

修士学位論文要約 (平成19年3月)

超音波エコーの多チャンネル同時受信系による  
散乱強度分布の高精度推定に関する研究

阿部優作, 長谷川英之, 金井 浩

Study on Accurate Estimation of Scattering Strength  
Distribution by Simultaneous Receiving of Ultrasonic Echoes  
with Multi-Channel Transducer Array

Yusaku ABE, Hideyuki HASEGAWA and Hiroshi KANAI

Recently, there have been several studies on ultrasonic cross-sectional imaging based on simultaneous receiving of echo signals with an array transducer without scanning ultrasonic beams. In those studies, the parallel processing is applied to create an image from a data set simultaneously received by the array. However, the lateral resolution of the parallel processing is not high. In this study, in order to improve the spatial resolution, the least square estimation and the truncated singular value decomposition (tSVD) is applied to the echo signals from two wire targets simultaneously received with a simulated multi-channel transducer array. Moreover, we introduced a weighting for correcting the effect of the directivity of an element of an array. The experimental results show a higher lateral resolution of the tSVD method with the weighting than that of the conventional parallel processing. The axial resolution is also improved by considering the finite duration of the transmitted ultrasonic pulse.

1. はじめに

近年, 1 回の超音波送信に対して反射波を配列型探触子の多点で同時に受信して断層像を構築, すなわち超音波散乱強度分布を推定する方法が報告されており [1], 従来のビーム走査と比べて高いフレームレートが実現されている. しかし, ここで用いられている並列同時受信法 (parallel beamforming: PBF) の方位分解能は高くない. PBF はある点からのエコー信号を同期加算する処理である. それに対し, 逆フィルタを用いた散乱強度分布の推定がリニア走査による逐次受信において行われている [2]. しかし, 多チャンネル同時受信系における推定に応用された例はない.

本論文では, 空間分解能の向上を目指して, 関心領域内の超音波散乱強度分布を最小二乗法 (least-squares: LS) と打ち切り特異値分解 (truncated singular value decomposition: tSVD) を用いて推定する. その際に, 素子の指向性と送信波形を考慮した推定を行う [3].

2. 散乱強度分布の推定原理

図 1 に示すように, 送信位置  $x_T$  から超音波パルスを送信し, 関心領域内の散乱体によって反射され, 受信位置  $x_{R_j}$  ( $j = 0, 1, \dots, L - 1$ ) で同時に受信することを考える. 関心領域内の散乱強度分布  $\mathbf{O}$  を  $M \times N$  行列で表す. 点  $(x_m, z_n)$  ( $m = 0, 1, \dots, M - 1$ ;  $n = 0, 1, \dots, N - 1$ ) における散乱強度を行列  $\mathbf{O}$

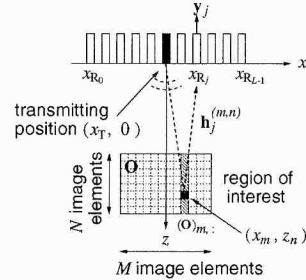


図 1: パルスエコー同時受信系.

の要素  $(\mathbf{O})_{m,n}$  で表す. 受信位置  $x_{R_j}$  における受信信号  $\{y_j(k)\}$  ( $k = 0, 1, \dots, K - 1$ ) を  $K$  次元ベクトル  $\mathbf{y}_j = [y_j(0) \ y_j(1) \ \dots \ y_j(K - 1)]^T$  で表す. ここで,  $T$  は行列・ベクトルの転置を表す. ここで, 送信点  $(x_T, 0)$  から点  $(x_m, z_n)$  を通り受信点  $(x_{R_j}, 0)$  までの経路を音波が伝搬するときの伝搬遅延を表すインパルス応答を  $K$  次元ベクトル  $\mathbf{h}_j^{(m,n)}$  で表す. 離散化された伝搬時間  $k_j^{(m,n)}$  を,

$$k_j^{(m,n)} = \frac{\sqrt{(x_T - x_m)^2 + z_n^2} + \sqrt{(x_m - x_{R_j})^2 + z_n^2}}{cT_s} \quad (1)$$

と表す.  $c$  は水中の音速,  $T_s$  は受信信号の標本化周期である.  $\mathbf{h}_j^{(m,n)}$  は,  $k_j^{(m,n)}$  番目の要素のみ 1 で, 他の要素が 0 のベクトルである.

送信波形を考慮するために、送信パルス波形  $\{s(k)\}$  ( $k = 0, 1, \dots, K-1$ ) から構成される下三角行列  $\mathbf{S}$  を定義する。また、受信波形  $\{y_j\}$  の受信位置による振幅の違いを表す重み関数  $\{w_j^{(m,n)}\}$  を導入する。超音波パルスの伝搬を表す  $\{w_j^{(m,n)} \mathbf{S} \mathbf{h}_j^{(m,n)}\}$  のすべての  $(j, m, n)$  の組み合わせから構成される  $KL \times MN$  伝搬行列  $\mathbf{P}$  を算出する [2]。  $L$  本の受信波形ベクトル  $\mathbf{y}_0, \dots, \mathbf{y}_{L-1}$  と行列  $\mathbf{O}$  をそれぞれ  $KL$  次元ベクトル  $\mathbf{y} = [\mathbf{y}_0^T \mathbf{y}_1^T \dots \mathbf{y}_{L-1}^T]^T$ ,  $MN$  次元ベクトル  $\mathbf{o} = [(\mathbf{O})_{0,:} (\mathbf{O})_{1,:} \dots (\mathbf{O})_{M-1,:}]^T$  で表すと、受信波形  $\mathbf{y}$  と散乱強度分布  $\mathbf{o}$  との関係は次式で表される。

$$\mathbf{y} = \mathbf{P}\mathbf{o} + \mathbf{e} \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{e}$  はチャネル間で無相関な白色雑音を表す  $KL$  次元のベクトルと仮定する。

散乱強度分布ベクトル  $\mathbf{o}$  の LS, tSVD, PBF による推定はそれぞれ以下のように表される。

$$\hat{\mathbf{o}}_{\text{LS}} = (\mathbf{P}^T \mathbf{P})^{-1} \mathbf{P}^T \mathbf{y} \quad (3)$$

$$\hat{\mathbf{o}}_{\text{tSVD},r} = \mathbf{P}_r^+ \mathbf{y} \quad (4)$$

$$\hat{\mathbf{o}}_{\text{PBF}} = \mathbf{P}^T \mathbf{y} \quad (\mathbf{S} = \mathbf{I}) \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{P}_r^+$  は、行列  $\mathbf{P}$  の特異値 ( $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_{MN}$ ) を次数  $r$  で打ち切った場合の、 $\mathbf{P}$  の疑似逆行列である。本論文では、 $\sigma_r / \sigma_1 = -20$  dB となるように  $r$  を設定した。

### 3. 水槽実験による評価

2つの単一素子平面トランスジューサ (口径  $\phi 1$  mm) を用いて、配列型探触子による多チャネル同時受信を模擬する。送信位置  $x_T$  に固定したトランスジューサに 10 MHz の正弦波パルス 1 波長分を印加し、超音波パルスを送信する。対象物は直径 30  $\mu\text{m}$  の金属細線 2 本であり、1 mm 間隔で水槽中に設置する。細線からのエコーを受信位置  $x_{R_j}$  にあるもう一方のトランスジューサで受信する。受信トランスジューサを自動ステージで走査し、各受信位置  $\{x_{R_j}\}$  で波形  $\{y_j\}$  を取得する。受信点数  $L = 61$ , 受信点間隔  $\Delta x_R = 200 \mu\text{m}$  である。

重み関数  $\{w_j^{(m,n)}\}$  を、送受信素子の指向性から、

$$w_j^{(m,n)} = D(\theta_T) \cdot D(\theta_R) \quad (6)$$

と設定した。ここで、 $D(\theta)$  は円形振動板の指向性関数、 $\theta_T, \theta_R$  は、各々  $(x_T, 0)$ ,  $(x_{R_j}, 0)$  から  $(x_m, z_n)$  を見込む角度である。

推定結果を図 2 に示す。図 2(c), (d) より LS の推定はノイズの影響を強く受け、散乱体の位置情報が失われていることが分かる。図 2(e), (f) より tSVD によってノイズの増幅が抑制された。PBF と tSVD の推定結果の  $x$  方向分布を図 3(a),  $z$  方向分布を図 3(b), (c) に示す。図 3(a) より、tSVD は PBF より

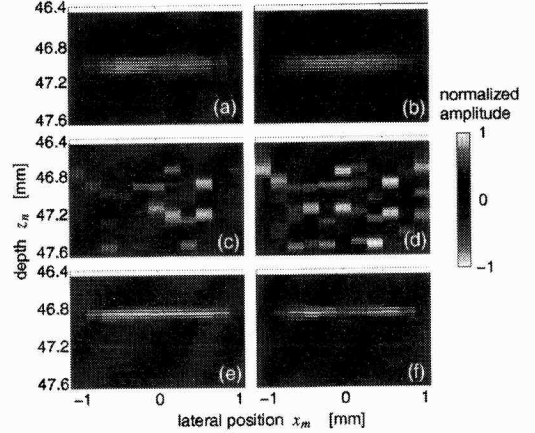


図 2: 散乱強度分布の推定結果. (a) PBF (重みなし). (b) PBF (重みあり). (c) LS (重みなし). (d) LS (重みあり). (e) tSVD (重みなし). (f) tSVD (重みあり).

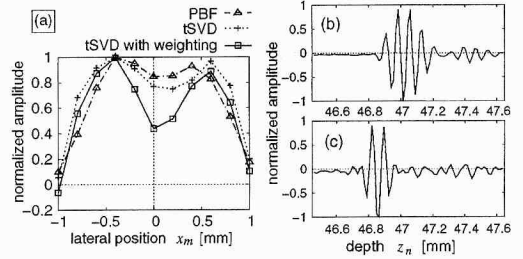


図 3: (a) 図 2(a), (e), (f) の  $x$  方向分布. (b) 図 2(a) の  $x_m = -0.4$  mm における  $z$  方向分布. (c) 図 2(f) の  $x_m = -0.4$  mm における  $z$  方向分布.

も細線の位置を示す 2 つのピークが明確であり、さらにこの差は重みの適用により強調された。図 3(b), (c) より、tSVD によって  $z$  方向分布の波長が短くなり、距離分解能も向上した。

### 4. 結論

本論文では、配列型振動子による多チャネル同時受信を模擬した水槽実験を行った。2本の金属細線からのエコー信号を取得し、PBF, LS, tSVD を用いて散乱強度分布を推定した。従来法の PBF と比較して、tSVD と重み関数の併用により高い空間分解能が得られた。これにより、高フレームレートかつ高空間分解能で断面像を生成できる可能性を示した。

### 文献

- [1] Y. Minochi, S. Yagi and T. Nishiyama: Jpn. J. Appl. Phys., **43** (2004) 3103.
- [2] F. Lingvall, T. Olofsson and T. Stepinski: J. Acoust. Soc. Am., **114** (2003) 225.
- [3] Y. Abe, H. Hasegawa and H. Kanai: Jpn. J. Appl. Phys., (投稿中).