

ホワイトノイズが混入した受信信号を用いた 超音波画像再構成法における L1 ノルム最小化法の効果

氏名[†]大石久展 氏名[‡]荒木雅弘 氏名[‡]柳田裕隆

所属[†]山形大学 所属[‡]山形大学大学院

1 はじめに

超音波撮像は臨床診断の分野において、リアルタイム性や放射線被ばくの心配がないなどの特徴から広く使われている。現在では、3D エコーや4D エコーなどの超音波診断装置も利用され始めている。しかし、超音波撮像において分解能やフレームレートは充分とはいえない。一般的に分解能を向上させるためには超音波の送受信回数とアレイの素子数を増加させる必要があるとされているが、3D エコーでは撮像領域全体を撮像するための超音波プローブの作製コストや難度が高い。

三村らは、撮像空間に3D物体が存在する場合におけるL1ノルム最小化法による超音波画像再構成法の有効性を示し、スパースな超音波プローブで分解能が高い画像の再構成に成功している。[1]

そこで、本研究ではL1ノルム最小化法による超音波画像再構成において、受信信号にノイズが混入した場合でも再構成可能かどうか検討する。

超音波画像の定量的な評価は、特に確立された手法はないため、画像評価法として一般的によく知られているMSE, PSNR, SSIMを用いた。

2 撮像モデルとL1ノルム最小化[2][3][4]

本研究では図1のような幾何学的配置を想定し、 $x=0, y=0, z=0$ の点に超音波送信素子を配置し、 $z=0$ の xy 平面上に受信素子256[ch]をランダムに配置した二次元アレイプローブを用いた。すべての素子は無指向性である。送信素子から、周波数3.5[MHz]の正弦波を送信し、 $x=0, y=0, z=0.15$ [m]に配置した点物体からの反射波を受信する。空間内の音速は1540[m/s]であり、反射体の反射率は1.0とした。ホワイトノイズは受信波形に対して8[dB]の大きさのものをランダムに加えた。

3D超音波イメージングシステムの概要を図1に示す。送信素子から等距離の球面に1, 2, ..., i のように番号を付けた。そのうちのある1枚の球面に着目し視野分割数を 64×64 の格子状に分割した。超音波の送受信によって得られる観測データ \mathbf{r} は受信素子数を M とすると(1)式のように M 次元ベクトルで表すことができる。また、球面を L 分割したときの反射率分布 \mathbf{s} は(2)式のように表され、観測過程を伝達行列 \mathbf{H} によってモデル化することで(3)式のように表すことができる。

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_M \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_L \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{s} \quad (3)$$

超音波撮像システムにおいて(3)式を解くとき、受信素子数が視野分割数より多い場合でない限り解は一意定まらない。しかし、 \mathbf{s} がスパースなベクトルであるとき(4)式のL1ノルム最小化法を用いることで解が推定でき、画像再構成が可能となる。

$$\min_{\mathbf{s}} \{ \|\mathbf{s}\|_1 + \frac{1}{2\rho} \|\mathbf{H}\mathbf{s} - \mathbf{r}\|_2^2 \} \quad (4)$$

ここで、 ρ はラグランジュ未定乗数と呼ばれるもので、全体式に対して第二項がどの程度影響を及ぼすかを調整する変数である。本研究では $\rho = 1/2$ を用いた。

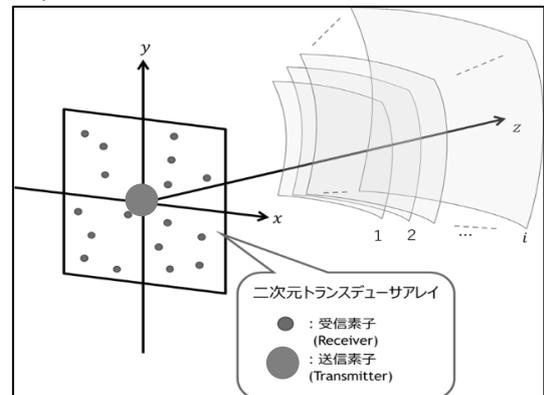


図1. シミュレーションモデル

Effect of L1-Norm Minimization Method on Ultrasound Image Reconstruction Using Received Signal Contaminated with White Noise

[†]Ohishi Hisanobu Yamagata University

[‡]Araki Masahiro Graduate School of Science and Engineering Yamagata University

[‡]Yanagita Hirotaka Graduate School of Science and Engineering Yamagata University

3 シミュレーション結果と評価

超音波伝播シミュレーションによって得られた波形をもとに L1 ノルム最小化手法を導入した画像再構成の結果を示す。まず、参照画像として、ノイズを加えない受信波形を用いた撮像結果を図3に示した。図4は8[dB]のホワイトノイズが混入した場合の撮像結果である。図5はノイズ除去のためフィルタを用いて改善したものを示す。図5の結果を得るために用いたフィルタは Pruning 法(5)と Soft-Thresholding 法(6)によってノイズの低減を行った。

・ Pruning 法

$$a_2(f, t) = \begin{cases} 0 & \text{for } f < f_1, f > f_2 \\ a_1(f, t) & \text{for } f_1 < f < f_2 \end{cases} \quad (5)$$

・ Soft-Thresholding 法

$$a_2(f, t) = \begin{cases} 0 & \text{for } a_1(f, t) < A \\ a_1(f, t) - \lambda & \text{for } a_1(f, t) \geq A \end{cases} \quad (6)$$

Pruning 法はしきい値である周波数を設定して周波数以外の成分を完全に除去するフィルタである。Soft-Thresholding 法は全体の信号強度をAだけ低減させて、A以下の成分はゼロにすることでホワイトノイズを除去するものである。ここで a_1 は処理前の波形、 a_2 は処理後の波形、 f は周波数、 t は時刻である。本研究では $A = 1.0 \times 10^{-3}$, $f_1 = 2.625 \times 10^3$, $f_2 = 4.375 \times 10^3$ を用いた。[5]

シミュレーションによって得られた画像はMSE, PSNR, SSIM によって比較・評価を行った。画像評価に用いる参照画像は点物体のポイントスプレッドファンクションを用いた。[6]

ノイズ低減法を用いた結果、主観的には図4で見られた奥行方向に見られたノイズは低減していることがわかる。また、表1からノイズを低減したときの画像の評価値はノイズがない画像の評価値に近づいていることがわかる。

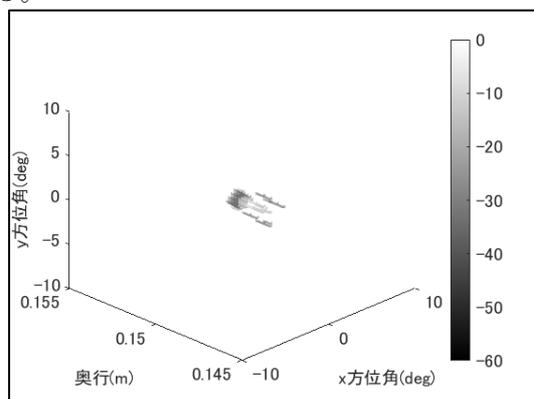


図3. ノイズなしで再構成された画像

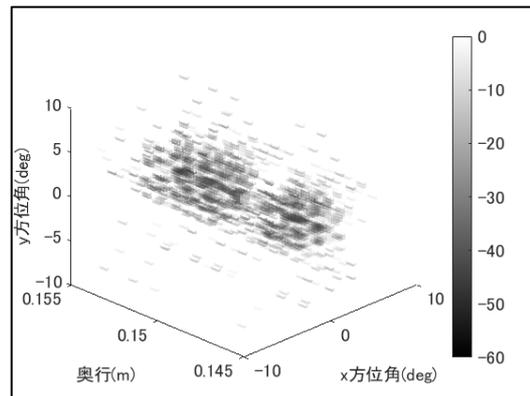


図4. ノイズを加えて再構成された画像

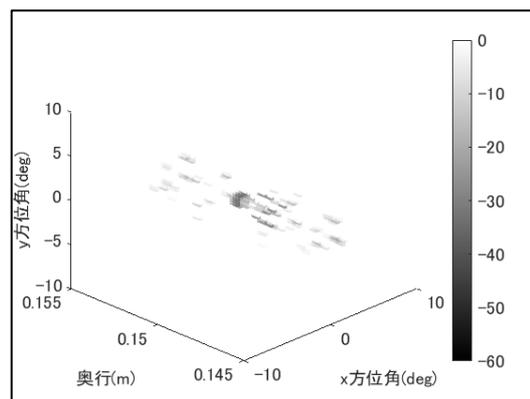


図5. ノイズ低減法を用いて再構成された画像

	ノイズなし	ノイズ有	ノイズ低減後
MSE	20.0114	20.9899	20.2073
PSNR	89.6293	88.3255	89.5786
SSIM	0.98752	0.96929	0.98724

表1. 画質評価

4 まとめ

再構成された画像と画質評価から受信データに対してホワイトノイズが混入した場合においても L1 ノルム最小化法は効果的にはたつき、8[dB]程度のホワイトノイズの混入であればノイズ低減法を用いれば、ノイズなしの画像と同等の結果を得ることができていることが分かった。

[1]三村祐輝, 生体医工学 60 巻1号(2022)
 [2]田中利幸, 電子情報通信学会 基礎・通信ソサイエティ Fundamentals review Vol.4 (2010) No.1 P39-47
 [3]和田山正, 日本神経回路学会誌 = The Brain & neural networks Vol.17 No.2 (2010), pp.63-69
 [4]三村和史, 数理解析研究所講究録 第1803巻 (2012), 26-56
 [5]伊藤海太, 日本金属学会誌 第71巻 第11号 (2007)1061-1065
 [6] Z. Wang et al. "Image Quality Assessment: from error visibility to structural similarity"