

受聴者の頭部形状による両耳間時間差の推定 —重回帰モデルの再検討—*

○石井要次, 木崎尚也, 吉田恵里, 飯田一博 (千葉工大)

1 はじめに

頭部伝達関数(HRTF)に含まれる方向知覚の手がかりは, 前後上下方向ではスペクトラルノッチを始めとするスペクトラルキュー, 左右方向では両耳間時間差(ITD)と両耳間レベル差(ILD)の両耳間差キューである. しかし, スペクトラルキューと同様に, 両耳間差キューにも個人差が存在する.

受聴者自身が試聴することなく適したHRTFを得る方法について多くの研究が進められている. スペクトラルキューについては, 受聴者の耳介形状から推定する方法が提案されている[1]. 本研究で取り上げるITDについては, Algaziら[2]は頭部を球と仮定し, 受聴者の頭部の幅, 長さ, 奥行きから適切な球の半径を推定し, その球の半径からITDを求める方法を提案した. しかし, 側方ではITDの推定誤差が大きくなることを報告している. 渡邊ら[3]は被験者の方位角に対するITDの振る舞いを正弦関数の和でモデル化した. 我々は前報[4]で, 重回帰分析を用いて, 受聴者の頭部形状から水平面内12方向のITDを直接推定することを試みたが, 高い推定精度は得られなかった. その後, 重回帰モデルに改良を加えた結果, 従来法[2]よりも高い精度でITDを推定することが可能となったので報告する.

2 両耳間時間差

2.1 頭部インパルス応答の測定

ITDは, 被験者本人のhrir(head-related impulse response)から算出した. hrirは, 式1によって得られるHRTF(ω)を逆フーリエ変換することで求めた.

$$HRTF(\omega) = G(\omega) / F(\omega) \quad (1)$$

ここで, $G(\omega)$ は無響室で測定したスピーカから外耳道入口までの伝達関数, $F(\omega)$ は無響室で測定した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伝達関数である.

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1.2mである. スピーカからSwept-Sine Signal(2¹⁸サンプル)を放射し, 被験者の外耳道入口に装着したイヤーマイクロホン[1]で受音した(外耳道閉塞状態). 測定信号および録音のサンプリング周波数は48kHzである. 被験者の頭部は固定していないが, 被験者の頭部および胴体に傾きがないかについては, 測定直前に2名の実験者が被験者の前方および側方から目測で確認した. 被験者は20代の33名(男性27名, 女性6名)である.

2.2 両耳間時間差の算出

両耳間時間差は以下の方法により算出した.

1. hrirに1.6kHz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)をかける.
2. サンプリング周波数を8倍(48kHz×8=384kHz)に変換する(時間分解能2.604μs).
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.

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

ここで, $|\tau| \leq 1000\mu s$ とし, 添え字のl,rは左耳,右耳を表す.

33名のITDをFig.1に示す. 正の値は左耳の到達時刻が遅いことを表す. 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. 0, 180°では0μs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.

Table 1に, 各方向のITDの最大値(Max), 最小値(Min), 個人差の範囲(Max-Min), 中央値(Med.), 標準偏差(Std.)を示す. 各方向の個人差の範囲(Max-Min)は, 83.3–148.4μsであ

*Estimation of interaural time difference based on the anthropometry of the listener's head
—reconsideration of the multiple regression analysis—
by ISHII, Yohji, KIZAKI, Naoya, YOSHIDA, Eri and IIDA, Kazuhiro (Chiba Institute of Technology).

り、個人差の大きい方向は 60, 120, 240, 300° (真横±30°)と 210°であった。真横(90, 270°)では個人差が小さい傾向にある。90°の ITD の分布範囲は、60°のそれと互いに重なり合っていた。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。

3 頭部形状

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 名について 15 箇所(x1, x5, x21-x26, x28, x29)の頭部形状を計測した(Fig 2)。なお、Algazi ら[2]は 3 箇所(x21, x22, x29)を用い、渡邊ら[3]は 11 箇所(x1, x5, x21, x22, x24, x29 および他の 5 箇所)を用いている。

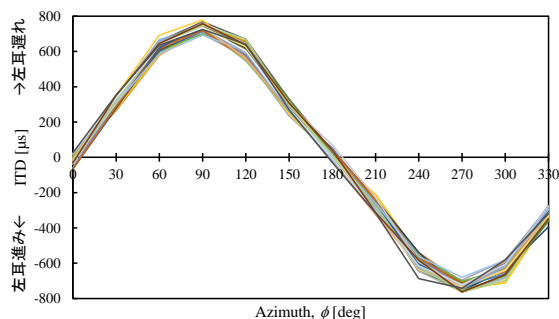


Fig. 1 33 名の ITD

Table 1 ITD の統計値。最大値(Max), 最小値(Min), 中央値(Med.), 標準偏差(Std.) [μs]

Azm.	Max	Min	Max-Min	Med.	Std.
0	26.0	-65.1	91.1	15.6	22.5
30	354.2	265.6	88.5	-307.3	24.2
60	692.7	578.1	114.6	-630.2	25.7
90	778.6	692.7	85.9	-734.4	19.6
120	669.3	546.9	122.4	-619.8	35.2
150	330.7	234.4	96.4	-278.6	22.5
180	70.3	-28.6	99.0	-13.0	23.1
210	-210.9	-325.5	114.6	270.8	28.8
240	-539.1	-687.5	148.4	604.2	35.0
270	-679.7	-763.0	83.3	737.0	21.1
300	-580.7	-710.9	130.2	638.0	34.2
330	-273.4	-393.2	119.8	317.7	27.8

15 箇所のうち x1, x5 はデジタルノギス, x21, x22, x24, x29 は触角計, x23, x25, x26, x28 は巻尺を用いて計測した。最小読取値は、デジタルノギスでは 0.01mm, 触角計と巻尺では 1mm である。Table 2 に計測結果を示す。RSD は変動係数(標準偏差を平均値で割ったもの)で、相対的なばらつきを表す。耳介の幅(x1)や長さ(x5)で大きい傾向にあり、耳介以外では、頭周(x25, x26)と肩幅(x24) が大きい傾向にある。頭部の幅(x21)の RSD は小さい傾向にある。

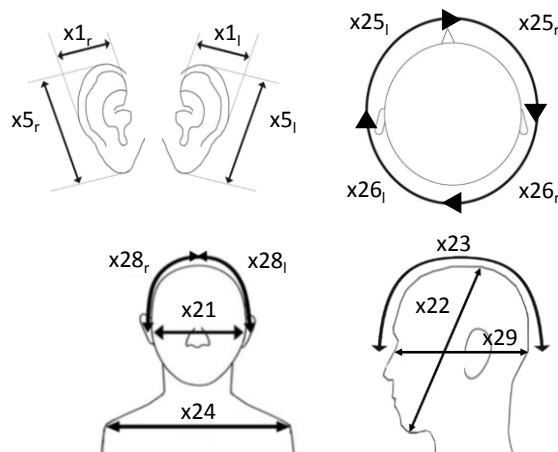


Fig. 2 頭部形状の計測箇所

Table 2 頭部形状の計測結果 [mm]

	Ave.	Max	Min	Max-Min	Std	RSD
x1 _l	31.79	35.32	27.55	7.77	2.1	0.066
x1 _r	33.47	36.8	27.09	9.71	2.3	0.069
x5 _l	63.32	72.44	51.4	21.04	4.4	0.070
x5 _r	62.67	71.38	50.7	20.68	4.5	0.071
x21	143	152	134	18	5.6	0.039
x22	246	266	227	39	9.9	0.040
x23	420	461	386	75	16.6	0.039
x24	393	439	337	102	23.9	0.061
x25 _l	152	167	136	31	7.4	0.049
x25 _r	159	185	148	37	8.1	0.051
x26 _l	144	163	130	33	8.1	0.056
x26 _r	145	176	120	56	12.0	0.083
x28 _l	195	217	176	41	8.2	0.042
x28 _r	197	211	185	26	7.2	0.036
x29	185	201	170	31	7.9	0.043

Table 3 頭部形状と各方向の ITD の単相関係数 r. : 10% 有意(|r| > 0.291)

Azm.	x1 _l	x1 _r	x5 _l	x5 _r	x21	x22	x23	x24	x25 _l	x25 _r	x26 _l	x26 _r	x28 _l	x28 _r	x29
0	-0.16	-0.03	0.03	0.00	-0.45	-0.20	-0.13	-0.14	-0.40	-0.28	0.19	-0.09	-0.18	-0.17	-0.06
30	0.14	0.09	0.19	0.30	0.20	0.05	-0.05	0.03	0.02	0.18	-0.04	0.01	-0.04	0.16	0.10
60	0.35	0.31	0.22	0.36	0.54	0.34	0.24	0.28	0.29	0.44	0.11	0.12	0.20	0.39	0.41
90	0.27	0.24	0.34	0.37	0.61	0.34	0.33	0.24	0.43	0.50	0.16	0.37	0.27	0.61	0.57
120	-0.10	-0.05	0.11	-0.05	0.10	-0.03	0.21	-0.06	0.04	0.02	0.28	0.38	0.09	0.22	0.38
150	0.03	0.00	-0.21	-0.28	0.01	-0.02	0.20	-0.02	-0.10	-0.05	0.47	0.21	-0.29	0.14	0.35
180	0.19	0.12	-0.19	-0.22	0.35	0.24	0.07	0.05	0.21	0.26	-0.17	0.11	0.14	0.14	0.25
210	-0.09	0.04	-0.24	-0.40	0.00	0.20	0.16	-0.01	0.12	0.07	-0.03	-0.02	0.25	0.06	0.05
240	-0.08	0.03	-0.40	-0.39	-0.23	-0.13	-0.26	-0.10	-0.07	-0.16	-0.32	-0.09	-0.20	-0.26	-0.23
270	-0.35	-0.25	-0.51	-0.56	-0.65	-0.33	-0.28	-0.46	-0.52	-0.58	-0.21	-0.34	-0.07	-0.64	-0.46
300	-0.36	-0.26	-0.16	-0.13	-0.54	-0.38	-0.14	-0.51	-0.42	-0.63	0.15	-0.18	-0.01	-0.41	-0.42
330	-0.14	-0.12	0.27	0.20	-0.25	-0.16	-0.08	-0.02	-0.19	-0.31	-0.09	0.02	0.08	-0.08	-0.16

4 頭部形状による各方向の ITD の推定

4.1 単回帰分析

頭部形状と各方向の ITD の単相関係数を Table 3 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 ($|r| > 0.291$) ことを表す.

側方で相関関係が認められる部位が多い傾向にある. 最も多くの方向で有意に相関関係が認められる部位は, x_{5r} , x_{21} , x_{29} であった (12 方向中 6 方向). x_{21} の 270° において相関係数の絶対値が最も高くなった ($r=0.65$). x_{21} と x_{29} は, Algazi らおよび渡邊らによって ITD の推定に高く寄与する部位であると報告されており, 本研究においても同様の結果となった.

4.2 重回帰分析

頭部形状を説明変数, 各方向の ITD を目的変数として重回帰分析を行った (式 3).

$$ITD(s, \phi) = a_1x_1 + a_5x_5 + \dots + a_{29}x_{29} + b \text{ [}\mu\text{s]} \quad (3)$$

ここで, s は被験者, ϕ は方位角である. さらに以下の 2 つの条件を設定し, 総当たり法によって変数選択を行った.

- 1) 全ての説明変数の危険率が 10% 未満
- 2) 重相関係数が最大

Table 4 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 (b は定数項) を示す. 各方向における重相関係数は $0.30-0.77$ であり, 側方で高くなり, $30, 330^\circ$ で低くなる傾向がある. 各方向の残差の絶対値の平均は $9.8-20.6 \mu\text{s}$ であり, 全方向の残差の絶対値の平均は $15.9 \mu\text{s}$ であった. 重相関係数が低い傾向にあった $30, 330^\circ$ における残差は, それぞれ $19.4, 19.2 \mu\text{s}$ であり相対的にやや大きい値となった.

説明変数として最も多くの方向で選ばれた部位は x_{5r} で 10 方向であった. 次いで x_{21} で 6 方向であった. x_{1l} と x_{26r} はいずれの方向においても説明変数として選ばれなかった.

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.

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

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. 本研究で用いたすべての説明変数の VIF (15 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 [5].

5 ナイーブな被験者の推定精度

4.2 節で求めた回帰モデル (Table 4) を用いて ITD の推定精度を検証した. 被験者は重回帰分析に含めていない 20 代の女性 2 名 (A, B) と男性 2 名 (C, D) の 4 名である. 推定誤差を Table 5 に示す. 方向ごとの推定誤差の平均値は, $8.1-26.5 \mu\text{s}$ であり, 真横 ($90, 270^\circ$) で小さい傾向にある. 被験者ごとの全方向の平均推定誤差は, $15.9-23.9 \mu\text{s}$ であった. 全被験者の全方向の平均推定誤差は $19.2 \mu\text{s}$ であった.

次に, 提案法と Algazi ら [2] の方法の推定誤差 (Table 6) を比較する. 上記のナイーブな被験者 4 名に対して, Algazi らの重回帰式から被験者の頭部半径 D を導出し ITD を求めた. 方向ごとの推定誤差の平均値は, $23.2-143.7 \mu\text{s}$ であり, 彼らが論文で述べているように, 側方で推定誤差が大きくなる傾向がみられる. 被験者ごとの全方向の平均推定誤差は $62.2-80.2 \mu\text{s}$ であり, いずれの被験者においても本研究の推定誤差より大きい. また, 全被験者

Table 4 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

Azm.	r	p	$E[\mu\text{s}]$	Regression coefficient															
				a_{1l}	a_{1r}	a_{5l}	a_{5r}	a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{24}	a_{25l}	a_{25r}	a_{26l}	a_{26r}	a_{28l}	a_{28r}	a_{29}	b
0	0.67	1.6E-03	13.1				-2.44	2.50				1.53					-1.14	-212	
30	0.30	9.3E-02	19.4				-1.61											-210	
60	0.54	1.2E-03	17.8					-2.49										-273	
90	0.76	4.3E-05	9.8					-1.09			0.25					-1.07	-1.01	-277	
120	0.74	5.0E-04	18.4		7.30	-5.92	6.11		1.56								-4.55	-406	
150	0.74	1.2E-04	11.1				2.15						-1.27		0.85		-1.11	-194	
180	0.62	6.9E-04	14.8				3.24	-2.94										204.8	
210	0.59	6.1E-03	17.7				4.07				-0.36				-1.30			411.1	
240	0.61	2.2E-02	20.6				5.12			1.07	-0.58	-3.10	2.03					207.2	
270	0.77	6.1E-06	10.8				1.42					0.85				1.10		292.8	
300	0.75	7.6E-05	18.7				-3.34	3.70			0.74			-1.06				181.1	
330	0.49	1.6E-02	19.2				-3.21	2.72										129.2	
Ave.	0.63	1.2E-02	15.9																

Table 5 本研究の回帰式による
推定誤差 [μs]

Azm.	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

Table 6 Algazi らの重回帰式による
推定誤差 [μs]

Azm.	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

Table 7 中央値による誤差 [μs]

Azm.	Subjects				Ave.
	A	B	C	D	
0	5.2	33.9	44.3	26.0	27.3
30	26.0	39.1	13.0	10.4	22.1
60	41.7	57.3	7.8	26.0	33.2
90	36.5	13.0	7.8	18.2	18.9
120	54.7	26.0	13.0	13.0	26.7
150	7.8	15.6	0.0	33.9	14.3
180	7.8	44.3	28.6	7.8	22.1
210	7.8	44.3	10.4	13.0	18.9
240	2.6	41.7	18.2	13.0	18.9
270	26.0	10.4	5.2	13.0	13.7
300	39.1	18.2	5.2	20.8	20.8
330	18.2	7.8	2.6	31.3	15.0
Ave.	22.8	29.3	13.0	18.9	21.0

Table 8 本研究の回帰式による
方位角誤差 [deg.]

Azm.	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

Table 9 Algazi らの回帰式による
方位角誤差 [deg.]

Azm.	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

Table 10 中央値による
方位角誤差 [deg.]

Azm.	Subjects				Ave.
	A	B	C	D	
0	-	-	-	-	-
30	3.0	4.7	1.4	1.1	2.6
60	5.4	7.7	1.0	2.8	4.2
90	-	-	1.4	3.3	2.4
120	7.4	3.3	1.6	1.4	3.4
150	0.9	1.6	0.0	3.4	1.5
180	-	-	-	-	-
210	0.9	6.3	1.1	1.4	2.4
240	0.3	5.6	2.4	1.5	2.5
270	-	-	0.0	2.4	1.2
300	5.0	2.2	0.5	2.2	2.5
330	2.0	0.7	0.2	2.8	1.4
Ave.	3.1	4.0	1.0	2.2	2.4

の全方向の平均推定誤差は 70.7 μs であり、本研究の平均推定誤差(19.2μs)に比べて約 3 倍であった。

さらに、提案法と ITD の中央値(Table 1 の Med.)を用いた場合の誤差(Table 7)を比較する。方向ごとの平均誤差は 13.7–33.2 μs であった。被験者ごとの全方向の平均推定誤差は 13.0–29.3 μs であった。全被験者の全方向の平均誤差は 21.0 μs であり、提案法の推定誤差よりも 1.8 μs 大きい。

次に、推定した ITD を方位角 φ に変換して、方位角誤差を求めた(Table 8–10)。方位角の算出には Woodworth の式を用いた(式 5)。

$$\sin \phi + \phi = \text{ITD} \times 2c / D \quad (5)$$

ここで、c は音速、D は被験者の頭部半径である。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除外した。提案法の平均方位角誤差は 2.3° であった Algazi らおよび中央値の平均角度誤差はそれぞれ 9.6, 2.4° であった。

以上より、提案法では、Algazi ら[2]と比べて精度良く推定できる。また、中央値を用いた場合とはほぼ同じ精度であるが、中央値では原理的に ITD が中央から離れた被験者ほど推定誤差が大きくなるという問題がある。

6 結論

本研究では、受聴者の頭部形状から水平面内 12 方向(30°間隔)の ITD を直接推定した。

- 1) 33 名の水平面内 12 方向の ITD の個人差の範囲は、83.3–148.4 μs であった。
- 2) 各方向の ITD を目的変数、15 箇所の頭部形状を説明変数とした重回帰分析を行った。重相関係数は 0.30–0.77 であった。
- 3) 4 名のナイーブな被験者を用いて推定精度を検証した。平均推定誤差は 19.2 μs であり、Algazi らの方法よりも 51.5 μs 小さい。
- 4) 本研究の平均方位角誤差は 2.3° であり、Algazi らの方法よりも 7.3° 小さい。

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] Iida *et al.*, *J. Acoust. Soc. Am.* 136(1), 317–333, 2014
- [2] V.R. Algazi *et al.*, *J. Audio Eng. Soc.* Vol. 49, 472–479, 2001
- [3] 渡邊ら, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 10, No. 4, 609–617, 2005
- [4] 石井ら, 音講論(秋), 447–448, 2015
- [5] Chatterjee, S. and Hadi, A. S., “Regression Analysis by Example, 5th ed.”, John Wiley and Sons, Hoboken, NJ, 2012