

受聴者の頭部形状による両耳間差キューの個人化

— 両耳間時間差の推定 —

石井 要次^{*1}飯田 一博^{*1}

**Personalization of interaural difference cues based on the anthropometry of the listener's head
- Estimation of interaural time difference -**

Yohji Ishii^{*1} and Kazuhiro Iida^{*1}

Abstract --- This study proposes an estimation method of listener's interaural time difference (ITD) based on the anthropometry of the listener's head. Ten anthropometric parameters of the heads and the ITDs on the horizontal plane for 33 subjects were measured. Then the multiple regression analysis of the ITD for each direction and the anthropometric parameters were carried out. The results show that the average of the correlation coefficients was 0.59 and the mean residual error was 16.5 μ s. Accuracy of the multiple regression was verified using four naive subjects. The mean estimation error was 19.2 μ s (2.3 degrees). Finally, the estimation accuracy of the proposed method was compared to that of previous method. The average estimation error of the proposed method was smaller (51.5 μ s, 7.3 degrees) than those of the previous methods.

Keywords: Interaural time difference, Personalization, HRTF, Anthropometry

1 はじめに

ヒトの方向知覚の手掛かりは頭部伝達関数 (HRTF: Head-Related Transfer Function)に含まれている。したがって、受聴者本人の HRTF を鼓膜上で再現することで任意の方向に音像を制御できる[1]。しかし、HRTF を測定するためには無響室や特殊な機材や膨大な時間を必要とするため、全ての受聴者の HRTF を測定することは現実的には不可能である。そこで、受聴者本人の HRTF の代わりに、いくつかの研究機関により公開されている HRTF データベース[2-6]に含まれる他人の HRTF を用いる方法が考えられる。しかし、HRTF には個人差があるため、他人の HRTF を用いると誤った方向に定位する現象がしばしば発生する[1,7]。HRTF の個人差は、頭部や耳介形状の個人差に起因していることが報告されている[8-10]。

3次元音像制御を一般に普及させるためには、各受聴者に適合する HRTF を容易に提供する方法が必要となる。この方法は、個人化(Personalization もしくは Individualization)と呼ばれ、盛んに研究が進められている[例えば 11-14]。HRTF の個人化を容易に行う方法が確立できれば、一般の受聴者に対して精度の高い音像

制御を提供できる。例えば、実在する音空間の時間や空間を超えた忠実な再現や、実在しない音空間のシミュレーションにおける音像定位制御の精度向上が期待できる。このような3次元音像制御技術を視覚障害者に対する補助等に応用することも考えられ、バリアフリー社会に対して貢献することが期待される。

著者らは、HRTFに含まれる方向知覚の手掛かりを推定することで、個人に適合する HRTF を提供する方法について研究を進めている[15]。HRTF に含まれる方向知覚の手掛かりは、前後上下方向ではスペクトルキューであり、左右方向では両耳間差キューであることが広く知られている。さらに、両耳間差キューには、両耳間時間差(ITD: Interaural Time Difference)と両耳間レベル差(ILD: Interaural Level Difference)があることが知られている[16,17]。ITD については 0 μ s で正面に知覚し、約 1000 μ s で側方に収束する[18]。両耳入力信号の波形そのものの時間差が左右方向の知覚の手掛かりとなるのは約 1600 Hz 以下の成分に限られる。これは、内耳の神経パルス発火に絶対不応期が存在するからである。1600 Hz 以上の周波数帯域では両耳入力信号の包絡線に対応した時間差が検出される[19]。一方、広帯域信号を用いた場合、ILD が 0 dB で正面に、約 10 dB で側方に知覚する[20]。ILD は可聴周波数帯域全域に亘って左右方向知覚の手掛かりとなっている。ただし、ILD は周波数依存性を持つため、入射方向が同じでも ILD

*1 千葉工業大学

*1 Chiba Institute of Technology

は周波数により異なる。

本研究では、左右方向知覚の手掛かりである ITD の個人化方法を提案する。受聴者の頭部形状から ITD を推定する方法については、Algazi *et al.* [21] および渡邊ら[22]が提案している。Algazi *et al.*[21]は、頭部を完全な球体と仮定して受聴者の頭部形状から適切な球の半径を推定し、その球の半径から各方向の ITD を算出する方法を提案した。彼らは、推定した球の半径と受聴者本人に適した球の半径の誤差が平均で 1.2 mm であったと報告している。また、被験者本人の方位角に対する ITD の振舞いを数式でモデル化した結果、モデル化誤差は側方において約 12°であったと報告している。方向知覚の弁別閾が側方で約10°であることから、方位角に対する ITD の振舞いを十分な精度でモデル化できているとはいえない。彼らが用いた頭部モデルは、頭部の前後・左右非対称性を考慮していないため ITD の前後・左右非対称性に対応できていない。渡邊ら[22]は、方位角に対する ITD の振舞いを正弦関数の和でモデル化し、その正弦関数のパラメータを受聴者の頭部形状から推定する方法を提案した。彼らが用いた頭部モデルは頭部の前後非対称性は考慮されているが、頭部の左右非対称性は考慮していないため ITD の左右非対称性に対応できていない。

従来法には以下の問題がある。

- 1) 頭部形状の左右非対称性が考慮されていないため、ITD の左右非対称性に対応できない。
- 2) 各頭部形状の回帰係数を方向間で等しく扱っているため、方向ごとの ITD と各頭部形状の相関関係の違いに対応できない。

本研究では、水平面内の ITD の推定精度の向上を図るため、頭部の前後・左右非対称性に対応するモデルを提案し、目的変数を水平面内の ITD、説明変数を頭部形状として方向ごとに異なる重回帰式を構築した。

2 両耳間時間差

2.1 頭部インパルス応答の測定

ITD は、無響室において測定した被験者本人の hrir(head-related impulse response)から算出した。hrir の測定方向は水平面内 12 方向(30°間隔)、スピーカから頭部中心位置までの距離は 1.2 m である。実験システムは、ノート PC、オーディオインタフェース(RME FireFace UFX)、スピーカ(FOSTEX FE83E)、アンプ(Marantz PM4001)、A/D コンバータ(Roland EDIROL M-10MX)、耳栓型マイクロホン[23]で構成した。測定信号は Swept-Sine Signal(2¹⁸ サンプル)である。測定信号および録音のサンプリング周波数は 48 kHz である。測定時、被験者に対して椅子に座り背筋を伸ばして正面を向いて静止するように指示した。被験者の頭部は固

定していないが頭部および胴体に傾きがないかについて、被験者の前方および側方から 2 名の実験者が目測で確認した。被験者は 20 代の 33 名(男性 27 名、女性 6 名)である。

hrir の算出方法は以下の通りである。

- 1) スピーカから受聴者の左右の外耳道入口(外耳道閉塞状態[24])までのインパルス応答 $g_l(t)$, $g_r(t)$ を測定する(2¹⁸ サンプル)。
- 2) 受聴者がいない状態での音源から受聴者の頭部中心位置に相当する位置までのインパルス応答 $f(t)$ を測定する(2¹⁸ サンプル)。
- 3) 正面方向の $g_l(t)$ と $g_r(t)$ から振幅の絶対値が最大となる時刻をそれぞれ求め、時刻が早い方から 50 サンプル前を切り出し開始位置 T_0 とする。
- 4) 全方向の $g_{l,r}(t)$ および $f(t)$ を T_0 から 512 サンプルの矩形窓で切り出す。
- 5) $g_{l,r}(t)$ および $f(t)$ をフーリエ変換し、512 サンプルの複素数 $G_{l,r}(\omega)$, $F(\omega)$ を得る。
- 6) 式(1)により $HRTF_{l,r}(\omega)$ を求める。
- 7) $HRTF(\omega)$ を逆フーリエ変換し、hrir を得る。

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

2.2 両耳間時間差の算出方法

2.1 節で求めた hrir を用いて ITD を算出した。1 章で述べたように、ITD が方向知覚の手掛かりとして作用する帯域は約 1.6 kHz 以下に限られる。また、ITD には周波数依存性があるため hrir の両耳間相互相関によって ITD を定義した。ITD の算出手順は以下の通りである。

- 1) hrir に 1.6 kHz をカットオフ周波数とする最小位相系ローパスフィルタ(790 tap)を畳み込む。
- 2) サンプリング周波数を 8 倍(48 kHz × 8 = 384 kHz)に変換する(時間分解能 2.604 μs)。
- 3) 両耳間相互相関関数 Φ (式 2)が最大となる時間差 τ を ITD とする[25]。

$$\Phi_{l,r}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\int_{-T}^T hrir_l(t) \times hrir_r(t - \tau) dt}{\sqrt{\int_{-T}^T hrir_l^2(t) \times hrir_r^2(t) dt}} \quad (2)$$

ここで、 $|\tau| \leq 1000 \mu s$ とし、添え字の l, r はそれぞれ左耳、右耳を表す。

2.3 両耳間時間差の算出結果

33 名の ITD を図 1 に示す。音源の方位角は正面方向を 0°として時計回りに表した。正の値は左耳の到達時刻が遅いことを表す。0°(正面)および 180°(真後ろ)において 0 μs とならない場合があるが、これは頭部の左右非対称性が影響していると考えられる。いずれの被験者においても、ITD は真横(90, 270°)で最大となった。真横から ±30°において、個人差が大きい傾向にある。

表 1 に各方向における ITD の平均値(Ave.)、最大値(Max)、最小値(Min)、個人差の範囲(Max-Min)、標準

3 頭部寸法の特徴量の計測

偏差(Std.)を示す。Ave.をみると、真横(90, 270°)では約730 μsとなった。同一矢状面内(30°と150°, 60°と120°, 330°と210°, 300°と240°)で比較すると、前方の方が15.1–47.1 μs 大きい。これは、外耳道入口が頭部中心よりやや後方に位置している可能性が示唆される。

次に、ITD の分布範囲(Max, Min)をみる。90°のITD の分布範囲は60°のそれと互いに重なっていた。また、270°のITD の分布範囲は240, 300°のそれと互いに重なり合っていた。つまり、ITD には30°分以上の個人差が存在する。方向知覚の弁別閾が前方では1°, 側方では10°程度[26]であることから、ITD には方向知覚に影響を及ぼす個人差が存在すると言える。

Max-Min は12方向において83.3–148.4 μs の範囲をとり、真横±30°(60, 120, 240, 300°)で大きく、真横(90, 270°)で小さい傾向にある。全方向の平均値は107.9 μs であった。Std.は19.6–35.2 μs の範囲をとり、Max-Min と同様に真横±30°(60, 120, 240, 300°)で大きく、真横(90, 270°)で小さい傾向にある。以上より、ITD の個人差は、真横±30°(60, 120, 240, 300°)で大きいと言える。

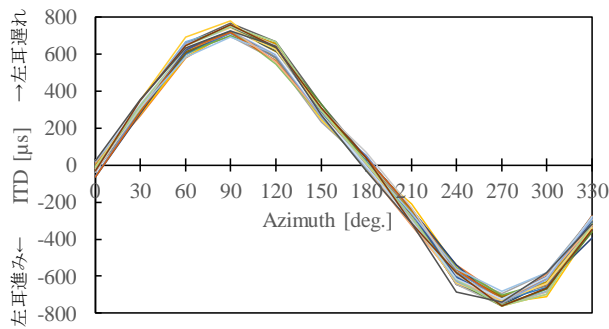


図1 全被験者のITDの方位角に対する変化
Fig.1 ITDs of 33 subjects in the horizontal plane.

表1 33名のITDの統計値 [μs]

Table 1 Statistics values of ITD for 33 subjects [μs]

Azm. [deg.]	Ave.	Max	Min	Max-Min	Std.
0	-14.7	26.0	-65.1	91.1	22.5
30	310.8	354.2	265.6	88.5	24.2
60	629.2	692.7	578.1	114.6	25.7
90	733.2	778.6	692.7	85.9	19.6
120	614.1	669.3	546.9	122.4	35.2
150	280.7	330.7	234.4	96.4	22.5
180	13.3	70.3	-28.6	99.0	23.1
210	-270.4	-210.9	-325.5	114.6	28.8
240	-602.1	-539.1	-687.5	148.4	35.0
270	-734.7	-679.7	-763.0	83.3	21.1
300	-638.1	-580.7	-710.9	130.2	34.2
330	-317.5	-273.4	-393.2	119.8	27.8
Ave.	-	-	-	107.9	26.6

3.1 頭部形状の計測方法

頭部表面を通る音波の伝播経路の個人差がITDの個人差に対応すると考え、ITDを求めた33名の頭部形状を計測した。

従来、Algazi et al.[21]は頭の幅、奥行、高さの3箇所を計測しており、頭の幅と奥行がITDの推定への寄与率が高いことを示している。渡邊ら[22]は、Algazi et al.[21]が用いた3箇所に加え、鼻の高さ、長さ、奥行、耳介の幅、長さ、肩幅、頭耳長、頭耳高を加えた11箇所を用いている。このうち、頭の幅、高さ、奥行、頭耳長、頭耳高、肩幅がITDの推定への寄与率が高いことを示している。ただし、いずれの研究においても、頭部の前後・左右非対称性は考慮されていない。

本研究で用いる頭部モデルを図2、表2に示す。従来法でITDの推定への寄与率が高いことが示された部位(頭の幅、高さ、奥行、頭耳長、頭耳高、肩幅)は全て用いている。このうち、p4_{l,r}, p5_{l,r}は渡邊ら[22]の頭耳長に相当する部位であるが、頭部の前後・左右非対称性に対応できるように前後・左右に分割した。また、p6_{l,r}は渡邊ら[22]の頭耳高に相当する部位であるが左右に分割した。なお、p4_{l,r}, p5_{l,r}の始点と終点は外耳道入口の中心位置、および正中面と水平面の交点であり、p6_{l,r}の始点と終点は外耳道入口の中心位置、および正中面と横断面の交点である。

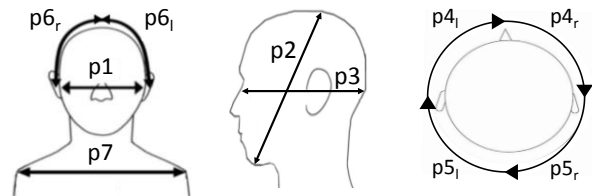


図2 ITDの推定に用いた頭部寸法の計測箇所

Fig.2 Anthropometric parameters measured for estimation of individual ITD

表2 計測箇所とその名称

Table 2 Name of the anthropometric parameters

計測箇所	名称
p1	頭の幅
p2	頭の高さ
p3	頭の奥行
p4, p5	頭周
p6	頭頂から外耳道入口
p7	肩幅

頭部形状の計測には触角計と巻尺を用いた。p1, p2, p3, p7 は触角計, p4, p5, p6 は巻尺により計測した。最小読取値は触角計, 巻尺ともに 1 mm である。

この計測方法による計測誤差を求めるため、1 名の被験者を対象に各部位をそれぞれ 10 回計測した。その結果、各部位の 10 回の計測の平均値と最小値または最大値の差は、それぞれ 1 mm であった。

3.2 頭部形状の計測結果

表 3 に頭部形状の計測結果と従来法[21,22]の計測結果の平均値を併せて示す。本研究で計測した p1, p3, p7 は従来法の平均値に比べやや小さく、p2 はやや大きい。

個人差の範囲(Max-Min)は、p7(肩幅)が最も大きく 102 mm であった。一方、p1(頭の幅)が最も小さく 18 mm であった。その他の部位は 26-56 mm の個人差が存在した。表の RSD(Relative Standard Deviation) は標準偏差(Std.)を平均値(Ave.)で割ったものであり、相対的なばらつきを表す指標である。頭部形状の個人差を RSD で評価すると、p4_{l,r}, p5_{l,r}(頭周)と p7(肩幅) の個人差が大きい。

次に、頭部の前後・左右非対称性についてみる。

表3 33名の頭部形状の統計値

Table 3 Statistics of the anthropometric parameters [mm]

	Ave.	Max	Min	Max-Min	Std	RSD	渡邊ら (Ave.)		
							Algazi et al. (Ave.)	Women	Men
p1	143	152	134	18	5.6	0.039	156	145	155
p2	246	266	227	39	9.9	0.040	227	-	-
p3	185	201	170	31	7.9	0.043	199	180	196
p4 _l	152	167	136	31	7.4	0.049	-	-	-
p4 _r	159	185	148	37	8.1	0.051	-	-	-
p5 _l	144	163	130	33	8.1	0.056	-	-	-
p5 _r	145	176	120	56	12.0	0.083	-	-	-
p6 _l	195	217	176	41	8.2	0.042	-	-	-
p6 _r	197	211	185	26	7.2	0.036	-	-	-
p7	393	439	337	102	23.9	0.061	408	-	-

p4_{l,r}, p5_{l,r}(頭周)の平均値の前後差については、p4_l, p5_l(左側)では平均で p4_l(前方)が p5_l(後方)より 8 mm 大きく、p4_r, p5_r(右側)も p4_r(前方)が p5_r(後方)より 14 mm 大きい。この結果から、外耳道入口は頭部中心よりやや後方に位置していると考えられ、左右の耳への音波の経路差が後方よりも前方の方が大きくなると推測できる。これは、2.3 節で示した同矢状面内の ITD が後方よりも前方の方が大きくなったことと合致する。

4 頭部形状による ITD の推定

4.1 単回帰分析

音源方向ごとに頭部形状と ITD の単回帰分析を行った。頭部形状と各方向における ITD の単相関係数を表 4 に示す。表中の網掛けは有意水準 10% で相関関係が認められることを表す(0.29 ≤ |r|)。ITD と相関があった主な部位は以下の通りである。

p1(頭の幅)は、最も多くの方向(12 方向中 6 方向)で相関関係が認められ、90, 270°において強い相関関係(0.6 < |r|)となった。p1 は従来法[21,22]で ITD の推定への寄与率が最も高いと報告された部位であり、本研究においても同様の結果となった。

p2(頭の長さ)および p3(頭の奥行)は、側方で有意な相関関係となる傾向がある。

p4_{l,r}, p5_{l,r}(頭周)については、p4_{l,r} は音源が水平面内の前半面にある場合のみ有意な相関が認められ、p5_{l,r} は音源が水平面内の後半面にある場合のみ有意な相関が認められた。つまり、音源から近い側の頭周の個人差は遠い側の頭周の個人差に比べ、ITD の個人差との相関が強いと言える。

p6_{l,r}(頭頂から外耳道入口)については、p6_l は 150°でのみ相関関係が認められた。p6_r は 60, 90, 270, 300°で相関が認められ、p6_r の 90, 270°で強い相関関係(0.6 < |r|)となった。

p7(肩幅)は 270, 300°でのみ相関関係が認められた。

表4 頭部形状と各方向の ITD の単相関係数 r. (網掛け): 10% 有意(0.29 ≤ |r|)

Table 4 Correlation coefficients between anthropometric parameters and ITDs (網掛け: 0.29 ≤ |r|)

Azm. [deg.]	p1	p2	p3	p4 _l	p4 _r	p5 _l	p5 _r	p6 _l	p6 _r	p7
0	-0.45	-0.20	-0.06	-0.40	-0.28	0.19	-0.09	-0.18	-0.17	-0.14
30	0.20	0.05	0.10	0.02	0.18	-0.04	0.01	-0.04	0.16	0.03
60	0.54	0.34	0.41	0.29	0.44	0.11	0.12	0.20	0.39	0.28
90	0.61	0.34	0.57	0.43	0.50	0.16	0.37	0.27	0.61	0.24
120	0.10	-0.03	0.38	0.04	0.02	0.28	0.38	0.09	0.22	-0.06
150	0.01	-0.02	0.35	-0.10	-0.05	0.47	0.21	-0.29	0.14	-0.02
180	0.35	0.24	0.25	0.21	0.26	-0.17	0.11	0.14	0.14	0.05
210	0.00	0.20	0.05	0.12	0.07	-0.03	-0.02	0.25	0.06	-0.01
240	-0.23	-0.13	-0.23	-0.07	-0.16	-0.32	-0.09	-0.20	-0.26	-0.10
270	-0.65	-0.33	-0.46	-0.52	-0.58	-0.21	-0.34	-0.07	-0.64	-0.46
300	-0.54	-0.38	-0.42	-0.42	-0.63	0.15	-0.18	-0.01	-0.41	-0.51
330	-0.25	-0.16	-0.16	-0.19	-0.31	-0.09	0.02	0.08	-0.08	-0.02

方位角ごとにみると、側方において相関関係が認められる部位が多い傾向にあり、真横(90, 270°)においては p1(頭の幅)の相関が最も高かった($r=0.61, -0.65$)。しかし、30°と 210°では、相関関係が認められる部位は存在しなかった。したがって、単回帰分析では全ての方向の ITD を精度良く推定することは困難である。

4.2 重回帰分析

10 箇所(10 種類)の頭部形状を説明変数、各方向の ITD を目的変数とした重回帰分析を行った(式 3)。

$$ITD(s, \phi) = a_1p_1 + a_2p_2 + \dots + a_7p_7 + \beta \quad [\mu s] \quad (3)$$

ここで、 s は被験者、 ϕ は方位角である。

なお、多重共線性の有無については、VIF(Variance Inflation Factor)によって確認した。VIF は以下の式で定義される。

$$VIF(j) = 1/(1-R^2(j)) \quad (4)$$

ここで、 $R^2(j)$ 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。本研究で用いたすべての説明変数の VIF(10 種類)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[27]。

表 5 に重相関係数 r 、回帰モデル全体の危険率 p 、残差の絶対値の平均 E と回帰係数(β は定数項)を示す。各方向における重相関係数 r は 0.34–0.79 であり、側方で高くなる傾向がある。全ての方向において有意水準 5% で相関関係が認められた($0.34 \leq r$)。全方向の平均重相関係数は 0.59 であった。

危険率 p については、90, 150, 270, 300°で 10% 未満となった。ただし、単回帰分析で相関関係が認められる部位が存在しなかった 30, 210°では高い危険率(97.5, 94.9%)となった。

各方向における残差の絶対値の平均 E は 9.6–24.8 μs の範囲をとった。全方向の平均は 16.5 μs であり、ITD の個人差の範囲の全方向の平均 107.9 μs (表 1、

Max-Min)の 15.3%に相当する。残差は真横(90, 270°)では小さく(9.8, 9.6 μs)、120, 240°では大きい傾向(20.8, 24.8 μs)にあるが、全ての方向において渡邊ら[22]の方法による ITD のモデル化誤差(25 μs)よりも小さい。したがって、本研究の重回帰モデルによって、従来法よりも高い精度で受聴者の ITD を推定できる可能性が示唆される。

5 ナイーブな被験者の ITD の推定

4.2 節で求めた重回帰モデル(表 5)の推定精度を重回帰分析に含めていない被験者を用いて検証した。被験者は 20 代の女性 2 名(A, B)と男性 2 名(C, D)の 4 名である。この 4 名の ITD と頭部形状を 2, 3 章と同じ方法で求めた(表 6, 7)。

重回帰式を用いて頭部形状から 12 方向の ITD を推定した。表 8 にナイーブな被験者の推定誤差の絶対値(以降、推定誤差)を示す。以降、各方向の重回帰モデルの残差の絶対値の平均(以降、残差)を基準として推定精度を評価する。被験者 A の推定誤差は 90–150°を除き、各方向の残差と同等(最大で 7.2 μs の差)であった。ただし、90–150°の推定誤差は各方向の残差の約 2–3 倍となった。被験者 B の推定誤差は 90, 120, 240–330°では各方向の残差よりも小さい。ただし、その他の方向の推定誤差は残差よりも 10 μs 以上大きく、30, 60, 150, 180, 210°の推定誤差は残差の約 2–3.5 倍となった。被験者 C の各方向の推定誤差は 0, 90, 300°を除き、各方向の残差と同等(最大で 4.2 μs の差)であった。ただし、0, 90, 300°の推定誤差は各方向の残差よりも 10 μs 以上大きく、特に 0, 90°の推定誤差は残差の約 2 倍となった。被験者 D の各方向の推定誤差は 120, 150°を除き、各方向の残差と同等(最大で 4.4 μs の差)であった。ただし、120, 150°の推定誤差は各方向の残差の約 2–3 倍となった。

表5 重回帰分析の結果。r: 重相関係数, p: 危険率, E: 残差の絶対値の平均, β : 定数項

Table 5 Results of the multiple regression analysis. r: multiple correlation coefficient, p: p-value, E: residual error

Azim.[deg.]	r	p	E[μs]	Regression coefficient($\times 10^{-6}$)											β
				p1	p2	p3	p4 _l	p4 _r	p5 _l	p5 _r	p6 _l	p6 _r	p7		
0	0.59	0.363	14.2	2.34	0.06	-0.72	1.11	-0.56	-0.48	-0.13	-0.21	-0.15	0.01	-127.24	
30	0.34	0.975	17.9	-1.37	-0.34	-0.19	0.98	-0.33	0.24	0.18	0.43	-0.51	0.16	-197.13	
60	0.63	0.210	15.0	-2.60	-0.27	-1.05	1.16	-0.02	0.20	0.55	-0.02	-0.62	0.02	-160.29	
90	0.78	0.009	9.8	-0.92	0.08	-1.13	0.40	-0.30	0.21	-0.04	-0.18	-1.13	0.22	-278.76	
120	0.65	0.165	20.8	1.50	1.23	-3.11	0.32	0.11	-0.15	-0.67	-0.83	-1.01	0.40	-295.37	
150	0.71	0.057	12.2	-0.09	-0.27	-1.32	0.48	0.07	-1.09	-0.03	1.10	-0.41	0.39	-163.68	
180	0.50	0.672	16.0	-1.81	-0.61	-0.82	0.63	0.15	0.79	0.11	0.06	-0.03	0.28	185.10	
210	0.38	0.949	21.1	1.59	-1.18	0.53	0.15	-0.90	-0.04	-0.41	-0.71	-0.15	0.33	458.68	
240	0.43	0.874	24.8	0.79	0.15	0.63	-1.18	0.41	0.98	-0.17	0.53	0.71	-0.10	127.05	
270	0.79	0.005	9.6	1.18	-0.14	-0.33	0.39	0.66	0.35	0.10	-0.59	1.07	0.04	320.99	
300	0.75	0.022	18.4	2.00	-0.26	0.67	-0.72	1.08	-1.24	-0.37	-0.55	0.91	0.42	217.87	
330	0.54	0.529	17.6	1.00	1.70	-1.24	-0.09	1.84	1.06	0.22	-1.46	-0.38	-0.67	142.87	
Ave.	0.59	0.402	16.5												

表6 ナイーブな被験者の ITD [μs]

Table 6 ITD of the naive subjects [μs]

Azim.[deg.]	Subjects			
	A	B	C	D
0	-20.8	-49.5	-41.7	-59.9
30	281.3	268.2	296.9	294.3
60	588.5	572.9	656.3	622.4
90	697.9	721.4	752.6	742.2
120	565.1	593.8	632.8	606.8
150	270.8	294.3	312.5	278.6
180	5.2	57.3	5.2	41.7
210	-278.6	-226.6	-283.9	-281.3
240	-606.8	-562.5	-617.2	-585.9
270	-710.9	-726.6	-750.0	-731.8
300	-599.0	-619.8	-658.9	-643.2
330	-299.5	-325.5	-349.0	-320.3

表7 ナイーブな被験者の頭部寸法 [mm]

Table 7 Anthropometric parameters of the naive subjects [mm]

	Subjects			
	A	B	C	D
p1	135	142	149	145
p2	234	237	246	252
p3	180	179	188	187
p4 _l	143	154	155	155
p4 _r	151	156	159	159
p5 _l	146	135	149	142
p5 _r	126	135	143	157
p6 _l	176	190	202	190
p6 _r	191	187	197	188
p7	369	381	398	424

表8 提案法の重回帰モデルによる

推定誤差の絶対値 [μs]

Table 8 Absolute estimation error by the multiple regression model of proposed method [μs]

Azim.	Subjects				Ave.
	A	B	C	D	
0	21.4	24.4	35.2	15.0	24.0
30	21.4	40.9	15.1	17.0	23.6
60	20.1	53.1	11.1	12.8	24.3
90	20.0	4.1	23.2	12.2	14.9
120	49.4	2.2	15.6	38.9	26.5
150	33.5	25.4	7.6	32.5	24.8
180	0.2	44.2	20.2	18.9	20.9
210	4.2	50.0	19.8	17.0	22.7
240	26.5	9.4	0.1	20.0	14.0
270	2.5	7.6	9.0	13.3	8.1
300	5.4	17.7	29.1	7.8	15.0
330	11.8	8.0	4.9	22.0	11.7
Ave.	18.0	23.9	15.9	18.9	19.2

表9 Algazi *et al.*の重回帰モデルによる

推定誤差の絶対値 [μs]

Table 9 Absolute estimation error by the multiple regression model of Algazi *et al.* [μs]

Azim.	Subjects				Ave.
	A	B	C	D	
0	20.8	49.5	59.9	41.7	43.0
30	28.0	9.9	31.1	30.5	24.9
60	115.3	90.0	130.4	158.4	123.5
90	62.0	72.5	81.1	83.7	74.8
120	91.8	110.9	114.8	135.0	113.1
150	17.6	35.9	15.4	46.1	28.8
180	5.2	57.3	41.7	5.2	27.3
210	25.4	31.8	18.0	17.5	23.2
240	133.5	79.6	94.0	119.3	106.6
270	75.0	77.7	70.7	81.1	76.1
300	125.7	136.9	151.3	161.0	143.7
330	46.3	67.2	57.1	82.6	63.3
Ave.	62.2	68.3	72.1	80.2	70.7

表10 提案法の重回帰モデルによる

方位角誤差の絶対値 [deg.]

Table 10 Absolute azimuth error by the multiple regression model of proposed method [μs]

Azim.	Subjects				Ave.
	A	B	C	D	
0	-	-	-	-	-
30	2.4	4.9	1.6	1.8	2.7
60	2.6	7.1	1.4	1.4	3.1
90	-	0.7	4.3	2.2	2.4
120	6.7	0.3	2.0	4.3	3.3
150	4.0	2.7	0.9	3.2	2.7
180	-	-	-	-	-
210	0.5	7.1	2.2	1.9	2.9
240	3.1	1.3	0.0	2.3	1.7
270	0.0	1.4	1.7	2.4	1.4
300	0.7	2.2	3.4	0.8	1.8
330	1.3	0.7	0.5	1.9	1.1
Ave.	2.4	2.8	1.8	2.2	2.3

表11 Algazi *et al.*の重回帰モデルによる

方位角誤差の絶対値 [deg.]

Table 11 Absolute azimuth error by the multiple regression model of Algazi *et al.* [deg.]

Azim.	Subjects				Ave.
	A	B	C	D	
0	-	-	-	-	-
30	3.1	1.1	3.3	3.2	2.7
60	13.4	10.9	14.3	16.3	13.7
90	11.8	13.2	14.2	14.4	13.4
120	11.2	12.8	13.0	14.5	12.9
150	2.0	3.8	1.7	4.6	3.0
180	-	-	-	-	-
210	2.8	4.5	2.0	1.9	2.8
240	15.0	9.8	11.1	13.2	12.3
270	13.8	14.0	12.7	14.1	13.7
300	14.3	15.0	15.9	16.5	15.4
330	4.8	6.4	5.5	7.3	6.0
Ave.	9.2	9.2	9.4	10.6	9.6

次に、各方向の全被験者の平均推定誤差(右端の Ave.)を重回帰式の残差の絶対値の平均(表 5 の E)と比較する。0–180°(右半面および前後方向)の平均推定誤差は、いずれの方向においても各方向の残差よりも 4.9–12.6 μs 大きい。右半面の推定誤差が残差よりも大きくなった理由については今後検討が必要である。210–330°(左半面)では、210°の推定誤差と残差の差は 1.6 μs であり、240–330°の推定誤差では各方向の残差よりも小さいことから、左半面では重回帰式と同等の精度であると言える。

全被験者の全方向の平均推定誤差は 19.2 μs であり、重回帰式の全 12 方向の残差の絶対値の平均値(16.5 μs)と 2.7 μs の差であった。この差は、アップサンプリングを施した hrir の 1 サンプル 2.604 μs と同等である。以上より、提案法はナイーブな被験者に対しても同等の精度で ITD を推定できると考えられる。ただし、一部の方向において残差よりも推定誤差が大きくなる場合があった。

次に、提案法と従来法の推定精度を比較した。上記と同じナイーブな被験者の ITD を Algazi *et al.*[21]の方法で推定した。Algazi *et al.*[21]の方法は、p1(頭の幅)、p2(高さ)、p3(奥行)の 3 箇所を用いた重回帰式から被験者の頭部半径 D を導出し、式(5)[28]から各方向の ITD を算出するものである。

$$ITD = D/2c (\sin \phi + \phi) \quad (5)$$

ここで、 c は音速(340 m/s)、 ϕ は方位角である。

Algazi *et al.* [21] の方法による ITD の推定誤差の絶対値を表 9 に示す。各方向の全被験者の平均推定誤差(右端の Ave.)は 23.2–143.7 μs であり、60, 120, 240, 300°では 100 μs を超えた。いずれの方向においても、提案法(8.1–26.5 μs)の方が小さい。また、被験者ごとの全方向の平均推定誤差(下段の Ave.)は 62.2–80.2 μs であり、いずれの被験者においても提案法(15.9–23.9 μs)の方が小さい。全被験者の全方向の平均推定誤差は 70.7 μs であり、提案法(19.2 μs)の方が小さい。

渡邊ら[22]の方法については、ITD を推定するために必要な回帰係数が示されていないため、同じナイーブな被験者を用いて推定精度の比較を行うことができない。ただし、提案法における被験者ごとの平均推定誤差(15.9–23.9 μs)は、渡邊ら[22]の方法における方位角に対する ITD の振舞いを数式によりモデル化する際に生じる誤差(25 μs : 59 名の平均)よりも小さい。

次に、提案法および Algazi *et al.*[21]の方法で推定した ITD を式(5)により方位角 ϕ に変換した。この方位角と元の音源の方位角の差の絶対値を求め、方位角誤差とした。ただし、推定した ITD が被験者本人の ITD の最大値よりも大きくなった場合は、方位角が算出できないため計算から除外した。

方位角 30, 60, 90, 120, 150°における方向知覚の弁

別閾は、提示音の周波数に依存するものの、最小で約 2, 3, 10, 3, 2°であることがそれぞれ示されている[26, 29]。

表 10 に提案法による方位角誤差を示す。各方向の全被験者の平均方位角誤差(右端の Ave.)は、方位角 30–150°(右半面)では、それぞれ 2.7, 3.1, 2.4, 3.3, 2.7°であり方向知覚の弁別閾と同等である。方位角 210–330°(左半面)では、それぞれ 2.9, 1.7, 1.4, 1.8, 1.1°でありいずれの方向においても方向知覚の弁別閾と同等であり、240–330°では 2°以下となった。ただし、各被験者の各方向の方位角誤差をみると、一部において方向知覚の弁別閾を超える場合があり最大推定誤差は 7.1°(被験者 B の 60, 210°)であった。各被験者の全方向の平均方位角誤差(下段の Ave.)は 1.8–2.8°であり、全被験者の平均方位角誤差は 2.3°であった。

Algazi *et al.*[21]の方法(表 11)による各方向の全被験者の平均推定誤差(右端の Ave.)は、方位角 30–150°(右半面)ではそれぞれ 2.7, 13.7, 13.4, 12.9, 3.0°であり、60–120°では方向知覚の弁別閾を超え、提案法よりもそれぞれ 10.6, 11.0, 9.6°大きい。方位角 210–330°(左半面)ではそれぞれ 2.8, 12.3, 13.7, 15.4, 6.0°であり、210–330°では方向知覚の弁別閾を超え、提案法よりもそれぞれ 10.6, 12.3, 13.6, 4.9°大きい。各被験者の全方向の平均方位角誤差(下段の Ave.)は 9.2–10.6°であり、いずれの被験者においても提案法よりも 6.4–8.4°大きい。また、全被験者の全方向の平均方位角誤差は 9.6°であり、提案法よりも 7.3°大きい。

以上より、提案法では、従来法よりも高い精度で受聴者の ITD を推定でき、各方向の平均推定誤差は方向知覚の弁別閾と同等となることを示した。

6 結論

本研究では、頭部の前後・左右非対称性を考慮した 10 箇所の頭部形状から水平面内 12 方向(30°間隔)の ITD を推定する方法を提案し、その推定精度を検証した。

- 1) 各方向の ITD を目的変数、10 箇所の頭部形状を説明変数とした重回帰分析を行った。その結果、重相関係数は 0.34–0.79 であり、全ての方向において 5%で有意な相関関係が認められた。
- 2) 4 名のナイーブな被験者を用いて提案法の推定精度を検証した。その結果、各方向の平均方位角誤差は 1.1–3.3°であり方向知覚の弁別閾と同等であった。ただし、各被験者の各方向の方位角誤差をみると、一部において方向知覚の弁別閾を超える場合があり、最大推定誤差は 7.1°(被験者 B の 60, 210°)であった。また、提案法の平均方位角誤差は 2.3°であり、従来法を用いた場合の平均方位角誤差よりも 7.3°小さかった。

7 謝辞

本研究の一部は文科省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業(S1311003)により実施した。

参考文献

- [1] M. Morimoto and Y. Ando: On the simulation of sound localization, *J. Acoust. Soc. Jpn (E)*, 1, 167-174 (1980)
- [2] The CIPIC HRTF Database:
<http://interface.cipic.ucdavis.edu>
- [3] MIT HRTF Measurements of a KEMAR Dummy-Head Microphone:
<http://sound.media.mit.edu/resources/KEMAR.html>
- [4] 名古屋大学 頭部伝達関数データベース:
<http://www.sp.m.is.nagoya-u.ac.jp/HRTF/index-j.html>
- [5] 東北大学 頭部伝達関数データベース:
<http://www.ais.riec.tohoku.ac.jp/lab/db-hrtf/index-j.html>
- [6] 千葉工業大学 頭部伝達関数データベース:
<http://www.iida-lab.it-chiba.ac.jp/HRTF/index-j.html>
- [7] E. M. Wenzel, M. Arruda, D. J. Kistler, and F.L. Wightman: Localization using nonindividualized head-related transfer functions, *J. Acoust. Soc. Am.*, 94, 111-123, (1993)
- [8] E. A. G. Shaw: Acoustical features of the human ear, in *Binaural and Spatial Hearing in Real and Virtual Environments*, R. H. Gilkey and T. R. Anderson, Eds., Erlbaum, Mahwah, NJ. (1997)
- [9] Y. Kahana and P. A. Nelson: numerical modeling of the spatial acoustic response of the human pinna, *J. Sound Vib.*, 292, 148-178 (2006)
- [10] H. Takemoto, P. Mokhtari, H. Kato, R. Nishimura, and K. Iida: Mechanism for generating peaks and notches of head-related transfer functions in the median plane, *J. Acoust. Soc. Am.*, 132, 3832-3841 (2012)
- [11] D. N. Zotkin, J. Hwang, R. Duraiswami and L. S. Davis: HRTF personalization using anthropometric measurements, *Proc. IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics*, 157-160, (2003)
- [12] J. C. Middlebrooks: Individual differences in external-ear transfer functions reduced by scaling in frequency, *J. Acoust. Soc. Am.*, 106, 1480-1492 (1999)
- [13] J. C. Middlebrooks: Virtual localization improved by scaling nonindividualized external-ear transfer functions in frequency, *J. Acoust. Soc. Am.*, 106, 1493-1510 (1999)
- [14] J. C. Middlebrooks, E. A. Macpherson and Z. A. Onsan: Psychophysical customization of directional transfer functions for virtual sound localization, *J. Acoust. Soc. Am.*, 108, 3088-3091 (2000)
- [15] K. Iida, Y. Ishii, and S. Nishioka: Personalization of head-related transfer functions in the median plane based on the anthropometry of the listener's pinnae, *J. Acoust. Soc. Am.*, 136, 317-333 (2014)
- [16] Lord Rayleigh: Acoustical observations, *Phil. Mag.* 3, 6th series, 456-464 (1877)
- [17] Lord Rayleigh: On our perception of sound direction, *Phil. Mag.* 13, 6th series, 214-232 (1907)
- [18] F. E. Toole and B. M. Sayers: Lateralization judgements and the nature of binaural acoustic images, *J. Acoust. Soc. Am.*, 37, 319-324 (1965)
- [19] 飯田, 森本: 空間音響学; コロナ社, 13-17, 東京 (2010)
- [20] B. McA. Sayers: Acoustic-image lateralization judgement with binaural tones, *J. Acoust. Soc. Am.*, 36, 923-926 (1964)
- [21] V. R. Algazi, C. Avendano, and R. O. Duda: Estimation of a Spherical-Head Model from Anthropometry, *J. Audio Eng. Soc.* 49(6), 472-479 (2001)
- [22] 渡邊, 岩谷, 行場, 鈴木, 高根: 身体特徴量に基づく両耳間時間差の予測に関する検討, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, 10(4), 609-617 (2005).
- [23] K. Iida, M. Itoh, A. Itagaki, and M. Morimoto: Median plane localization using a parametric model of the head-related transfer function based on spectral cues, *Applied Acoustics*, 68, 835-850 (2007)
- [24] E. A. G. Shaw and R. Teranishi: Sound pressure generated in an external-ear replica and real human ears by a nearby point source, *J. Acoust. Soc. Am.* 44, 240-249 (1968)
- [25] B. F. G. Katz and M. Noisternig: A comparative study of interaural time delay estimation methods, *J. Acoust. Soc. Am.* 135, 3530-3540 (2014)
- [26] 黒沢, 都木, 山口: 頭部伝達関数と方向弁別能力について, *日本音響学会誌*, 38(3), 145-151 (1982)
- [27] S. Chatterjee and A. S. Hadi: *Regression Analysis by Example*, 5th ed., John Wiley and Sons, Hoboken, NJ (2012).
- [28] R. S. Woodworth and R. Schlosberg: *Experimental Psychology*, Holt, Rinehart and Winston, 349-361 (1954)
- [29] A. W. Mills: On the minimum audible angle, *J. Acoust. Soc. Am.*, 30, 237-246 (1958)

(2017年3月23日受付)

[著者紹介]

石井 要次



2017年 千葉工業大学工学研究科満期退学。同年一般財団法人小林理学研究所研究員、現在に至る。空間音響に関する研究に従事。

飯田 一博 (正会員)



1986年神戸大学大学院工学研究科修了。1986年パナソニック株式会社入社。2007年千葉工業大学教授、現在に至る。空間音響に関する研究に従事。博士(工学)。