

●羽田 陽一 牧野 昭二 金田 豊
(NTTヒューマンインタフェース研究所)

1.はじめに

頭部伝達関数は、仮想音像定位などに広く用いられており、これを効率良くモデル化することは大変重要である。従来からある全零モデル (FIRフィルタ) や極零モデル (IIRフィルタ) では、音の到来方向が変化すると、頭部伝達関数の全てのパラメータも変化する。本研究では、頭部伝達関数の中から音の到来方向に依存しない共通な量を推定抽出し、図1のように、共通量と方向毎のパラメータ (方向に依存した量) を用いたモデルで表現することを試みた。

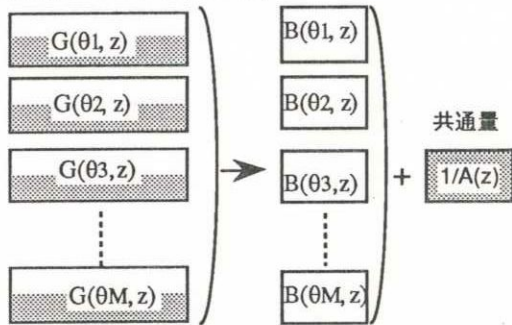


図1 頭部伝達関数の効率的なモデル

2.原理

頭部伝達関数は耳介と外耳道からなる共振系を含んでおり[1]、この共振系の極の数とその分布は音の到来方向には依存しないと考えられる。そこで、音響系の極を抽出しそれを複数の伝達関数に対し共通であるとしてモデル化する「共通極によるモデル化」の方法[2]を、音源から左耳または右耳までの頭部伝達関数に適用する。本報告では、水平面内の頭部伝達関数を対象として述べる。

水平面内の方向毎の頭部伝達関数 $G(\theta, z)$ (図2の $G_L(\theta, z)$ または $G_R(\theta, z)$) は角度に依存しない共通な極 $A(z)$ と角度に依存する零 $B(\theta, z)$ を用いて、

$$G(\theta, z) = \frac{B(\theta, z)}{A(z)} = \frac{\sum_{n=0}^Q b_n(\theta)z^{-n}}{1 + \sum_{n=1}^P a_n z^{-n}} = \frac{C \prod_{n=1}^Q (1 - q_n(\theta)z^{-1})}{\prod_{n=1}^P (1 - p_n z^{-1})} \quad (1)$$

と表現される。ここで、 θ は図2に示す音の到来

方向を表す角度であり、 a_n は共通極に対応する共通ARモデル係数、 $b_n(\theta)$ は角度に依存するMAモデル係数、 p_n は共通極、 $q_n(\theta)$ は角度に依存する零点、 P, Q はそれぞれ極と零の次数である。また、図2に示した音源からの距離 r は一定とする。

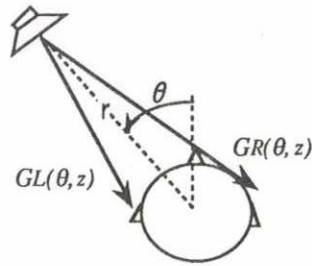


図2 音源位置と受聴者の関係

3.頭部伝達関数の測定

頭部伝達関数のインパルス応答の測定は、無響室においてダミーヘッド (B&K:TYPE4128) を用いて15度おきに行なった。周波数帯域は100Hz~20kHzで、サンプリング周波数は48kHzである。図3に0度から330度までの30度おきの左耳の頭部伝達関数の測定結果 (周波数特性) を示す。3kHz, 9kHz, 13kHz付近などに共通なピークが確認でき、これらを共通極として抜き出せると考えられる。

角度 θ_i (°) (図2参照)

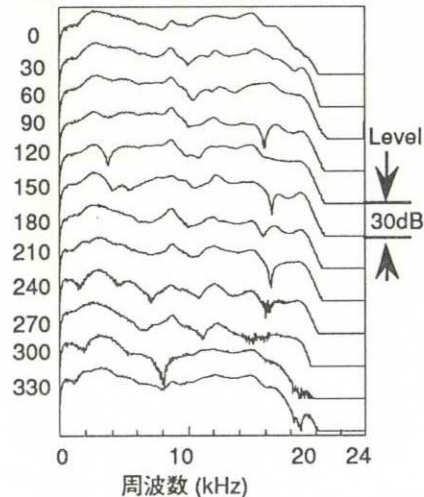


図3 頭部伝達関数の周波数特性の測定例 (左耳)

*Common Poles independent of Sound Directions and Modeling of a Head Related Transfer Function.
By Yoichi Haneda, Shoji Makino, Yutaka Kaneda. (NTT Human Interface Laboratories)

4. 共通極の抽出

共通極 p_n は共通ARモデル係数 a_n として求めた。各方向 θ_i ($i=1,2,\dots,M$)のインパルス応答の実測値 $g(\theta_i, k)$ を共通ARモデル係数 a_n と方向毎のMAモデル係数 $b_n(\theta_i)$ を用いてモデル化し、各方向の式誤差[3]

$$\varepsilon_{eq}(\theta_i, k) = g(\theta_i, k) - \sum_{n=1}^P a_n g(\theta_i, k-n) - \sum_{n=0}^Q b_n(\theta_i) \delta(k-n)$$

$$(但し、\delta(k) = 1 (k=0), \delta(k) = 0 (k \neq 0)) \quad (2)$$

の2乗値の総和 I

$$I = \sum_{i=1}^M \sum_{k=0}^{\infty} (\varepsilon_{eq}(\theta_i, k))^2 \quad (3)$$

を最小化することで共通ARモデル係数の推定を行なった。

ARMAモデル次数の決定は、インパルス応答の実測値 $g(\theta_i, k)$ と、インパルス応答の実測値 $g(\theta_i, k)$ とモデルのインパルス応答 $y(\theta_i, k)$ との出力誤差 $\varepsilon_{out}(\theta_i, k)$

$$\varepsilon_{out}(\theta_i, k) = g(\theta_i, k) - y(\theta_i, k) \quad (4)$$

のエネルギー比で定義したモデル化誤差

$$E(\theta_i) = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{k=0}^N (g(\theta_i, k))^2}{\sum_{k=0}^N (\varepsilon_{out}(\theta_i, k))^2} \right) \quad (5)$$

が25dBを越える最小の次数の組み合わせで決定した。但し、モデルのインパルス応答 $y(\theta_i, k)$ は、

$$y(\theta_i, k) = \sum_{n=1}^P a_n y(\theta_i, k-n) - \sum_{n=0}^Q b_n(\theta_i) \delta(k-n) \quad (6)$$

と表される。最終的に用いた次数は、AR20次、MA40次である。

図4に θ_i が0度から330度までの30度間隔の12個の左耳の頭部伝達関数から求めた共通ARモデル係数のみで表されるインパルス応答の周波数特性を示す。方向に依存しない頭部伝達関数の共振系のピークが抽出されているのが分かる。

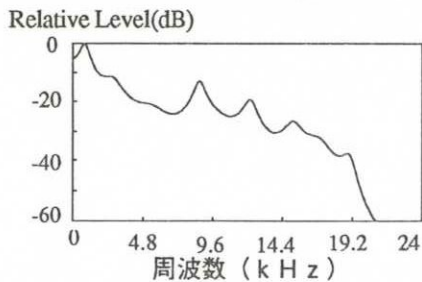


図4 共通ARモデル係数によって得られる周波数特性

5. 評価

抽出した極が共通量であることと、これを用い

た頭部伝達関数のモデル化が有効であることを示すため、共通ARモデル係数を用いた本モデル (AR20次+MA40次) と、合計次数の同じ全零モデル (MA60次) とのモデル化誤差を比較した。評価には、先に求めた共通AR係数の推定に用いていない他の角度のインパルス応答 (15、45、75、285、315、345度) を用いた。

図5に(5)式に基づくモデル化誤差 $E(\theta_i)$ を比較した結果を示す。ほぼ全ての角度において、共通ARモデル係数を用いたモデル化誤差が全零モデルと同等かそれ以上である。従って、音の到来方向の異なる頭部伝達関数の中から共通量を共通ARモデル係数として抽出できること、及び共通極を用いたモデル化は有効であることが分かる。図6に角度15度に於けるインパルス応答の実測波形と共通ARモデル係数を用いた本モデルのインパルス応答を示す。両者はモデル化誤差27dBで一致している。

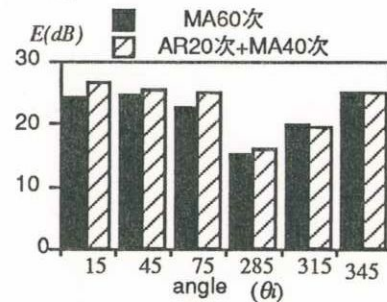


図5 全零モデルと共通極を用いたモデルの比較

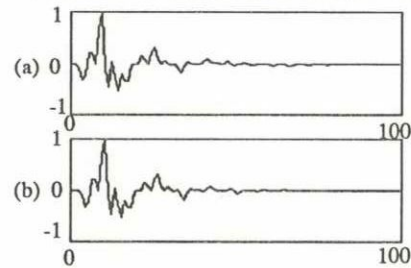


図6 頭部伝達関数の(a)実測したインパルス応答と (b)共通極を用いた本モデルのインパルス応答

6. おわりに

音の到来方向の異なる複数の頭部伝達関数から、共通量を極 (共通極) として抽出した。抽出された共通極は外耳道等の共振系に対応すると考えられる。これを用いて頭部伝達関数を表現することにより、音の到来方向による頭部伝達関数の相異は極の影響が取り除かれた零点の変化として表現できる。

参考文献

- [1]ブラウエルト他: "空間音響" (鹿島出版会)
- [2]羽田他: 日音講論 1-7-12, p393 (1991.3)
- [3]中溝: "信号解析とシステム同定" (コロナ社)