リアルタイム近接 4 点法による音場解析に向けた精度向上に関する研究

Accuracy improvement of closely located four point microphones method for real-time sound-field analysis

1W100497-0　保田 速人　　指導教員　山﨑 芳男　教授
YASUDA Hayato　　Prof. YAMASAKI Yoshio

概要：本研究では近接 4 点法における音源位置推定の精度向上を目指した．リアルタイム近接 4 点法による音源位置推定が正確にできれば音場の挙動をリアルタイムに把握したり移動する音源の様子を観測したりできるが，一方で近接 4 点法はわずかな測定誤差の影響を受けやすい．そこで幾何的な制約を持つ最適化問題を解くことにより近接 4 点法マイクロホンの座標を校正し，高い精度で音源の位置を推定する方法を提案する．

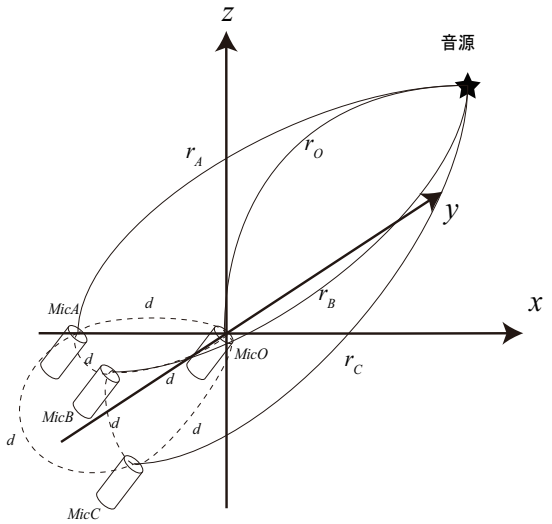
キーワード：近接 4 点法，音場解析，音源位置推定
Keywords: Closely Located four point Microphones Method, Analysis of Sound-Field, Estimation of sound source position

1. はじめに

残響時間など音場のパラメータがほぼ等しいような音場において，音の ” 響き ” に異なった印象をうけることがある．このような ” 響き ” が存在する理由は，われわれが普段音を聞く際音源から直接届く直接音の他に反射音を含む音を聞いているからである．そこで当研究室では山﨑らの提案した近接 4 点法を用いて直接音や反射音の位置や大きさを推定することにより各種音場の評価を行ってきた [1]．近年本研究室では，横田らによるリアルタイム音場把握によるコミュニケーションエイドへの応用 [2] や，中村らによる近接 4 点法を用いたリアルタイム音源位置推定，小林らによる音源分離 [3] など「より高精度に実時間で」音源の位置を推定をすることが求められている．また，リアルタイムで直接音や反射音の位置を推定することができれば音源の移動の様子を音響信号のみから推定でき，音場の解析に有用である可能性がある．しかし，その一方で近接 4 点法による実時間での音源位置推定は測定系のわずかな誤差の影響を受けやすい．そこで本研究では幾何的な制約を持つ最適化問題を解くことにより近接 4 点法に用いられるマイクロホンの座標を校正することで，高い精度で音源の位置を推定する方法を提案する．

2. 近接 4 点法

近接 4 点法とは，同一平面上にない 4 つの近接したマイクロホンで音を収録し，各マイクロホンへの音の到達時間の僅かな差を利用して直接音や反射音の位置や大きさを推定することにより，様々な音場の空間情報を算出する方法である．本研究室ではこれまでに近接 4 点法を用いて様々な音場の評価を行ってきた．



図—1　正四面体型近接 4 点法マイクロホンの配置

2.1 近接 4 点法の原理

図— 1 のように各マイクロホンを 1 辺の長さが d の正四面体の頂点に配置した時音源の座標は各マイクロホンと音源の距離を利用して

$$
\begin{aligned}
x &= \frac{-d^2 - r_O^2 + r_A^2}{2d} \\
y &= \frac{-d^2 - r_O^2 - r_A^2 + 2r_B^2}{2\sqrt{3}d} \\
z &= \frac{-d^2 - r_O^2 - r_A^2 - r_B^2 + 3r_C^2}{2\sqrt{6}d}
\end{aligned}
\tag{1}
$$

と表される．各マイクロホンと音源の距離はインパルス応答より推定される．

3. マイクロホン校正方法の提案

近接 4 点法の原理より，音源とマイクロホンの位置関係には幾何的な制約が存在する．最小化問題である，

$$\begin{aligned} \underset{r'_O, r'_A, r'_B, r'_C}{\text{minimize}} \Big\| & (r_O - r'_O) + (r_A - r'_A) \\ & + (r_B - r'_B) + (r_C - r'_C) \Big\|^2 \\ \text{subject to} \quad & r_O > 0, r_A > 0, r_B > 0, r_C > 0 \end{aligned} \tag{2}$$

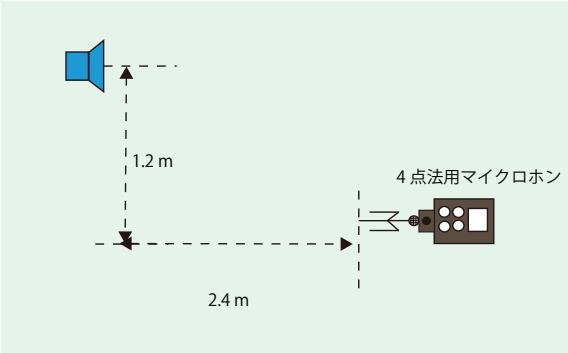
を解くことによりマイクロホンの座標と音源の位置を校正する方法を提案する．ただし，インパルス応答から求まる各マイクロホンと音源との距離を r_O，r_A，r_B，r_C とし，(x, y, z) を推定される音源の座標，(x_A, y_A, z_A) はマイクロホン A の座標，(x_B, y_B, y_B) はマイクロホン B の座標，(x_C, y_C, z_C) はマイクロホン C の座標としたとき，r'_O，r'_A，r'_B，r'_C は

$$\begin{aligned} r'_O &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ r'_A &= \sqrt{(x - x_A)^2 + (y - y_A)^2 + (z - z_A)^2} \\ r'_B &= \sqrt{(x - x_B)^2 + (y - y_B)^2 + (z - z_B)^2} \\ r'_C &= \sqrt{(x - x_C)^2 + (y - y_C)^2 + (z - z_C)^2} \end{aligned} \tag{3}$$

である．

4. 実　　験

提案方法の妥当性を検討するため実験を行った．高さ 1.06 m のところにスピーカと近接 4 点法用マイクロホンを図—2 のように設置した場合の直接音と第一反射音の位置推定とそれらの校正結果を表—1,2,3 に示す．直接音，第一反射音共にマイクロホン座標と音源座標が校正されたことによって座標より求めた距離がインパルス応答より求めた距離に近づき，校正ができていることがうかがえる．



図—2　実験概要図

表—1　マイクロホン推定結果

	式 2 最適化前 [m]	式 2 最適化後 [m]
A マイクロホン x 座標	-0.0500	0.0500
A マイクロホン y 座標	0	-1.0322E-05
A マイクロホン z 座標	0	-1.1966E-05
B マイクロホン x 座標	-0.0250	-0.024998
B マイクロホン y 座標	-0.043301	-0.043280
B マイクロホン z 座標	0	-6.7275E-06
C マイクロホン x 座標	-0.025	-0.025007
C マイクロホン y 座標	-0.014434	-0.014434
C マイクロホン z 座標	-0.040825	-0.040805

表—2　直接音位置推定結果

	式 2 最適化前 [m]	式 2 最適化後 [m]
直接音 x 座標	2.5467	2.5480
直接音 y 座標	-1.7363E-02	-1.7363E-02
直接音 z 座標	0.84856	0.84922
座標より求まる直接音距離	2.6844	2.6858
インパルス応答より求まる直接音距離	2.6859	

表—3　反射音推定結果

	式 2 最適化後 [m]	式 2 最適化後 [m]
反射音 x 座標	3.4215	3.2295
反射音 y 座標	0.16102	0.16001
反射音 z 座標	-1.1254	-1.1191
座標より求まる反射音距離	3.4413	3.4217
インパルス応答より求まる反射音距離	3.4215	

5. む　す　び

本研究では，マイクロホン座標を校正することにより，近接 4 点法による音源位置推定の精度の向上を試みた．幾何的な制約を与えた最適化問題を解くことで，マイクロホンの座標と音源の座標の校正を行い，座標から求めた距離とインパルス応答から求めた距離をほぼ一致させることができた．今後は各マイクロホン間の到達時間差のみから音源の正確な座標を推定するシステムを考案し，リアルタイムで音源の位置や音場の挙動を観測する方法を研究する所存である．

参 考 文 献

[1] Y. Yamasaki and T. Itow, “ Measurement of spatial information in sound fields by closely located four point micro phone method,” J. Acoust. Soc. Jpn., Vol.10, No.2, Dec.1989.

[2] 横田林三，沖幸太朗，山﨑芳男，“ 近接 4 点法を利用した球による音場の 3 次元表示, ”日本音響学会講演論文集, pp.581-582，Sep.2004.

[3] 小林万里恵, 及川靖広, 山﨑芳男,“ 分散配置した近接 4 点法マイクロホンによる音源位置推定と音源分離,” 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, pp.685-686, Mar.2012.