

耳介形状による上半球正中面の 頭部伝達関数のノッチピーク周波数とレベルの推定

☆設樂祐月 (千葉工大・院), 飯田一博 (千葉工大・先進工)

1 はじめに

近年, 映像の VR は個人で手軽に体験できるようになった一方, 音の VR については高精度なシステムの実用化に至っていない。

本人の頭部伝達関数(HRTF:head-related transfer function)を外耳道入口に再現することで任意の方向に音像を知覚させることができる[1]。しかし, HRTF には顕著な個人差があり, 他人の HRTF を用いると頭内定位や前後誤判定, 音像の上昇などの問題が発生する[2]。

Iida *et al.*[3]は, ノッチとピーク(以降 N/P と記述)に着目したパラメトリック HRTF モデルを提案した(Fig.1)。第 1 第 2 ノッチ(N1,N2), 第 1 第 2 ピーク(P1,P2)の 4 つを再現することで被験者本人の実測 HRTF と同等の定位精度が得られることを報告した。

また, 正面方向(上昇角 0°)において, 耳介形状パラメータから重回帰モデルにより N1N2 周波数を推定する方法が提案されている[4]。しかし, 他の方向については推定方法は明らかではない。

本研究では, 上半球正中面 7 方向($0-180^\circ, 30^\circ$ 間隔)における N/P 周波数とレベルを耳介形状により推定した。

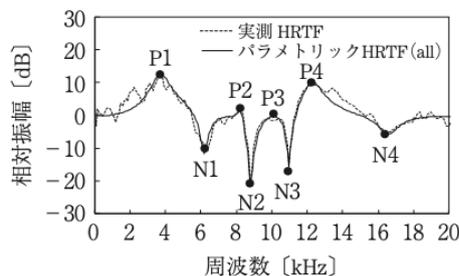


Fig. 1 Measured HRTF and parametric HRTF recomposed of all notches and peaks [3].

2 N/P 周波数の推定

2.1 推定方法

重回帰分析を用いて N/P 周波数を推定した。目的変数は, 無響室で測定した成人 118 耳の上半球正中面 7 方向($0-180^\circ, 30^\circ$ 間隔)の N/P 周波数である。説明変数は Algazi *et al.*[5]と同様, 10 種類の耳介形状パラメータとした (Fig.2)。

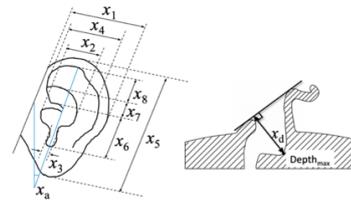


Fig. 2 Ten anthropometric parameters of the pinna [5].

2.2 トレーニング耳介の推定結果

説明変数の個数ごとに自由度調整済み重相関係数が最大となる組み合わせを求めた。さらに, 説明変数の個数を 1 つずつ増加させて自由度調整済み重相関係数の最大値が収束する値を求めた。

Fig. 3 に自由度調整済み重相関係数の収束値を示す。重相関係数は 7 方向において N1 で 0.60-0.81, N2 で 0.60-0.73, P1 で 0.52-0.60, P2 で 0.66-0.74 であった。また, N1P1 の周波数の重相関係数は天頂方向に比べて正面と後方で低く, N2 は正面方向の重相関係数が低いことが分かる。

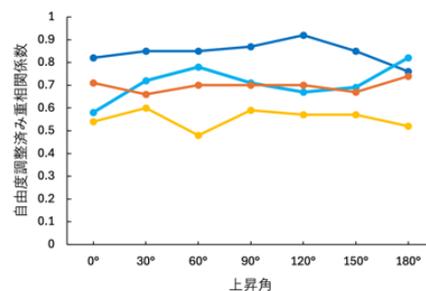


Fig. 3 Adjusted multiple correlation coefficient for N/P frequency

* Estimation of frequency and level of spectral notches and peaks of the head-related transfer functions in the upper median plane based on pinna shape, by SHIDARA, Yuzuki and IIDA, Kazuhiro (Chiba Institute of Technology).

N1N2 周波数の平均絶対残差を Table 1 に示す。N1 は 0.05-0.09oct., N2 は 0.05-0.09oct. であった。平均絶対残差が弁別閾(0.15 oct.)以下になる確率は N1 で 82.2-100%, N2 で 80.3-97.1%, であった。

Table 1 Mean absolute residual for N1 and N2 frequency estimation

	N1周波数			N2周波数		
	平均絶対残差		絶対残差がJND以下になる確率[%]	平均絶対残差		絶対残差がJND以下になる確率[%]
	[Hz]	[oct.]		[Hz]	[oct.]	
0°	433.4	0.09	82.2	639.7	0.09	80.3
30°	394.8	0.07	91.6	541.6	0.07	90.6
60°	471.4	0.07	91.4	588.4	0.06	92.9
90°	352.3	0.05	97.1	547.1	0.06	97.1
120°	374.6	0.05	100	526.7	0.05	96.9
150°	420.2	0.06	94.1	621.1	0.06	94.8
180°	532.6	0.09	83.1	572.9	0.06	95.6

PIP2 周波数の平均絶対残差を Table 2 に示す。P1 は 0.05-0.06oct., P2 は 0.09-0.31oct. であった。P1 の平均絶対残差が弁別閾(低域側 0.47oct., 高域側 0.35oct.)以下になる確率は 100%であった。なお、P2 の弁別閾は明らかではない。

Table 2 Mean absolute residual for P1 and P2 frequency estimation

	P1周波数			P2周波数		
	平均絶対残差		絶対残差がJND以下になる確率[%]	平均絶対残差		
	[Hz]	[oct.]		[Hz]	[oct.]	
0°	162.1	0.06	100	497.6	0.09	
30°	172.1	0.06	100	1558.3	0.31	
60°	182.7	0.06	100	592.8	0.11	
90°	180.1	0.06	100	575.2	0.1	
120°	171.5	0.06	100	526.8	0.09	
150°	155.0	0.05	100	500.3	0.09	
180°	187.0	0.07	100	521.7	0.09	

N/P 周波数の推定において選定された耳介部位を Table 3 に示す。最も頻度高く選定されたのは xa(耳介の傾き)であった。そもそも、耳の傾きが変化すると音源方向自体が変化するため、耳介の傾きが寄与することは妥当である。

N1 周波数の推定では、全方向で x8(耳介の深さ)が選ばれた。耳介の深さはノッチの成因と密接に関連する部位であるため、耳介形状から推定するために必要な耳介部位であると考えられる。N2 周波数の推定では後方(90-180°)において x8 と 120°を除いて x6 が選ばれ、耳甲介

腔の長さが寄与していると考えられる。P1 周波数については、120°を除く全ての方向で x8(舟状窩の長さ)が選ばれている。P2 周波数については、全方向において x2(耳甲介腔の最大幅), x6(耳甲介腔の長さ), x8(舟状窩の長さ)が選ばれた。また、180°を除く全ての方向について x1(最大耳幅)と xd(耳甲介腔の深さ)が選ばれている。耳甲介腔は P2 の成因に密接に関係している部位であるため[6], この点からも P2 周波数を耳介形状から推定するために必要な耳介部位であると考えられる。

Table 3 Selected pinna region

	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	xd	xa
N1	0°	○	○		○			○	○	○
	30°		○	○	○				○	○
	60°			○	○	○	○	○	○	○
	90°			○	○	○	○	○	○	○
	120°			○	○	○	○	○	○	○
	150°			○	○	○		○	○	○
	180°		○	○		○			○	○
N2	0°	○				○				○
	30°			○	○					○
	60°	○			○					○
	90°	○				○		○		○
	120°	○						○		○
	150°		○	○			○	○	○	○
	180°						○	○	○	○
P1	0°					○		○	○	○
	30°		○			○		○	○	○
	60°	○	○		○			○	○	○
	90°	○	○	○	○	○		○	○	○
	120°	○		○	○			○	○	○
	150°			○	○	○		○	○	○
	180°		○		○	○		○	○	○
P2	0°	○	○	○		○		○	○	
	30°	○	○			○		○	○	
	60°	○	○			○		○	○	○
	90°	○	○	○		○		○	○	○
	120°	○	○	○		○		○	○	○
	150°	○	○			○	○	○	○	○
	180°		○	○			○	○		

2.3 ナイーブ耳介の推定結果

トレーニングで用いられていない耳介でも N/P 周波数を推定できるか検証するため、全耳介のうち2耳をテストデータ、その他の耳をトレーニングデータとして N/P 周波数の推定を行った(leave two-out 法)。

N1N2 周波数の平均絶対残差を Table 4 に示す。N1 は 0.05-0.1oct., N2 は 0.06-0.09oct. であった。平均絶対残差が弁別閾以下になる確率は N1 で 77.8-97.1%, N2 で 77.0-97.1% であった。

Table 4 Mean absolute residual for N1 and N2 frequency estimation

	N1周波数			N2周波数		
	平均絶対残差		絶対残差がJND以下になる確率[%]	平均絶対残差		絶対残差がJND以下になる確率[%]
	[Hz]	[oct.]		[Hz]	[oct.]	
0°	508.96	0.1	77.78	657.20	0.09	77.03
30°	483.62	0.08	84.29	624.82	0.08	85.71
60°	519.59	0.07	90.9	638.74	0.07	90.00
90°	416.73	0.05	92.65	555.09	0.06	97.10
120°	466.97	0.06	97.14	636.72	0.06	93.85
150°	474.59	0.07	92.65	692.23	0.07	94.74
180°	608.52	0.1	78.57	628.14	0.07	93.18

PIP2 周波数の平均絶対残差を Table 5 に示す。P1 は 0.02-0.03oct., P2 は 0.09-0.13oct.であった。平均絶対残差が弁別閾以下になる確率は P1 で 100%であった。

Table 5 Mean absolute residual for P1 and P2 frequency estimation

	P1周波数			P2周波数	
	平均絶対残差		絶対残差がJND以下になる確率[%]	平均絶対残差	
	[Hz]	[oct.]		[Hz]	[oct.]
0°	178.9	0.02	100	498.1	0.09
30°	208.4	0.02	100	748.9	0.13
60°	226.4	0.02	100	587.8	0.10
90°	210.8	0.02	100	575.2	0.10
120°	196.2	0.02	100	526.8	0.10
150°	176.2	0.02	100	500.3	0.10
180°	229.2	0.03	100	521.7	0.09

2.4 従来の個人化方法との比較

従来、54 耳を用いて正面方向(0°)においてのみ N1N2 周波数の推定が試みられており[3], その N1N2 の重相関係数はそれぞれ 0.81 および 0.82 であった。本研究では N1N2 とともに 0.78 であり、ほぼ同様の結果となった。

また、平均絶対残差は 54 耳の推定の N1N2 でそれぞれ 0.07 および 0.08oct.であったが、本研究では、0.10 および 0.09oct.であり、ほぼ同程度の推定精度が得られているといえる。

3 N/P レベルの推定

3.1 推定方法

N/P 周波数の推定と同様に、N/P レベルを目的変数、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。

3.2 トレーニング耳介の推定結果

周波数の推定と同様に自由度調整済み重相

関係数の最大値の収束値を求めた。

Fig. 4 に自由度調整済み重相関係数の収束値を示す。重相関係数は 7 方向において N1 で 0.23-0.72, N2 で 0.26-0.52, P1 で 0.43-0.74, P2 で 0.44-0.70 であった。

N1N2 の重相関係数は 0°および 180°では低く、N1 は 0°, 180°では 0.25, 0.24, N2 は 0°, 180°では 0.26, 0.28 であった。一方、90°では比較的高く、N1 で 0.72, N2 では 0.52 であった。

P1 の重相関係数は 0°および 180°で高く、0°で 0.71, 180°で 0.74 であった。一方、30°-150°では比較的低く、0.43-0.61 であった。

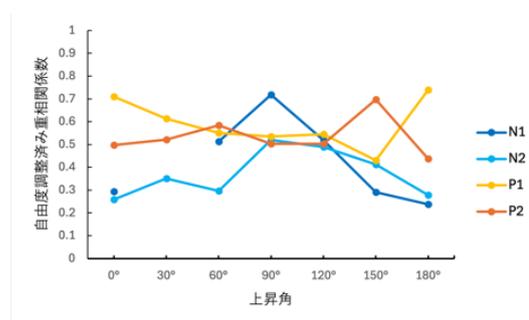


Fig. 4 Adjusted multiple correlation coefficient for N/P level

また、各レベルの平均絶対残差を Table 6 に示す。N1 で 3.2-6.9dB, N2 で 4.9-8.1dB, P1 で 1.0-2.2dB, P2 で 2.0-3.8dB であった。以上の結果より、N1N2 レベルを耳介形状から高い精度で推定するのは困難であるといえる。

Table 6 Mean absolute residual for N/P level estimation [dB]

	N1レベル	N2レベル	P1レベル	P2レベル
0°	6.1	5.9	1.4	3.8
30°		5.3	1.3	2.9
60°	4.7	5.1	2.2	2.4
90°	3.2	4.9	1.0	2.0
120°	5.6	7.0	1.1	2.3
150°	5.7	7.1	1.2	2.1
180°	6.9	8.1	1.0	3.8

各レベルを推定するために選ばれた耳介部位を Table 7 に示す。説明変数の個数は N1 で 2-7 個, N2 で 3-6 個, P1 で 3-4 個, P2 で 2-4 個であった。

Table 7 Selected pinna region

	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	xd	xa
0°			○					○		○
30°										
60°			○	○	○	○	○	○		
N1 90°			○			○	○	○		
120°			○			○	○	○		
150°		○				○	○	○	○	○
180°					○					○
0°					○	○	○	○		
30°	○				○	○	○	○		○
60°		○			○	○	○			○
N2 90°	○		○		○					○
120°			○			○		○		
150°			○			○			○	
180°				○	○				○	○
0°	○	○							○	○
30°	○	○							○	○
60°	○	○							○	○
P1 90°	○	○							○	○
120°	○	○							○	○
150°	○	○							○	○
180°	○	○							○	○
0°			○		○			○		○
30°		○				○			○	○
60°	○	○				○				○
P2 90°	○	○				○				○
120°	○	○				○				
150°	○	○							○	○
180°	○		○							

3.2 ナイーブ耳介の推定結果

周波数の推定と同様にナイーブな2耳のN/Pレベルの推定を行った。各レベルの残差をTable 7に示す。

平均絶対残差はN1で3.5-7.5dB, N2で5.8-9.7dB, P1で1.0-1.6dB, P2で2.5-5.0dBであった。トレーニング耳介の推定同様、N1N2レベルの平均絶対残差は大きく、耳介形状から高い精度で推定するのは困難であるといえる。

Table 7 Mean absolute residual for N/P level estimation [dB]

	N1レベル	N2レベル	P1レベル	P2レベル
0°	6.5	6.3	1.6	4.3
30°		6.0	1.4	3.7
60°	5.6	5.8	1.5	2.9
90°	3.5	5.7	1.0	2.6
120°	6.0	7.5	1.2	2.5
150°	6.8	8.1	1.5	2.5
180°	7.5	9.7	1.1	5.0

4 おわりに

本研究では、受聴者の10箇所耳介形状から上半球正中面7方向におけるN/P周波数の

推定を行った。その結果、以下の知見が得られた。

1)自由度調整済み重相関係数はN1で0.60-0.81, N2で0.60-0.73, P1で0.52-0.6, P2で0.66-0.74であった。絶対残差が弁別閾以下になる確率は82.2-100%, N2で80.3-97.1%, P1で100%であった。

2)ナイーブな2耳をテストデータとして推定を行った場合、絶対残差はN1N2で0.05-0.09oct., P1P2で0.05-0.31oct.であった。また、絶対残差が弁別閾以下になる確率はN1で77.8-97.1%, N2で77.0-97.1%, P1で100%であった。

また、受聴者の10箇所の耳介形状から上半球正中面7方向におけるN/Pレベルの推定を行った。その結果、以下の知見が得られた。

1)自由度調整済み重相関係数はN1で0.23-0.72, N2で0.26-0.52, P1で0.43-0.74, P2で0.44-0.70であった。

2)ナイーブな2耳をテストデータとしてN/Pレベルの推定を行った場合、平均絶対残差はN1で3.5-7.5dB, N2で5.8-9.7dB, P1で1.0-1.6dB, P2で2.5-5.0dBであった。

謝辞

研究に協力いただいた藤原つぐみ氏、中島瑞稀氏、村上敦哉氏に深謝します。

参考文献

- [1] Morimoto and Ando, J. Acoust. Soc. Jpn. (E), 1, 167-174, 1980.
- [2] 飯田一博 著, “頭部伝達関数の基礎と3次元音響システムへの応用”, コロナ社, p.34, 2017
- [3] Iida *et al.*, Appl Acoust, 68, 835-850, 2007.
- [4] Iida *et al.*, J. Acoust. Soc. Am. 136, 317-333, 2014.
- [5] Algazi *et al.*, Proc. IEEE Workshop on Application of signal processing to audio and acoustics, 99-1, 2001.
- [6] 飯田一博 著, “頭部伝達関数の基礎と3次元音響システムへの応用”, コロナ社, p.51, 2017