

室内音場伝達関数の極に着目した 残響抑圧制御*

©三井隆博 鮫島俊哉 (九州芸工大)

1. はじめに

室内のアクティブ音場制御においては、従来、音場の逆フィルタ処理の考え方に基づく研究が主になされていた。しかし、音源～受音点間の伝達関数のみに着目したこの手法では、音場全体をプラントとして扱った制御の実現は、今まで困難とされてきた。そこで本論文では、室内音場全体の制御を目的として、伝達関数の極に着目したフィードバック制御手法を提案し、その可能性を検討する。

2. 提案する制御システム

室内音場において、共振という物理現象を考えると、それは音源～受音点の位置に依存しない、室内全体に共通のものである。また、共振は室内音場伝達関数の極に対応している。以上のことを考慮すれば、すべての室内音場伝達関数は共通な極 (共通極¹⁾) を含んでいるといえる。室内音場伝達関数の共通極・零モデルと等価な共通 ARMA モデルを示す。

$$\hat{H}(\mathbf{r}_j, z) = \frac{\sum_{i=0}^Q b_i(\mathbf{r}_j)z^{-i}}{1 + \sum_{i=1}^P a_i z^{-i}}$$

$\hat{H}(\mathbf{r}_j, z)$: 各 \mathbf{r}_j に対して共通極・零 (共通 ARMA) モデル化された伝達関数

Q : 零点の次数

P : 極の次数

$b_i(\mathbf{r}_j)$: 各 \mathbf{r}_j に対する MA 係数

a_i : 共通 AR 係数

共通極は室内でのいくつかのインパルス応答より等価な共通 AR 係数として推定でき、これを用いて制御器を設計することで、室内全体を制御できると考える。具体的に

は、ある受音点に対して、伝達関数の共通極を制御をすることによって、室内全体が派生的に制御されることをねらう。提案する制御システムを以下に示す。

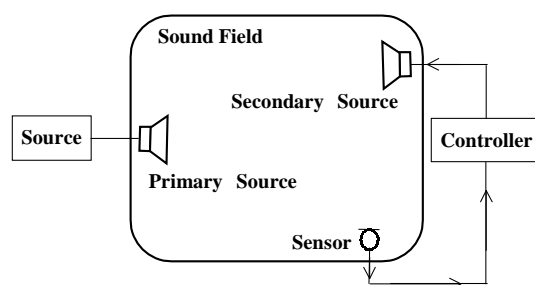


Fig. 1 提案するフィードバック制御システム

上図の制御系において、音源～制御する受音点間の音場を状態空間表現すれば次式のように表せる。

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{b}_f u_f(k) + \mathbf{b}_s u_s(k) \\ y(k) &= \mathbf{c}\mathbf{x}(k) \end{aligned}$$

ただし、

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & \cdots & -a_P \\ 1 & 0 & \cdots & \cdots & -a_{P-1} \\ \cdot & \cdot & & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 & -a_2 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & -a_1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b}_f^T = [b_{fP}(\mathbf{r}_j) \quad b_{f(P-1)}(\mathbf{r}_j) \quad \cdots \quad b_{f1}(\mathbf{r}_j)]$$

$$\mathbf{b}_s^T = [b_{sP}(\mathbf{r}_j) \quad b_{s(P-1)}(\mathbf{r}_j) \quad \cdots \quad b_{s1}(\mathbf{r}_j)]$$

$$\mathbf{c} = [0 \quad 0 \quad \cdots \quad \cdots \quad 0 \quad 1]$$

であり、 a_i が共通 AR 係数、 b_{fi} 、 b_{si} が各音源から受音点まで MA 係数である。また u_f 、 u_s は、1 次音源、2 次音源への入力である。

* Active suppression of reverberation taking notice of room transfer functions.

3. フィードバック制御器の設計

$u_s(k) = -\mathbf{f}\mathbf{x}(k)$ で表されるフィードバック制御則を求める。フィードバックゲイン \mathbf{f} は評価関数が以下のように与えられる最適レギュレータ問題の解である。

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} \{ \mathbf{x}^T(k) \mathbf{R}_1 \mathbf{x}(k) + r_2 u_s^2(k) \}$$

ただし, $\mathbf{R}_1 = \mathbf{c}^T \mathbf{c}$, r_2 は任意の重み係数である。

4. 計算機シミュレーションによる検討

提案した制御システムの可能性を検討するため, Fig.2のような音場モデルを想定し, 計算機シミュレーションを行った。2次音源から位置 a~c, およびセンサーまでのインパルス応答を用いて共通極を推定し, 提案した制御手法を用いて制御を施した場合のセンサーと受信点でのインパルス応答を算出した。Fig.3に残響曲線と周波数応答で結果を示す。結果から, 提案した制御システムによって, 制御を施した位置以外でも, 派生的に残響が抑圧されていることが確認できた。

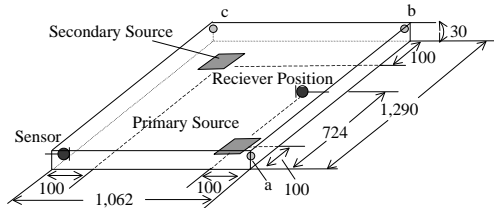


Fig. 2 音場モデル

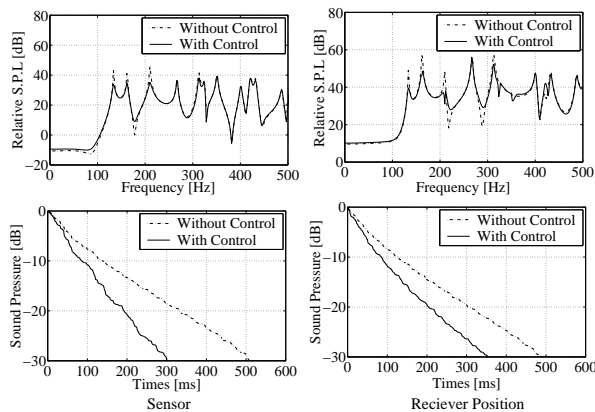


Fig. 3 制御結果 (周波数特性, 残響曲線)

5. 模型音場における制御実験

提案したフィードバック制御システムの有効性を, 実験的に確認した。音場には模型残響室を用いた。その詳細と音源とセンサー, 受信点の位置を Fig.5 に示す。

実験では Time Stretched Pulse を出力して各受信点におけるインパルス応答を測定し, 後処理によって制御した場合としない場合のインパルス応答を算出した。その結果を周波数特性で示す。ただし $r_2 = 10^3$ とした。

結果を見ると, いくつかの共振は抑圧できているが, その他では抑圧できていない, もしくはそのピークが制御前よりさらに高くなっているものさえある。これは, 共通 AR 係数の精度の問題であることが考えられる。ある一つの共通 AR 係数の誤差は全体に影響する。すなわち, 共通 AR 係数推定の際の誤差が制御結果に大きく影響したと推測できる。

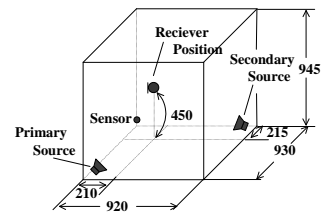


Fig. 4 実験に用いた模型残響室

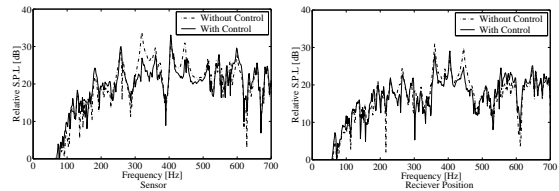


Fig. 5 制御結果 (周波数特性, 残響曲線)

6. まとめ

本研究では, 室内音場伝達関数の極に着目することで室内全体をプラントとすることを目的とした, 新たな残響抑圧制御手法を提案をした。提案した制御システムの適用例として, 計算機によるシミュレーション, そして実音場として模型残響室による実験を行い, その検討を行った。実音場における実験においては所望の結果を得ることができなかった。その原因として, 共通 AR 係数の誤差が考えられる。このことから実音場に対応できる正確な共通極の推定が, 提案した制御システムを実現するための今後の課題である。

参考文献

[1] Yoichi Haneda, Shouji Makino, Yutaka Kaneda, "Common Acoustical Pole and Zero Modeling of Room Transfer Function" IEEE TRANSACTIONS ON SPEECH AND AUDIO PROCESSING, VOL.2, NO.2, APRIL pp.320-328 (1994)