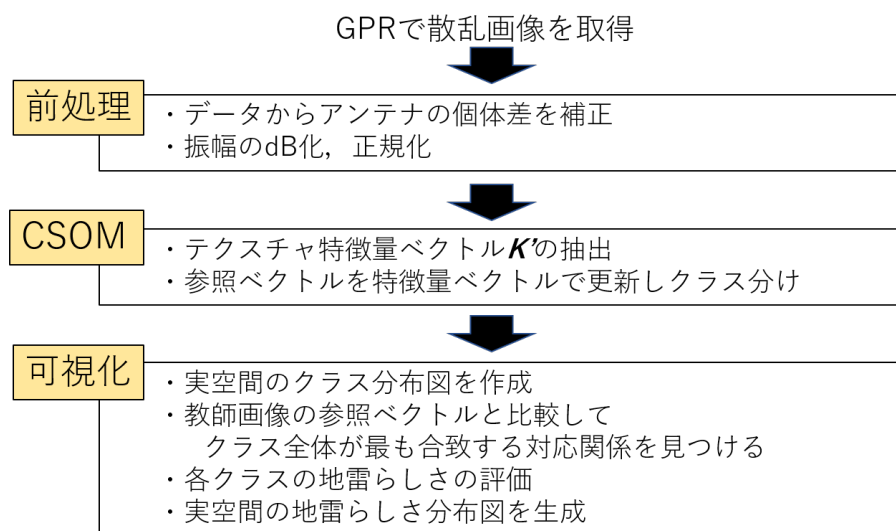


図 1: CSOM を利用した地雷可視化の流れ

1.1.3 問題点

先述したシステムの問題点として、計測に時間がかかることがあげられる。一辺が約 15cm の正方形のエリアを観測するのに約 5 分の時間がかかっており、広いエリアにおいて複数の地雷を検知することを考えるとこ

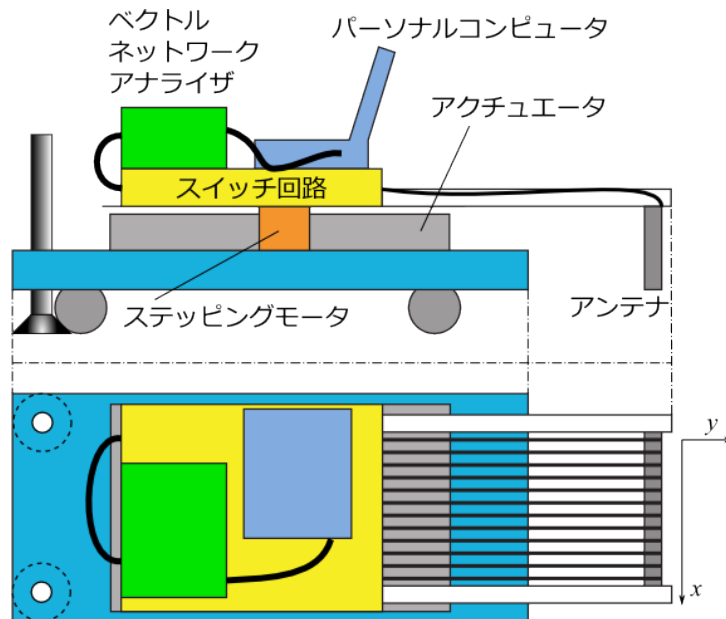


図 2: 1次元アレイアンテナ式地雷可視化システム

の計測時間では現実的ではない。また非常に大型で個人での運搬が困難なため、機械の運搬や稼働に人手や時間がかかってしまう。

1.2 目的

本研究では地雷可視化に必要な時間を短縮するために圧縮センシングを用いて少ない計測点から地雷の位置を特定することを目的とする。また圧縮センシングを用いることで正確にすべての座標を計測する必要がないため、一対のアンテナのみの軽量のシステムを人の手で動かして計測することができる、といったメリットも挙げられる。先行研究で使用している計測データと同じ型のデータから1部を取り出し、部分的なデータから地雷を可視化することを目指す。

2 従来手法と基本原理

2.1 計測方法

図2のような装置を使い計測を行う。Vector Network Analyzer(VNA)を用いて位相と振幅の情報を持った散乱画像を取得する。周波数は8GHzから12GHzのあいだで等間隔に101箇所の周波数で計測を行う。散乱画像の取得はフロントエンド部に1列に並んだ12個のアンテナを平行移動させながら取得する。1つの位置では送受信するアンテナが隣同士の場合と1つおきの場合の2通りで21か所の計測を行うことができる(図3)。フロントエンドの位置を等間隔で21か所に動かすことで合計 $21 \times 21 \times 121$ 個のデータを取得する。

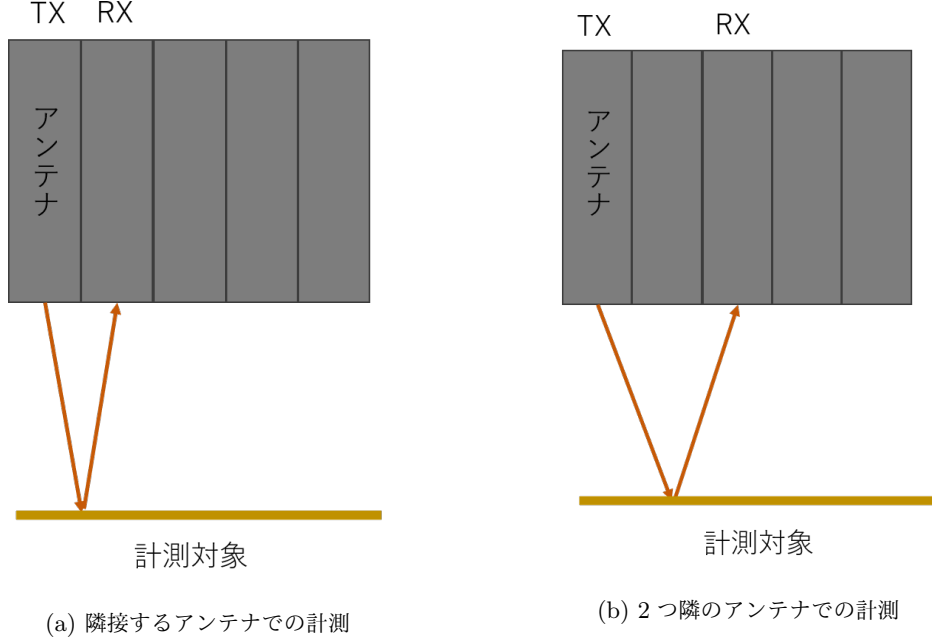


図 3: 計測時のアンテナの組み合わせ

2.2 特徴量ベクトルの抽出

CSOM では局所的テクスチャを見て分類する。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。今回は $L = 4$ としている。その後、 (x, y) について掃引し、特徴量ベクトル $\mathbf{K}(x, y)$ を次のように得る。

$$\mathbf{K} = [\mathbf{K}_m \quad \mathbf{K}_s \quad \mathbf{K}_f]^T \quad (1)$$

ただし T は転置を表す。位置 (x, y) における $\mathbf{K}(x, y)$ は、空間的なテクスチャ特徴量 \mathbf{K}_m 、 \mathbf{K}_s と周波数領域のテクスチャ特徴量 \mathbf{K}_f からなる。空間的なテクスチャ特徴量は、各 (l_x, l_y) の複素画素値の平均 \mathbf{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。

$$\mathbf{K}_m = \frac{1}{L^2 N} \sum_{l_x=1}^L \sum_{l_y=1}^L \sum_{n=1}^N z(l_x, l_y, f_0 + n f_{\text{int}}) \quad (2)$$

$$\mathbf{K}_s = [K_s(0, 0) \quad K_s(0, 1) \quad K_s(1, 0) \quad K_s(1, 1)]^T \quad (3)$$

$$K_s(i, j) = \frac{1}{L^2 N} \sum_{l_x=1}^L \sum_{l_y=1}^L \sum_{n=1}^{N-1} z^\dagger(l_x + i, l_y + j, f_0 + n f_{\text{int}}) \cdot z(l_x, l_y, f_0 + n f_{\text{int}}) \quad (4)$$

ただし、 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、 f_0 は使用した

最も低い周波数である。また周波数領域での特徴量として、 f_{int} 高い周波数での同じ位置との相互相関 \mathbf{K}_f をとる。

$$\mathbf{K}_f = \begin{bmatrix} K_f(1) & \dots & K_f(n) \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

$$K_f(n) = \frac{1}{L^2} \sum_{l_x=1}^L \sum_{l_y=1}^L z^\dagger(l_x, l_y, f_0 + (n+1)f_{\text{int}}) \cdot z(l_x, l_y, f_0 + nf_{\text{int}}) \quad (6)$$

これらの特徴量を式 (1) のように 1 つのベクトルにまとめている。

2.3 圧縮センシング

圧縮センシングのもととなる理論であるスパースモデリングでは信号の様子を次のような式で表す。

$$\mathbf{y} = \mathbf{B}\mathbf{x} \quad (7)$$

ここで \mathbf{y} は元の信号、 \mathbf{x} は変換を行った後のスパースな信号である。信号の変換を表す行列 \mathbf{B} は基底列ベクトルを並べたものである。ここでベクトル \mathbf{y} に信号の 1 部のみを計測することを表す行列 \mathbf{L} をかけたものをベクトル \mathbf{s} とする。

$$\mathbf{s} = \mathbf{L}\mathbf{y} = \mathbf{L}\mathbf{B}\mathbf{x} \equiv \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (8)$$

このとき行列 \mathbf{A} を計画行列と呼ぶ。計測された信号 \mathbf{s} と計画行列 \mathbf{A} からスパースな信号 \mathbf{x} を求めるのが圧縮センシングの基本的な考え方である。一般的な場合 \mathbf{x} は一意には定まらないが \mathbf{x} がスパースだとすると、この式は最適化問題として解くことができる。

$$\min_{\mathbf{x}} \|\mathbf{x}\|_0 \quad \text{subject to} \quad \mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (9)$$

$\|\mathbf{x}\|_0$ は 0 ノルムとよばれ、0 ではない要素の数を表す。一般的にはこの形の問題は NP 困難なため実際に計算する際は適切な近似を行って \mathbf{x} を求める。

3 圧縮センシングを用いた高速な地雷可視化の提案

従来の方法ではエリア全体を計測するのに約 5 分の時間がかかっていた。この計測時間を短縮するために圧縮センシングを用いて計測点の数を減らす手法を提案する。圧縮センシングでは計測対象の信号がスパースであることが必要である。スパース性とは信号に対して適切な基底変換を行った際に非零の成分が少数になるという性質である。圧縮センシングを適用するためには散乱画像に変換を加えてスパース性を実現することが必要となる。金属地雷の検知では圧縮センシングを用いた手法が開発されている [13]。この手法では 3 次元空間で地雷と対応したモデルを考え、そのモデル内での散乱の強度を見ることで散乱物の影響を抑えている。その際地雷が存在する座標のみ散乱強度が高くなることを生かしてスパース性を実現している。一方、プラスチック製の地雷では散乱強度をそのまま利用してもうまく可視化できない。これに対して特徴量ベクトルは複素振幅を扱っており、またその空間的、周波数的な相関をその成分としていてそれぞれ空間、周波数テクスチャを表現している。これに対して圧縮センシングの考え方を利用することでより可視化性能を向上させることができると考える。

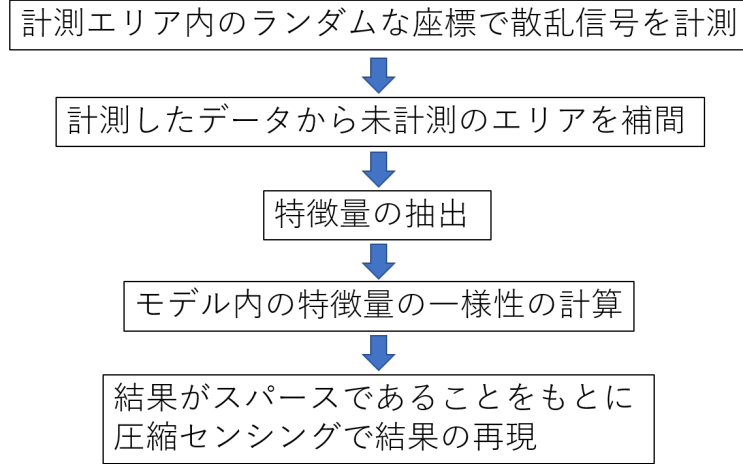


図 4: 圧縮センシングを用いた地雷可視化の流れ

高次元の複素ベクトルである特徴量ベクトルを使ってスパース性を満たすために、モデル内の特徴量の一様性を考える。地雷の存在するエリアでは特徴量ベクトルが一様になると考え、モデル内の特徴量の一様性を計算することでデータのスパース性を実現できると考えられる。

このスパース性を使って最適化問題としてデータの復元を行い少ない計測での地雷の可視化を目指す (図 4)。

3.1 高次元特徴量データを扱うときのスパース性の表現

3.1.1 モデル内での特徴量の一様性

スパース性を実現するために、モデル内の特徴量の一様性という指標を導入する。モデルとは目標物、今回の場合は地雷と同じ大きさの形のエリアを切り出してそのエリア内のデータの特徴を調べるという考え方である。この研究では地雷と同じ大きさの形のエリアを切り出してそのエリア内の特徴量ベクトルが一様である場合そこに地雷が存在すると考える。類似度を特徴量ベクトル同士の内積で考えると、モデル内の特徴量の一様性 $h(x, y)$ は、

$$h(x, y) = \sum_{i < j} |\mathbf{K}(\mathbf{r}_i)^* \mathbf{K}(\mathbf{r}_j)| \quad (10)$$

ただし、 $*$ はエルミート転置を表す。 (x, y) はモデルの座標、 $\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j$ はモデル内でのその特徴量の座標を表す。

地雷のある座標では特徴量ベクトルが同じものになるという仮定をもとにすると、図 5a のようにモデルの位置を地雷がないところでとると、特徴量ベクトルがまばらなため h は小さくなるが、図 5c のようにモデルと地雷の位置が完全に一致すると特徴量ベクトルが一定になり、 h は特に大きな値を示すと考えられる。モデルが地雷の位置と一致したときのみ cor_{model} が非零になるとするとこの信号はスパースとみなすことができるため圧縮センシングの考えを適用することができると考えられる。

3.1.2 散乱画像の補間

圧縮センシングを適用するためには一度まばらな計測データから特徴量ベクトルを抽出する必要がある。しかし、ランダムに計測したデータから特徴量ベクトルを抽出する際、ウィンドウ内に計測データが少数である

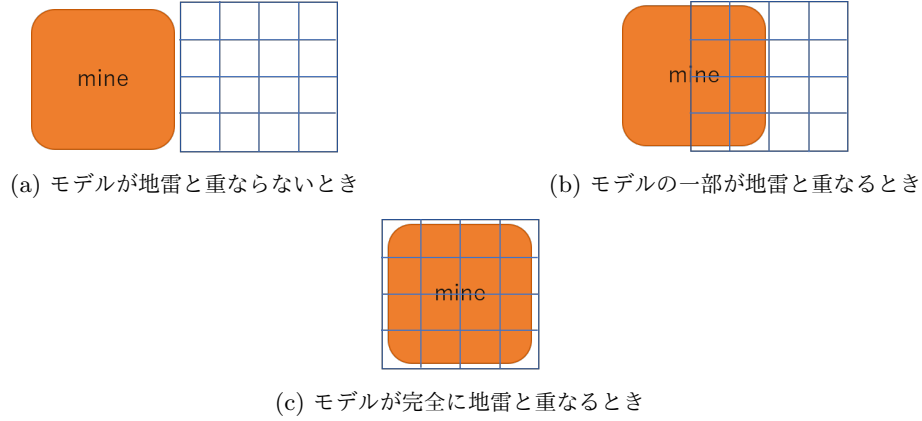


図 5: モデルと地雷の位置関係

と相互相関などの数字が意味を持たなくなってしまう。これを解決するために計測していない座標のデータを計測したデータをもとに補間することを考える。

計測済みのデータが N 箇所ありその場所の信号を $s_i(x_i, y_i, f) (i = 1 \dots N)$ とする。 s_i は振幅と位相のデータを含んだ複素数で表される。振幅と位相を分離して補間するため、 s_i の絶対値をとったものを別で計算する。絶対値の推測値と位相の推測値をそれぞれ \hat{s}_a 、 \hat{s}_p で表す。ある未計測の座標のデータを $\hat{s}(\hat{x}, \hat{y}, f)$ 、絶対値の推測値と位相の推測値をそれぞれ $\hat{s}_a(\hat{x}, \hat{y}, f)$ 、 $\hat{s}_p(\hat{x}, \hat{y}, f)$ 、その座標と計測済みの s_i の座標との距離を $r_i (i = 1, \dots, N)$ とする。

$$r_i = \sqrt{(\hat{x} - x_i)^2 + (\hat{y} - y_i)^2} \quad (11)$$

$$\hat{s}_a(\hat{x}, \hat{y}, f) = \sum_{i=1}^N |s_i(x_i, y_i, f)| \frac{e^{-ar_i}}{\sum_{j=1}^N e^{-ar_j}} \quad (12)$$

$$\hat{s}_p(\hat{x}, \hat{y}, f) = \arg \left(\sum_{i=1}^N s_i(x_i, y_i, f) \frac{e^{-ar_i}}{\sum_{j=1}^N e^{-ar_j}} \right) \quad (13)$$

$$\hat{s}(\hat{x}, \hat{y}, f) = \hat{s}_a(\hat{x}, \hat{y}, f) e^{-i\hat{s}_p(\hat{x}, \hat{y}, f)} \quad (14)$$

この式はある点の観測値は実空間での距離が近い点に近い値になるという仮定で補間を行っている。このような式で未計測の座標を埋めることで特徴量ベクトルを抽出することができる。 a は距離に対する重みをどうとるかを調整するパラメータである。

3.2 圧縮センシングの適用

ここまで述べた方法でモデル内の特徴量の一意性を計算することでデータのスパース性を実現できる。ここまでの計算では計測した信号とスパースな信号の関係は式 9 のような単純な式では表せないが、既存の最適化アルゴリズムをうまく活用することで信号の復元が可能であると考えられる。

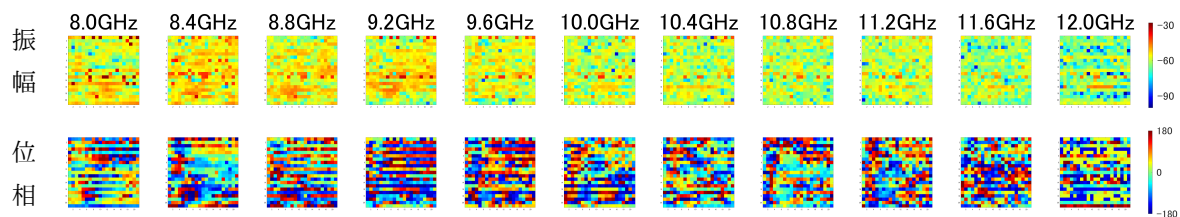


図 6: フロントエンドから得た散乱画像



図 7: 地雷模型の配置

3.3 適応的な計測

少数の計測データからうまく可視化ができなかった場合に追加の計測を行う際、計測する座標をうまく設定することで追加計測の効果を最大限にすることを目指す。モデル内の特徴量の一様性が低い場所で追加で計測を行うことで、より特徴量の乱雑さが強調され相対的に地雷のある場所を強調させることができると考える。

4 実験結果

4.1 CSOM とモデル内の特徴ベクトルの類似度の比較

2.1 に示した方法で散乱画像を取得した (図 6)。地雷は直径約 8cm の対人地雷「TYPE72」を深さ約 5cm のところに埋めて使用した。実際に計測した地雷模型の配置を図 7 に示す。赤い四角はおおよその計測範囲を示している。

モデル内の特徴量の類似度を計算したときの結果を、CSOM で分類した場合と比較した (図 8, 9)。今回モデルは計算の簡略化のため 4×4 の正方形を採用している。モデル内の特徴量の一様性は、CSOM と比較しても十分な可視化性能を持っているといえる。

4.2 少数の計測値から補間を行った際の評価

次に散乱画像から一部の観測値をランダムで取り出して (14) 式を用いて補間したときのモデル内の特徴量の類似度を計算した。20% を抜き出したときの元のデータ、抜き出したデータ、補間したデータを図 10 に示

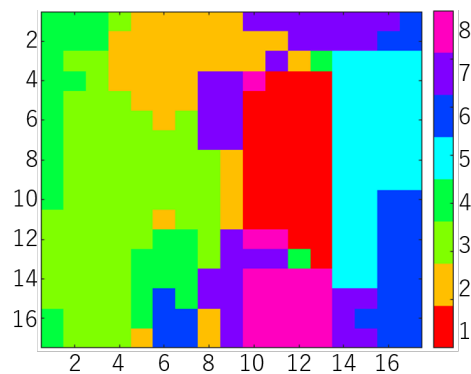


図 8: CSOM での分類

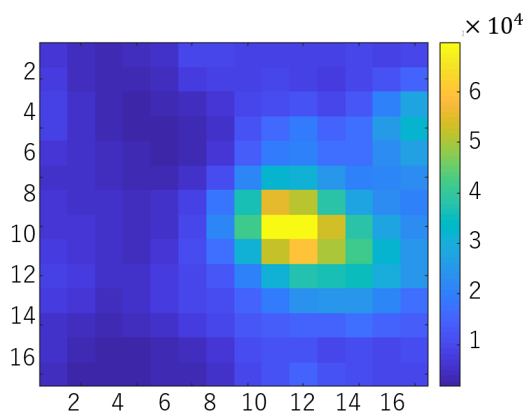
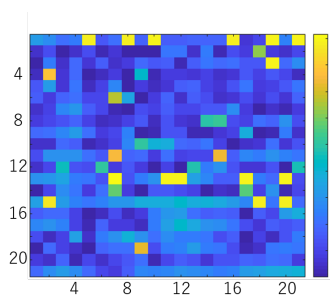
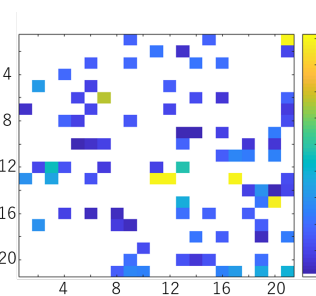


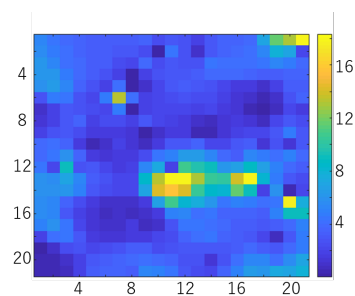
図 9: モデル内の特徴量の類似度



(a) 元データ

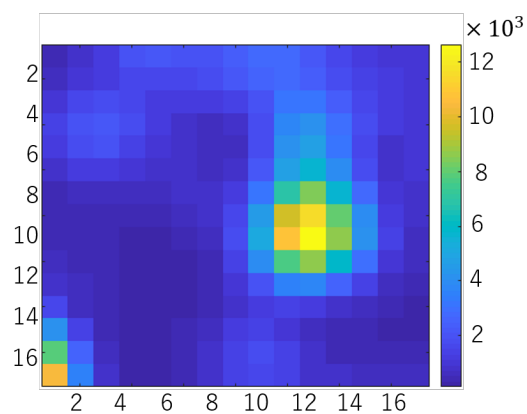


(b) 抜き出したデータ

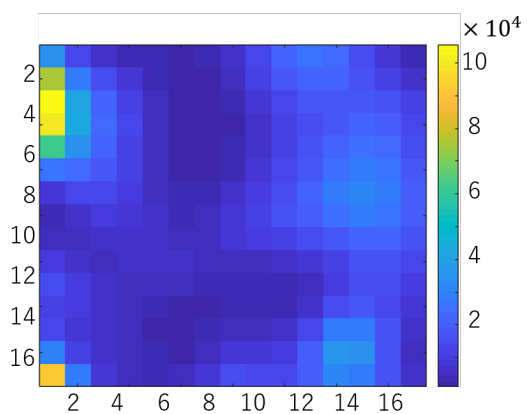


(c) 補間したデータ

図 10: データ補間の様子



(a) 20%



(b) 10%

図 11: 一部のデータから補間した時のモデル内の特徴量の類似度

す。データは空間座標 441 点からランダムで抜き出し、各座標ですべての周波数における観測値を利用した。モデル内の特徴量の類似度を計算した結果は 20% を抜き出したときと 10% を抜き出したときの 2 通りを示す (図 11)。

20% のデータを使った場合はそこまで結果に変化はないが 10% まで使用するデータの割合を下げると結果が地雷の場所が鮮明にわからなくなる。ここまでの結果から、モデル内の特徴量の類似度を使えばこれまでより少ない観測点数でもかなり良い結果が得られることがわかった。今後さらに少ない観測点数でも可視化が可能なように、データのスパース性を利用した圧縮センシングのアルゴリズムを考案する。

5 今後の予定

これまでの実験で計測データのスパース性の実現ができた。今後はこれまでの結果を使って圧縮センシングにおける具体的な復元アルゴリズムの考案と適応的な計測方法について進めていく。

参考文献

- [1] T. Susuki and I. Arai, "Advance on underground radars," IEICE Transactions, vol.E74, no.2, pp.289-294, 1991.
- [2] T. Counts, A. C. Gurbuz, W. R. Scott Jr., J. H. McClellan and K. Kim, "Multistatic ground-penetrating radar experiments," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 45, no. 10, pp. 2544-2553, October 2007.
- [3] C-C Chen, S. Nag, W. D. Burnside, J. I. Halman, K. A. Shubert and L. Peters, Jr., "A Standoff, Focused-Beam Land Mine Radar," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol.38, no.1, pp. 507-514, 2000.
- [4] Jeroen Groenenboom, Alexander Yarovoy, "Data Processing and Imaging in GPR System Dedicated for Landmine Detection," Subsurface Sensing Technologies and Applications, vol.3, no.4, pp. 387-402, 2002.
- [5] Alexander G. Yarovoy and Leo P. Ligthart, "Polarimetric video impulse radar for landmine detection," Subsurface Sensing Technologies and Applications, vol.3, no.4, pp. 271-293, 2002.
- [6] M. Sato, Y. Hamada, X. Feng, F. N. Kong, Z. Zeng and G. Fang, "GPR using an array antenna for land-mine detection," Near Subsurface Geophysics, vol. 2, pp. 7-13, 2004.
- [7] M. Sato, K. Takahashi, X. Feng and T. Kobayashi, "Dual sensor evaluation test in Afghanistan," IEEE Geoscience and Remote Sensing Society Newsletter, pp. 22-24, September 2005.
- [8] 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.
- [9] S. Masuyama and A. Hirose, "Walled LTSA array for rapid, high spatial resolution, and phase sensitive imaging to visualize plastic landmines," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 45, no. 8, pp. 2536-2543, August 2007.
- [10] S. Masuyama, K. Yasuda and A. Hirose, "Multiple mode selection of walled-ltsa array elements for high resolution imaging to visualize antipersonnel plastic landmines," IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 5, no. 4, pp. 745-749, October 2008.
- [11] Y. Nakano and A. Hirose, "Improvement of plastic landmine visualization performance by use of ring-cscom and frequency-domain local correlation," IEICE Transactions on Electronics, vol. E92-C, no. 1, pp. 102-108, January 2009.
- [12] Y. Nakano and A. Hirose, "Adaptive identification of landmine class by evaluating the total degree of conformity of ring-SOM," Australian Journal of Intelligent Information Processing Systems, pp. 23-28, December 2010.
- [13] R. Karlina and M. Sato, "Model-Based Compressive Sensing Applied to Landmine Detection by GPR," IEICE Transaction, vol.E99-C, no.1 pp.44-51, 2016.