

# 単一点音源の選択的定位と凸射影法に基づく近接マイクロホンアレーの動作時自律校正\*

藤田 悠哉, 小野 順貴, 安藤 繁 (東大・情報理工)

## 1 はじめに

近年活発な研究が行われている音源定位や音源分離においては, 実環境ではマイクロホン間の感度差や位相差が大きく性能を劣化させる。これを補償するためには各マイクロホンの周波数特性の厳密な測定が必要であるが, 併せて温度や湿度などによる動的な変化を吸収するために, システム自体が実際の使用環境における自律的な校正能力を具備することが望ましい。

これに対し本研究では, 1) 時空間勾配法 [1, 2] による音源分布の推定と音源定位, 2) 球面波拘束条件に基づく補償フィルタの逐次更新, により, 単一点音源の立ち上がりなどの良好な球面波を含む時間フレームの情報を選択的に利用し, それらがより明瞭に点音源定位するように修正することで, マイクロホン間の相対的な感度差を自律的かつ安定に校正する手法を提案し, 実験によりこれを検証した結果を報告する。

## 2 提案手法

### 2.1 球面波拘束条件

本手法は, 空間微分が計測可能な近接マイクロホンアレー, もしくは音場の空間微分を取得する新しい MEMS マイクロホン [3] の校正に適用可能であるが, ここでは例として, Fig.1 の様に近接配置された 6 本のマイクロホンの相互感度を補正することを考える。

第  $k$  回目の観測時間区間において, 音源が単一点音源とみなせるならば, 波面は球面波をなすことから, アレー中心の音圧のフーリエ変換  $F_k(\omega)$  とその空間勾配  $\nabla F_k(\omega)$  は,

$$\nabla F_k(\omega) - \left( \frac{j\omega}{c} + \frac{1}{R_k} \right) F_k(\omega) \mathbf{n}_k = 0 \quad (1)$$

を満たさなければならない [1, 2]。これを球面波拘束条件と呼ぶ。ただし,  $c$  は音速,  $\mathbf{n}_k, R_k$  はそれぞれ第  $k$  回目の観測におけるアレー中心から音源方向に向かう単位ベクトル, アレー中心と音源との間の距離である。いま,  $G_{1k}(\omega), \dots, G_{6k}(\omega)$  はアレーの各マイクロホンにより観測される音圧信号のフーリエ変換,  $\beta(\omega) = (\beta_1(\omega) \dots \beta_6(\omega))^T$  は各マイクロホンの相互感度を補償するフィルタ係数とすると, 補償フィルタが正しいならば,

差分近似が成り立つ周波数では, 音圧の空間勾配は差分, 中心音圧は平均で近似できるので, 式 (1) より,

$$\begin{pmatrix} (\beta_1(\omega)G_{1k}(\omega) - \beta_2(\omega)G_{2k}(\omega))/D \\ (\beta_3(\omega)G_{3k}(\omega) - \beta_4(\omega)G_{4k}(\omega))/D \\ (\beta_5(\omega)G_{5k}(\omega) - \beta_6(\omega)G_{6k}(\omega))/D \end{pmatrix} \quad (2) \\ - \left( \frac{j\omega}{c} + \frac{1}{R_k} \right) \frac{\sum_i \beta_i(\omega)G_{ik}(\omega)}{6} \begin{pmatrix} n_{xk} \\ n_{yk} \\ n_{zk} \end{pmatrix} \simeq 0$$

が成り立たなければならない。ただし  $D$  はマイクロホン間隔である。これを  $\beta(\omega)$  に関してベクトル表示すると,

$$\left( \mathbf{J}_{xk}(\omega) \quad \mathbf{J}_{yk}(\omega) \quad \mathbf{J}_{zk}(\omega) \right)^H \beta(\omega) \simeq 0 \quad (3)$$

と表すことができる。ここで  $\mathbf{J}_{xk}(\omega), \mathbf{J}_{yk}(\omega), \mathbf{J}_{zk}(\omega)$  は音源位置に依存した係数ベクトルである。これが真の補償フィルタ  $\beta(\omega)$  が満足すべき拘束条件となる。

### 2.2 凸射影法による適応的校正アルゴリズム

式 (3) を満たすよう補償フィルタ  $\beta_k(\omega)$  を更新するためには, 1) 観測された波面が球面波であるかどうかの判断と, 2) 球面波の場合の音源位置情報を, 観測信号そのものから取得する必要がある。よって我々は, 以下のアルゴリズムで補償フィルタを逐次推定する。

#### 音源定位ステップ

ある観測フレームの観測信号に対し,  $\beta_k(\omega)$  を用いて観測信号を補償し, 時空間勾配法 [1, 2] により音源定位を行なう。これは, 差分近似が成り立つ全周波数帯域において, 式 (1) をフィッティングさせたことに対応する。このとき残差がある閾値より大きい場合は, 観測信号は球面波ではないとみなし, 補償フィルタ更新は行なわない。残差が閾値より小さい場合は, 次のステップに進む。

#### 補償フィルタ更新ステップ

音源定位により得られた  $R_n, \mathbf{n}_k$  を用いて,  $\mathbf{J}_{xk}(\omega), \mathbf{J}_{yk}(\omega), \mathbf{J}_{zk}(\omega)$  を求める。これらは, 補償フィルタが真の値でないことや, 周囲の雑

\* Autonomous calibration method for proximity microphone arrays based on selective point source localization and convex projection method. by Yuya FUJITA, Nobutaka ONO, and Shigeru ANDO (Dept. Information Physics and Computing, University of Tokyo)



Fig. 1 近接6点マイクロホンアレー

正八面体の各頂点にマイクロホンを配置した3次元近接マイクロホンアレー。対向するマイクロホンで観測された信号間の差分近似により、 $x, y, z$  方向の空間微分を推定し、音源位置を推定する。使用したマイクロホンは無指向性のエレクトレットマイクロホン (Primo; EM133) であり、対向マイクロホン間隔は 50mm とした。

音、残響等の影響により、ある誤差を含むと考えられる。これを考慮し、式 (3) の代わりに

$$\left| \left( \begin{matrix} J_{xk}(\omega) & J_{yk}(\omega) & J_{zk}(\omega) \end{matrix} \right)^H \beta(\omega) \right| \leq \varepsilon^2 \quad (4)$$

を満たすような  $\beta(\omega)$  の空間  $\Lambda_k \in \beta_k(\omega)$  を射影する。 $\Lambda_k$  は凸集合をなすため、 $\Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_n$  が共通集合をもつような適切な誤差上界  $\varepsilon$  を選択すれば、凸射影法 [4] の原理により補償フィルタは必ずその共通集合に収束する。得られた収束点の真値への近さは、 $J_{xk}(\omega)$  等の誤差の大きさと設定した誤差上界  $\varepsilon$  に依存して決まるが、実用的には、補償フィルタが更新されなくなったら  $\varepsilon$  を少し小さくし、補償フィルタが振動的に更新され収束しなくなったら  $\varepsilon$  を少し大きくするような適応的手法が有効と考えられる。

### 3 実験

Fig.1 に示すアレーを用いて実環境における実験を行った。音源信号は 8kHz で帯域制限したホワイトノイズとし、1つのスピーカ (SD-0.6; sounddevice) を緩やかに移動させながらこれを出力した。録音した信号をフレーム幅 512 点 (5.8msec) ごとに切り出し、それぞれを 1 回の観測として 120 回分のデータを用い、提案手法により補償フィルタを推定した。なお、差分近似が十分成り立つ 2kHz 以下の周波数成分のみを用いた。

次に、校正前後で単一音源に対する音源定位結果を比較した。アレーで取得した信号に対し、8チャンネル Gabor フィルタによりサブバンド分解を行い、各サブバンド毎に時空間勾配法 [1, 2] により定位を行なった。結果を Fig.2, Fig.3 に示す。また、Fig.2, Fig.3 における定位結果の分散を Table 1 に示す。校正後は定位結果のばらつきが少なくなっており、補償フィルタによる校正が有効に働いていることを示している。

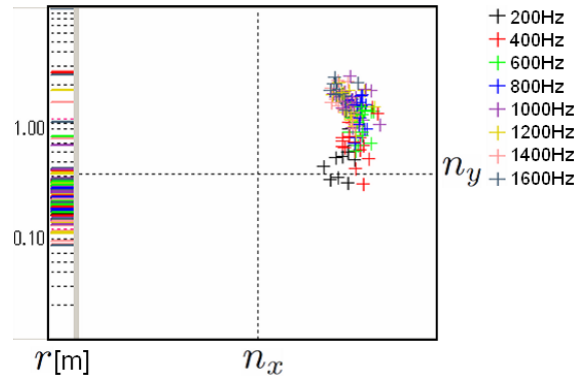


Fig. 2 校正前の定位結果

感度差校正前の状態で、単一音源に対し音源定位を行った結果。5.8ms 毎に 8 つのサブバンド (200-1600Hz) で 8 個の定位結果が得られ、これを 116ms の時間区間 (160 個) で重ねて表示している。図は、観測点から音源に向かう単位ベクトル  $n_x, n_y$  を「+」記号で、観測点と音源との間の距離  $r_m$  を左側に「-」記号で、サブバンドごとに色分けして表示している。定位結果は 1 点に集中するはずであるが、周波数依存のマイクロホン間の感度差の影響により、ばらつきと周波数ごとの偏りが見られる。

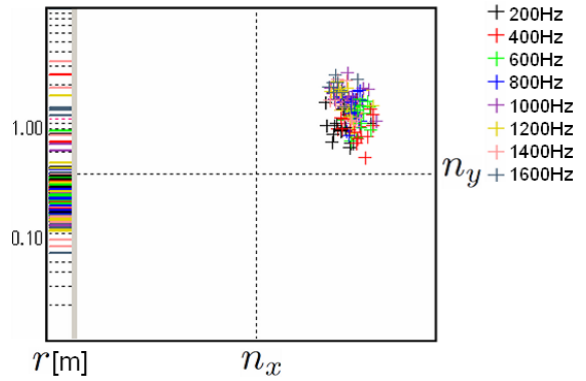


Fig. 3 校正後の定位結果

Fig.2 の実験で取得した信号に対して本手法による校正を行い、再度定位結果を表示した。Fig.2 と比較して定位結果のばらつきと偏りが減少していることがわかる。

Table 1 校正前後の定位結果の分散

Fig.2 と同じ条件で得られた 160 個の音源方向単位ベクトル  $n_x, n_y$ 、観測点と音源との間の距離  $r_m$  の逆数の分散の値  $\text{Var}(n_x), \text{Var}(n_y), \text{Var}(1/r)$  を、校正前後で比較したものの。校正後の方が値が小さくなっており、定位結果のばらつきが小さくなっていることがわかる。

	$\text{Var}(n_x)$	$\text{Var}(n_y)$	$\text{Var}(1/r)$
校正前	0.0071	0.043	12.5
校正後	0.0042	0.018	10.8

### 参考文献

- [1] 安藤 繁, 篠田裕之, 小川勝也, 光山 訓, 計測自動制御学会論文集, vol.29, no.5, pp.520-528, 1993.
- [2] 小野順貴, 藤田悠哉, 千條吉基, 安藤 繁, 日本音響学会 2004 年秋季研究発表会, vol.I, pp.607-608, 9月, 2004.
- [3] Nobutaka Ono, Akihito Saito, Shigeru Ando, Trans. IEEJ, vol.123-E, no.3, pp.92-97, 2003.
- [4] D. C. Youla and H. Webb, IEEE Trans. Medical Imaging, Vol.MI-1, no.2, October, 1982.