

パラメトリック頭部伝達関数と両耳間差を用いた 上半球面音像制御*

○東岡泰一（日東紡音響エンジニアリング）、伊藤元邦（パナソニック）、
飯田一博（千葉工大・工）、森本政之（神戸大院・工学研）

1 はじめに

従来、頭部伝達関数(HRTF)に方向感の手がかりが含まれており、その HRTF を忠実に再現することで、任意方向に音像を制御できることが明らかにされている[1]。しかし、HRTF は受聴者間で個人差があり、他人の HRTF を再現すると定位精度が下がる場合がある[1]。従って、任意の方向について音像を再現するためには、個人の HRTF をあらゆる方向について測定する必要がある、実用性に乏しい。

Morimoto and Aokata[2]は、音像方向を Fig. 1 に示す座標系で表すと、側方角 α は両耳間差キューによって、上昇角 β はスペクトラルキューによって知覚されることを示した。さらに、Blauert [3]の方向決定帯域が正中面以外の矢状面についても成り立つことを明らかにした。この結果に基づき、Morimoto and Aokata は、Fig. 1 に示す座標系において、上昇角 β を知覚するためのスペクトラルキューは矢状面間で共通であるという仮説を立てている。この仮説に基づき Morimoto *et al.* [4]は、正中面のみの実測 HRTF と水平面前方の両耳間差を用いて上半球面の音像定位実験を行った。上半球面の任意の方向に音像を制御できたことから、上記仮説の妥当性を示し、個人差の問題を正中面のみ限定できる可能性を示した。

一方、Iida *et al.* [5]は、HRTF の振幅スペクトル中の特定のピーク及びノッチの全部、あるいは一部のみを用いて再構成した、パラメトリック HRTF を提案した。これを用いることで、正中面の任意の方向に音像を制御できることを示し、それら特定のピーク及びノッチが上昇角知覚の手がかりであることを示した。また、板垣ら[6]はこれらのピークとノッチが、各矢状面間で共通して見られることを明らかにしている。

Morimoto *et al.* [2] の仮説が正しければ、これら矢状面間で共通してみられる特定のピーク及びノッチが、各矢状面における上昇角知覚の手がかりとして寄与していると考えられる。また、上昇角の情報が矢状面間で共通のスペクトラルキューで与えられるならば、1つの矢状面、たとえば正中面のスペクトラルキューのみを用いて、Morimoto *et al.* が示した手法[4]を用いて上半球面全体の音像制御を行うことができると考えられる。この手法を用いることで、個人差の問題は正中面の手がかりのみに限定することができる。

本研究では、パラメトリック HRTF と水平面の両耳間差を用いたシミュレーション実験を行い、方向定位の手がかりに基づいた、新たなシミュレーション方式の有効性について検討する。

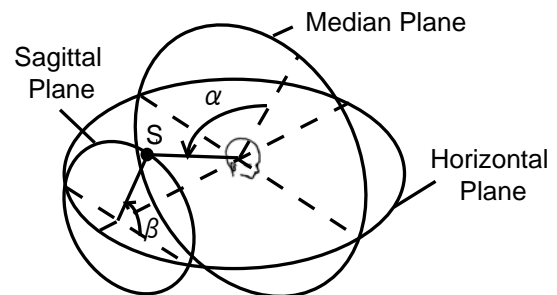


Figure 1 Definition of coordinate system.

2 実験方法

2.1 パラメトリック頭部伝達関数および両耳間差

提示したパラメトリック頭部伝達関数（パラメトリック HRTF）は、被験者本人の正中面 7 方向($\beta=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$)の実測 HRTF から抽出したピーク及びノッチのうち、全てを用いて再構成したパラメトリック HRTF(All)である。先行研究[7]にしたがって各被験者の実測頭部伝達

* Upper hemisphere sound localization using parametric head-related transfer functions and interaural differences.

関数(実測 HRTF)から、ピーク及びノッチを抽出し、被験者ごと、方向ごとのパラメトリック HRTF を作成した。

両耳間差として被験者に両耳間時間差 (ITD) と両耳間レベル差 (ILD) を提示した。ITD は、水平面前方の 4 方向 ($\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$) で測定した HRTF に、音源信号と同じ 280 Hz–17.1 kHz の広帯域ホワイトノイズを畳み込みこんだ信号を作成し、両耳間相関度が最大となる時間差と定義した。ILD は、ITD と同じ信号から、正面 ($\alpha = 0^\circ$) での値を 0 dB としたときの各耳の相対音圧レベルを求め、その値の左右差を ILD と定義した。Table 1 に被験者ごとの ITD と ILD を示す。

Table 1 Measured interaural time difference (ITD), interaural level difference (ILD), and level difference for each ear.

Subject	Lateral angle α (deg.)	ITD (ms.)	ILD (dB)	Level difference (dB)	
				Left ear	Right ear
C	0	0	0	0	0
	30	0.29	7.8	-5.8	2.0
	60	0.54	11.9	-10.6	1.3
	90	0.69	14.4	-15.5	-1.1
D	0	0	0	0	0
	30	0.31	11.3	-7.2	4.1
	60	0.58	18.6	-14.0	4.6
	90	0.73	18.8	-16.0	2.9
H	0	0	0	0	0
	30	0.27	11.2	-7.5	3.6
	60	0.52	17.6	-12.7	4.9
	90	0.69	20.7	-17.3	3.4
K	0	0	0	0	0
	30	0.25	11.7	-7.6	4.0
	60	0.50	17.2	-12.6	4.5
	90	0.67	18.9	-15.0	3.9

2.2 被験者

被験者は、学生 8 名において、予め正中面の実測 HRTF 及びパラメトリック HRTF を用いたシミュレーション音場における定位能力を確認し、定位精度の良かった学生 4 名 (C, D, H, K) である。

2.3 刺激

音源信号は 280 Hz–17.1 kHz の広帯域ホワイトノイズである。これに各被験者のパラメトリック HRTF を畳み込み両耳間差を加えたもの (正中面 7 方向 \times 両耳間差 4 方向の 28 個) を刺激として用いた。なお、ITD については左耳の HRTF に Table 1 で示した値と等しい時間遅れを加え、ILD については Table 1 に示した正中面との相対音圧レベルを各耳に加えることで再現した。

刺激の提示時間は 1.2 s (前後に 0.1 s の立ち上がり/立ち下がりを含む)、提示レベルは外耳道入り口で 60 dB である。イヤースピーカから外耳道入り口までの伝達特性を補正するため、以下の手順で刺激を作成し、提示した。被験者を無響室内の椅子にイヤーマイクとイヤースピーカを装着した状態で座らせ、再生系の伝達関数 $C(\omega)$ を測定した。測定後はイヤーマイクのみを取り外し、刺激を式(2.1)によって算出し被験者に提示した。ここで $S(\omega)$ は音源信号、 $H(\omega)$ はパラメトリック HRTF である。

$$P(\omega) = S(\omega) \cdot H(\omega) / C(\omega) \quad (2.1)$$

2.4 実験方法および回答方法

28 個の刺激をランダムに並べたものを 1 試行とし、それぞれ 10 試行からなる実験を 5 つのセッションに分けて行った。実験に先立って、1 セッションの練習を行った。

被験者は回答用パソコンを用いて刺激の提示及び回答を行った。被験者自ら刺激の提示の操作を行い、提示された後に、知覚したすべての音像の方向の方位角と仰角をマッピング法により回答させた。被験者は刺激の方向がわかるまで同じ刺激を繰り返し聴くことができるが、次の刺激に移った後は戻ることができない。

3 実験結果

3.1 回答分布

Fig. 2 に回答分布の一例として被験者 C の回答分布を示す。図に示す半円 1 つが、1 つの刺激に対する回答分布を表している。円の半径方向は側方角 α を、円周方向は上昇角 β を表す。最も外側の円弧は正中面 ($\alpha = 0^\circ$) を、中心は真横 ($\alpha = 90^\circ$) を意味している。提示 (シミュレート) した α と β はそれぞれ実線で示している。従って、それらの線の交点がターゲット方向に相当する。回答は、 α と β ともに 5° ごとにまとめて表示した。円の直径が回答数を表している。側方角 α と上昇角 β のそれぞれに着目し回答分布について考察する。

A. 側方角 α の回答分布について
 水平面 ($\beta = 0^\circ$) を提示した場合

両耳間差は水平面前方で実測した HRTF を基に算出しているため、 $\beta = 0^\circ$ においては、実測 HRTF とほぼ等しい両耳間差が提示されると考えられる。 $\beta = 0^\circ$ についての回答結果を見ると、提示した α が大きくなるに伴って回答分布が中心へ寄っている。他の被験者についても同様の傾向が見られた。従って、本シミュレーションシステムにおいて、側方角 α が正確にシミュレートできているといえる。

水平面以外 ($\beta = 30^\circ \sim 180^\circ$) を提示した場合

$\beta = 0^\circ$ 以外の方向について同様に見ると、それぞれの β について α が大きくなるに従って、回答分布が中心へ寄っている。これは各被験者に共通して見られた。すなわちこの結果は、両耳間差のみが側方角知覚のキューと

なっていることを示唆し、Morimoto and Aokata の主張[2]と一致する。

側方を提示した場合に、 α が大きくなるに従い回答のばらつきが大きくなる傾向がある。これは水平面定位の弁別限[7]、水平面上における側方角定位の弁別限[8]の傾向と一致している。また、 $\beta = 0^\circ$ の傾向と異なり、側方を提示した場合に実測 HRTF の分布に比べてより円の外側、すなわち正中面寄りに回答が分布する傾向が見られる。被験者 C においては $\beta = 120^\circ, 150^\circ$ にその傾向が見られる。また、 $\alpha = 90^\circ$ を提示した場合には、 $\beta = 60^\circ \sim 180^\circ$ で正中面寄りに回答している。これら α の回答のばらつきの傾向は他の各被験者にも共通してみられ、実測 HRTF と両耳間差を用いてシミュレーションを行った従来の研究[4]の結果とも一致する結果である。

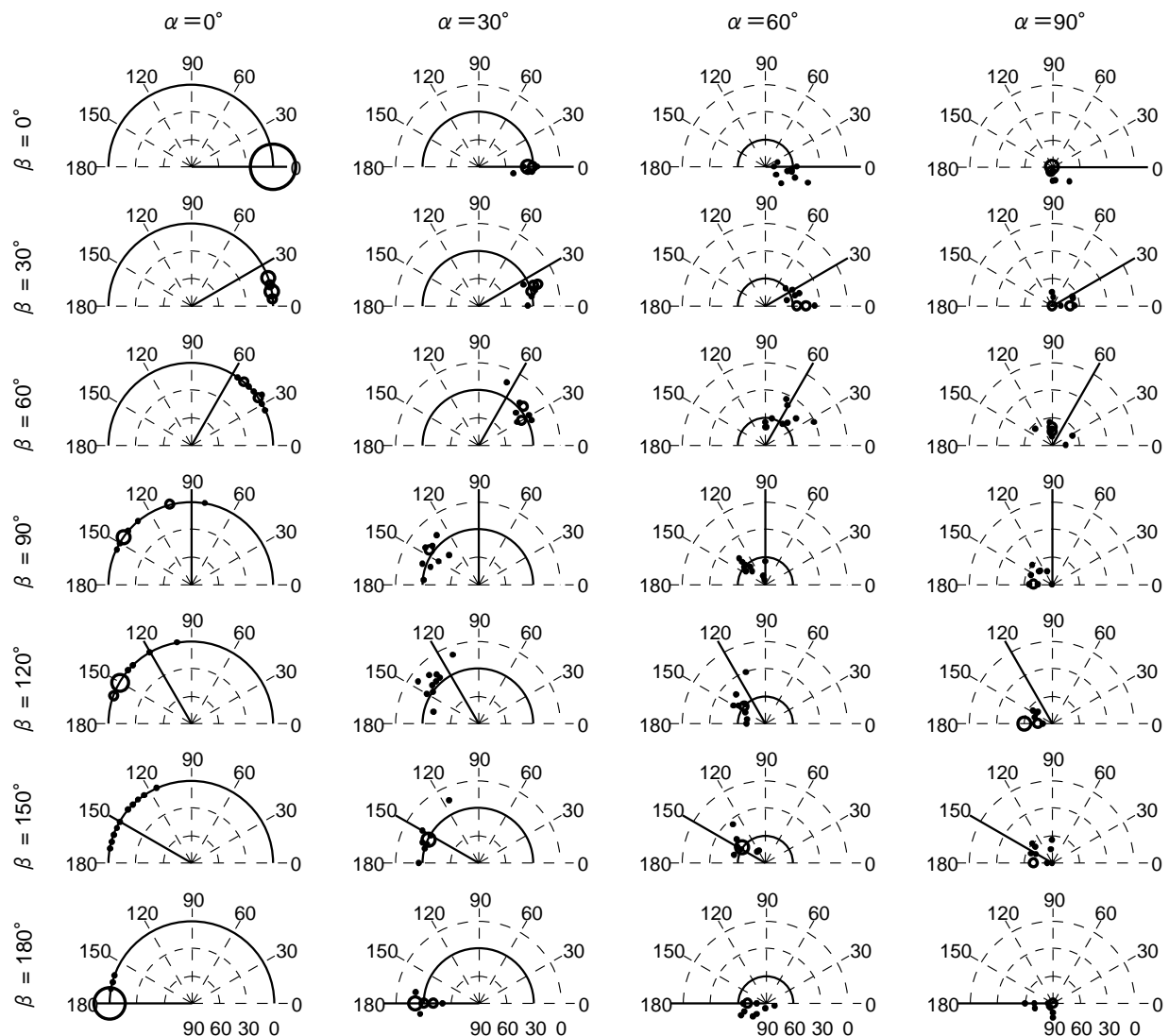


Figure 2 Distribution of responses for subject C.

B. 上昇角 β の回答分布について

正中面 ($\alpha=0^\circ$) を提示した場合

続いて β の回答傾向について考察する。まず $\alpha=0^\circ$ については、おおよそターゲット方向と回答方向が一致しており、精度良く定位した。被験者 D, K については正面方向を提示した際に回答が若干上昇する傾向があった。

側方 ($\alpha=30^\circ \sim 90^\circ$) を提示した場合

次に、側方を提示した場合の回答分布について考察する。被験者 C については、 $\alpha=60^\circ$ で $\beta=0^\circ$ を提示した場合に水平面よりも下方に音像をいくつか知覚しているが、それ以外の方向については $\alpha=0^\circ$ の分布とおおよそ似ており、精度良く定位できていることがわかる。他の被験者についてもおおよそターゲット方向と回答方向は一致していたが、その回答傾向には個人差があった。被験者 D については、 $\beta=60^\circ$ のときに後方に音像を知覚した。被験者 H については $\beta=90^\circ$ を提示したときに回答が後方に寄る傾向があったが、これは正中面で見られたのと同じ傾向である。また、 $\alpha=60^\circ$ で $\beta=0^\circ$ を提示した場合に回答が $\beta=90^\circ$ に寄る傾向があった。被験者 K については $\beta=0^\circ$ を提示したときに、ほぼ全ての音像を後方に知覚したという結果が出た。

3.2 平均定位誤差

定位精度について、式(3.1)により定義される平均定位誤差を用いて定量的に検討する。S は提示した方向、R は音像の方向である。

$$e = \sqrt{|S - R|} \quad (3.1)$$

Table 2 は平均定位誤差を、側方角 α と上昇角 β について被験者ごとに求めたものである。まず、側方角 α の定位誤差(Table 2 (a))について見ると、提示した α が大きくなるに従って誤差も大きくなっていることがわかる。前述した水平面定位の弁別限[7][8]と同様の傾向である。また Morimoto *et al.* の実験結果[4]と同程度の値であり、水平面前方の両耳間差のみを用いて、 α を精度良くシミュレートすることができるといえる。

次に、上昇角 β の定位誤差(Table 2 (b))について見ると、 $\alpha=0^\circ$ を提示した場合について比較すると、各被験者とも、パラメトリック HRTF を用いた正中面定位[5]で示されている

誤差と同程度の値である。続いて、側方を提示した場合についても、前後誤判定のあった被験者 K を除くと、Morimoto *et al.* の実験結果[4]と近い値を示していることがわかる。正中面のスペクトラルキューによって、側方の上昇角も精度良くシミュレートできたと行うことができる。

Table 1 Localization errors in lateral angle α and vertical angle β

(a) Lateral angle α					(b) Vertical angle β			
Parametric HRTF (All)					Parametric HRTF (All)			
Sub.	Target angle α (deg.)				Sub.	Target angle α (deg.)		
	0	30	60	90		0	30	60
C	0.4	6.8	9.8	15.7	C	17.6	19.1	23.9
D	5.2	13.6	19.6	15.0	D	19.2	23.6	39.4
H	1.0	7.7	11.6	28.3	H	10.6	19.4	30.1
K	0.4	9.4	15.4	25.4	K	15.1	35.2	44.4
Ave.	1.7	9.4	14.1	21.1	Ave.	15.6	24.3	34.5

Result of Morimoto et.al.					Result of Morimoto et.al.			
Sub.	Target angle α (deg.)				Sub.	Target angle α (deg.)		
	0	30	60	90		0	30	60
IT	0	7	15	17	IT	10	11	22
NS	0	6	13	17	NS	14	16	27
YG	4	9	21	34	YG	21	13	15
Ave.	1	7	16	23	Ave.	15	13	21

4 結論

本研究では、パラメトリック HRTF と両耳間差を用いた上半球面のシミュレーション実験を行い、当シミュレーション方式が、音像制御方式として有効であることを示した。

参考文献

- [1] Morimoto and Ando, J. Acoust. Soc. Jpn. (E), 1(3), 167-174, 1980.
- [2] Morimoto and Aokata, J. Acoust. Soc. Jpn. (E), 5(3), 165-173, 1984.
- [3] Blauert, *Acustica*, 22, 205-213, 1969-70.
- [4] Morimoto *et al.*, *Acoust. Sci. & Tec.*, 24(5), 267-275, 2003.
- [5] Iida *et al.*, *Applied Acoustics*, 68, 835-850, 2007.
- [6] 板垣ら, 音講論(秋), pp. 301-302, 2006.
- [7] 黒澤ら, 日本音響学会誌, 38(3), 145-151, 1982.
- [8] Blauert, "Spatial Hearing (revised edition)," MIT press (MA), 1997.