

時空間勾配計測に基づく指向性制御と音源分離の理論*

小野順貴, 有田哲也, 千條吉基, 安藤繁 (東京大学・情報理工)

1 はじめに

音源分離とは複数の音源信号が混合した観測信号から元の音源信号を分離する問題であり, その信号処理に関して適応ビームフォーマや独立成分分析等, 活発な研究が行われている [1]。しかし観測信号取得のためのセンサに関してはほとんどの研究において, アレイ状に配置した音圧感度型マイクロフォンの使用が前提となっている。一方センシングの分野では, 近年の Miles らの研究 [2] に触発され, ヤドリバエのような生物の聴覚器を模倣し, 超小型で音圧と音圧勾配を同時検出する新たな音響センサの設計が試みられはじめている [3][4][5]。我々もヤドリバエの聴覚器構造のモデル化とその一般化に基づく超小型音源定位センサの試作 [6][7] や, 音場の微分検出に基づく実時間音源定位アルゴリズム [8] を提案してきた。本研究では以上のような背景の下, 時空間勾配計測という枠組みにおける, 指向性制御や音源分離の基本的な性質やアルゴリズムを明らかにしたので, 報告する。

2 理論

2.1 時空間勾配の荷重和と指向特性

観測点において, 音圧信号 $f(t)$, 時間微分信号 $\dot{f}(t)$, 空間微分信号 $\nabla f(t) = (f_x(t), f_y(t), f_z(t))^T$ が観測されるものとする。これらの荷重和は一般性を失わず,

$$h(t) = A\{-uf(t) - u_t\dot{f}(t) + \mathbf{w} \cdot \nabla f(t)\} \quad (1)$$

と表わされる。ただし u, u_t は実数定数, \mathbf{w} は単位ベクトル, A は全体のゲインを表わす正の定数である。

まず, 式 (1) の基本的な指向特性を明らかにするため, (x, y, z) に存在する点音源から到来する球面波 $g(t)$ に対し, 式 (1) がどのような出力を与えるかを求めてみる。このとき観測信号は, 音源信号 $g(t)$ を用いて以下のように表わされる。

$$f(t) = g(t) \quad (2)$$

*Theory of Directivity Control and Souns Source Separation Based on Spatio-Temporal Measurement by Nobutaka ONO, Tetsuya Arita, Yoshiki SENJO, and Shigeru ANDO (Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo)

$$\dot{f}(t) = \dot{g}(t) \quad (3)$$

$$\nabla f(t) = \left(\frac{1}{R}g(t) + \frac{1}{c}\dot{g}(t) \right) \mathbf{n} \quad (4)$$

ただし,

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \quad \mathbf{n} = \frac{1}{R}(x, y, z)^T \quad (5)$$

である。よって $h(t)$ は

$$h(t) = AH(x, y, z)g(t) + AH_t(x, y, z)\dot{g}(t) \quad (6)$$

と表わされる。ただし,

$$H(x, y, z) = \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{w}}{R} - u = \frac{\cos \theta}{R} - u \quad (7)$$

$$H_t(x, y, z) = \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{w}}{c} - u_t = \frac{\cos \theta}{c} - u_t \quad (8)$$

であり, θ は \mathbf{n} と \mathbf{w} のなす角を表わす。よって時空間勾配の荷重和である式 (1) は, 音源信号 $g(t)$, その時間微分信号 $\dot{g}(t)$ に対して異なる指向特性 $H(x, y, z)$, $H_t(x, y, z)$ をもつフィルタの和として表わされることがわかる。式 (7) と式 (8) をより詳細に解析することにより, 以下の性質を得る。

1. 2つの指向特性 $H(x, y, z)$ と $H_t(x, y, z)$ は \mathbf{w} を軸とする回転対称性をもつ。
2. $H(x, y, z)$ の零点分布は球または平面をなす (図 1 (左))。
3. $H_t(x, y, z)$ の零点分布は円錐面または平面をなす (図 1 (右))。
4. $H(x, y, z)$ と $H_t(x, y, z)$ の零点の交わりは円または平面をなす。
5. 零点分布は周波数依存性を持たず, 従来のマイクロフォンアレイで問題となる, 空間的エリアシングによる分離不可能条件は生じない。

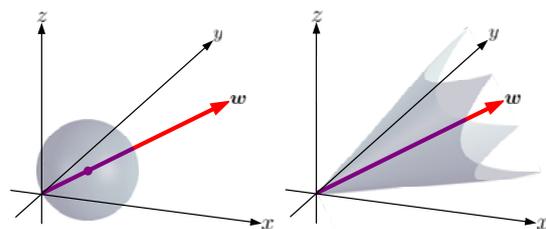


図 1: $H(x, y, z)$ (左) と $H_t(x, y, z)$ (右) の零点分布

2.2 最適音源分離荷重の設計と補償フィルタ

ここでは簡単のため、2つの点音源の位置を既知とし、一方に零点を向け、もう一方に対するゲインを最大とする最適分離荷重の設計法について考察する。

まず、音源1が存在する (x_1, y_1, z_1) でのゲインが0となる、すなわち

$$H(x_1, y_1, z_1) = 0, \quad H_t(x_1, y_1, z_1) = 0 \quad (9)$$

となるための条件は、荷重が

$$u = \frac{n_1 \cdot w}{R_1}, \quad u_t = \frac{n_1 \cdot w}{c} \quad (10)$$

を満たすことである。 u, u_t はこれらの式から決まるので、 w の選び方の分だけ任意性があることがわかる。図2に、 w による H_t の指向性の違いを示す。 w を零点方向に向けたときに最もブロードな零点が、 w を零点方向と直交方向に向けたときに最も急峻な零点が形成されることがわかる。

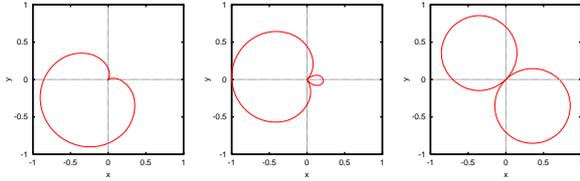


図2: w による指向特性の比較: w を零点方向 (45度方向) に対して、0度 (左)、50度 (中)、90度 (右) 方向に設定した場合の $H_t(x, y, z)$ の指向特性を示す。

音源1に零点を向けたまま音源2に対するパワーを最大化する最適な w は、厳密には音源2のパワースペクトルに依存する。しかし実環境での多くの場合、式(6)の右辺の2つの項では H_t の項の寄与の方が大きいので、これを最大化することによりほぼ最適な w を得ることができる。 (x_1, y_1, z_1) に零点を向けた状態での (x_2, y_2, z_2) における H_t は式(10)を式(8)に代入することにより、

$$H_t(x_2, y_2, z_2) = \frac{1}{c}(n_2 - n_1) \cdot w \quad (11)$$

と表されるので、

$$w = \pm \frac{n_2 - n_1}{|n_2 - n_1|} \quad (12)$$

が求める w である。

最後に、式(6)で示したように、時空間勾配の荷重和は音源信号に対してその時間微分信号を加えたものとなるが、補償フィルタは荷重で決まる1次のLPFとなり、容易に設計が可能である。

3 実験と結果

本稿の理論は数値シミュレーションでも十分に検証しているが、ここでは紙面の制限のため、実環境で

行なった実験結果のみ示す。微分検出型のセンサは现阶段ではまだ試作段階のため、本実験では近接して配置した (対向マイクロフォン間隔 5[cm])6 個の無指向性マイクロフォン (Primo; EM133) により、近似的に音場の空間勾配を計測した。時間微分信号は PC に取り込んだ後、フィルタリングにより求めた。

図3に実験結果を示す。実験場所は、周囲に反響軽減のためにスポンジ等を配置した大学の研究室である。図3から、一方の音源信号が十分抑圧され、時空間勾配観測信号から2音源の分離が行なえていることが確認できる。また、聴感上も同様の結果を確認した。

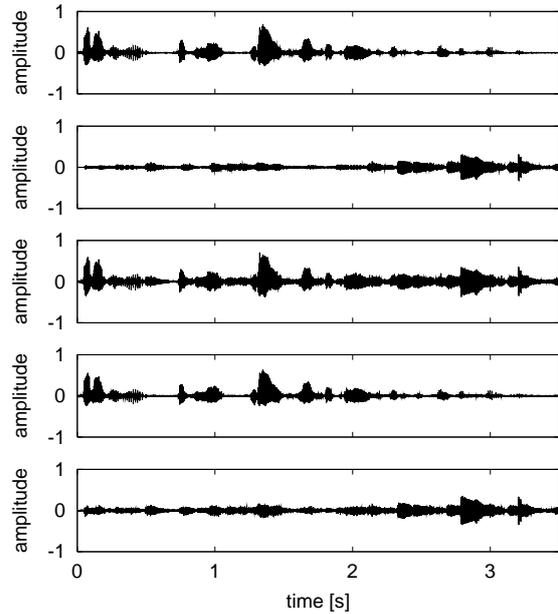


図3: 実環境における音源分離結果: 上から音源信号1(音声)、音源信号2(ピアノの音)、観測信号、分離信号1、分離信号2を表わしている。また音源は音源1(0.4, 0.0, 0.0)[m]、音源2(-0.4, 0.0, 0.0)[m]に配置した。

参考文献

- [1] A. Hyvärinen, J. Karhunen, and E. Oja, "Independent Component Analysis," Wiley, 2001.
- [2] R. N. Miles, D. Robert, and R. R. Hoy, J. Acoust. Soc. Am, vol. 98, no. 6, pp. 3059–3070, Dec. 1995
- [3] C. Gibbons and R. N. Miles, Proc. IMECE, Nov. 2000
- [4] K. Yoo, J. -L. A. Yeh, N. C. Tien, C. Gibbons, Q. Su, W. Cui, and R. N. Miles, Proc. Transducers'01, pp.130–133, 2001
- [5] K. Yoo, C. Gibbons, Q. T. Su, R. N. Miles and N. C. Tien, Sensors and Actuators A, vol. 97-98, pp. 448–456, 2002
- [6] 小野, 斎藤, 安藤, 日本音響学会聴覚研究会資料, H-2002-25, Vol.32 (2), 2002
- [7] N. Ono, A. Saito, and S. Ando, Proc. Transducers'03, pp.939-0942, 2003
- [8] 小野, 藤田, 千條, 安藤, 日本音響学会 2004 年秋季研究発表会予稿集, pp.607–608, 2004