

ビームフォーマを用いた音源探索における探索点の無限次元化*

◎ 渡會博子, 野原大地, 吉野夏樹, 矢田部浩平 (農工大), 阿久津真理子 (鉄道総研)

1 はじめに

工業製品や機械の改良において騒音の発生源の特定は重要な課題であり、特に高速鉄道の空力騒音は列車速度の6~8乗に比例して増大する性質をもつため、速度向上において騒音源の解明と対策が欠かせない。騒音源の探査にはマイクロホンアレイを用いたビームフォーミングが広く用いられるが、通常のDelay-and-Sum (DS) ビームフォーマは空間分解能が低いため、CLEAN-SC [1] などのスパースな音源分布を得る解析手法が利用されている。CLEAN-SCは、ビームフォーマ出力のピーク点を探索して逐次差し引く処理で構成されており、適切なピーク点を検出することができれば空間分解能の高い解析結果を得ることができる。しかし、通常のCLEAN-SCはピーク点の探索を離散化されたグリッド上で行っており、グリッドが荒い場合には真のピーク位置とは異なる点で更新が行われ、その誤差は後続の更新に悪影響をもたらすことが知られている。そこで本研究では、CLEAN-SCの達成し得る最高性能を検証するために、ピーク位置の検出誤りをなくす手法を提案する。具体的には、ピーク位置の探索点を、有限の離散グリッドではなく、無限次元化して連続関数にすることで、検出誤りのないCLEAN-SCを実現した。

2 DS ビームフォーマと CLEAN-SC

M ch マイクロホンアレイで観測された複素音圧 $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^M$ の空間相関行列 $\mathbf{R} = \mathbb{E}[\mathbf{x}\mathbf{x}^H] \in \mathbb{C}^{M \times M}$ を用いて、DS ビームフォーマの出力は $\mathbf{w}_k^H \mathbf{R} \mathbf{w}_k \in \mathbb{R}_+$ によって与えられる。ただし、 $\mathbf{w}_k$ は k 番目のスキャン点に対する正規化ステアリングベクトルであり、全スキャン点 ($k = 1, \dots, K$) に対してDS ビームフォーマの出力を計算することで音源の分布を可視化することができる。しかし、DS ビームフォーマは空間分解能が低く、音源分布を詳細に解析できない。

空間分解能の高い解析を行う方法として、CLEAN-SC [1] が広く用いられている。CLEAN-SCは、DS ビームフォーマの出力 $\mathbf{p} = [\mathbf{w}_1^H \mathbf{R} \mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_K^H \mathbf{R} \mathbf{w}_K]^T$ におけるパワー最大の位置 $k_{\max} = \arg \max_k p_k$ を探索し、その位置にある音源が空間相関行列に与える影響 $\mathbf{R}_{k_{\max}}$ を $\mathbf{R} \leftarrow \mathbf{R} - \mathbf{R}_{k_{\max}}$ のように差し引くことで空間相関行列を更新する。この探索と更新を既定

の条件を満たすまで L 回繰り返す、得られたピーク位置 $k_{\max}^{(1)}, \dots, k_{\max}^{(L)}$ のみに音源パワーを再配置することで、サイドローブや雑音の影響のないスパースな可視化結果を得る。なお、無相関な雑音の影響を抑制するために、CLEAN-SCでは対角成分を除去した空間相関行列に対して同様の処理を行うことが多い。

CLEAN-SCはビームフォーマの空間分解能を飛躍的に向上させることができるが、離散的なスキャン点 $\{\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_K\}$ の中からパワー最大のインデックス $k_{\max}$ を探索するので、有限個のスキャン点の中にビームフォーマ出力のピーク位置が含まれていない場合は、探索したピーク位置に誤差が生じる。この誤差は、空間相関行列の逐次更新の過程で蓄積していくので、スキャン点が有限個であるうちはCLEAN-SC本来の性能を達成できていない可能性がある。

3 探索点の無限次元化

上述のように、ビームフォーマのスキャン点が離散的な場合はピーク位置の探索に誤差が生じ、CLEAN-SCの計算結果に誤差が蓄積される。スキャン点の位置はビームフォーマを計算する際に決めることができるので、十分に細かいグリッドでビームフォーマ出力を計算すれば誤差を減らすことができるが、どこまで細かくすれば誤差がどの程度減るかは明らかではない。そこで本研究では、細かさの極限である「無限点のグリッド」を考え、ピーク位置を誤差なく検出できるCLEAN-SCを提案する。

3.1 無限次元ビームフォーマ

ビームフォーマ出力の細かさは、計算に用いるステアリングベクトルの個数で決まるので、仮にステアリングベクトルを無限に用意することができれば上記の問題を解決できる。現実には無限個のステアリングベクトルを計算することはできないが、ビームフォーマ出力が空間的に滑らかであることを考えれば、有限個の連続関数で精度良く近似できるはずである。そこで、ビームフォーマ出力を多項式によって表現することで、任意のスキャン位置に対して出力結果を与える無限次元ビームフォーマを実現する。

関数近似理論において、性質の良さから広く用いられているChebyshev多項式 [2] による表現を考える。ただし、実際のビームフォーマは二次元グリッド

*Infinite-dimensionalization of search points in beamforming-based sound source localization. By Hiroko WATARAI, Daichi NOHARA, Natsuki YOSHINO, Kohei YATABE (Tokyo University of Agriculture and Technology) and Mariko AKUTSU (Railway Technical Research Institute)

に対して計算するが、ここでは簡単のために一次元で説明を行う。区間 $[-1, 1]$ 上の滑らかな関数 f は、Chebyshev 多項式 $T_n(x) = \cos(n \cos^{-1}(x))$ によって

$$f(x) \approx f_N(x) = \sum_{n=0}^N a_n T_n(x) \quad (x \in [-1, 1]) \quad (1)$$

と近似できる。ただし、 $(a_n)_{n=0}^N$ は f の展開係数であり、 $a_n = (2/\pi) \int_{-1}^1 f(x) T_n(x) / \sqrt{1-x^2} dx$ によって与えられる。もし、近似誤差 $|f - f_N|$ が無視できるほど小さければ、 $\sum_n a_n T_n(x)$ を計算することで任意の x に対して $f(x)$ の値を与えることができる。

具体的には、通常は有限個のグリッド上で計算されるビームフォーマ出力 $\mathbf{p}$ を、連続変数 x 上の関数 $p(x) = \mathbf{w}(x)^H \mathbf{R} \mathbf{w}(x)$ として扱う。ただし、 $\mathbf{w}(x)$ はスキャン点の存在する平面上の位置 x に対する正規化ステアリングベクトルである。この関数を Chebyshev 多項式展開することで、近似的にビームフォーマを無限次元化することができる。その際、近似誤差を計算機イプシロン程度まで落とすことで、計算機上では実質誤差なしの連続関数とみなすことができ、すなわちスキャン点 x を離散化することなく連続変数として扱う「無限次元ビームフォーマ」が実現される。

3.2 無限次元 CLEAN-SC

多項式展開によって得られた $p(x)$ の極大点は導関数の零点を計算すれば求めることができるが、 $p(x)$ は多項式なので微分を解析的に計算することができ、連続関数として極大点を求めることができる。具体的には、解析的に微分した多項式に対して根を求めるアルゴリズムを適用することで極値を求め¹、極大点を探索すれば良い。CLEAN-SC における、極大位置のインデックスの探索ステップ $k_{\max} = \arg \max_k p_k$ を、無限次元 DS ビームフォーマの微分に基づくピーク検出に置き換えることで、ピーク位置の検出誤りがない無限次元 CLEAN-SC が実現される。なお、空間相関行列はマイクロホンアレイのチャンネル数で次元が決まるので、ピーク位置の検出以外は従来の CLEAN-SC のアルゴリズムをそのまま実行できる。

本稿では簡単のために一変数関数を用いて説明したが、二変数関数に対しても同様に多項式展開を適用でき、極大点も求めることができる。また、これらの関数近似や演算は MATLAB ツールボックスとして実装されており、GitHub 上で公開されている [2]。

4 シミュレーション

提案法の効果を確認するため、シミュレーションによって従来法との比較を行った。図-1 に示すよう

¹ 多項式の根は、例えば、その多項式を特性方程式として持つコンパニオン行列の固有値分解によって計算できる。

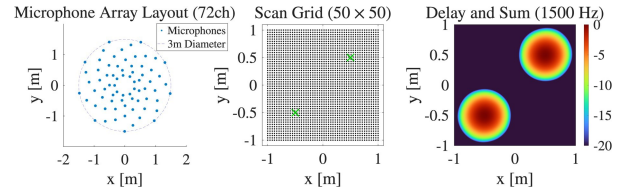


図-1 シミュレーション条件 (左: アレイ配置, 中央: スキャン点と音源位置, 右: DS ビームフォーマ出力)

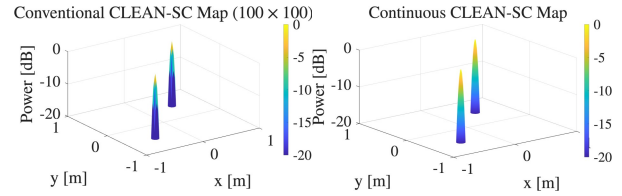


図-2 CLEAN-SC の音源分布 (左: 従来法, 右: 提案法)

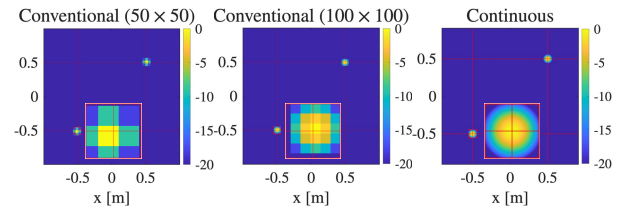


図-3 従来法と提案法の比較 (左・中央: 従来法, 右: 提案法). 得られた音源分布から推定した音源位置の誤差は、左からそれぞれ 7.1 mm, 3.6 mm, 0.0014 mm であった。

に、二つの点音源を $(-0.5, -0.5)$ と $(0.5, 0.5)$ に配置し、手前に 5 m 離れた位置に設置した 72 ch マイクロホンアレイで観測した信号を用いてビームフォーミングを行った。音源周波数は 1500 Hz とし、従来法のスキャン点は 50×50 または 100×100 とした。

従来法と提案法によって得られた音源分布を図-2 と図-3 にまとめて示す。従来の CLEAN-SC は音源分布がスキャン点の細かさに依存し、極大点で与えられる音源位置の推定誤差もスキャン点の設定によって定まる。一方、提案法は連続関数としてビームフォーマ出力を扱っているため、推定された音源分布の位置誤差が抑えられており、本稿の設定では誤差を従来法の $1/1000$ 未満に抑えることができた。

5 むすび

本稿では、ビームフォーマ出力を多項式展開することで連続関数化した無限次元ビームフォーマを提案し、CLEAN-SC に導入することで、ピーク位置の検出誤りがない無限次元 CLEAN-SC を実現した。今後は、シミュレーションや実測データへの適用を通じて、音源探査性能について検証を行う所存である。

参考文献

- [1] P. Sijtsma, “CLEAN based on spatial source coherence,” *Int. J. Aeroacoustics*, **6**(4), 357–374 (2007).
- [2] L. N. Trefethen, “Computing numerically with functions instead of numbers,” *Commun. ACM*, **58**(10), 91–97 (2015).