

2-7-14

低周波領域における室内音場伝達関数のARMAモデルについて*

◎羽田 陽一 牧野 昭二 小泉 宣夫
(NTT ヒューマンインタフェース研究所)

1. まえがき

音響エコーキャンセラでは、エコーが生じる室内音場の伝達特性を効率よくモデル化することが重要である。従来から用いられているFIRフィルタ(MAモデルに対応)は、残響時間の長い室内を対象とする場合、フィルタ長(次数)が長くなるという欠点を持つ。一方、室内音場の伝達特性が極と零から記述できるという観点に立てば、伝達特性をARMAモデルで表すことによりフィルタの次数削減が期待できる¹⁾。これまでも室内音場をARMAモデルでモデル化することを試みた報告²⁾³⁾がいくつかあるが、次数の削減につながるような肯定的な結果は得られていない。今回、筆者らは室内音場のモード密度が低周波領域で低いことに着目し、低周波領域における伝達特性をARMAモデルでモデル化することを試みた。

2. 室内音場の極零モデル

室内音場の2点間の伝達特性は、周波数領域では、

$$H(\omega) = \frac{(\omega - Z_1)(\omega - Z_2) \cdots (\omega - Z_q)}{(\omega - P_1)(\omega - P_2) \cdots (\omega - P_p)} \quad (1)$$

で与えられる。ここで、Pは極の、Zは零の周波数、pとqは極と零の個数である。(1)式をz変換を用いて離散化すると、ARMAモデル、

$$Y(k) = \sum_{n=1}^p a_n Y(k-n) + \sum_{n=0}^q b_n X(k-n) \quad (2)$$

となる。a_n、b_nはそれぞれARとMAの係数、kは離散化された時刻である。

極の数pは部屋の共振周波数の総数と等しいとすると、周波数f(Hz)、部屋の容積V₀(m³)、音速c(m/s)を用いて、

$$p \approx \frac{4}{3} \pi \frac{V_0}{c^3} f^3 \quad (3)$$

で与えられる⁴⁾。また、零も極とほぼ同数存在していると考えられる¹⁾。

3. インパルス応答の測定

容積87m³の直方体残響可変室にスピーカとマイクロホンを設置し(図1)、残響時間と上限周波数をパラメータとしてM系列信号を用いてインパルス応答を測定した。周波数帯域は、下限周波数を60Hzに固定し、上限周波数を100Hzから1kHzまで変化させた。サンプリング周波数は、各上限周波数の2.5倍とした。残響時間として、0.3、0.36、0.55、1.6、2.4秒(500Hz)の5種類について測定を行った。図2に残響時間0.55秒、周波数帯域60~300Hzの場合のインパルス応答の一例を示す。

残響音場

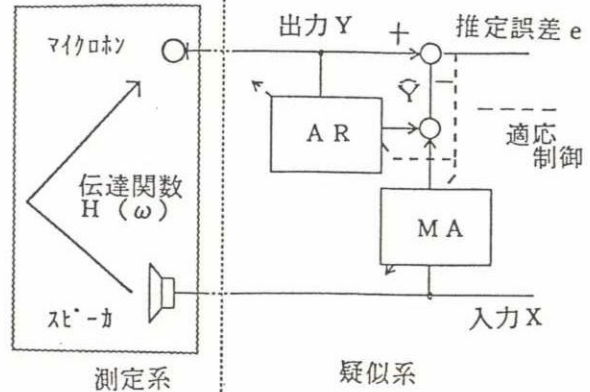


図1. 直並列ARMAモデルによる残響音場のモデル化

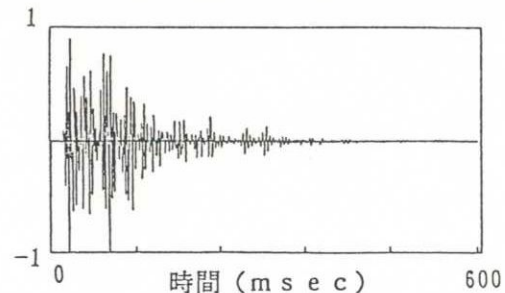


図2. 実測したインパルス応答(周波数帯域60~300Hz:サンプリング周波数750Hz)

* ARMA modeling for a room acoustic transfer function at low frequency bands by Yoichi Haneda, Shoji Makino, Nobuo Koizumi. (NTT Human Interface Laboratories)

4. ARMAモデル化

測定したインパルス応答に対し、図1に示す直並列形のARMAモデルでモデル化を行った。

係数の推定には再帰最小自乗(RLS)アルゴリズム⁵⁾を用い、実測したインパルス応答からの出力 Y と、モデルにより推定した伝達特性からの出力 \hat{Y} との差(推定誤差 e)が -40 dBとなるようにしてARMAモデルの次数($p+q$)を求めた。

図3にインパルス応答が 40 dB減衰するタップ数(以下これを残響タップ数と呼ぶ。これに各帯域のサンプリング周期を掛ければ、帯域の残響時間の $2/3$ になる。)に対して、各帯域でモデル化したARMAモデルの次数を示す。FIRの次数(破線)は残響時間に比例して多くなるのに対し、ARMAモデルの次数は残響時間の増加に対し、低周波ほどFIRより小さな傾きで増加している。従って、低周波領域で残響時間が長いほど次数の削減に有効である。例えば、図から上限周波数 200 Hzの低周波領域のインパルス応答では、残響タップ数が 600 タップ(帯域の残響時間 1.8 秒)の場合、FIRフィルタによるモデル化では 600 次必要であるのに対し、ARMAモデルでは約 240 次でモデル化ができることが分かる。

図4に残響時間 0.55 秒の部屋で測定した各上限周波数でのFIRとARMAモデルの次数を示す。ここで、破線は(3)式で示した極の総数による予測値である。ARMAモデルの次数はFIRの次数より少く、低周波ほど次数の削減に有利で、 100 Hzでは約半分の次数でよい。しかし、図中破線が周波数の 3 乗に比例して増大するのに対し、実測したインパルス応答より求めた次数は増大の傾きが異なっている。この理由については今後検討していく予定である。

5. あとがき

室内音場のモード密度が低周波領域で低いことに着目し、室内の伝達特性をARMAモデルでモデル化した。ARMAモデルの次数と周波数および残響時間との関係を実際の室内音場で実験することにより、低周波領域で残響時間が長い場合のARMAモデルの次数削減を確かめた。筆者らがARMAモデル化を行った残響可変室(87 m³)の例では、 200 Hz付近の低周波領域で、ARMAモデルにより、フィル

タ次数をFIRに比べ約 40% に削減することができる。一般の室内においても同様な効果が期待できると考えられ、低周波領域の騒音能動制御や周波数帯域分割型エコーキャンセラの低域部に使用可能と考えられる。

参考文献

- (1) N. Koizumi, R. H. Lyon: J. A. S. A. vol. 86, Suppl. 1, S3 (1989)
- (2) O. Muron, J. Sikorav: ICASSP'86 p. 921 (1986)
- (3) G. Long, D. Shwed, D. D. Falconer: IEEE CAS-34, p. 765 (1987)
- (4) R. Lyon, "Machinery Noise and Diagnostics": Butterworth (1987)
- (5) L. Ljung, T. Soderstrom: "Theory and Practice of Recursive Identification" (MIT Press 1987)

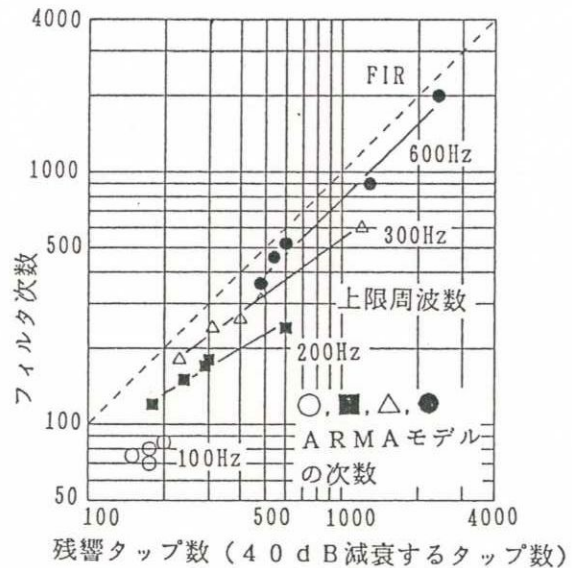


図3. インパルス応答の残響タップ数とフィルタ次数

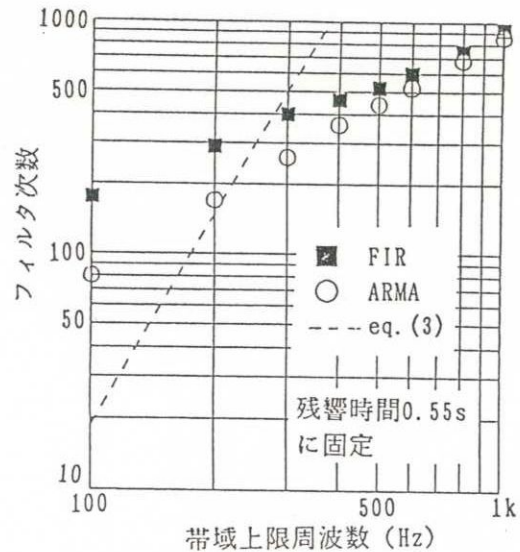


図4. 周波数帯域とフィルタ次数