

# 音場支援システムを用いた残響音場の モデルベースド制御に関する基礎的検討

03-220080 河野 光貴

## 1. はじめに

電気音響設備を用いたシステムによって室用途に合わせた最適な音場を生成するためには、コンピュータ上に構築したモデル上で調整を行うモデルベースド制御が役立つ可能性がある。本研究ではそのための基礎的な検討として、音場を生成するシステムとして音場支援システム (YAMAHA : Active Field Control Enhance (以下、AFC) [1]) を使用し、モデルベースド制御のためのモデル構築とその精度の検証を行った。

## 2. 実験システム

### 2.1 音場支援システム

AFC の概念図を図 1 に示す。システムは初期反射音制御部と残響音制御部に分けられる。初期反射音制御部では、指向性マイクを用いて主に直接音を收音し、響きを付加してスピーカから再生することで初期反射音成分を増強する。残響音制御部では無指向性マイクを用いて室の反射音を收音し、響きを付加してスピーカから再生させた音を繰り返し收音する音響フィードバックを積極的に利用することで残響を自然に延長する。いずれの制御部でも、響きの付加には入力信号に対する FIR フィルタ (Finite Impulse Response) の重畳によって行う。

本研究では、初期反射音制御部に限定してシステムのモデル化を行った。初期反射音制御部の信号処理のフローを図 2 に示す。AFC プロセッサ内の処理として、各マイクへの入力に対する EQ (周波数特性の調整) と FIR (反射音の付加)、Matrix (マイク・スピーカの割り当て) の 3 つの処理を主に使用する。

### 2.2 実験室の機器構成

実験室内の機器構成を図 3 に示す。室中心に配置したマイク・スピーカを M0 および S0 とする。シミュレーション精度の検証時に演奏者のステージ音響指標値である  $ST_{Early}$  [2] を算出することを想定し、距離 1m、高さ 1.5m と測定条件を設定した。

また、AFC システム用のマイク・スピーカを M1~M4 および S1~S8 とし、1つのマイクに收音された音が 2つのスピーカから再生されるよう割り当てを行った。

表 1 AFC システムのマイク・スピーカの割り当て

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
M1	○		○					
M2		○						○
M3				○		○		
M4					○		○	

## 3. シミュレーションモデルの構築

M0~M4 と S0~S8 間の計 45 個のインパルス応答と AFC システムのモデルを統合することで測定系における音場支援のシミュレーションモデルを作成した。シミュレーションモデルによる処理の流れを図 4 に示す。

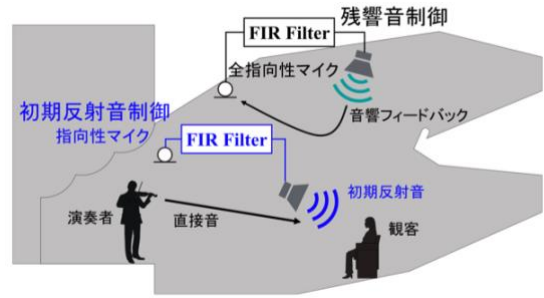


図 1 音場支援システム概念図

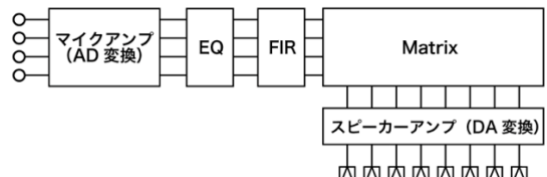


図 2 初期反射音制御部の信号処理フロー

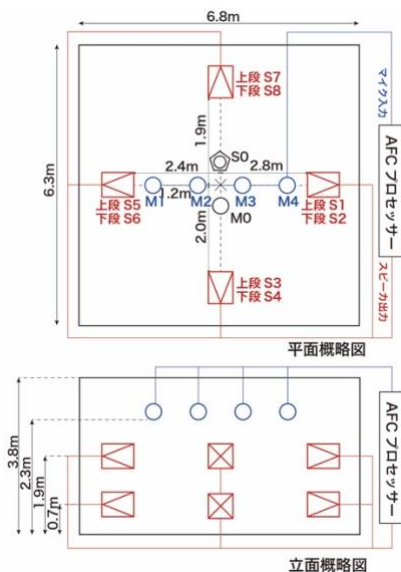


図 3 実験室概略図

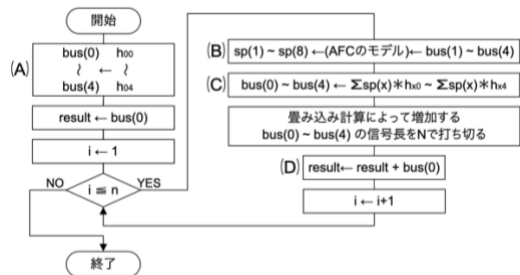


図 4 シミュレーションモデルによる処理の流れ

図中の  $h$  は測定したインパルス応答、添字はスピーカとマイクの番号を表す。システム内での表記に倣い、マイクの入力信号の配列名は bus とし、スピーカの出力信号の配列名は便宜上 sp としている。

処理の流れは大きく以下の通りである。

- (A) S0 から M0～M4 の入力信号について、M0 への入力信号は結果に加算する。
- (B) 図2に示したモデルによってM1～M4の入力信号からS1～S8の出力信号を計算する。
- (C) 新たにM0～M4の入力信号を計算する。
- (D) M0の入力信号は結果に加算し、M1～M4の入力信号はループ始めに戻す。

(B)～(D)をループ処理で繰り返し、AFCプロセッサを経由する回数ごとにM0への入力信号を加算していくことで、S0とM0間のインパルス応答に対し響きが付加されたインパルス応答を生成するプログラムとなっている。

また計算量を抑えるため、生成するインパルス応答信号長  $N$  とループ回数  $n$  を打ち切った。本研究では初期反射音制御部に限定したモデル化のため信号長は 3s とし、ループ回数については本研究の測定条件において減衰曲線の十分な収束が確認できる 10 回と定めた。

#### 4. シミュレーション精度の検証

AFC が on の状態で測定したインパルス応答とシミュレーションモデルにより生成したインパルス応答の比較により、シミュレーション精度の検証を行った。AFC 内の FIR フィルタは残響時間(T)や室容積(V)の異なる 2 条件 (小ホール(T=1.6, V=2,500)、大ホール (T=2.5, V=13,000)) を用意し、図5は条件Sを使用した場合の波形を示す。

まず、初期反射音部分の精度の検証を行った。直接音の到来時刻を 0s とし、システムを経由して初期反射音成分を付加している 19ms から 100ms の間で相互相関係数を計算し波形の類似度を求めた。0.97 という高い相関が得られたため、初期反射音成分については高い精度の結果が得られたと言える。

次に、ループ回数(i)ごとの残響減衰曲線の変化を図6に示す。-15dB～-25dBの区間の残響減衰曲線の傾きを用いて算出した初期減衰時間を EDT' と定義し、残響感に関する検証を行なった。AFC 内でスピーカゲインを操作した場合の EDT' の変化を図7に示す。グラフから、ゲイン調整や FIR フィルタに関わらず、実測よりシミュレーションの方が、残響音エネルギーが大きくなる事が確認できた。

このことについて検証を行ったところ、シミュレーションにおいて特定の周波数成分が増加してしまっていることが判明した。原因についてはさらなる検証が必要である。

また、モデルを用いた定量的な調整を実現するためには、シミュレーション結果が AFC 内のパラメータ操作に対応していることは極めて重要である。例として、スピーカゲインを操作した場合の、 $ST_{Early}$  の変化を図8に示す。

$$ST_{Early} = 10 \log_{10} \left\{ \frac{\int_{20 \text{ ms}}^{100 \text{ ms}} h^2(t) dt}{\int_{0 \text{ ms}}^{10 \text{ ms}} h^2(t) dt} \right\} \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

実測とシミュレーションの差は 0.2dB 以内となり、操作の対応が確認できた。

#### 5. おわりに

音場支援システムによって実空間に生成される音場のモデルベースド制御のためのモデル構築と室内音響指標に基づいた妥当性の検証を行った。

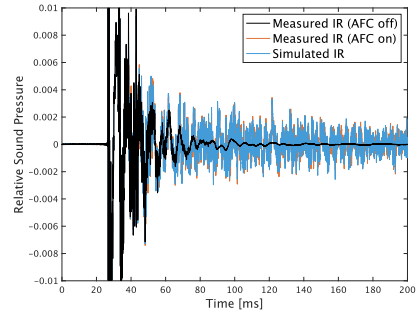


図5 インパルス応答波形の比較

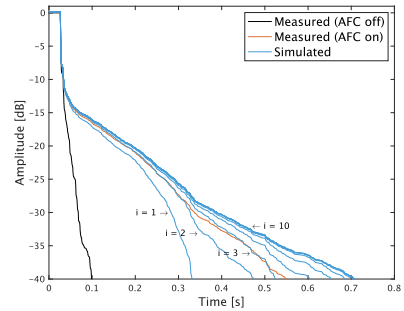


図6 ループ回数ごとの残響減衰曲線の変化

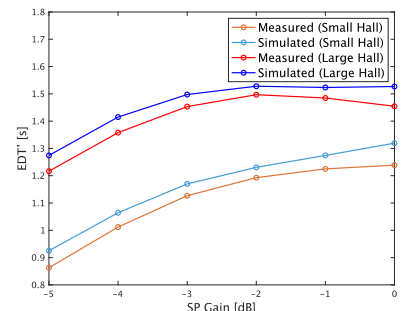


図7 ゲイン調整による EDT' の変化

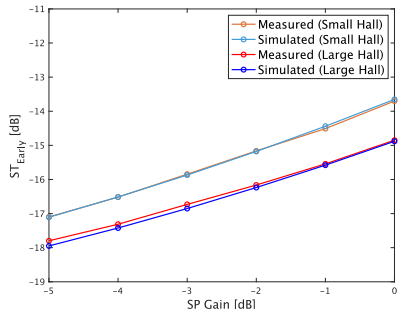


図8 ゲイン調整による  $ST_{Early}$  の変化

今後の展望として、残響音制御部に対するモデルの拡張や、AFC が導入された他の空間への適用が考えられる。また、シミュレーションにおける残響音エネルギーの増加の原因については解明の必要がある。

#### 参考文献

- [1] 渡辺隆行, 宮崎秀生, “音場支援システムの構成と適用事例”, 日本音響学会誌, 76.9, 2020, 511-517.
- [2] A. C. Gade, “Investigations of musicians' room acoustics conditions in concert halls, Part II: Field experiments and synthesis of results”, *Acustica*, 69, 1989, 249-262.