

室内音場伝達関数の共通極・零モデル化

Common Acoustical Pole and Zero Modeling of Room Transfer Functions

羽田 陽一*

Yoichi HANEDA

牧野 昭二*

Shoji MAKINO

金田 豊*

Yutaka KANEDA

あらまし

室内音場の共振系に対応した共通極を用いた室内音場伝達関数の新しいモデルである共通極・零モデルを紹介する。共通極は音源・受音点配置の異なる複数の室内音場伝達関数[†]から共通AR係数として推定する。このモデルでは、複数の室内音場伝達関数を、推定した共通AR係数[†]とそれぞれの室内音場伝達関数ごとに異なる零点を用いて表現するため、従来の全零モデルや極零モデルに比べてパラメータ数を削減することができる。共通極・零モデルに基づいたエコーキャンセラのシミュレーションを行った結果、従来の全零モデルに比べて、800Hzまでの帯域で、適応フィルタの次数を約半分に、収束速度を約1.5倍に向上させることができ、提案したモデルの有効性を確認した。

Abstract

A new model (Common-Acoustical-Pole and Zero model : CAPZ model) for a room transfer function (RTF) uses common acoustical poles that correspond to resonance properties of a room. These poles are estimated as the common AR coefficients of many RTFs corresponding to different source and receiver positions. Using the estimated common AR coefficients, the proposed method models the RTFs with different MA coefficients. This new model requires far fewer variable parameters to represent RTFs than the conventional all-zero or pole/zero models. The acoustic echo canceller based on the proposed model requires only half the variable parameters and converges 1.5 times faster than one based on the all-zero model.

1 ま え が き

室内に置かれた音源と受音点間の音の伝達特性を表す室内音場伝達関数をモデル化することは、多くのアプリケーションにとって大変重要である。例えば、音響エコーキャンセラでは擬似エコーを生成するために、また、音場シミュレータでは、室内の音場を再現するためにモデル化された室内音場伝達関数が

必要である。これらのアプリケーションにおいては、室内音場伝達関数を少ないパラメータで効率良くモデル化することが要求される。なぜなら、音響エコーキャンセラでは、少ないパラメータで室内音場伝達関数を表現できれば、パラメータ数に依存する適応フィルタの収束速度を向上させることができるからである。さらに、異なる音源や受音点の位置における多数の室内音場伝達関数を保存しておく必要のある音場シミュレータで

*NTTヒューマンインタフェース研究所 NTT Human Interface Laboratories

[†]論文中のゴシック文字は、本論文に解説があります。

©日本電信電話株式会社 1995

は、メモリスペースの削減が可能となるからである。

代表的な室内音場伝達関数のモデルとしては、全零モデル[†](MA (Moving-average) モデル)、および極零モデル[†](ARMA (Auto-regressive moving-average) モデル)が知られている。しかし、両モデルとも、音源や受音点の配置が変わる等により室内音場伝達関数が変化した場合には、すべての係数を変化させる必要がある。これは音響エコーキャンセラでは、収束速度が遅くなる原因となり、音場シミュレータでは、多くのメモリを必要とする要因となる。

この問題を解決する方法として、著者らは、音源・受音点が移動したときの室内音場伝達関数の変化に対し、変化しない極と変化する零点とで室内音場伝達関数を表現する『共通極・零モデル (Common-Acoustical-Pole and Zero model; CAPZ model)』をすでに提案した^{(1)~(3)}。この共通極・零モデルは、共通極として室内の物理的な極を推定して用いる。物理的な極は、室内の共振系に対応し、室内の形状や吸音率に依存するが、音源や受音点の移動には依存せず変化しない量である⁽⁴⁾。このような量を用いることにより、提案しているモデルは、室内音場伝達関数の変化を表現するのに従来のモデルに比べて少ないパラメータで表現可能となる。その結果、適応フィルタの収束速度の向上、および多くの室内音場伝達関数の係数を蓄積するために必要なメモリスペースを削減することができる。

本論文では、まず、従来のモデルについて述べ、その後、提案した共通極・零モデルについて説明する。さらに、複数の伝達関数から共通極を推定するための手法を説明する。次に、共通極の推定結果について述べる。最後に、このモデルを音響エコーキャンセラに適用した場合の有効性を、実測したインパルス応答を用いた計算機シミュレーションにより示す。

2 室内音場伝達関数の従来のモデル

今、図1のように、音源信号を $X(z)$ 、室内音場伝達関数を $H(z)$ としたとき、受音点での信号 $Y(z)$ は、

$$Y(z) = H(z)X(z) \quad (1)$$

となる。室内音場伝達関数 $H(z)$ は室内での直接音やすべての反射音の特性を含んでいる。

次に、図2に示すような複数の室内音場伝達関数をモデル化することを考える。ここで、 r_j は音源・受音点配置を表し、 $Y(r_j, z)$ は r_j の位置の受音点におけるそれぞれの受信信号である。音源・受音点配置 r_j が異なると直接音、反射音の到達時間や振幅が異なるので、 $H(r_j, z)$ は互いに異なる。

これらの室内音場伝達関数 $H(r_j, z)$ は零点やMA係数を用いる全零モデルでは以下のようにモデル化される。

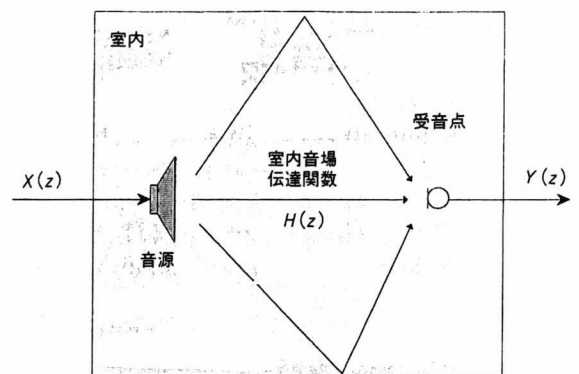


図1 室内音場伝達関数

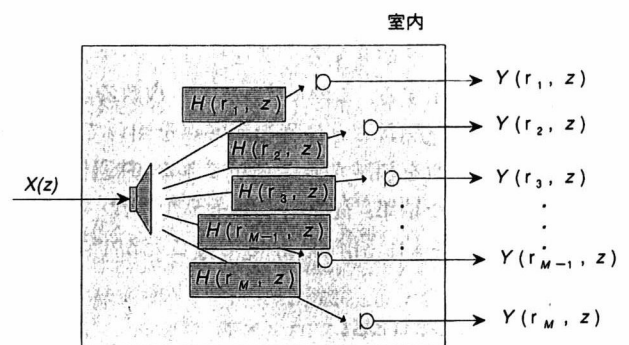


図2 複数の室内音場伝達関数

$$\hat{H}(r_j, z) = C z^{-Q_1} \prod_{i=1}^{Q_2} (1 - q_i(r_j) z^{-1}) = \sum_{i=0}^Q b_i(r_j) z^{-i} \quad (2)$$

$\hat{H}(r_j, z)$: 各 r_j に対して全零(MA)モデル化された伝達関数

r_j : 音源・受音点位置, $j = 1, 2, \dots, M$

M : 伝達関数の数

C : 定数

Q, Q_1, Q_2 : 零点の次数 ($Q = Q_1 + Q_2$)

$q_i(r_j)$: 各 r_j に対する零点

$b_i(r_j)$: 各 r_j に対するMA係数

一方、極零モデルでは、室内音場伝達関数は以下のようにモデル化される。

$$\hat{H}(r_j, z) = \frac{C z^{-Q_1} \prod_{i=1}^{Q_2} (1 - q_i(r_j) z^{-1})}{\prod_{i=1}^P (1 - p_i(r_j) z^{-1})} = \frac{\sum_{i=0}^Q b_i(r_j) z^{-i}}{1 + \sum_{i=1}^P a_i(r_j) z^{-i}} \quad (3)$$

$\hat{H}(r_j, z)$: 各 r_j に対して極零(ARMA)モデル化された伝

達関数

Q, Q_1, Q_2 : 零点の次数 ($Q = Q_1 + Q_2$)

P : 極の次数

$p_i(r_j)$: 各 r_j に対する極

$a_i(r_j)$: 各 r_j に対するAR係数

このように、従来の全零モデルや極零モデルでは、すべてのパラメータが音源・受音点配置 r_j に依存しているため、複数の室内音場伝達関数を表そうとした場合に、多くの異なる係数値が必要となる。

3 提案するモデル

3.1 共通極・零モデル

提案したモデルは、室内に置かれた音源と受音点の間の室内音場伝達関数の固有周波数(共振周波数)と減衰定数(Q値)は音源と受音点の配置には依存しない⁽⁴⁾という性質に基づいている。すなわち、室内の物理的な極はすべての室内音場伝達関数に共通であると言える。この点を考慮し、以下に共通極・零モデルを提案する。このモデルは、通常の極零モデルやARMAモデルと同様に、以下のように表現できる。

$$\hat{H}(r_j, z) = \frac{C z^{-Q} \prod_{i=1}^Q (1 - q_i(r_j) z^{-1})}{\prod_{i=1}^P (1 - p_i z^{-1})} = \frac{\sum_{i=0}^Q b_i(r_j) z^{-i}}{1 + \sum_{i=1}^P a_i z^{-i}} \quad (4)$$

$\hat{H}(r_j, z)$: 各 r_j に対して共通極・零モデル化された伝達関数

p_i : 共通極

a_i : 共通AR係数

(4)式と(3)式の違いは、極が音源・受音点配置 r_j に依存しているかどうかである。

前章で説明したように、従来の極零モデルでは、極も零点も伝達関数ごとにそれぞれ表現しなければならない。しかし、提案するモデルでは、極については、複数の伝達関数に共通な量を用いて表現すればよいので、複数の伝達関数を効率よく表現することができる。

3.2 最小2乗法による共通極の推定

室内のすべての伝達関数は、共通極を共通に持っている。しかし、すべての共通極が1つの室内音場伝達関数から観測できるとは限らない。なぜならば、音源と受音点配置に依存する零点が極に強く影響し、幾つかの極を相殺することさえあるからである⁽⁵⁾。したがって、共通極を推定するためには、配置によって異なる零点の影響を取り除くために、音源・受音点配置の異なる複数の伝達関数から推定しなければならない。

なる複数の伝達関数から推定しなければならない。

共通極は、(4)式で示したように共通極と等価である共通AR係数として推定する。(4)式より、共通極・零モデルのインパルス応答は以下のように表すことができる。

$$\hat{h}(r_j, k) = - \sum_{i=1}^P a_i \hat{h}(r_j, k-i) + \sum_{i=0}^Q b_i(r_j) \delta(k-i) \quad (5)$$

$\hat{h}(r_j, k)$: 各 r_j に対して共通極・零モデル化された伝達関数のインパルス応答

a_i : 推定される共通AR係数

$b_i(r_j)$: 各 r_j に対して推定されるMA係数

k : 離散化された時刻

$$\delta(k) = \begin{cases} 1, & k=0 \\ 0, & k \neq 0 \end{cases}$$

ここで、真のインパルス応答とモデルのインパルス応答との間の誤差(式誤差⁽⁶⁾)を、以下のように定義する。

$$\varepsilon_{eq}(r_j, k) = h(r_j, k) + \sum_{i=1}^P a_i h(r_j, k-i) - \sum_{i=0}^Q b_i(r_j) \delta(k-i) \quad (6)$$

共通AR係数 a_i は、次に示すコスト関数を最小にする係数として推定される。

$$J_{eq} = \sum_{j=1}^M \sum_{k=0}^{\infty} \varepsilon_{eq}^2(r_j, k) \quad (7)$$

ここで、 M は推定に使用するインパルス応答の個数である。今、各インパルス応答の長さを N 、すなわち、 $h(r_j, k) = 0$ ($k > N$) とすると、 $\varepsilon_{eq}(r_j, k) = 0$ ($k > N + P$) となる。したがって、(7)式の2番目の和は $k = N + P$ まででよい。

コスト関数を最小にする a_i と $b_i(r_j)$ は、 a_i と $b_i(r_j)$ による偏微分方程式を同時に0とする値として求めることができる。

$$\frac{\partial J_{eq}}{\partial a_i} = 0, \quad \frac{\partial J_{eq}}{\partial b_i(r_j)} = 0 \quad (8)$$

また、最小2乗解は、行列式表現を用いても解くことができる⁽⁷⁾。

4 提案手法による共通極の推定

推定方法の評価のために、推定した共通極と理論的に求めた音場の極を比較した。複素平面上における理論的な音場の極の位置は、立方体室においては計算可能であるので⁽⁸⁾、以下では立方体室 ($6.7 \times 4.3 \times 3.0 = 86 \text{ m}^3$) を仮定して、鏡像法⁽⁹⁾を用いて作成した室内音場伝達関数のインパルス応答に対して共通極の推定を行い、理論値と比較した。

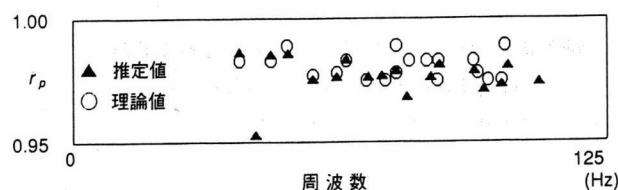


図3 推定した共通極と理論値の比較

図3に音源・受音点配置が異なる20個のインパルス応答から推定した共通極を理論値と比較した結果を示す。図の縦軸の r_p は複素数である極の絶対値を示している。図中の▲は推定された極、○は理論値から求めた極である。図から、提案する推定手法では、物理的な極に対応した共通極を精度よく推定していることが分かる。

5 提案するモデルの有効性の評価

説明してきた共通極・零モデルを音響エコーキャンセラに応用することでその有効性を評価する。音響エコーキャンセラは、テレビ会議システムや騒音能動制御などにおいて、音響的なフィードバックを抑圧し、エコーを消去するために用いられる。

図4に、共通極・零モデルに基づいた音響エコーキャンセラのブロック図を示す。直並列型のIIRフィルタ構成であり、推定された共通AR係数を持つ固定フィルタと、音場の変化に対し追従するMA係数(適応フィルタ)から成る。このエコーキャンセラでは、まず最初に、複数の異なるマイクロホン位置のインパルス応答を、図右側の破線で示した経路を用いて測定する。次に、測定した複数のインパルス応答を用いて共通AR係数を推定し、これを固定フィルタにコピーする。

図4に示した共通極・零モデルに基づく音響エコーキャンセラについて、計算機シミュレーションを行った。シミュレーション

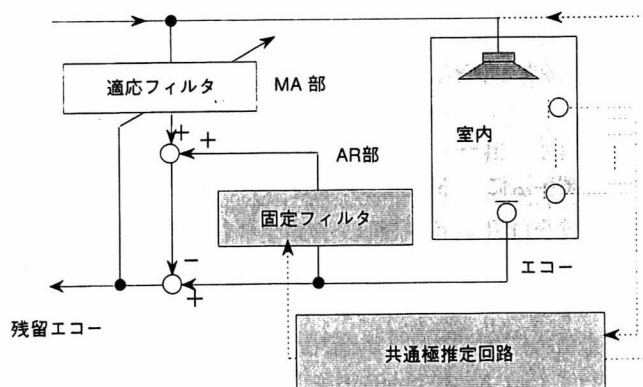


図4 共通極・零モデルに基づくエコーキャンセラのブロック図

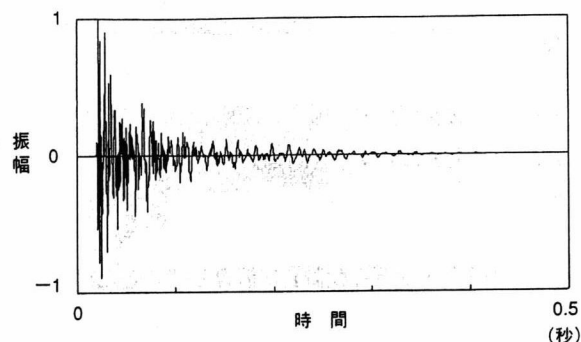


図5 シミュレーションに用いたインパルス応答

ョンには、実際の室内で測定したスピーカ・マイクロホン配置の異なる複数のインパルス応答を用いた。室容積は80m³、残響時間は約0.6秒であった。

提案している共通極・零モデルは特に低い周波数領域で有効なので、インパルス応答の周波数領域は60~800Hzとした。サンプリング周波数は2kHzとした。図5は、測定したインパルス応答の一例である。

共通AR係数である固定フィルタの次数は250、適応フィルタであるMA係数の次数は450とした。これらの次数は、定常エコー消去量(ERLE)が35dBを超えるように決定した。ここで、ERLEは次式で定義される。

$$\text{ERLE} = 10 \log_{10} \left(\frac{\text{エコーパワー}}{\text{残留エコーパワー}} \right) \quad (\text{dB}) \quad (9)$$

音響エコーキャンセラの評価シミュレーションには、共通AR係数の推定に用いていないインパルス応答を用いた。提案する共通極・零モデルに基づくエコーキャンセラを、図6に示す従来のMAモデルに基づくエコーキャンセラと、エコー消去の収束特性と比較した。従来の音響エコーキャンセラは、適応フィルタしか持っていないため、35dBの定常消去量を実現するためには、800次が必要であった。一方、提案するエコーキャン

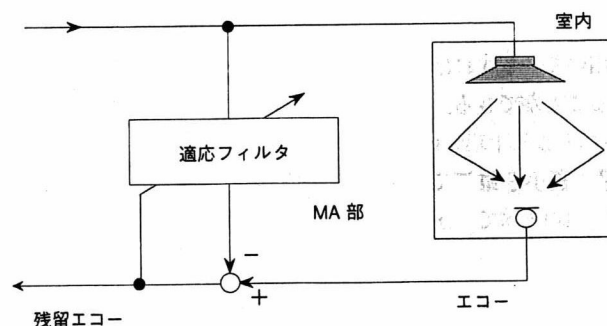


図6 従来のMAモデルに基づくエコーキャンセラのブロック図

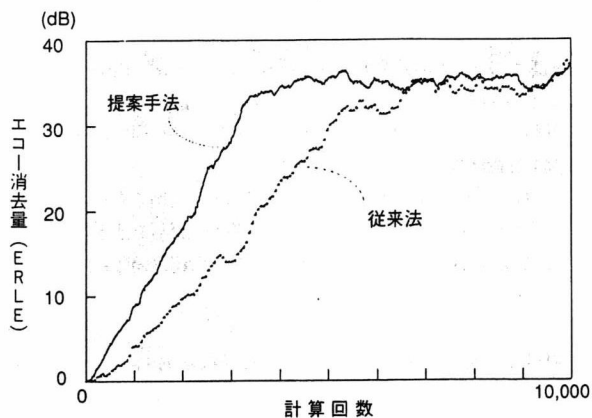


図7 収束速度の比較結果

セラは、共通AR係数を固定フィルタとして用いるため、適応フィルタの次数が少なく済み、この例では、提案するエコーキャンセラは、従来のエコーキャンセラの約半分の適応フィルタ次数しか必要としない。図7は、2つのエコーキャンセラの収束特性を示した図である。適応フィルタであるMA係数は、学習同定法⁽¹⁰⁾を用いて逐次推定した。適応フィルタは、パラメータの数が少ないほど収束速度が速いため、提案するエコーキャンセラは、従来のMAモデルに基づくエコーキャンセラよりも約1.5倍収束が速くなっている。

このように、提案している共通極・零モデルは、室内音場伝達関数に変化する場合にパラメータ数を削減でき、適応フィルタの収束を速くすることができる。これらの結果から提案するモデルの有効性が確認できた。

6 あとがき

音源や受音点配置の移動等による室内音場伝達関数の変化に対して不変な量である共通極を用いた共通極・零モデルを紹介した。さらに、共通極を共通AR係数として最小2乗法を用いて推定する方法を説明した。この手法を用いて共通極を推定した結果は、理論的な極とよく一致した。

また、共通極・零モデルを用いて室内音場伝達関数をモデル化すると、従来のモデルよりも室内音場伝達関数の変化に依存したパラメータ削減することができる。この有効性を、エコーキャンセラのシミュレーションによって説明した。共通極・零モデルに基づくエコーキャンセラは、800Hz以下の帯域で、従来のMAモデルに基づくエコーキャンセラの約半分の適応フィルタ次数しか必要とせず、収束速度を約1.5倍速くする結果を得た。

文 献

- (1) Y. Haneda, S. Makino and Y. Kaneda: Modeling a room transfer function using common acoustical poles, in Proc. ICASSP92, 2, pp.289-292, Mar., 1992.
- (2) Y. Haneda, S. Makino and Y. Kaneda: Common acoustical pole and zero modeling of room transfer functions, IEEE Trans SP, 2, No.2, pp.320-328, 1994.
- (3) 羽田・牧野・金田: 室内音場伝達関数の共通極・零モデル化, 信学技報, EA93-101, pp.19-29, Mar., 1994.
- (4) 例えば, H. Kuttruf: Room Acoustics, London: Elsevier Applied Science, 1991.
- (5) R.H. Lyon: Machinery Noise and Diagnostics, Stoneham, MA: Butterworth, 1987.
- (6) L. Ljung and T. Söderström: Theory and Practice of Recursive Identification, Cambridge, MA: M.I.T. Press, 1983.
- (7) 羽田・牧野・金田: 複数の室内音場伝達関数に共通な極の最小2乗推定について, 信学'93春大, 分冊1, pp.489-490, Mar., 1993.
- (8) M. Tohyama and S. Yoshikawa: Approximate formula of the averaged sound energy decay curve in a rectangular reverberant room, J. Acoust. Soc. Am., 70, pp.1674-1678, 1981.
- (9) J.B. Allen and D.A. Berkly: Image method for efficiently simulating small-room acoustics, J. Acoust. Soc. Am., 65, pp.943-950, 1979.
- (10) 野田・南雲: システムの学習的同定法, 計測と制御, 7, No.9, pp.597-605, 1968.



羽田 陽一

ヒューマンインタフェース研究所音声情報研究部
研究主任
平成元年入社。主に音響エコーキャンセラの研究開発・実用化に従事。
昭和62年東北大学理学部物理学科卒業。平成元年同大学院物理学専攻修士課程修了。
電子情報通信学会・音響学会・IEEE会員。



牧野 昭二

ヒューマンインタフェース研究所主幹研究員
昭和56年入社。電気音響変換器、拡声電話機、および音響エコーキャンセラなどの音響信号処理の研究に従事。
昭和54年東北大学工学部機械工学第二学科卒業。56年同大学院機械工学修士課程修了。平成3年工学博士(東北大学)。
IEEE・電子情報通信学会・日本音響学会会員。



金田 豊

ヒューマンインタフェース研究所主幹研究員
昭和52年入社。主に雑音抑圧マイクロホンアレーの研究に従事。現在、音響信号処理の研究に従事。
昭和50年名古屋大学工学部電気学科卒業。52年同大学院工学研究科修士課程修了。平成2年工学博士(名古屋大学)。
日本音響学会・電子情報通信学会・米国音響学会・IEEE会員。
平成元、3年日本音響学会論文賞受賞。平成元年IEEE ASSP誌論文賞受賞。

■用語解説■

室内音場伝達関数

室内音場伝達関数は、音源(スピーカ)と受音点(マイクロホン)の間の音の伝わりの様子を表す関数であり、室内音響伝達特性などとも呼ばれる。時間領域でみれば、音源にパルスを入力したときに受音点で観測される波形(インパルス応答)に等しい。また、周波数領域でみれば、周波数伝達特性や位相特性がどのように変化して伝わるかを表す。

共通AR係数

極を解として持つ方程式を展開したときの係数がAR係数である。これと同様の考えにより、共通極を解として持つ方程式を展開したときの係数が、共通AR係数となる。具体的に、共通極と共通AR係数は4式の分母の関係で結ばれている。

共通極

一般に室内のような閉空間には、その形状や大きさに依存した共振周波数が存在する。この共振周波数は、音源(スピーカ)と受音点(マイクロホン)との配置に依存せずに室内音場伝達関数に共通に含まれる。共通極はこの共振周波数に対応する。1つの室内音場伝達関数から共通極を抽出することはできないが、複数の室内音場伝達関数に共通なパラメータとして抽出することができる。

全零モデル

室内音場伝達関数などのシステムの応答関数 $H(z)$ を表現するためのモデルの1つである。応答関数の z にある値を代入したときに、その関数の値を0とする値($H(z)=0$ を満足する z)は零点と呼ばれるが、この零点のみを変数として応答関数を表現したものが、全零モデルである。具体的な式は本文2式参照。

極零モデル

室内音場伝達関数などのシステムの応答関数 $H(z)$ を表現するためのモデルの1つである。応答関数の z にある値を代入したときに、その関数の値を無限大とする値($H(z)=\infty$ を満足する z)は極と呼ばれる。この極と、零点を変数として応答関数を表現したものが、極零モデルである。具体的な式は本文3式参照。

鏡像法

室内に置かれた音源(スピーカ)と受音点(マイクロホン)の間の

室内音場伝達関数(インパルス応答)を計算機上でシミュレーションするための1方法である。室内の壁を鏡に見立て、そこに写しだされた虚像音源から放射された音が、実際の壁からの反射音に等しいという性質を利用している。

騒音能動制御

騒音を、その騒音と逆位相の音で打ち消す技術であり、最近注目されている技術である。音を用いて積極的に騒音を消すところから能動的な制御と呼ばれ、防音材などを用いた従来の騒音抑制技術とは区別されている。

IIRフィルタ

Infinite Impulse Response Filter. 無限インパルスレスポンスフィルタ。極零モデル(ARMAモデル)を、巡回型の差分方程式で表現したものをデジタルフィルタとして実現したものをIIRフィルタという。

定常エコー消去量

エコーキャンセラが、エコーをどれだけ消去したかを評価する量で、エコーに対する残留エコー(消し残されたエコー)のパワー比で定義される。通常、エコーキャンセラが十分学習した後の定常状態で定常消去量は計算される。