

正中面のbest-matching頭部伝達関数と両耳間時間差による3次元音像制御*

☆宮本 雄太, 石井 要次, 飯田 一博 (千葉工大)

1 はじめに

頭部伝達関数(HRTF)を受聴者の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ことが知られている[1]. しかし, 他人のHRTFを用いた場合, 前後誤判定, 音像の上昇などの現象がしばしば発生する.

任意の受聴者に適合したHRTFを得る方法として, 無響室での測定, 耳介のモデリングによる数値計算, HRTFデータベースから試聴して選出などの方法があるが, 特別な設備や装置が必要となるため困難である.

Iida *et al.* [2]は, 実測や試聴なしに受聴者に適合するHRTFを提供する方法として, 受聴者の耳介形状から第1, 第2ノッチ(N1, N2)周波数を推定し, 推定したN1, N2周波数に最も近いHRTF (best-matching HRTF)をデータベースから選出する方法を提案した. 彼らは, 選出したbest-matching HRTFを用いて上半球正中面内7方向(0-180°, 30°間隔)で音像定位実験を行い, 目標方向0°と180°で被験者本人の実測HRTFと同等な定位精度が得られることを示した. しかし, 彼らの実験では正中面内での検証に留まっているため, 任意の3次元方向への展開が課題となっている.

任意の3次元方向へ展開する方法として, Morimoto *et al.*[3]が提案した正中面内のHRTFと両耳間差キューによる3次元音像制御が有効であると考えられる. 彼らは, 被験者本人の上半球正中面内の実測HRTFと水平面内の両耳間差を用いて音像定位実験を行った. その結果, 側方角と上昇角は, 両耳間差と正中面内の実測HRTFによって独立して制御でき, 側方角の制御については, 両耳間レベル差(ILD)に比べて両耳間時間差(ITD)が優位に作用することを示した.

本研究では, 正中面内のbest-matching HRTFにITDを与えて3次元方向での音像定位実験を行った.

2 実験方法

実験は防音室で行った. 実験システムは, ノートPC, オーディオインターフェース, アンプ, オープンエアヘッドホン(AKG K-1000), A/Dコンバータ, イヤーマイクロホンで構成した. 再生系伝達関数をキャンセルするため, 実験前にヘッドホンからイヤーマイクまでの伝達関数を測定し, その逆特性を刺激に畳込んだ. 音源信号は200-17000 Hzのホワイトノイズである.

目標方向は, 側方角 $\alpha=0, 30, 60^\circ$ の各矢状面における上昇角 $\beta=0-180^\circ, 30^\circ$ 間隔(21方向)と真横($\alpha=90^\circ$)の全22方向とした(Fig.1). 使用したHRTFは以下の3種類である.

- (A) 被験者本人の目標方向の実測HRTF
- (B) 被験者本人の正中面HRTFにITDを付加したHRTF
- (C) 正中面best-matching HRTFにITDを付加したHRTF

また, 付加するITDは, 水平面前方の右側(側方角 $\alpha=0, 30, 60, 90^\circ$)で測定した被験者本人の両耳の頭部インパルス応答から相互相関関数によって算出した. 実験は(A)-(C)のHRTFの種類ごとに行った.

HRTFを畳込んだ刺激をランダムな順に提示した. 各刺激の提示回数は10回である. 刺激のレベルは外耳道入口で63dB SPL, 継続時間は1.2秒(前後に0.1秒の立上がり/立下がりを含む)とした. 被験者は, 音像の方位角と仰角をマッピング法でPCの画面上で回答した. 頭内定位した場合は, 画面上にあるチェックボックスにチェックするように指示した. 被験者は20代学生3名である.

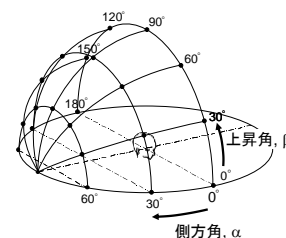


Fig.1 目標とした22方向

* Three-dimensional sound image control using the median plane best-matching head-related transfer functions combined with interaural time difference, by MIYAMOTO Yuta, ISHII Yohji, and IIDA Kazuhiro, (Chiba Institute of Technology).

3 実験結果

3.1 回答の分布

3名の被験者で同様の傾向が示されたので、ここでは被験者 OIS の回答の分布を矢状面ごとに示す(Fig.2, 3). 図は(A)被験者本人の目標方向の実測 HRTF, (B)被験者本人の正中面 HRTF に ITD を付加した HRTF, (C)正中面 best-matching HRTF に ITD を付加した HRTF の結果である. 回答結果は 5° 間隔にまとめてプロットした. 図の縦軸はそれぞれ上昇角 β および側方角 α の知覚した方向を表し, 横軸は目標とした上昇角 β を表す.

3.1.1 知覚した上昇角 β の分布

側方角 $\alpha=0^\circ$ (正中面)では, (A)および(B)は同一の HRTF である. 概ね目標方向に知覚している. ただし, (B)の目標の上昇角 60° および 90° では回答がややばらついた. また, (C)においても, 概ね目標方向に知覚している.

側方角 $\alpha=30^\circ$ では, (A)は概ね目標方向に知覚している. ただし, 目標の上昇角 30° と 150° で回答がばらついた. (B)においても, (A)と同様の分布となった. ただし, 90° と 150° で(A)よりもばらつきが大きくなった. 30° では上方に知覚する傾向がみられた. (C)においては, 概ね対角線上に布置している. $30, 90, 150^\circ$ での回答の分布は(B)と同様であった. 90° および 120° では後方に知覚する傾向がみられた.

側方角 $\alpha=60^\circ$ では, (A)においては, 概ね対角線上に布置している. ただし, 目標の上昇角 30° および 60° においては目標よりも上方に回答する傾向があった. 120° においては回答がばらついた. (B)においても, 概ね対角線上に布置している. ただし, $30, 60, 120, 150^\circ$ での回答は目標よりも上昇する傾向がみられた. (C)においては, 0° および 180° で1回ずつ 90° 方向に分布しているが, 両者とも側方角を 82° および 89° (ほぼ真横)に回答しており, 実質的に上昇角の誤差は小さい. 30° および 150° では回答が上昇する傾向がみられた. 90° では後方に知覚する傾向がみられた. 60° および 120° では回答がばらついた.

3.1.2 知覚した側方角 α の分布

側方角 $\alpha=0^\circ$ (正中面)では, (A)および(B)は同一の HRTF である. 分布は(A)も(B)も同様に目標方向に知覚している. (C)においても, 目標方向に知覚している.

側方角 $\alpha=30^\circ$ では, (A)においては, 概ね目

標とする側方角に分布した. ただし, 目標の上昇角 0° および 180° で側方, $30-120^\circ$ で正中面に回答の分布が寄る傾向があった. 150° では回答がばらついた. (B)においても, 概ね目標とする側方角に分布した. $30, 60, 120, 150^\circ$ での回答の分布は(A)と同様であった. ただし, 0° では正中面, 90° では側方に回答の分布が寄る傾向があった. (C)においても, 概ね目標とする側方角に分布した. $30, 60, 120-180^\circ$ での回答の分布は(A)と同様であった. 0° では正中面, 90° では側方に回答の分布が寄る傾向があった. これは(B)と同様であった.

側方角 $\alpha=60^\circ$ では, (A)においては, 概ね目標とする側方角に分布した. ただし, 目標の上昇角 0° で側方, 120° および 150° で正中面に回答の分布が寄る傾向があった. (B)においては, 0° で側方, $30-180^\circ$ で正中面に回答の分布が寄る傾向があった. (C)においては, 0° および 180° で側方, $30, 60, 120, 150^\circ$ で正中面に回答が寄る傾向があった. 90° では回答がばらついた.

側方角 $\alpha=90^\circ$ では, (A)-(C)のいずれも真横に知覚していた.

3.2 平均定位誤差

Table 1, 2に被験者3名分の上昇角および側方角の平均定位誤差を示す. ここで, 平均定位誤差は目標の上昇角および側方角と知覚した上昇角および側方角の差の絶対値の平均値と定義する.

3.2.1 上昇角の平均定位誤差

$\alpha=0^\circ$ では, (C)の目標の上昇角 $0, 60-120, 180^\circ$ の平均定位誤差は被験者本人の HRTF と同等であった. また, 7方向の平均でも被験者本人の HRTF と同等であった.

$\alpha=30^\circ$ では, (C)の目標の上昇角 $0-60, 150, 180^\circ$ の平均定位誤差は被験者本人の HRTF と同等であった. ただし, 90° では(A)の約2倍となった. 7方向の平均では被験者本人の HRTF と同等であった.

$\alpha=60^\circ$ では, (C)の目標の上昇角 $0-60, 120-180^\circ$ の平均定位誤差は被験者本人の HRTF と同等であった. ただし, 90° では(A)の約2倍となった. 7方向の平均では被験者本人の HRTF と同等であった.

3.2.2 側方角の平均定位誤差

$\alpha=0^\circ$ では, (C)のすべての目標の上昇角において被験者本人の HRTF と同等であった.

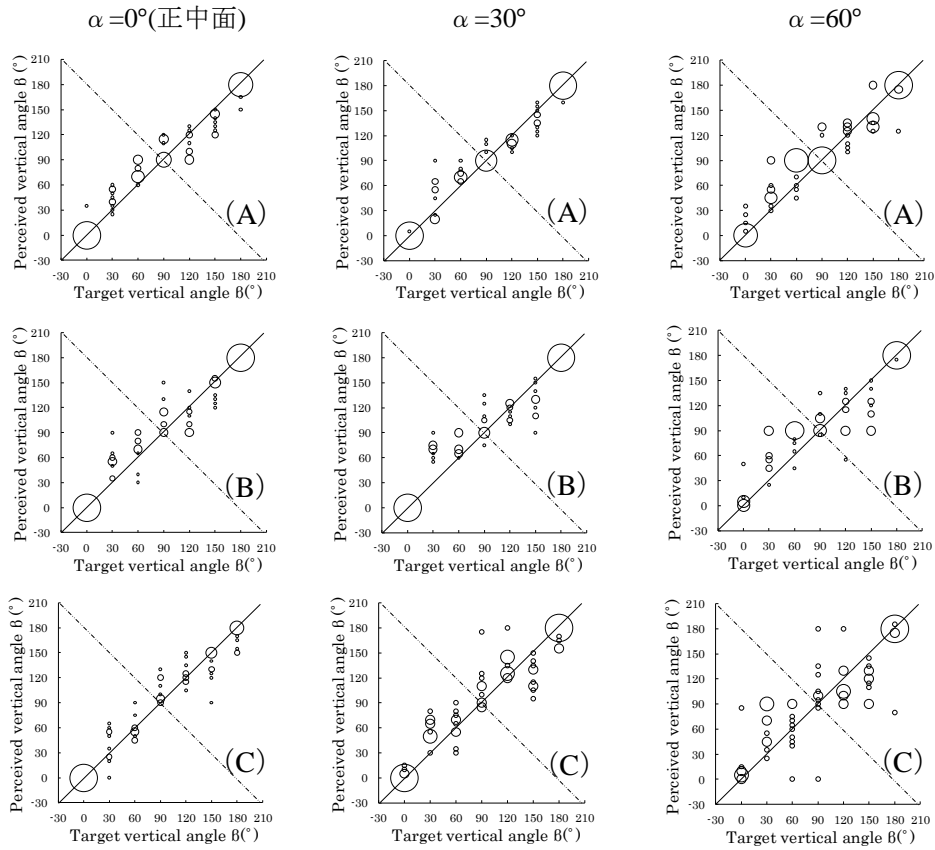


Fig. 2 被験者 OIS の上昇角 β の回答分布

(A) 目標方向の実測 HRTF, (B) 被験者の正中面 HRTF に ITD を付加した HRTF, (C) 正中面 best-matching HRTF に ITD を付加した HRTF

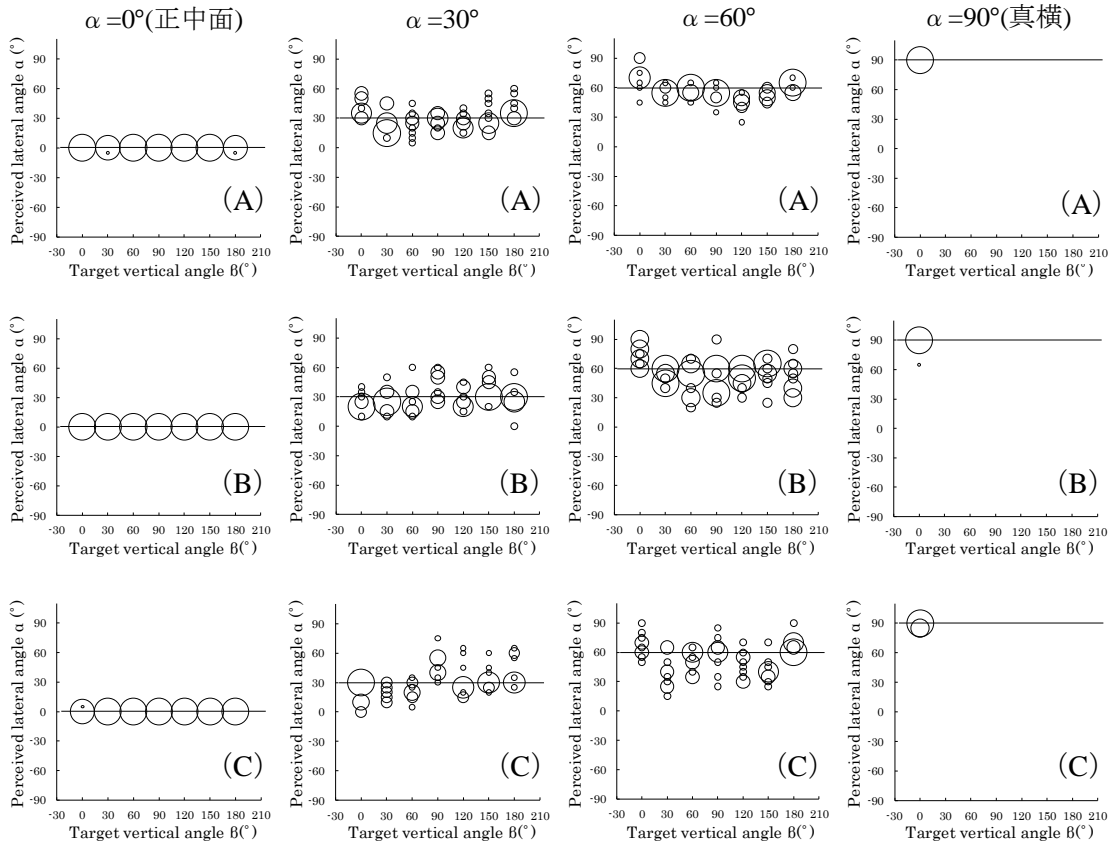


Fig. 3 被験者 OIS の側方角 α の回答分布

$\alpha=30^\circ$ では、(C)の目標の上昇角 30, 60, 150°の平均定位誤差は被験者本人の HRTF と同等であった。ただし、180°では(A)の約2倍となった。

$\alpha=60^\circ$ では、(C)の目標の上昇角 0, 120°の平均定位誤差は被験者本人の HRTF と同等であった。ただし、180°では(A)の約2倍となった。

$\alpha=90^\circ$ では、(A)–(C)のいずれも同等の平均定位誤差だった。

3.3 前後誤判定率

Table 3 に被験者3名分の回答についての前後誤判定率を矢状面ごとに示す。

すべての矢状面において、(C)の目標の上昇角 0°での前後誤判定率は被験者本人の HRTF と同様に0%であった。また、他の6方向においても(C)の前後誤判定率は被験者本人の HRTF と大きな差はなかった。

HRTF 間の前後誤判定率に有意な差があるかを確認するためにカイ二乗検定を行った。被験者3名の結果を Table 4 に示す。目標側方角 $\alpha=0^\circ$ および30°ではすべての被験者で有意な差はなかった。 $\alpha=60^\circ$ では、被験者 CKT および MTZ の(A)と(B)の HRTF 間に1%、被験者 MTZ の(A)と(C)の HRTF 間に5%の有意差があり、どちらの被験者も(A) の前後誤判定率が高かった。

3.4 頭内定位率

すべての種類の HRTF において頭内定位は生じなかった。

4 おわりに

本研究では、正中面内の best-matching HRTF に ITD を与えて3次元方向での音像定位実験を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- 1) $\alpha=0^\circ$ (正中面)においては、best-matching HRTF の音像定位精度は被験者本人の実測 HRTF と同等であった。
- 2) $\alpha=30^\circ$ および 60°の矢状面においては、best-matching HRTF の音像定位精度は概ね良好であったが、一部の目標の上昇角において、被験者本人の実測 HRTF と比較して低下した。
- 3) $\alpha=90^\circ$ (真横)においては、best-matching HRTF の音像定位精度は被験者本人の実測 HRTF と同等であった。

Table 1 3名の上昇角の平均定位誤差(°)

Target lateral angle α (°)	HRTF	Target vertical angle β (°)							Ave.
		0	30	60	90	120	150	180	
0	(A)	1.9	10.6	15.1	18.4	18.1	11.1	2.2	11.1
	(B)	2.0	19.4	17.7	24.3	16.8	15.4	1.4	13.9
	(C)	1.5	15.8	16.8	16.4	16.4	18.3	4.4	12.8
30	(A)	4.1	20.4	19.6	11.4	13.0	16.3	4.1	12.7
	(B)	2.1	23.3	16.9	19.4	15.2	14.9	0.8	13.2
	(C)	3.8	23.2	18.2	24.3	17.7	16.2	3.2	15.2
60	(A)	15.8	29.0	24.8	9.8	29.2	41.6	9.5	22.8
	(B)	17.2	25.6	20.8	14.9	20.1	30.8	5.5	19.3
	(C)	13.3	28.3	19.2	23.9	21.6	31.9	11.9	21.4

Table 2 3名の側方角の平均定位誤差(°)

Target lateral angle α (°)	HRTF	Target vertical angle β (°)							Ave.
		0	30	60	90	120	150	180	
0	(A)	4.5	1.6	0.8	0.9	0.6	0.3	2.5	1.6
	(B)	4.9	2.6	0.9	0.8	0.3	0.3	8.2	2.6
	(C)	0.6	0.3	0.3	0.0	1.2	0.6	2.5	0.8
30	(A)	7.6	12.3	10.2	11.9	9.9	10.4	10.3	10.4
	(B)	10.6	15.2	18.4	15.0	15.2	13.1	11.2	14.1
	(C)	11.4	12.6	12.7	16.2	16.3	13.1	20.9	14.7
60	(A)	10.0	13.5	7.2	8.8	14.9	13.5	9.2	11.0
	(B)	13.8	17.3	17.9	19.3	16.8	11.2	9.5	15.1
	(C)	11.3	18.1	13.8	11.9	13.8	18.3	18.3	15.1
90	(A)	2.1							
	(B)	3.3							
	(C)	2.3							

Table 3 3名の前後誤判定率(%)

Target lateral angle α (°)	HRTF	Target vertical angle β (°)							Ave.
		0	30	60	90	120	150	180	
0	(A)	0.0	0.0	0.0	-	6.7	0.0	0.0	1.1
	(B)	0.0	0.0	6.7	-	6.7	3.3	0.0	2.8
	(C)	0.0	0.0	0.0	-	3.3	6.7	0.0	1.7
30	(A)	0.0	3.3	10.0	-	0.0	0.0	0.0	2.2
	(B)	0.0	0.0	13.3	-	3.3	0.0	0.0	2.8
	(C)	0.0	0.0	13.3	-	3.3	0.0	0.0	2.8
60	(A)	0.0	6.7	6.7	-	40.0	30.0	0.0	13.9
	(B)	0.0	6.7	6.7	-	13.3	3.3	0.0	5.0
	(C)	0.0	6.7	3.3	-	20.0	10.0	6.7	7.8

Table 4 各 HRTF 間での前後誤判定率の

カイ二乗検定の結果

Target lateral angle α (°)	HRTFの組み合わせ	被験者		
		CKT	MTZ	OIS
0°	(A) & (B)	1.0	0.079	1.0
	(A) & (C)	0.56	0.32	0.32
	(B) & (C)	0.56	0.31	0.32
30°	(A) & (B)	1.0	1.0	0.65
	(A) & (C)	0.56	0.56	0.56
	(B) & (C)	0.56	0.56	0.31
60°	(A) & (B)	0.0072 **	0.0082 **	0.17
	(A) & (C)	0.080	0.023 *	0.094
	(B) & (C)	0.30	0.65	0.73

(**: $p<0.01$ *: $p<0.05$)

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, J. Acoust. Soc. Jpn. (E), vol.1, pp. 167-174, 1980.
- [2] Iida *et al.*, Journal of Acoustical Society of America, 136(1), 317-333(2014)
- [3] Morimoto *et al.*, Acoust. Sci. & Tech., 24(5), pp.267-275, (2003)