

残響付加システムのモデルベースド制御に関する研究

37246088 河野 光貴

1. はじめに

電気音響による残響付加システムは、建築的操作によるパッシブ手法と比較して、より柔軟な残響制御が可能である。一方で、システムの調整の面では音響技術者の主観や経験に頼った部分が大きく、調整の最適化・自動化が課題として挙げられている。このような課題に対し、計算機上に事前に構築したシミュレーションモデル上で調整を行う、モデルベースド制御が有効であると考えられる。

本研究では、実空間での残響付加を模擬するシミュレーションモデルを、インパルス応答の事前計測に基に構築し、モデルベースド制御による定量的な調整手法を検討する。

2. 残響付加システム

本研究では、残響付加システムとして YAMAHA 製 Active Field Control Enhance (AFC)^[1]を使用する (図 1)。

システムは初期反射音制御部と残響音制御部から構成される。初期反射音制御部では、指向性マイクで直接音を收音し、初期応答に相当する FIR(Finite Impulse Response) フィルタを畳み込んでスピーカから再生する。一方、残響音制御部では、全指向性マイクで室内の反射音を收音し、FIR フィルタ処理によって響きを加えた信号をスピーカから再生するとともに、空間を経由してマイクへ戻るフィードバックループを利用して残響を自然に延長する。

AFC プロセッサ内の信号処理フローを図 2 に示す。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 つの処理を使用する。FIR にはコンサートホールなどの実空間において取得・加工した信号を選択する (表 1)。

3. シミュレーションモデルの構築

3.1 実験室の機器構成

実験室として使用した半無響室の機器配置を図 3 に示す。単一指向性マイク 4 本 (M1~M4)、全指向性マイク 4 本 (M5~M8)、スピーカ 20 台 (S1~S20) を使用し、AFC を構成した。その際、1 つのマイクに收音された信号が距離の十分離れた 2,3 つのスピーカから再生されるよう割り当てを行った。

また、室内音響指標評価用の 12 面体スピーカ (S0) と全指向性マイク (M0) を別途設置した。これらはステージ音響指標である ST_{Early} の測定条件に基づき、室中央部の高さ 1.5 m に 1 m 離して設置した。

3.2 計算手法

AFC と評価用を合わせた全てのスピーカからマイク間のインパルス応答を事前に測定し、伝達関数 h_{ij} ($i = 0 \sim 20$, $j = 0 \sim 8$) に変換した。AFC 内処理系の各マイクから各スピーカへの伝達関数を g_{ji} とすると、AFC 作動時の S0-M0 間の伝達関数はフィードバックループを反映して次式で表される^[2]。

$$\begin{aligned} h'_{00} &= h_{00} + h_{S0}^T G h_{0M} + h_{S0}^T G (HG) h_{0M} \\ &\quad + h_{S0}^T G (HG) (HG) h_{0M} + \dots \\ &= h_{00} + h_{S0}^T G (I - HG)^{-1} h_{0M} \end{aligned} \quad (1)$$

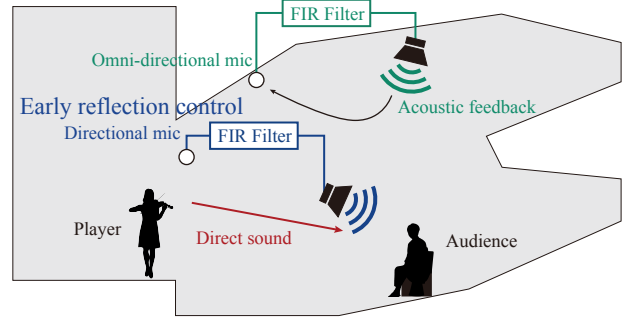


図 1 残響付加システムの概念図

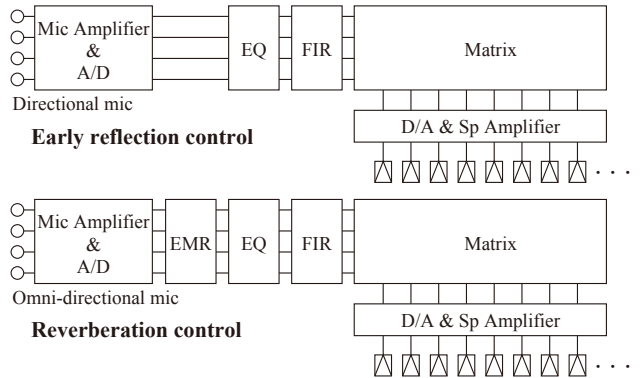


図 2 AFC プロセッサ内の信号処理フロー

表 1 AFC 内 FIR の種類

ID	Venue	Reverberation time [s]	Room volume [m ³]
A	Piano testing room	1.3	3,500
B	Small concert hall	1.6	2,500
C	Small symphony hall	1.9	5,700
D	Large concert hall	2.5	13,000
E	Large symphony hall	2.7	25,000
F	Cathedral	5.0	8,700

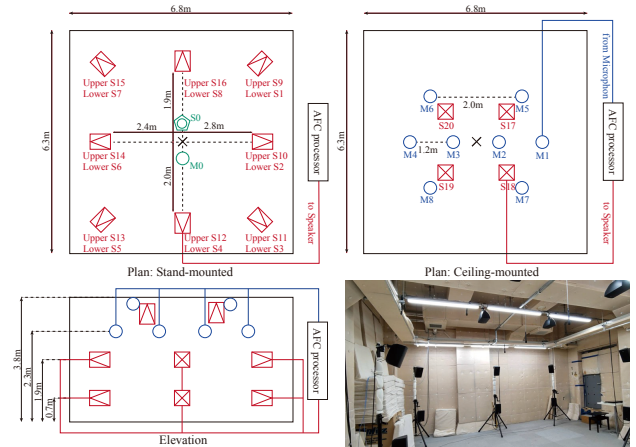


図 3 半無響室の機器配置

$H_{ij} = h_{ij}$: 音場内 S1~20-M1~8 間の伝達行列

$G_{ij} = g_{ji}$: AFC 内 M1~8-S1~20 の伝達行列

$h_{0M,i} = h_{0i}$: S0-M1~8 間の伝達ベクトル

$h_{s0,i} = h_{j0}$: S1~20-M0 間の伝達ベクトル

本研究では IR の時間長を 3 s ($f_s = 48$ kHz)、伝達関数の周波数間隔を 1/3 Hz とし、最終的に h'_{00} の逆 FFT により評価用 IR を算出した。

計算フローを図 4 に示す。なお、 HG の全ての固有値の絶対値が 1 未満のとき式(1)が成立し、 h'_{00} が計算できる。逆に、 HG が絶対値 1 以上の固有値を持つ場合、行列の無限級数和が発散しシステムは不安定となる。したがって、 HG の固有値を解析することで、AFC システムの安定性判別、すなわちハウリング限界の検出が可能となる。

3.3 精度の検証

AFC 作動時に測定した評価用 IR とシミュレーションモデルにより再現した評価用 IR を比較することで、シミュレーション精度の検証を行う。図 5 には、評価用 IR の時間波形と初期の拡大図を示しており、波形レベルでの正確さが確認できる。

次に、残響減衰曲線を図 6 に示す。2 条件の FIR フィルタ (条件 B,D) をそれぞれ AFC 内に適用して調整した場合について、初期から後期に至るまで良い対応が確認できる。また、残響感に関する指標として、 T_{20} (125~4k Hz の 1/1 オクターブバンド値) を図 7 に示す。こちらは、S0-M0 間の距離が近いことによる直接音直後の低下を考慮し、-15~-35 dB 区間から便宜的に算出した。シミュレーション誤差は大きい帯域でも僅か 0.1 s 程度となり、特に 250~2k Hz 帯域の算術平均値の誤差は 2 %以下と良い対応が確認できた。また、音量感に関するステージ音響指標 ST_{Early} (250~2k Hz 帯域の算術平均値) については、シミュレーション誤差は 0.1 dB 程度となった。

4. シミュレーションモデルを用いた調整

4.1 ハウリング・カラーレーション対策

まず、AFC の実運用において使用されている調整ツールを参考に、ループゲインの低減および平坦化を行った。各 AFC 用マイクに対応した信号処理系統毎にループゲインを算出し、平均レベルは -21dB、ピークレベルは -12dB を目標として、ループゲインの周波数特性上のピーク検出と EQ 適用を反復処理することで目標値に近づける。

次に、ループゲイン行列 HG に基づくハウリング対策を行った。行列の無限級数和の性質により、 HG の各周波数について、全ての固有値の絶対値が 1 未満であれば式(1)は成立する。そのため、本研究では安全側の基準として目標値を 0.9 に設定し、固有値の絶対値が 0.9 を超える周波数に対して狭帯域の EQ を適用した。

次に、Meynial によって提案されているカラーレーション指標^[3]を使用した調整を行った。算出手順を図 7 に示す。

- 評価用 IR から残響減衰曲線を算出し、-25~-45dB の区間を評価対象区間とした
- 減衰の影響を取り除くため、評価区間で切り出した IR に $\exp(6.91t/T)$ を掛けて補正を行う (T は評価対象区間から算出した残響時間)
- 補正信号の周波数振幅特性に対して 1/3 オクターブバンド幅の移動平均によって平滑化を行い、後者に対する前者の比 (H_{ww}/G_{ww}) の標準偏差をカラーレーション指標 σ とする

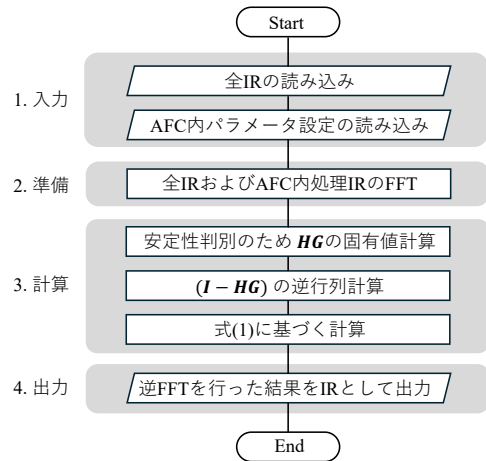


図 4 シミュレーションモデルの処理フロー

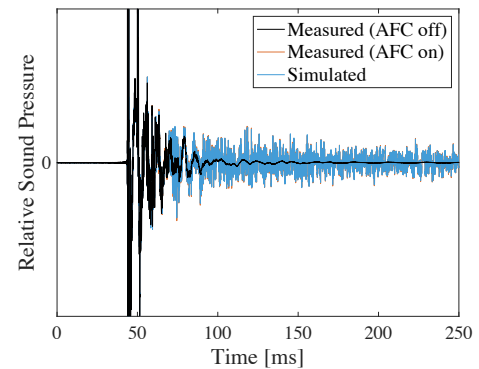


図 5 インパルス応答波形の比較

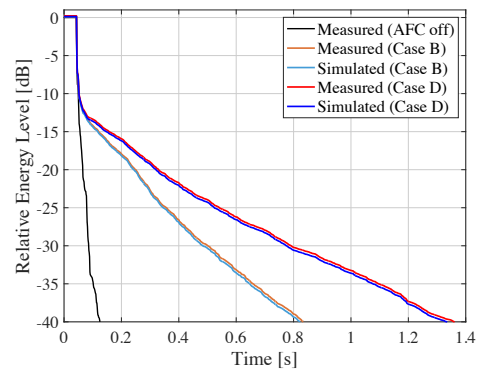


図 6 残響減衰曲線の比較

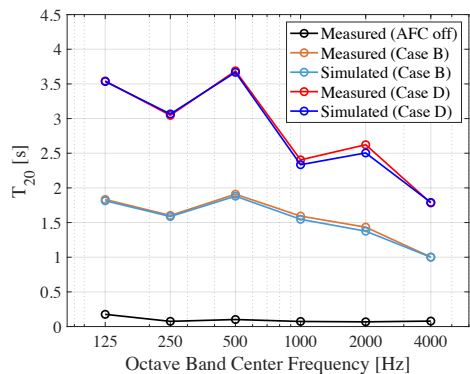


図 7 T_{20} の比較

また、 H_{ww}/G_{ww} の最大値 L_{max} を確認することで、カラーレーションのリスクが高い周波数を確認できる。そのため、表 1 の各 FIR を AFC に適用してハウリング対策を実施した後、狭帯域 EQ の適用によって H_{ww}/G_{ww} のピークを段階的に低減することで、カラーレーション指標 σ の低減を図った。表 2 に結果を示す。

表 2 カラーレーション制御結果

		Case A	Case B	Case C	Case D	Case E	Case F
before	σ	0.82	0.91	0.79	0.71	0.68	0.79
	L_{max}	16.4	18.7	18.5	19.8	20.2	22.0
after	σ	0.86	0.86	0.68	0.65	0.62	0.69
	L_{max}	12.9	16.9	13.9	14.3	13.7	13.7

4.2 室内音響指標に基づく調整

AFC 内 EQ パラメータを勾配法により調整することで、室内音響指標を目標値に近づける手法について検討した。

初期の音量感に関する指標として ST_{Early} (250–2k Hz 帯域の算術平均)、残響感に関する指標として T_{20} (125–4k Hz の 1/1 オクターブバンド値) の目標値を定め、それぞれ初期反射音制御部の EQ (オールパスゲインのみ)、残響音制御部の EQ (125–4k Hz の 1/1 オクターブバンド中心周波数に対応した各 EQ ゲイン) を勾配法によって最適調整した。なお、 T_{20} は、直接音直後の低下を除いた -15~35 dB 区間から便宜的に算出した。

調整フローを図 8 に示す。収束までに要するループ回数は、EQ ゲイン更新式に含まれる対角行列や、設定した調整目標値に依存するが、本検討では安全側の挙動をとるよう、対角行列などの係数を小さく設定して調整を行った。

結果の一例を表 3 に示す。実測値と目標値の差は概ね 0.1 s 以内に収まり、 ST_{Early} について誤差は 1 dB 以内となった。以上の結果から、複数の室内音響指標に基づいた音場調整を行える可能性が示された。

表 3 室内音響指標に基づく調整結果

Frequency [Hz]	T_{20} [s]						ST_{Early} [dB]
	125	250	500	1000	2000	4000	
Target Value	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	-16.0
Simulated Value	2.00	1.99	2.00	2.00	2.01	2.00	-15.9
Measured Value	2.00	1.96	1.99	1.90	2.05	1.72	-16.8

5. 実利用空間への適用

半無響室での検討を、実際に AFC が導入されている扇形講義室(図 9)に適用する。第 3 章の手順でシミュレーションモデルを構築し、精度の検証(図 10)を行った後、カラーレーションのリスクが低いことを指標から確認した。

その後、室内音響指標に基づく調整を実施した。本章では、残響音制御部による T_{20} の調整と初期反射音制御部による C_{80} の調整を同時に実施し、 T_{20} の条件を目標値した上で C_{80} の目標値を 0.1 dB 刻みで変化させ、調整可能範囲を確認した。結果を図 11 に示す。 T_{20} の調整値が大きくなるほど、 C_{80} の調整可能範囲が全体的に小さくなる傾向が確認でき、これは残響音制御部のループゲイン増大によって残響音エネルギーが増加した結果だと推測できる。また、初期反射音制御部のゲインを大きくした場合も、同様に C_{80} の低下が確認された。これは AFC 用マイク・スピーカの配置や計算遅延などといった環境条件が影響することで、初期反射音制御部でも残響音成分の付加が支配的となる場合があることを示している。

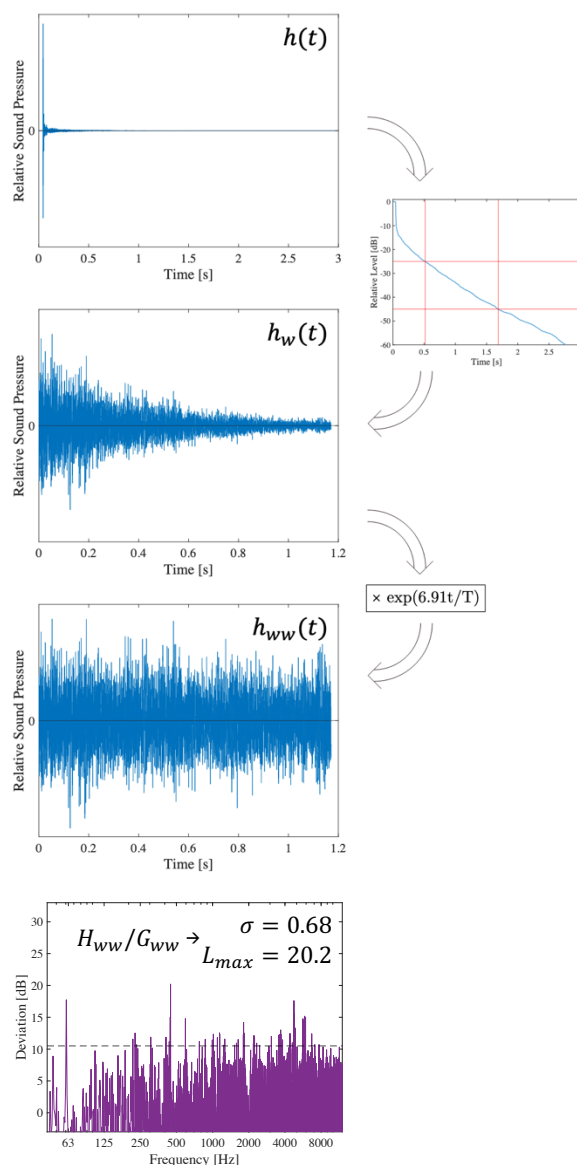


図 7 カラーレーション指標の算出手順

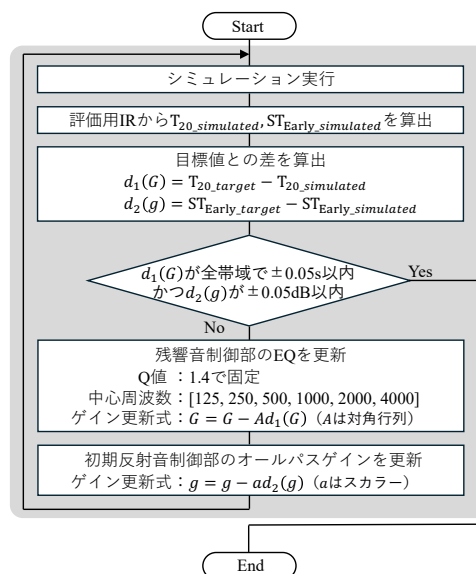


図 8 室内音響指標に基づく EQ 調整

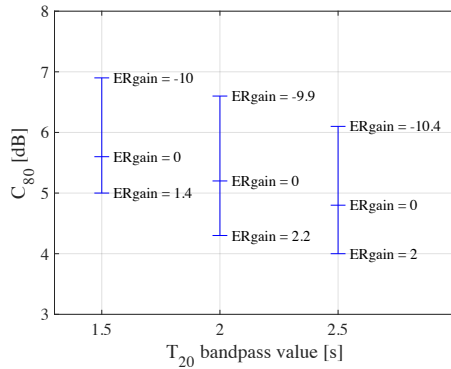


図 11 C_{80} の調整可能範囲

6. GUI アプリケーションの作成

MATLAB に搭載されている GUI 開発機能である App Designer を用いて、AFC の調整および音場評価を行うためのアプリケーションを作成した(図 12)。シミュレーションモデルと調整アルゴリズムを分離した構成とし、今後の拡張が容易であるという特徴を有している。

7. まとめ

本論文では、AFC 調整が技術者の経験に依存してきたという課題に対し、モデルベース制御に基づく定量的な調整手法の実現を目指した。AFC のシミュレーションモデルを構築し、ハウリング・カラーレーション対策および室内音響指標に基づく EQ 調整手法を検討した結果、生成音場を複数の指標に基づき調整可能であることを示した。さらに、実利用空間に適用し、モデルの再現性と調整可能範囲を確認した。また、調整と評価を支援する GUI アプリケーションを作成し、実用的な調整支援環境を提示した。

8. 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, Vol.76, No.9, pp.511–517, 2020.
- [2] M. Ohsmann, Analyse von Mehrkanalagen, Acustica, Vol.70, pp.233–246, 1990.
- [3] X. Meynial and O. Vuichard, Objective Measure of Sound Colouration in Rooms, Acustica, Vol.85, No.1, pp.101–107, 1999.

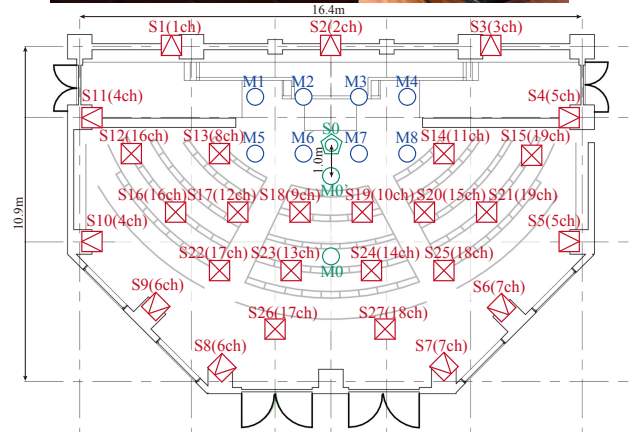


図 9 扇形講義室の機器配置

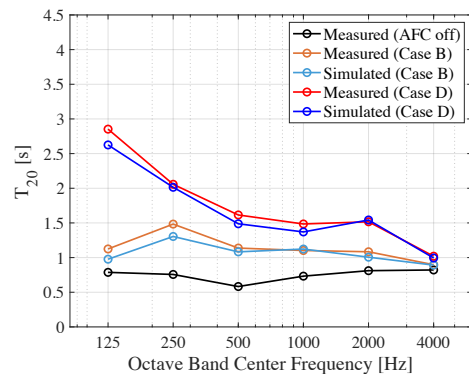


図 10 T_{20} の比較

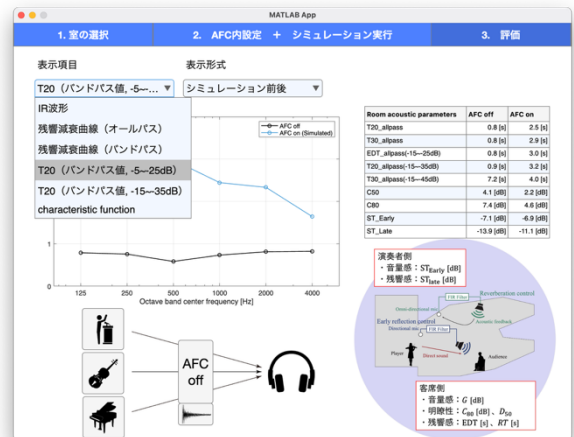


図 12 アプリケーションの GUI