ISS-A-003

特定のエリア内における受聴点移動を考慮した逆フィルタ型音場再現システム

Inverse-filter-based sound field reproduction system considering movement of listening point within a specific area

牧野雅弘 [1]　　立蔵洋介 [1]
Masahiro Makino　　Yosuke Tatekura

静岡大院 総合科学技術研究科 [1]
Shizuoka University

1　まえがき

逆フィルタ型音場再現システムでは，逆フィルタ制御により室内音響伝達特性を打ち消すことで受聴点にピンポイントな信号の再現ができる [1]．しかし，ピンポイントな制御を行うため，受聴点移動に伴う伝達特性の変化によって再現精度が低下する．

本稿では受聴点の移動を考慮することで，移動した点でも受聴点と同等な再現精度を保つ方法について考える．スピーカと受聴点間の伝達関数は，受聴点が異なってもスピーカ位置が変動しなければ類似した包絡を持つことが知られている [2]．そこで，受聴点の伝達関数を用いて近傍の伝達関数を推定する方法を提案し，その推定精度を調査した．

2　逆フィルタ型音場再現システム

M 個のスピーカと N 個の受聴点を持つ逆フィルタ型音場再現システムにおいて，受聴点 n で得られる再現信号 $Y_n(\omega)$ を要素とする再現信号の行列 $\boldsymbol{Y}(\omega)$ は以下のように表される．

$$\boldsymbol{Y}(\omega) = \boldsymbol{G}(\omega)\boldsymbol{H}(\omega)\boldsymbol{X}(\omega) \tag{1}$$

ここで，$\boldsymbol{X}(\omega)$ は受聴点 n で再現したい原信号 $X_n(\omega)$ を要素とする原信号の行列，$\boldsymbol{H}(\omega)$ は M 行 N 列の逆フィルタの行列，$\boldsymbol{G}(\omega)$ は受聴点 n からスピーカ m 間の伝達関数 $G_{nm}(\omega)$ を要素とする N 行 M 列の行列，ω は角周波数を表す．音場再現において，$\boldsymbol{Y}(\omega) = \boldsymbol{X}(\omega)$ となるように逆フィルタ $\boldsymbol{H}(\omega)$ が設計されるのが望ましい．$M > N$ のような非正方行列の逆行列を求める方法として，Moore-Penrose 一般逆行列による解法が知られている [3]．

3　近傍の伝達関数の推定

受聴点とその近傍の伝達関数では，直接波の到達する時間が異なる．そこで，直接波の到達時間差と受聴点の伝達関数を利用し，近傍の伝達関数を模擬できると考える．直接波の到達時間差は，近傍の観測点 o とスピーカ m 間の距離 $d_{o,m}$ と受聴点 n とスピーカ m 間の距離 $d_{n,m}$ との差と音速 c の二つを用いて以下のように計算できる．

$$\tau_{o,n,m} = \frac{1}{c}(d_{o,m} - d_{n,m}) \tag{2}$$

$\tau_{o,n,m}$ は各スピーカからの直接波の到達時間差を表す．到達時間差を用い，受聴点の伝達関数を以下のように位相の補正を行う．

$$\hat{\boldsymbol{G}}(\omega) = \boldsymbol{G}(\omega) \circ \exp(-j\omega\boldsymbol{\tau}) \tag{3}$$

$\circ$ はアダマール積，$\boldsymbol{\tau}$ は $\tau_{o,n,m}$ を要素とする N 行 M 列の到達時間差の行列，$\hat{\boldsymbol{G}}(\omega)$ は推定した伝達関数を表す．

4　実環境データを用いたシミュレーション実験

本稿では，実環境で測定した伝達関数を用いたシミュレーションを行った．実験環境図を Fig. 1 に示す．2 個のスピーカから 0.1 × 0.1 m の平面内にある 1 個のマイクまでの伝達関数を，全 121 点測定した．サンプリング周波数は 48 kHz とした．測定空間は 7.5 × 6.0 m の室内で，残響時間は約 0.5 秒であった．

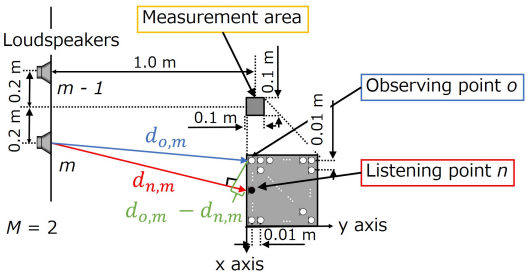

Fig. 1　実環境における伝達関数を測定した環境図

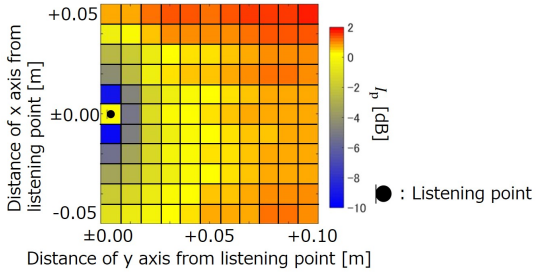

Fig. 2　推定後の伝達関数を利用した際における再現精度の改善量 $\mathrm{I_p}$

Fig. 1 に示した受聴点における伝達関数を用い，各観測点の伝達関数をそれぞれ推定した．推定した伝達関数を用いて逆フィルタ $\hat{\boldsymbol{H}}(\omega)$ を設計し，再現波形 $\mathcal{F}^{-1}[\boldsymbol{G}(\omega)\hat{\boldsymbol{H}}(\omega)]$ を生成した．ここで，$\mathcal{F}^{-1}$ は逆フーリエ変換を表す．再現精度の評価は SNR を用い，以下のように計算した．

$$\mathrm{SNR_c} = 10\log_{10}\frac{\sum_t r(t)^2}{\sum_t (r(t) - \mathcal{F}^{-1}[\boldsymbol{G}(\omega)\boldsymbol{H}(\omega)])^2} \tag{4}$$

$$\mathrm{SNR_p} = 10\log_{10}\frac{\sum_t r(t)^2}{\sum_t (r(t) - \mathcal{F}^{-1}[\boldsymbol{G}(\omega)\hat{\boldsymbol{H}}(\omega)])^2} \tag{5}$$

ここで，$r(t)$ は帯域 150–4000 Hz のバンドパスフィルタによって処理されたパルス波形，$\mathrm{SNR_c}$ は推定前，$\mathrm{SNR_p}$ は推定後を表す．また改善量の評価として，$I_\mathrm{p} = \mathrm{SNR_p} - \mathrm{SNR_c}$ を用いた．

Fig. 2 に推定後のインパルス応答を用いた再現精度の改善量を示す．y 軸方向に 0.05 m 未満の点では再現精度が低下している点もあるが，y 軸方向 0.05 m 以上の点では改善が確認できる．y 軸方向 0.05 m 未満の点では，位相の遅延が少ないため再現精度を低下させたが，y 軸方向 0.05 m の点では位相の遅延による影響が大きいため向上したと考えられる．

謝辞　本研究は JSPS 科研費 15K00229 の支援を受けた．

参考文献

[1] 立蔵 洋介, 音響誌, vol. 72, no. 12, pp. 777–782, 2016.
[2] R. NAKADA *et. al.*, *IEICE TRANS. FUNDAMENTALS*, vol. E96-A, no. 7, pp. 1509–1517, 2013.
[3] 猿渡 洋 他, 音響誌, vol. 69, no. 2, pp. 63–68, 2013.

Copyright © 2018 IEICE