

受聴者の耳介形状による 頭部伝達関数のスペクトラルピーク周波数の推定*

☆千勝智美, 石井要次 (千葉工大院・工学研), 飯田一博 (千葉工大・工)

1 はじめに

受聴者本人の頭部伝達関数(HRTF)を鼓膜上で再現することで任意の方向に音像を制御することができる[1]. しかし, HRTF の測定には多くの時間と無響室などの特別な設備が必要であり, 任意の受聴者に HRTF を提供することは現実的ではない.

耳介の写真などから受聴者の HRTF を推定することが考えられるが[2], 受聴者の HRTF の全ての情報を推定することは困難である. そこで, ヒトが方向知覚の手がかりとして利用している情報のみを推定することを考える. Iida *et al.* [3]は, 各受聴者の耳介寸法データから HRTF のスペクトラルノッチ(N1・N2)周波数を弁別閾内の精度で推定できることを示した.

本研究では各受聴者の耳介寸法データから HRTF のスペクトラルピーク(P1・P2)周波数の推定を行った.

2 分析に用いたデータ

2.1 耳介形状

P1・P2 は, 耳介の共鳴現象によって生じているという知見[4,5]に基づき, 日本人成人 54 耳の耳型から 10 種類の耳介形状(Fig. 1)をデジタルノギスで計測した. なお, 耳介の傾き(x_a)は被験者の横顔の写真から測定した.

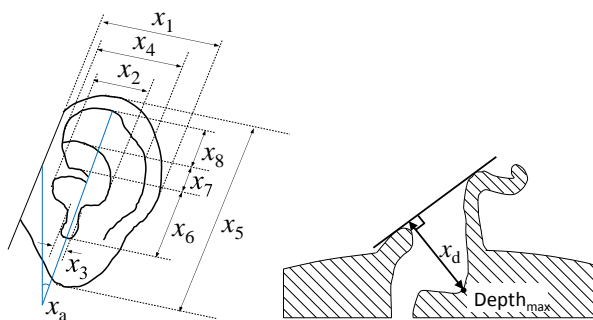


Fig. 1 Ten anthropometric parameters of pinna.

2.2 P1・P2 周波数

耳介形状データを求めた 54 耳の上半球正中面 7 方向(30° 間隔)の HRTF を無響室で測定した. 音源には Swept-sine wave(2¹⁸サンプル)を用いた. サンプル周波数は 48 kHz, スピーカから頭部中心位置までの距離は 1.2 m である. 被験者は耳栓型マイクロフォン[6]を装着して測定した. HRTF は以下の式により求めた.

$$HRTF_{l,r}(\omega) = G_{l,r}(\omega)/F(\omega) \quad (1)$$

ここで, $F(\omega)$ は無響室で測定した被験者がいない状態での音源から被験者の頭部中心位置に相当する位置までの伝達関数であり, $G_{l,r}(\omega)$ は無響室で測定した音源から被験者の外耳道入口までの伝達関数である.

HRTF の測定を行った 54 耳の P1・P2 を抽出した. 抽出には Iida *et al.* [3]が提案した方法を用いた. 頭部インパルス応答の初期応答部分(1 ms)を時間窓で切り出し, それをフーリエ変換する方法である.

54 耳の正面方向の P1 周波数は 3.5 – 4.3 kHz (0.31 oct.), P2 周波数は 6.9 – 10.7k Hz (0.62 oct.)の範囲に分布した.

3 耳介形状による P1・P2 周波数の推定

3.1 重回帰モデル

54 耳の正面方向の P1・P2 周波数を目的変数, 10 種類の耳介形状パラメータを説明変数として重回帰分析を行った(式(2)).

$$f(S)_{P1,P2} = \left. \begin{aligned} &a_1x_1 + a_2x_2 + \\ &\quad \dots + a_Nx_N + b \text{ [Hz]} \end{aligned} \right\} (2)$$

ここで, S は被験者, a_i は回帰係数, x_i は耳介形状データ, b は定数である.

3.2 重回帰モデルの精度

重回帰分析の結果, P1 および P2 の重相関係数は 0.68 および 0.83 であった. 平均絶対残差はそれぞれ 0.04 および 0.08 oct. であった.

しかし, 説明変数の p 値が 0.05 を超える耳介

* Estimation of spectral peak frequencies of listener's head-related transfer functions from anthropometry of the pinnae, by CHIKATSU, Tomomi, ISHII, Yohji and IIDA, Kazuhiro (Chiba Institute of Technology).

部位があった。これらの耳介部位が P1・P2 周波数に寄与しているとは考えにくい。そこで、総当たり法によって全ての説明変数の p 値が 0.05 未満かつ重相関係数が最大となる組み合わせを求めた。その結果、P1 については x_3, x_4, x_5, x_d , P2 については $x_2, x_3, x_5, x_6, x_8, x_d, x_a$ の耳介形状パラメータが選ばれた。重回帰モデルで推定した P1・P2 周波数と実測 HRTF から抽出した P1・P2 周波数の関係を Fig. 2 に示す。P1 および P2 の重相関係数は 0.66 および 0.82 であった。求めた重回帰モデルの統計量を Table 1 に示す。P1 および P2 周波数の平均絶対残差は、0.04 および 0.08 oct. であり、P1 および P2 周波数の個人差(0.32, 0.64 oct.)の凡そ 8 分の 1 となった。重回帰係数、p 値、95%信頼区間を Table 2 に示す。重回帰係数についてみると、P1 周波数において、 x_d の係数が最も大きい。P2 周波数においては、 x_6 および x_8 の係数が大きい。ここで、P1 は、 x_d

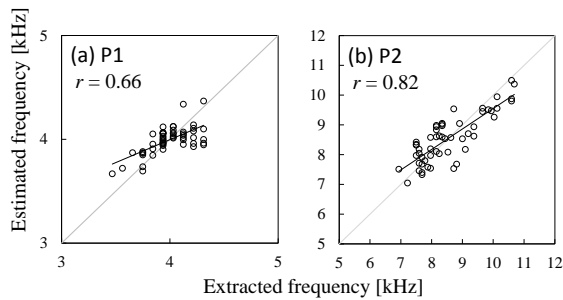


Fig. 2 Relation between extracted and estimated P1 and P2 frequencies.

Table 1 Statistics of the multiple regression models of P1 and P2 for the front direction.

	Correlation coefficient	Significance level	Absolute mean residual error [Hz]	[oct.]
P1	0.66	7.E-06	114	0.04
P2	0.82	3.E-09	470	0.08

Table 2 Multiple regression coefficients, p-values, and 95% confidence intervals of P1 and P2 for the front direction.

	Regression coefficient		P-value	95% confidence intervals			
	P1	P2		P1		P2	
a_1							
a_2		175.5	4.6E-03			57.0	294.0
a_3	-31.0	-145.8	2.2E-02	3.8E-02	-57.5	-4.6	-282.8
a_4	-21.5		1.2E-02		-38.0	-5.0	
a_5	-19.5	51.0	1.7E-04	4.0E-02	-29.1	-9.8	99.5
a_6		-296.3	1.1E-05			-417.4	-175.2
a_7							
a_8		-203.6	2.5E-05			-291.2	-116.1
a_d	-35.3	-159.1	7.9E-03	5.6E-03	-60.9	-9.7	-269.1
a_a		-42.5	2.8E-04			-64.3	-20.7
b	6627.4	16252.7	2.0E-20	9.9E-11	5762.8	7491.9	12322.6

の深さ方向の共鳴([4]), P2 は x_6, x_8 の共鳴によって生じることから[5], これらの係数が大きくなったと考えることができる。

多重共線性の有無を確認するために、P1 周波数の推定に用いた耳介部位(x_3, x_4, x_5, x_d)の間、P2 周波数の推定に用いた耳介部位($x_2, x_3, x_5, x_6, x_8, x_d, x_a$)の間で VIF(variance inflation factor)(式 3)を計算した。

$$VIF(j) = 1/(1 - R(j)^2) \quad (3)$$

ここで、 $R(j)^2$ は j 番目の説明変数を目的変数とし、他の説明変数を説明変数とした場合の重回帰分析における決定係数である。

その結果、すべての VIF の値は 10 未満であったため、説明変数間には多重共線性はないとみなせる[7]。

4 おわりに

本研究では、正面方向の P1・P2 周波数を目的変数、耳介の形状データを説明変数とした重回帰分析を行った。その結果、以下のことを示した。

1. 日本人成人 54 耳の正面方向の P1・P2 周波数を実測 HRTF から抽出した。個人差はそれぞれ 0.31 および 0.62 oct. であった。
2. 54 耳の正面方向の P1・P2 周波数を目的変数、P1 においては 4 箇所、P2 においては 7 箇所の耳介形状を説明変数として重回帰分析を行った。P1・P2 の重相関係数はそれぞれ 0.66 および 0.82 であった。また、P1・P2 の平均絶対残差は、それぞれ 0.04, 0.08 oct. であった。

参考文献

- [1] M. Morimoto and Y. Ando, J. Acoust. Soc. Jpn. (E), 1, 167-174, 1980.
- [2] R. Sottek and K. Genuit, Proc. DAGA, 1999.
- [3] K. Iida *et al.*, J. Acoust. Soc. Am, 136(1), 317-333, 2014.
- [4] E.A.G Shaw and R. Teranishi, J. Acoust. Soc. Am, 44, 240-249, 1968.
- [5] H. Takemoto *et al.*, J. Acoust. Soc. Am, 132, 3832-3841, 2012.
- [6] K. Iida *et al.*, J. Acoust. Soc. Am, 68, 835-850, 2007.
- [7] S. Chatterjee and A. S. Hadi, *Regression Analysis by Example*, Wiley, 2012.