

三次元音響表示のための頭部伝達関数の
推定法に関する研究

西野 隆典

名古屋大学図書



11441234

概要

人間や多くの動物は、両耳に到達した音を頼りに、その音がどの方向から到来したのかを知覚することが可能である。このように音源定位が可能であるのは、主として両耳間における音の到達時間差や音圧差、頭部や耳介で音波が反射や回折することで生じる周波数特性の変化などを手がかりとしているためと言われる。定位の手がかりとなる音響特性を表すものに頭部伝達関数 (Head Related Transfer Function:HRTF) と呼ばれる伝達関数がある。HRTF は、音源から耳道内の 1 点までの伝達関数である。本論文では、音源から耳道入口までの伝達関数として HRTF を定義する。ヘッドホン受聴で立体音場を再現する場合、HRTF と音源信号を畳み込み処理することで、忠実に立体音場を再現することが可能となる。しかし、HRTF は音波が頭部や耳介により反射、回折した影響を含むため、音源方向や個人によって特性が異なる。そのため、HRTF が測定された音源方向については忠実に立体音場を再現することができるが、測定されていないその他の方向については再現することができない。また、聴取者とは異なる HRTF を用いた場合には、立体音場の再現精度は悪くなる。そのため、HRTF を利用する立体音場再現システムは、すべての聴取者、およびすべての音源方向に対する HRTF を備えていることが理想である。しかし、そのような要求はシステム資源の面からも、HRTF の測定の面からも現実的ではない。本論文では、限られた音源方向で測定された HRTF から、他の音源方向の HRTF を推定し、すべての音源方向の HRTF を補間する検討と、頭部や耳介といった物理的形狀から HRTF を推定する検討を行ない、HRTF の音源方向依存および個人依存に関わる問題の解決を図る。

まず始めに、もっとも利用頻度が高い水平面内の HRTF に対して、限られた音源方向で測定された HRTF から、他の音源方向の HRTF を推定し、データを補間する検討を行なった。補間手法として線形 2 点補間と主成分分析を用いた補間の 2 手法を提案し、インパルス応答と振幅応答に対して補間手法を適用し検討を行なった。

客観評価および主観評価により補間結果を評価した。インパルス応答の補間に対する客観評価尺度には Signal to Deviation Ratio を、振幅応答の補間に対する客観評価尺度には、Spectral Distortion(SD) をそれぞれ用いた。また主観評価として、音源の移動感および方向定位感の評価を行なった。客観評価および主観評価結果より水平面上の HRTF は 45° (8 方位) もしくはそれ以下の角度間隔で測定された HRTF から補間可能であることが明らかとなった。さらに、客観評価結果と主観評価結果とを比較・対比させることで、SD が 5.7 dB 以下であれば、聴感上、音源の移動感が得られることが明らかとなった。この結果より、従来、HRTF の再現精度の評価には、主観評価実験を行ない検証する必要があったが、客観評価から、主観評価の予測も含んだ評価が可能となった。

次に、水平面内での検討結果をふまえ、仰角方向の HRTF をあわせた全方向の HRTF について補間可能性に関する検討を行なった。補間手法として線形 2 点補間、スプライン補間の 2 手法を用いて、水平方向および仰角方向の HRTF に対する補間可能性を客観基準と主観基準 (方位に関する音源定位並びに高さの知覚) により評価した。その結果、水平方向 45° 間隔、仰角方向 30° 間隔もしくはそれ以下の角度間隔で測定した HRTF から、任意の方向の HRTF が推定可能であることが明らかとなった。

続いて、頭部や耳介の形状から水平面上の HRTF を推定する検討を行なった。HRTF の振幅応答と頭部や耳介形状を重回帰分析により対応づけ、HRTF の振幅応答の推定を行なった。実験結果から、1 kHz から 8 kHz の帯域の HRTF を合成した場合に、78 標本の全方位 (72 方位) の平均で SD は 3.3 dB となった。また、各身体的特徴量が HRTF の主成分に及ぼす寄与率を求めたところ、両耳間距離や頭囲が寄与することが明らかとなった。さらに、重回帰モデルを用い、身体的特徴量のみから HRTF の振幅応答を推定した。その結果、SD は 5.8 dB となり、水平面上の HRTF の補間の検討と同等であった。これにより、重回帰モデルを用いることにより、実際に HRTF を測定することなく頭部や耳介の大きさを計測するだけで HRTF が推定可能となることが明らかとなった。

以上より、本論文では HRTF の音源方向依存および個人依存の問題について解決手法を提案し、検討を行なった。その結果、HRTF は水平方向 45° 、仰角方向 30° もしくはそれ以下の角度間隔で測定することで、任意方向からの音の到来を模擬す

ることが可能となった。また、頭部や耳介の形状から HRTF を推定することが可能であることを明らかにした。これらの検討結果から、限られた HRTF および身体的特徴量の測定を行なうことによって、すべての音源方向およびすべての聴取者の HRTF を作成可能となる。従って、HRTF を利用するシステムは、少ないシステム資源で、多数の聴取者および任意の方向からの音波の到来を模擬することが可能となった。

今後の課題として、さらに高精度に HRTF を推定する手法の検討が挙げられる。HRTF を高精度に推定するため、個人性や音源方向・距離がパラメータとして反映されるモデル化を行なう必要があると考えられる。また、音源定位・移動感・頭外定位感といった主観評価と関連する客観評価手法の検討や、HRTF および身体的特徴量に関する大規模データベースの作成も今後検討する必要がある課題である。

謝辞

本研究を進めるにあたり，本研究のみならず，研究者としての姿勢や心構えについて，ご指導いただきました名古屋大学教授 板倉文忠先生に，心から御礼申し上げます。

本論文に対する有益な助言をいただきました名古屋大学教授 大西昇先生に深く感謝致します。また，本研究全般に渡るご指導をいただきました名古屋大学助教授 武田一哉先生に深く感謝致します。

研究手法や実験機材の取り扱いについて，様々な助言をいただきました四日市大学助教授 池田幹男先生，研究だけでなく学生生活全般に渡り暖かい励ましとご指導をいただきました名古屋大学助教授 梶田将司先生に感謝致します。

後期課程在学時に，昼夜を問わず活発な議論をさせていただきました奈良先端科学技術大学院大学助教授 猿渡洋先生，名古屋大学助手 坂野秀樹先生に感謝致します。

最後に，研究を共に行ない，日頃から助言や議論をいただきました板倉研究室の学生の皆様に感謝致します。

目次

1	序論	1
1.1	聴覚における方向定位	1
1.2	両耳受聴における立体感	3
1.3	頭部伝達関数	4
1.4	HRTF の応用範囲および問題点	8
1.5	本論文の目的および構成	9
2	水平方向に関する頭部伝達関数の補間	11
2.1	はじめに	11
2.2	頭部伝達関数の測定	12
2.3	補間手法	15
2.3.1	線形 2 点補間	15
2.3.2	主成分分析を利用した補間	15
2.4	実験	20
2.4.1	実験条件	20
2.4.2	評価基準	22
2.5	実験結果	26
2.5.1	客観評価結果	26
2.5.2	主観評価結果	29
2.5.3	まとめ	40
2.6	むすび	40
3	水平方向および仰角方向に関する頭部伝達関数の補間	41
3.1	はじめに	41
3.2	頭部伝達関数の測定	42
3.3	補間手法	49
3.3.1	線形 2 点補間	49

3.3.2	スプライン補間	49
3.4	実験	52
3.4.1	実験条件	52
3.4.2	評価尺度	54
3.5	実験結果	57
3.5.1	客観評価結果	57
3.5.2	主観評価結果	59
3.5.3	まとめ	64
3.6	むすび	64
4	重回帰分析を用いた頭部伝達関数の推定	65
4.1	はじめに	65
4.2	実験データの測定	66
4.2.1	頭部伝達関数の測定	66
4.2.2	身体的特徴量の計測	70
4.3	手法	72
4.3.1	HRTF の主成分分析	72
4.3.2	重回帰分析による主成分重みの推定	73
4.4	実験	75
4.4.1	実験条件	75
4.4.2	評価尺度	75
4.5	実験結果	76
4.5.1	重回帰分析に基づく HRTF の振幅応答の合成	76
4.5.2	HRTF の振幅応答に対する身体的特徴の寄与率	78
4.5.3	HRTF 測定外被験者への適用	81
4.5.4	まとめ	85
4.6	むすび	85
5	結論	87
	参考文献	91
	研究業績	103

目次

1.1	HRTF の振幅応答	5
1.2	方位・仰角ごとの HRTF の振幅応答	6
1.3	聴取者ごとの HRTF の振幅応答	7
2.1	測定環境 (単位: mm)	13
2.2	方位角の定義	13
2.3	方位角ごとの右耳 HRTF のインパルス応答	14
2.4	方位角ごとの右耳 HRTF の振幅応答	14
2.5	右耳 HRTF の第 1 主成分重み	19
2.6	HRTF 中の遅延成分と主応答成分	21
2.7	前後知覚誤りの定義	25
2.8	平均 SDR	27
2.9	平均 SD	27
2.10	方位角ごとの SDR	28
2.11	方位角ごとの SD	28
2.12	MOS 値による移動感の主観評価結果	30
2.13	SDR 対 MOS 値	31
2.14	SD 対 MOS 値	31
2.15	回帰式による MOS 値の予測	32
2.16	音源定位結果 (測定した HRTF)	35
2.17	音源定位結果 (線形 2 点補間によるインパルス応答の補間)	36
2.18	音源定位結果 (線形 2 点補間による振幅応答の補間)	36
2.19	音源定位結果 (主成分分析によるインパルス応答の補間)	37
2.20	音源定位結果 (主成分分析による振幅応答の補間)	37
2.21	SDR 対正答率	38
2.22	SD 対正答率	38
2.23	回帰式による正答率の予測	39

3.1	測定環境 (単位: mm)	43
3.2	方向の定義	43
3.3	測定室	44
3.4	測定した HRTF の振幅応答 (仰角-45°)	46
3.5	測定した HRTF の振幅応答 (仰角 0°)	46
3.6	測定した HRTF の振幅応答 (仰角 75°)	47
3.7	測定した HRTF の振幅応答 (方位 0°)	48
3.8	測定した HRTF の振幅応答 (方位 165°)	48
3.9	方位・仰角共に補間する場合	53
3.10	補間結果 (方位・仰角共に補間した場合)	58
3.11	測定した HRTF を用いた場合の方位に関する定位実験結果	62
3.12	補間した HRTF を用いた場合の方位に関する定位実験結果	62
3.13	測定した HRTF を用いた場合の仰角に関する知覚実験結果	63
3.14	補間した HRTF を用いた場合の仰角に関する知覚実験結果	63
4.1	測定環境	68
4.2	角度の定義	68
4.3	全方位角に対する 78 名の右耳で測定した HRTF の対数振幅応答の分散	69
4.4	計測した身体的特徴	71
4.5	78 名の平均 SD による合成した HRTF の振幅応答の方位角ごとの精度	77
4.6	HRTF の振幅応答の合成の良い例	77
4.7	両耳間距離と第 1 主成分重み	80
4.8	合成した HRTF の精度	83
4.9	方位角ごとの合成した HRTF の精度	83
4.10	上限周波数の違いによる合成精度	84

表 目 次

2.1	補間データの条件	20
2.2	移動感の評価値	24
2.3	条件ごとの正解率と前後誤り率	35
3.1	測定方向	42
3.2	補間角度間隔と補間に用いた角度および方向の総数	53
3.3	仰角の知覚の評価項目	56
3.4	方位に関する定位実験の正答率および前後知覚誤り率 (仰角-15°) . . .	61
3.5	方位に関する定位実験の正答率および前後知覚誤り率 (仰角 15°) . . .	61
4.1	身体的特徴量の計測結果	71
4.2	HRTF の振幅応答の各主成分重みに対する身体的特徴とその寄与率 .	79

第 1 章

序論

1.1 聴覚における方向定位

人間や多くの動物は、音によって様々な情報を得て、自らの行動に役立てている。音により得られる情報には、音の到来方向や距離といった情報が含まれ、その音がどの方向から聞こえてくるのかといった情報から、動物は自らの身に危険が迫っているのか、獲物がいるのかという判断を行なっている。また、我々人間も、例えば他人から呼びかけられた場合や、緊急車両のサイレンが聞こえてきた場合など、それらの方向を把握し、次の行動の助けとしている。特に、視覚では捉えることのできない方向についても、音によって空間認知が可能となっていることから、聴覚には広範囲のセンサとしての役割が備わっていると言うことができる。

音像の移動が知覚可能な最小の角度、すなわち方向知覚の弁別限は、最も小さい場合で 1° である [1]。また、水平面における弁別限は、正面および後方が小さく、両耳付近の方位では、弁別限は大きくなり正面の 3~10 倍である。また、正中面において、天頂に向かうにつれて弁別限は大きくなり、天頂方向では水平面の 2~20 倍の弁別限であるといった報告がなされている [2]。また、純音やクリック音を用いた実験結果から、信号の周波数が 1 kHz の場合に、最も弁別限が小さくなることが報告されている [3, 4]。

このような音源定位が可能となる手がかりとして、水平面定位では主に両耳での到達時間差 (Interaural Time Differences: ITD) と音圧差 (Interaural Level Differences: ILD) が挙げられる。ITD に関する初期の研究として、Rayleigh による報告 [5] などがある。その後、すべての周波数において一定の位相差のある音を呈示した場合の、音像の移動についての報告 [6, 7, 8] がなされ、どれだけの ITD を知覚することがで

きるのか、どれだけの ITD を与えることで、音像が両耳間で遷移するのかといった事柄が調査された。信号に純音を用いた場合は、頭部を剛球と仮定したモデルを考えると、球の半周に相当する波長において、両耳の位相差が 180° となるため、両耳に到達する信号の差が知覚できなくなる。これに関して、例えば Perrott らの研究 [9, 10] によれば、1.6kHz 以上の純音に対しては、ITD は知覚できないと言われている。ILD に関しては、一方の耳に完全に音像が移動する ILD の値について、Kietz は、10 ~ 15 dB [11]、永井らは、7 ~ 10 dB [12]、Pinheiro らは、10 dB 以上 [13] とそれぞれ報告しているが、完全に片側へ移動する限界を測定することは困難であることも報告されている [7]。また、一方の耳に完全に移動するまでは、音像の移動は ILD にほぼ線形に依存している [7]。このように水平面定位においては、ITD、ILD とともに音像の移動に寄与していることが分かる。通常は、どちらか一方の差のみを利用するのではなく、相互に利用しながら音源定位を行なっているが、1.5 ~ 1.6 kHz 以下の音に対しては ITD が、それ以上の周波数の音に対しては ILD が特に有効に働くと考えられている [14, 15, 16]。

ITD、ILD 以外には、音の周波数成分による手がかりが考えられている。中林による研究 [17] では、1 オクターブバンド雑音を用い、水平面上で定位実験を行なった結果、8 ~ 16 kHz の高周波は、正しく知覚がなされるのに対し、それ以外の周波数では、前方の音を後方に、もしくは後方の音を前方に誤ってしまうことが示された。

一方、上下方向の定位、特に正中面上での上下方向の定位に関しては、ITD、ILD とともに差がほとんど無いことから、正中面定位は、頭部や耳介による影響や、到達した信号のスペクトル等を手がかりとして行なわれると考えられている。Gardner らは、正中面定位における耳介の役割を調査するため、耳甲介腔を部分的に塞いだ状態での定位精度を評価した [18, 19]。その結果、耳甲介腔を塞ぐことで、正中面内の定位精度が劣化することが報告されている。また、どのような帯域が上下方向の定位の手がかりとなっているかについては、5 kHz 以上の帯域が正中面定位に重要であることが報告されている [20, 21, 22, 23, 24, 25]。

続いて聴覚系と音源定位について述べる。両耳に到達した音波は、外耳道を通り鼓膜を介して内耳へ伝達される。内耳では蝸牛内の基底膜により、音波は帯域分割され、聴神経パルスとなり聴覚野へと伝送される。神経パルスが聴覚野でどのよう

に処理されているのかに関しては、動物を使った調査がなされている [26, 27]。これに対し、人間はこれまでに経験してきた音環境と比較し、定位を行なっているという報告 [28, 29] がなされているのみで、基底膜により得られた神経パルスがどのように聴覚野で処理され、定位に結び付いているかについては、未だ明らかにはされていない。

以上のように、音源定位は音の両耳間差、頭部や耳介などにより音波が反射や回折するといった物理的な影響や、聴覚的に日常獲得してきた、音源位置の情報などをもとに総合的に判断していると考えられている。

1.2 両耳受聴における立体感

1.1節で述べたように、音源定位は、頭部や耳介、肩といった体の影響によって変化した音波をもとに行なわれている。このことは、両耳へ到達した音を忠実に再現することにより、ある音空間を再現することが可能となることを意味する。このような音波を変化させるための一つの方法は、人の頭部や耳介の形状を模擬した疑似頭と呼ばれる人形を作成し、その耳道内部に設置した小型マイクロホンにより、音を収録することである。疑似頭を使って収録した音を、空間的に離れた場所にいる被験者にヘッドホンを通じて呈示する実験が、これまでに多数なされている [28, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39]。その結果、被験者はヘッドホンで呈示された音から、方向を正しく判別することが可能であった。この検討結果より、頭部および耳介の形状を模擬した疑似頭と呼ばれる装置を利用し音を収録することによって、その音場を別の場所で再現することが可能であることが示された。この技術はバイノーラル録音と呼ばれ、ホールなどの音響特性の評価や、放送、音楽といった分野で利用されている [40]。

バイノーラル録音を行なうための疑似頭の音響特性は、聴取者と一致することが望ましい。そのため、バイノーラル録音で用いられる疑似頭についての検討も多くなされている。より多数の聴取者に対応するという設計指針からは、標準的な耳介や頭部の形状を用いることが提案されている。4000名以上の被験者に対して測定された頭部や耳介形状から、平均的な形状を求め、疑似頭を設計する手法が Burkhardらにより報告されている [41]。Fukudome は 52 名の成人男性の頭部形状を測定し、疑似頭の設計指針を報告している [42]。また一方で、実際の頭部や耳介の形状をもと

にするのではなく、頭部伝達関数 (Head Related Transfer Function:HRTF) と呼ばれる、頭部や耳介による音波への影響を表現した音響特性関数を設計指針に用いた、人間の音響特性に近い音響特性が得られるような疑似頭の設計方法が、Hudde and Schroter[43] や Hamada ら [44], 岡部ら [45, 46, 47] により提案されている。HRTF については次節で述べる。

1.3 頭部伝達関数

1.2節では、疑似頭を用いることで、音場を伝送することが可能であることを述べた。疑似頭によって得られる音響効果、すなわち音源と耳介との間での、音の時間的、周波数的な変化を表すものを頭部 (音響) 伝達関数と呼ぶ。この HRTF は、音響フィルタの一種で、頭部や耳介の形状、音源方向により一意に決定される。Blauert は、HRTF は単一音源に対して定義され、通常次の 3 種類があるとした [15]。

1. 自由空間伝達関数: 単一音源から耳道内の 1 点 (主として鼓膜上) までの伝達関数と、単一音源から頭の中心に相当する自由空間中 (被験者は存在しない) の 1 点までの伝達関数から導かれる伝達関数。すなわち、単一音源から耳道内の 1 点までの伝達関数。
2. 単耳伝達関数: ある方向と距離の音源に対する自由空間伝達関数を基準とした、他の方向、距離の音源に対する自由空間伝達関数。ただし、原則として方位 0° ・仰角 0° 、から平面波が入射する場合を基準とする。
3. 両耳間伝達関数: 両耳道の測定可能な点における両耳音圧の関係。通常、音源側の耳における音圧を基準音圧とする。

このようにして決定された HRTF と、呈示したい音源とを畳み込むことにより、忠実な立体音場再生が可能となる [37, 48, 49, 50, 51, 52, 53]。なお、本論文で取り扱う HRTF は、耳道内の 1 点を耳道入口とした、上記の 1 の場合の伝達関数である。図 1.1 は、音源位置を被験者の正面とした場合の、右耳で測定された HRTF の周波数応答である。ここで、8 ~ 10 kHz の帯域に存在する谷については、個人ごとの違いが反映され、かつ仰角方向の知覚の手がかりである、といった報告がなされている [54]。

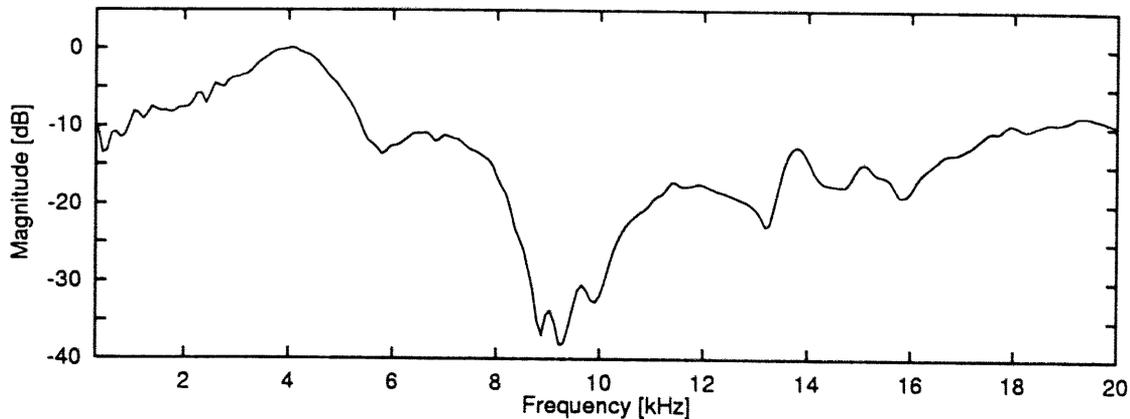
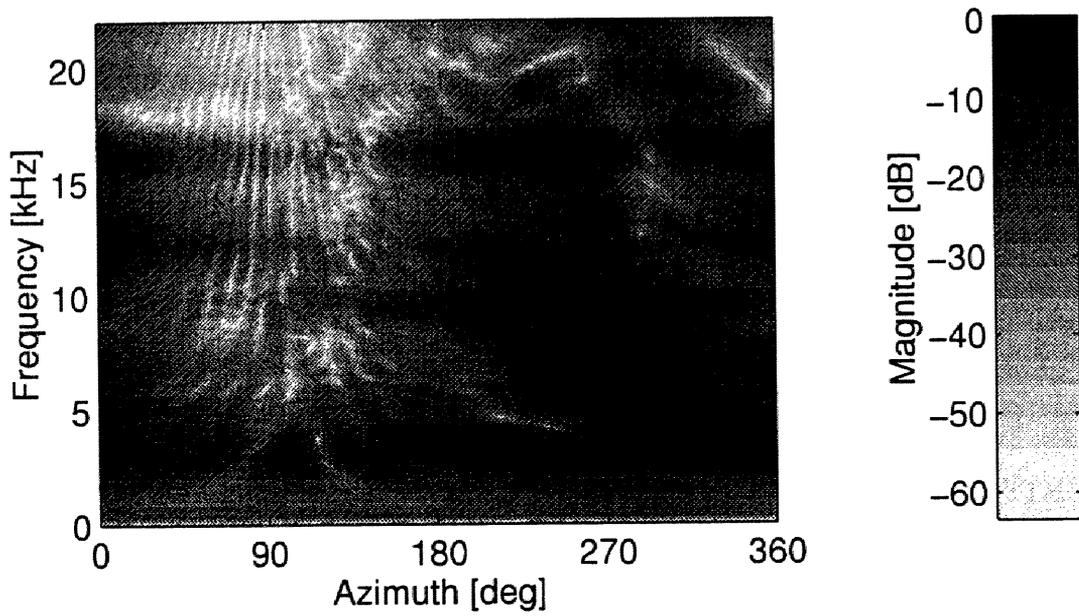


図 1.1: HRTF の振幅応答

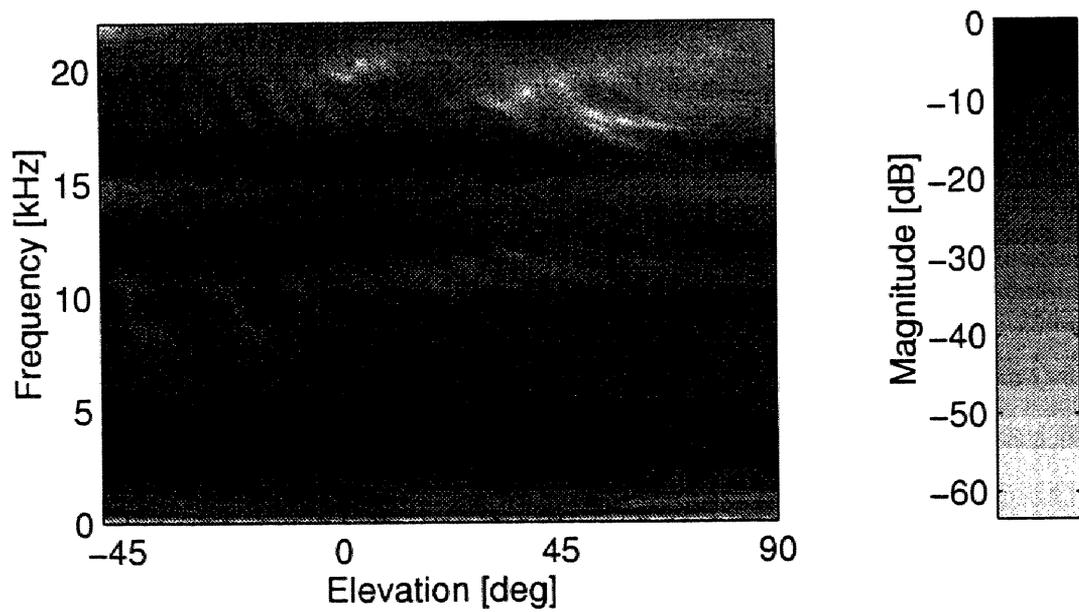
HRTF は、頭部や耳介によって音波が反射、回折することにより決定される伝達関数であるため、音源の方向によって特性が異なる。図 1.2は、疑似頭 (B&K 4128 型) に対して、右耳にて測定した HRTF の対数振幅応答を濃淡図で表したものである。図 1.2(a) の横軸は音源の方位を (0° は正面, 90° は疑似頭の左側, 180° は後方, 270° は疑似頭の右側), 縦軸は周波数を表す。図 1.2(b) の横軸は音源の仰角を (0° は水平面上, 90° は天頂), 縦軸は周波数を表す。これらの図より, HRTF の振幅応答は水平方向および仰角方向ともに, 局所的には緩やかに変化するが, 方向ごとに異なる特性を持つことが確かめられる。なお, このような極座標系ではなく, 森本らの側方角と上昇角により定義される座標系 [23] では, 上昇角が等しい場合には側方角にかかわらず HRTF は高い類似性を示すという報告もなされている [55, 56, 57]。

また, 頭部や耳介の形状は個人ごとに異なるため, HRTF は同一の特性を持つことはない。図 1.3は, 19 歳から 26 歳までの男性 8 名に対して, 右耳にて測定した水平面上の HRTF の対数振幅応答を濃淡図で表したものである。横軸は音源の方位を (0° は正面, 90° は被験者の左側, 180° は後方, 270° は被験者の右側), 縦軸は周波数である。これらの図は, すべて相異なる濃淡図となっていることが分かる。このことから, HRTF が個人ごとに特性の異なる伝達関数であることが確かめられる。

HRTF の特性を知ることは, 空間知覚の研究に役立つばかりでなく, 様々なシステムへの HRTF の応用が可能となる [58, 59, 60, 61]。そのため HRTF の測定に関わる文献は多い [50, 62, 63, 64, 65, 66, 67]。また, 近年では, HRTF の測定データを, インターネット上で公開することも増えてきている [68, 69, 70, 71, 72, 73]。



(a) 水平面上の HRTF の周波数特性を濃淡表示



(b) 正中面上 (前方) の HRTF の周波数特性を濃淡表示

図 1.2: 方位・仰角ごとの HRTF の振幅応答

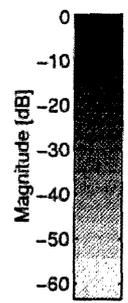
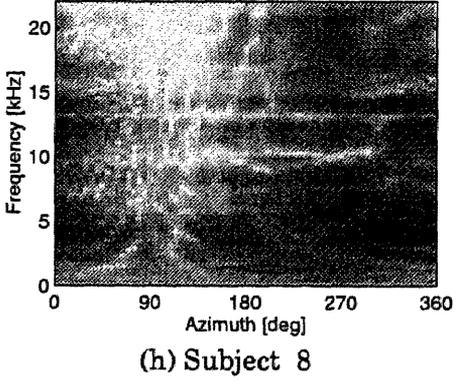
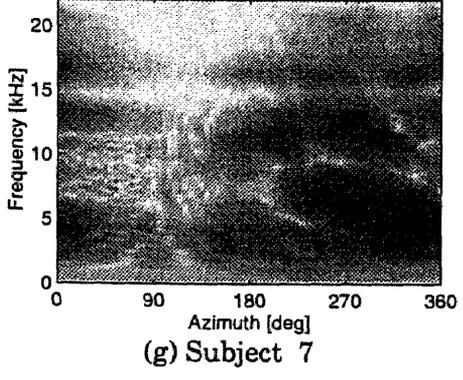
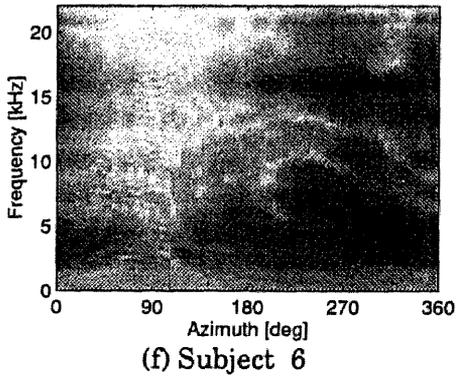
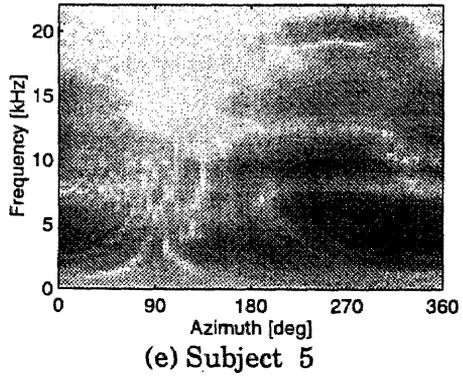
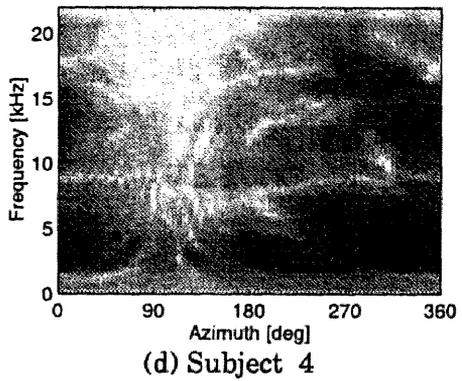
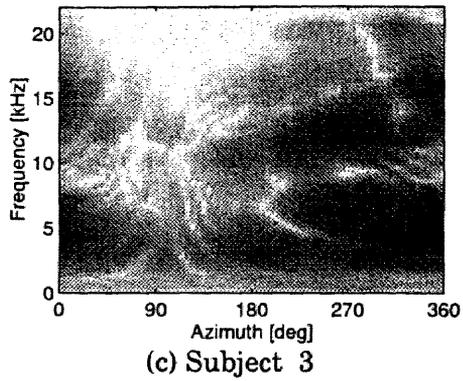
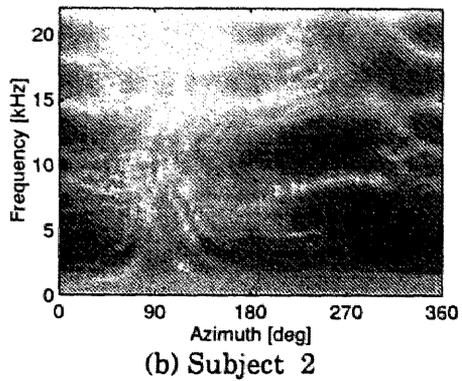
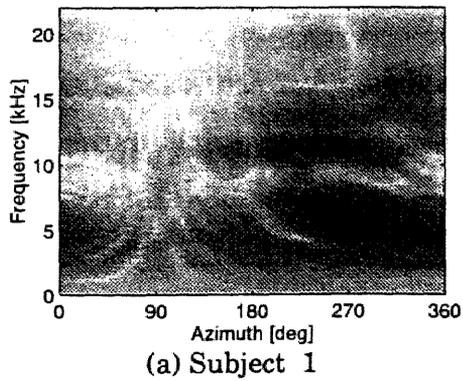


図 1.3: 聴取者ごとの HRTF の振幅応答

1.4 HRTF の応用範囲および問題点

HRTF は、頭部や耳介における音波の反射や回折の影響を含む伝達関数である。そのため、自由空間内において、音源信号 $s[n]$ が任意の方向 θ から聴取者の耳道入口へ到来する状況は、任意の方向 θ にて測定された HRTF $h_\theta[n]$ と音源信号との畳込み演算 $s[n] * h_\theta[n]$ により表すことができる。すなわち、HRTF を用いることで、自由空間内の任意の方向から音源信号の到来を生成することが可能であると言える。

この技術の応用として、聴覚バーチャルリアリティシステム [74] や、5.1ch サラウンドをヘッドホンで再現するシステム、またコンピュータゲームのようなより臨場感が要求されるエンターテインメントの分野が挙げられる [75]。さらに、航空機の操縦室のような激しい騒音環境下での三次元聴覚ディスプレイの実現に向けた検討もなされている [76, 77]。しかし、HRTF を利用するシステムには、HRTF が方向および個人に依存した伝達関数であることに起因する次のような問題点がある。第 1 に、すべての方向から音が到来するような状況を作り出すためには、任意の方向について、HRTF を用意する必要がある。第 2 に、聴取者に適した HRTF を、聴取者の数だけ用意しなくてはならない。聴取者とは異なる HRTF を用いた場合には、正しく定位が行なわれることも稀に生じるが、ほとんどの場合は定位精度が悪くなる [78, 79]。このように無数の方向および多数の聴取者用の HRTF を用意することは、システム資源の面からも、実際に HRTF を測定する面からも、非常に困難である。

これらの問題点を解決するため、1.2節で述べた疑似頭がしばしば用いられるが、聴取者と疑似頭とで頭部や耳介の形や大きさが明らかに異なる場合には、疑似頭をもとに測定して得られた HRTF を用いる効果はない。そこで、可能な範囲で測定された HRTF や頭部の大きさといった身体的特徴量を用いて HRTF を推定し、データを補間する検討がなされている。本論文では、この HRTF を推定し、データを補間することを HRTF の補間と呼ぶ。HRTF の補間に関して、次の 3 項目から研究が進められている。

1. 方向および距離に関する補間
2. 伝達関数の補間を行なう領域 (時間領域と周波数領域)
3. 聴取者に関する補間

方向に関する補間として、少数の音源方向で測定した HRTF から、他の測定されていない方向の HRTF を推定する検討がなされている [80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90]。また、ある特定の音源距離で測定した HRTF から、音源距離が異なる HRTF を推定する検討もなされている [91, 92]。

次に、伝達関数の補間を行なう領域に関しては、少数のパラメータを用い、HRTF の任意の周波数成分を推定する検討が挙げられる。特定の周波数における振幅と位相から、他の周波数の振幅と位相を推定する検討 [93] や、通常 FIR フィルタで表現される HRTF を、フィルタの次数を削減する目的で IIR フィルタ型で近似する手法 [94, 95, 96, 97, 98] が検討されている。また、Wavelet 変換を用いたモデル化手法も検討されている [99]。

最後に、聴取者に関する補間として、聴取者に適した HRTF を推定する検討がなされている。多数の測定データを分類し代表的な HRTF を聴取者に呈示する手法 [100, 101] が提案されている。また、HRTF を実際に測定するのではなく、頭部や耳介の形状から HRTF を推定する検討 [75, 102, 103, 104, 105] や、有限要素法や境界要素法といった数値解析的なアプローチから、HRTF を求める試みも行なわれている [106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113]。

1.5 本論文の目的および構成

1.3節で述べたように、HRTF を利用するシステムは、HRTF を測定した聴取者および音源方向に対しては、忠実な音場の再現や音波の到来を模擬することが可能である。ここで、HRTF には 1.4節で挙げた問題点があるため、HRTF を利用するシステムは、より多数の聴取者および音源方向の HRTF を備えていなくてはならない。しかし、システムを実現するには、膨大なシステム資源を必要としてしまう。そこで本論文では、HRTF の方向依存および個人依存の問題点に対して、HRTF の測定方向数の削減手法、ならびに頭部・耳介形状からの HRTF の推定手法を提案し検討を行なう。これらの検討では、聴感上の性能を劣化させずに HRTF の測定方向数を大幅に削減すること、また、HRTF を実際に測定することなく、聴取者に適した HRTF を推定することを目的とする。これにより、少ないシステム資源で、多数の聴取者および任意の方向からの音波の到来の模擬が可能となる。

本論文の構成は以下の通りである。まず、第 2 章では水平面上における HRTF の

特性を示し、測定したデータから測定が行なわれていない任意の方位の HRTF を推定する手法について述べる。第 3 章では、第 2 章で示した水平面上の検討にあわせて、仰角方向についても、測定したデータから測定が行なわれていない任意の方向の HRTF を推定する手法について述べる。また、第 4 章では、HRTF が頭部および耳介の形状と密接に関係している点に着目し、頭部および耳介の形状から、水平面上の任意の方位の HRTF を推定する手法について述べる。最後に第 5 章で本論文のまとめを行なう。

第 2 章

水平方向に関する頭部伝達関数の補間

2.1 はじめに

頭部伝達関数 (Head Related Transfer Function: HRTF) を用いることにより、ヘッドホンにて、立体音場を呈示することが可能となる。HRTF は、頭部や耳介での音波の回折や反射による特性の変化を表す伝達関数であるため、音源の方向ごと、および個人ごとに異なった特性を持つ。そのため、HRTF を利用する立体音場シミュレーションシステムでは、被験者本人の HRTF を用いることが必要であること、また、HRTF が測定されている音源方向においてのみ、音源から両耳に到来する音波を模擬することが可能であることが言える [37, 49, 51, 114]。ここで、シミュレーションシステムが聴取者依存であると考えた場合であっても、HRTF が測定されていない角度から音波が到来する状況を作り出すためには、必要な音源方向の HRTF を新たに測定するか、測定した HRTF から推定することにより、その角度の HRTF を補間する必要がある。HRTF の補間が可能であれば、少数の測定した HRTF から全方位の HRTF が作成できるため、シミュレーションシステムを構築する上で、データ削減の有効な手段となるだけでなく、より滑らかな音像の移動感を得ることができ。HRTF の補間には、線形手法による補間 [80, 81, 83, 86, 88, 89] や、極零モデル化による補間 [87, 90] が報告されている。ここで、E. M. Wenzel らは、水平方向 30° 間隔の線形補間を用いた補間の検討を行なっている [80]。しかし、角度間隔を変化させた場合の検討がなされていないこと、主観評価の結果から補間した HRTF を用いた場合に定位誤りが増加するといった問題点がある。

そこで本章では、限られた音源方位で測定した HRTF から、任意の方位の HRTF を推定する手法として、線形 2 点補間による手法、および主成分分析を用いた手法を

提案し、水平面上の HRTF に対して HRTF の補間可能性を検討する [115, 116, 117]。さらに、HRTF の補間方法として、インパルス応答の補間を行なう方法と振幅応答の補間を行なう方法とを比較する。そして、これらの補間方法により得られた HRTF の性能を客観評価基準と主観評価基準 (移動感ならびに方向定位感) により評価し、水平面上の HRTF に対する、補間可能な測定角度間隔を明らかにする。

まず、2.2節にて、本章で用いた HRTF の測定条件、および測定結果について述べる。2.3節では、HRTF の補間手法を提案し、2.4節において提案手法の有効性を検証するための評価方法 (客観評価および主観評価) を述べる。2.5節において、評価実験により得られた結果を述べ、最後に 2.6節において、本章のまとめを述べる。

2.2 頭部伝達関数の測定

本論文では、HRTF を音源から被験者の外耳道入口までの音響伝達特性関数と定義する。ラウドスピーカ (BOSE, ACOUSTIMASS, 口径 63mm) から、0.1~20kHz の帯域を持つ信号長 0.1s の Golay 信号 [118] を出力し、外耳道入口に装着したコンデンサマイクロホンとの間のインパルス応答を求めることにより [119]、補間手法を適用するための HRTF を測定した。ラウドスピーカと測定被験者の配置を図 2.1 に示す。なお、HRTF を測定した部屋の残響時間は 0.3 s で、暗騒音レベルは約 34dB(A) であった。

HRTF は男性 6 名を対象に、水平面上を 5° ごとに 72 点測定した。測定はラウドスピーカの位置を固定として行なったので、方位角 $\theta (0 \leq \theta \leq 355)$ は図 2.2 のように被験者の向きにより決まる。ここで、被験者とラウドスピーカが正対する角度を 0° とする。また、標準化周波数は 44.1kHz である。なお、測定された HRTF は床面や壁からの反射音を除外するため 512 点 (11.6ms) とした。

測定した HRTF の一例として、ある被験者の右耳にて測定した HRTF のインパルス応答と振幅応答について、方位角をパラメータとして表示した結果を、図 2.3, 図 2.4 に示す。ここで、図 2.4 は、0 dB ~ -40 dB までの範囲の振幅応答を濃淡図で示したものである。このようにインパルス応答、振幅応答ともに、角度に関して局所的に緩やかに変化する部分が多いことが分かる。これらの測定結果からも、HRTF のインパルス応答および振幅応答の補間の可能性がうかがえる。

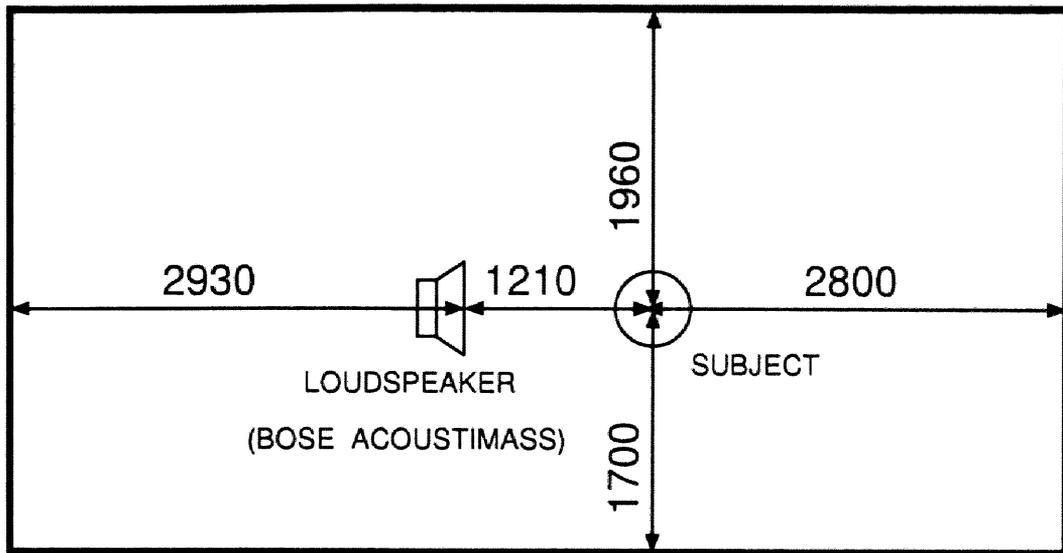


図 2.1: 測定環境 (単位: mm)

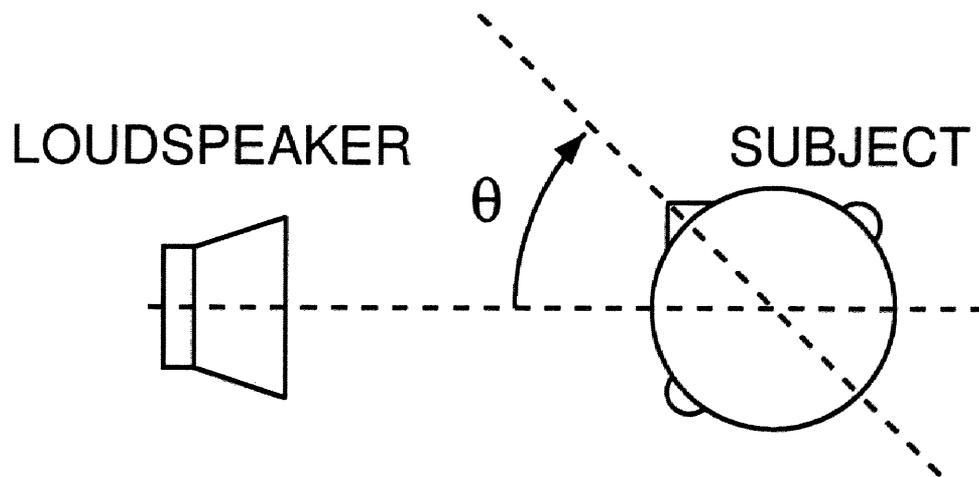


図 2.2: 方位角の定義

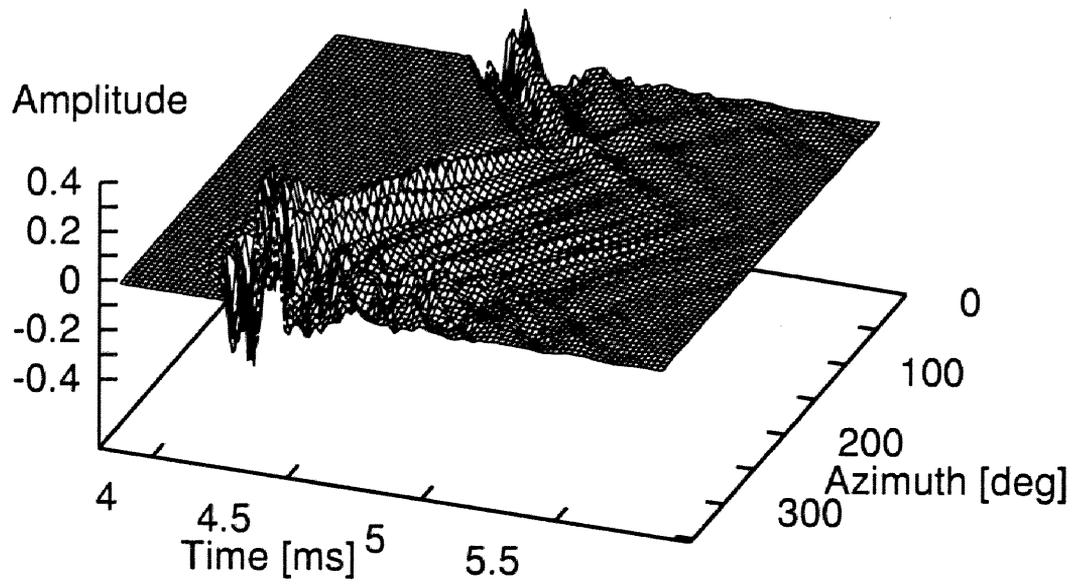


図 2.3: 方位角ごとの右耳 HRTF のインパルス応答

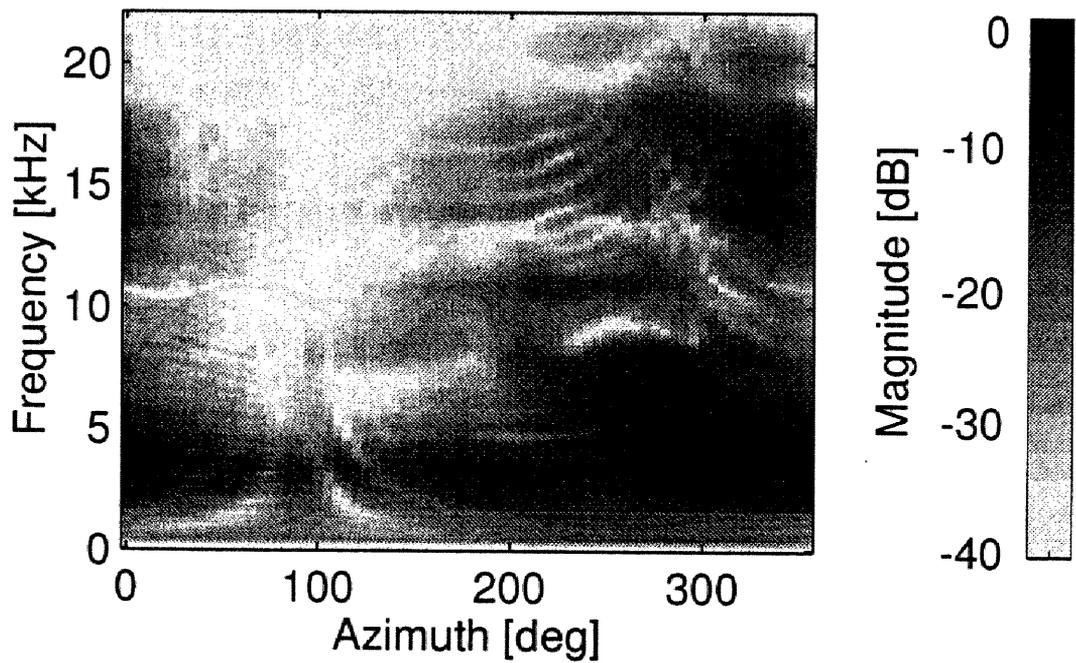


図 2.4: 方位角ごとの右耳 HRTF の振幅応答 (0 dB ~ -40 dB までを濃淡表示したもの)

2.3 補間手法

本節では、まず最も単純な手法である、線形2点補間によるHRTFの補間法を提案する。さらに、Kistlerらによる、HRTFは少数の主成分重み和で表すことができるとの報告[121]を用いて、HRTFを主成分分析して得られる主成分重みに着目したHRTFの補間法を提案する。

なお、補間手法を適用する対象は、HRTFのインパルス応答および振幅応答とする。インパルス応答に対する補間は、振幅応答と位相応答を含めた周波数スペクトルの補間を行なうことと等価である。よって、インパルス応答の補間と振幅応答の補間との本質的な違いは位相応答を含むか否かである。

2.3.1 線形2点補間

線形2点補間は、インパルス応答の補間では式(2.1)を用いて行なう。

$$\hat{h}[n] = r h_1[n] + (1 - r) h_2[n], \quad 0 \leq r \leq 1 \quad (2.1)$$

ここで、 $h_1[n]$ 、 $h_2[n]$ は測定されたHRTFのインパルス応答、 r は $h_1[n]$ 、 $h_2[n]$ 間の内分比を表すパラメータである。 r を変えることにより $h_1[n]$ 、 $h_2[n]$ 間の任意の角度のHRTFのインパルス応答 $\hat{h}[n]$ を得る。

また、振幅応答の補間では式(2.2)を用いる。

$$|\hat{H}[f_i]| = r \times |H_1[f_i]| + (1 - r) \times |H_2[f_i]|, \quad 0 \leq r \leq 1 \quad (2.2)$$

ここで、 $|H_1[f_i]|$ 、 $|H_2[f_i]|$ は測定されたHRTFの振幅応答、 r は $|H_1[f_i]|$ 、 $|H_2[f_i]|$ 間の内分比を表すパラメータである。 r を変えることにより $|H_1[f_i]|$ 、 $|H_2[f_i]|$ 間の任意の角度のHRTFの振幅応答 $|\hat{H}[f_i]|$ を得る。なお、 $H_1[f_i]$ 、 $H_2[f_i]$ は512点の離散フーリエ変換(Discrete Fourier Transform:DFT)により求める。

2.3.2 主成分分析を利用した補間

主成分分析(Principal Component Analysis:PCA)は、観測値間の相関関係を解析し、全体の観測値の持つ変動を少数の合成変数の変動で説明しようとするもので、多変量解析で用いられる手法である[120]。HRTFを主成分分析することにより、HRTF

を少数の主成分重み和で表現することができる [115, 121, 122, 123]。本手法では、この主成分重みに着目して補間を行なう。

実験では以下の手順に従い主成分分析を行ない、HRTF の補間を行なう。

1. 主成分分析を M 個の測定方向の HRTF の集合に対して行なう。零平均化 HRTF を、インパルス応答に対しては式 (2.3)、振幅応答に対しては式 (2.4) を用いて求める。

$$\bar{h}_k[n] = h_k[n] - \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M h_m[n] \quad (2.3)$$

$$|\bar{H}_k[f_i]| = |H_k[f_i]| - \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M |H_m[f_i]| \quad (2.4)$$

ここで $h_k[n]$, $H_k[f_i]$ は、主成分分析に用いる HRTF 集合の中の k 番目 ($k = 1, \dots, M$) の方向の HRTF であり、それぞれ HRTF のインパルス応答および振幅応答を表す。なお、 $H_k[f_i]$ は 512 点の DFT により求める。

2. 零平均化 HRTF に対する共分散行列を、インパルス応答に対しては式 (2.5)、振幅応答に対しては式 (2.6) によって求める。

$$s_{ij} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \bar{h}_m[i] \bar{h}_m[j] \quad i, j = 1, 2, \dots, 512 \quad (2.5)$$

$$s_{ij} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M |\bar{H}_m[f_i]| |\bar{H}_m[f_j]| \quad i, j = 1, 2, \dots, 256 \quad (2.6)$$

ここで、 s_{ij} は共分散行列 \mathbf{S} の第 i 行 j 列要素である。

3. 共分散行列 \mathbf{S} の固有ベクトルを求め、固有ベクトル行列 \mathbf{C} を作る。 \mathbf{C} を用いて、第 k 番目の零平均化 HRTF $\bar{h}_k[n]$ に対する主成分重みベクトル \mathbf{W}_k を式 (2.7) により求める。また、 $|\bar{H}_k[f]|$ に対する主成分重みベクトル \mathbf{W}_k は式 (2.8) により求める。

$$\mathbf{W}_k = \mathbf{C}^T \bar{\mathbf{h}}_k \quad (2.7)$$

$$\bar{\mathbf{h}}_k = (\bar{h}_k[1], \bar{h}_k[2], \dots, \bar{h}_k[512])^T$$

$$\mathbf{W}_k = \mathbf{C}^T \bar{\mathbf{H}}_k \quad (2.8)$$

$$\bar{\mathbf{H}}_k = (|\bar{H}_k[f_1]|, |\bar{H}_k[f_2]|, \dots, |\bar{H}_k[f_{256}]|)^T$$

ここで、 T は転置を表すものとする。

4. 任意の方位角 θ [rad] の主成分重み系列を求めるために、離散値フーリエ級数展開を利用する。これにより、方位角 θ の第 p 次主成分重み $w_\theta[p]$ は、式 (2.9) により求まる。

$$w_\theta[p] = a_0 + \sum_{q=1}^{\frac{M}{2}} (a_q \cos q\theta + b_q \sin q\theta) \quad (2.9)$$

$$a_0 = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M w_{\phi_m}[p]$$

$$a_q = \frac{2}{M} \sum_{m=1}^M w_{\phi_m}[p] \cos\left(\frac{m-1}{M} 2q\pi\right)$$

$$b_q = \frac{2}{M} \sum_{m=1}^M w_{\phi_m}[p] \sin\left(\frac{m-1}{M} 2q\pi\right)$$

$w_{\phi_m}[p]$ は、HRTF 集合の中の m 番目の測定方向にあたる方位角 ϕ_m [rad] の第 p 次主成分重みである。例として、図 2.5 に第 1 主成分重みと離散値フーリエ級数展開の結果を、方位角をパラメータとして示す。本手法では、この離散値フーリエ級数展開により求まる値を、任意の方位角の主成分重みであるとする。

5. 同様の手順により、主成分重み系列を次元ごとに離散値フーリエ級数展開し、任意の方位角の主成分重み系列 $\hat{\mathbf{W}}_\theta$ を求める。

$$\hat{\mathbf{W}}_\theta = (w_\theta[1], w_\theta[2], \dots, w_\theta[p], \dots, w_\theta[N])^T \quad (2.10)$$

ここで、 N は HRTF を求める際に必要な次数を表す。実験で用いる N の値は、2.5 節で述べる。

6. 任意の方位角 θ での、インパルス応答の零平均化 HRTF $\tilde{\mathbf{h}}_\theta$ は式 (2.11) から、振幅応答の零平均化 HRTF $\tilde{\mathbf{H}}_\theta$ は式 (2.12) からそれぞれ求める。

$$\tilde{\mathbf{h}}_\theta = \mathbf{C} \hat{\mathbf{W}}_\theta \quad (2.11)$$

$$\tilde{\mathbf{h}}_\theta = (\tilde{h}_\theta[1], \tilde{h}_\theta[2], \dots, \tilde{h}_\theta[512])^T$$

$$\tilde{\mathbf{H}}_\theta = \mathbf{C}\hat{\mathbf{W}}_\theta \quad (2.12)$$

$$\tilde{\mathbf{H}}_\theta = (|\tilde{H}_\theta[f_1]|, |\tilde{H}_\theta[f_2]|, \dots, |\tilde{H}_\theta[f_{256}]|)^T$$

7. 最後に、任意の方位角 θ の HRTF のインパルス応答 $\hat{h}_\theta[n]$ を式 (2.13) から、任意の方位角 θ の HRTF の振幅応答 $|\hat{H}_\theta[f_i]|$ を式 (2.14) から、それぞれ得る。

$$\hat{h}_\theta[n] = \tilde{h}_\theta[n] + \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M h_m[n] \quad (2.13)$$

$$|\hat{H}_\theta[f_i]| = |\tilde{H}_\theta[f_i]| + \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M |H_m[f_i]| \quad (2.14)$$

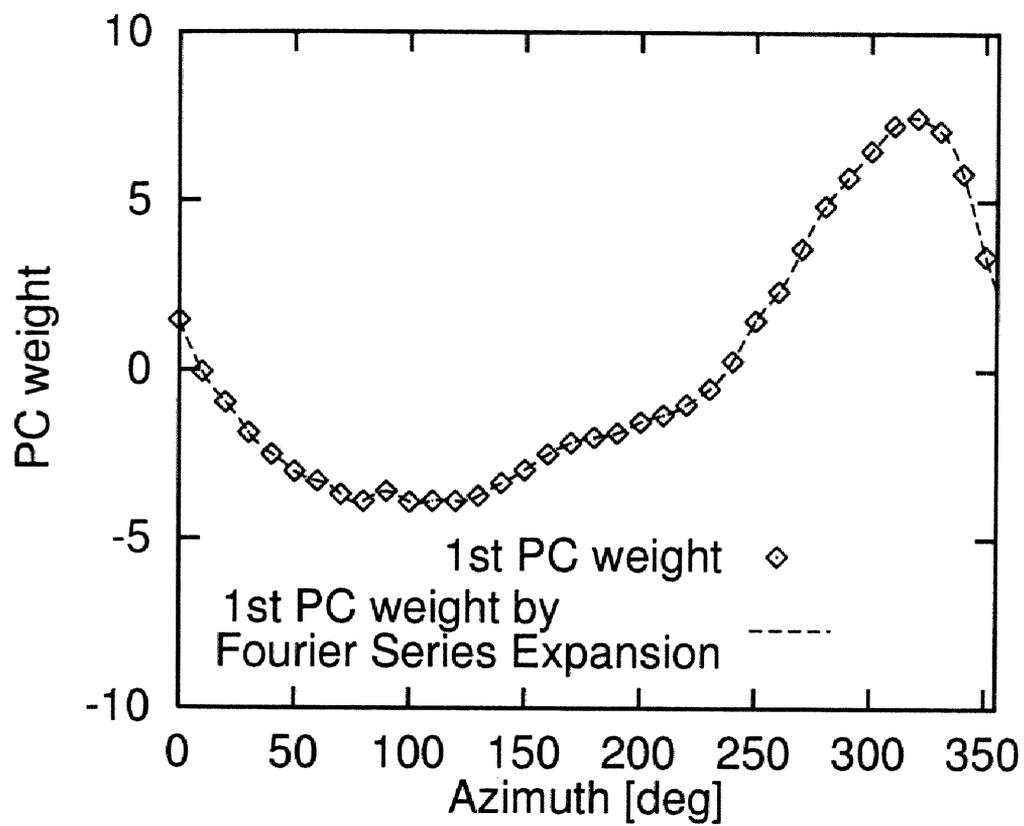


図 2.5: 右耳 HRTF の第 1 主成分重み (◇は第 1 主成分重み系列, 点線は第 1 主成分重み系列をフーリエ級数展開した結果)

2.4 実験

2.4.1 実験条件

補間実験は、5°ごとの HRTF 計 72 個が得られるように、表 2.1 に示す 5 条件で行なった。例えば、条件 1 は 0° から 10° ごとに 350° まで測定した M=36 点の HRTF から 5°, 15°, ..., 355° の計 36 個の HRTF を補間により求めることを表す。

インパルス応答の補間

インパルス応答の補間では、HRTF を図 2.6 に示される遅延時間成分と主応答成分に分離した後、遅延時間成分と主応答成分それぞれに補間手法を適用する。ここで、遅延時間は振幅応答に何ら影響を与えない部分であることから、インパルス応答から適切な遅延時間を分離すれば、遅延時間を分離する前のインパルス応答の振幅応答と、遅延時間を取り除いたインパルス応答の振幅応答との間の相関係数は 1 となる。これに対し、遅延時間を真値より長く求め分離した場合には、相関係数は 1 を大きく下回る [124]。そこで、式 (2.15) を満たす最大の τ を遅延時間とした。

$$\frac{\text{Cov}(\mathbf{H}, \mathbf{H}_\tau)}{\sqrt{\text{Var}(\mathbf{H})\text{Var}(\mathbf{H}_\tau)}} > 0.997 \quad (2.15)$$

$$\mathbf{H} = (|H[f_1]|, |H[f_2]|, \dots, |H[f_{256}]|)^T$$

$$\mathbf{H}_\tau = (|H_\tau[f_1]|, |H_\tau[f_2]|, \dots, |H_\tau[f_{256}]|)^T$$

表 2.1: 補間データの条件

No.	データ間隔 [deg]	補間に用いる点数 (M)	被補間点数
1	10 (0,10,...,350)	36	36
2	15 (0,15,...,345)	24	48
3	30 (0,30,...,330)	12	60
4	45 (0,45,...,315)	8	64
5	90 (0,90,180,270)	4	68

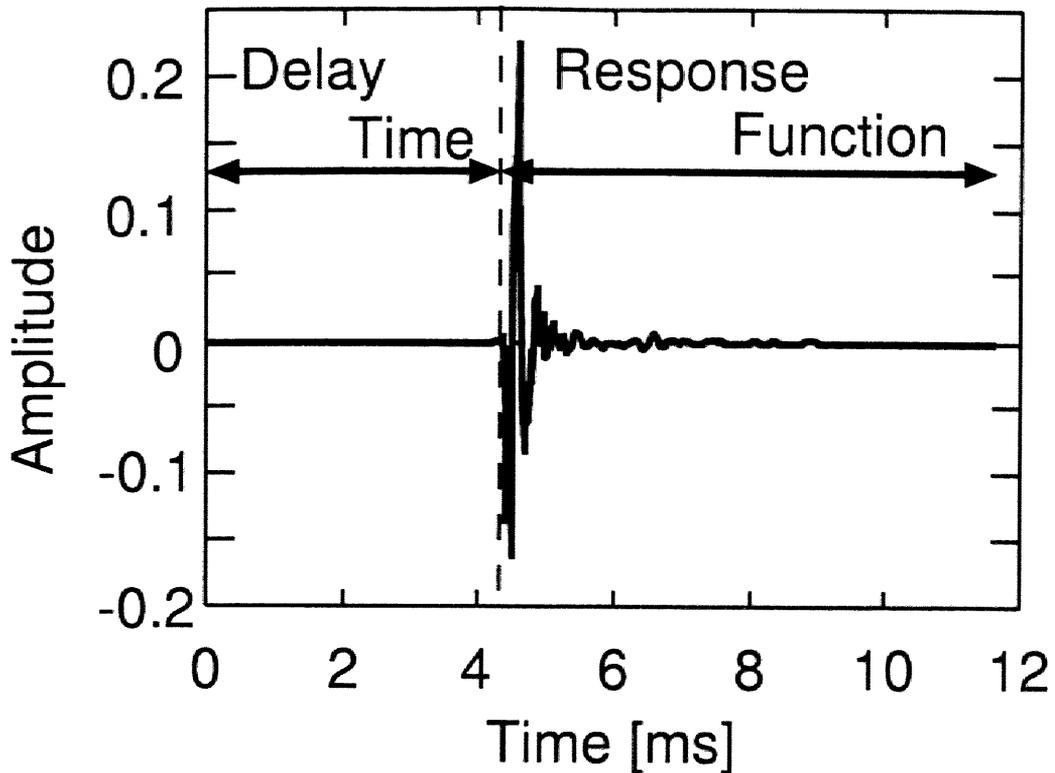


図 2.6: HRTF 中の遅延成分と主応答成分

ここで $|H[f_i]|, i = 1, 2, \dots, 256$ は、測定した HRTF $h[n]$ の振幅応答、 $|H_\tau[f_i]|, i = 1, 2, \dots, 256$ は、 $h[n - \tau]$ の振幅応答である。また 0.997 は予備実験により決定した値である。

この手順にて求めた遅延時間を用いて、HRTF のインパルス応答を遅延時間成分と主応答成分に分離した後、零詰めを行ない 512 点のインパルス応答とした。この零詰めした主応答成分に対して 2.3 節で述べた 2 つの補間手法を適用した。また、補間した HRTF の遅延時間 $\hat{\tau}$ は、測定した HRTF より求めた遅延時間 τ_1, τ_2 に線形 2 点補間を適用し求めた。

$$\hat{\tau} = r \times \tau_1 + (1 - r) \times \tau_2, \quad 0 \leq r \leq 1 \quad (2.16)$$

振幅応答の補間

振幅応答の補間では、測定した HRTF のインパルス応答に対し 512 点の DFT を行なった後、振幅応答に対してのみ補間手法を適用する。

ここで HRTF の位相に関して、Kistler らは HRTF を最小位相フィルタとしてモデル化を行ない、評価を行なった結果、HRTF は最小位相フィルタとしてモデル化が可能であると報告した [121]。そこで、本実験においても位相応答は補間対象として取り扱わず、振幅応答に対してのみ補間を行なうこととし、HRTF の主応答成分が最小位相フィルタとなるようにした。最小位相フィルタは、振幅応答を逆フーリエ変換した後に、その逆フーリエ変換信号の自己相関を求め、Levinson-Durbin 法により求めた。なお、振幅応答を精度良く再現するため、最小位相フィルタを求める際のフィルタのサンプル数は 86 点とした。

また、補間した HRTF の遅延時間は、インパルス応答の補間と同様、式 (2.16) により求めた値を用いた。

2.4.2 評価基準

補間の評価は、客観評価と主観評価により行なった。

客観評価尺度には、Signal to Deviation Ratio(SDR) と、Spectral Distortion(SD) を用いた。SDR は測定した HRTF と補間した HRTF をインパルス応答で比較するため、HRTF の振幅応答と位相応答の両方の補間精度を評価する尺度である。一方、SD は HRTF の振幅応答のみの補間精度を評価する尺度である。

次に、HRTF の補間により、滑らかな移動感が得られるか、また、測定されていない方向の音源定位が可能かを検討するため、主観評価では、移動感と方向定位感の評価実験を行なった。なお、本章では、滑らかな移動感が得られることに重点を置いたため、まず移動感の主観評価実験を行ない、補間可能な最大の角度間隔を決定した後、その角度間隔での方向定位感について評価を行なった。

客観評価尺度

SDR は式 (2.17) を用いて求める。

$$D_t(l) = 10 \log \frac{\sum_{n=1}^{N_r} h^2[n]}{\sum_{n=1}^{N_r} \{h[n] - \hat{h}[n-l]\}^2}, \quad l = \pm 1, 0 \quad [\text{dB}] \quad (2.17)$$

ここで、 $h[n]$ は測定した HRTF の主応答成分、 $\hat{h}[n]$ は補間した HRTF の主応答成分を表す。また、 N_r は主応答成分の信号長を表す。 l は、時間軸のずれを考慮する

ために導入したパラメータで、求めた $D_t(l)$, $l = \pm 1, 0$ の中で最大値をとるものを評価値とする。 D_t は値が大きい程、HRTF の補間精度が高いことを示している。なお、遅延時間成分については、いずれの補間法・補間対象の場合でも線形 2 点補間により求めているので、主応答成分のみを対象として SDR を計算した。

一方、SD は式 (2.18) を用いて求める。

$$D_f = \sqrt{\frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \left(20 \log \frac{|H[f_i]|}{|\hat{H}[f_i]|} \right)^2} \quad [\text{dB}] \quad (2.18)$$

ここで、 $|H[f_i]|$ は測定した HRTF の振幅応答で、 $|\hat{H}[f_i]|$ は補間した HRTF の振幅応答である。 f_i は周波数を表す。 D_f が小さい程、HRTF の補間精度が高いことを示している。なお、本実験では全帯域について評価を行なうため、 $I = 256$ とし D_f を求めた。

主観評価尺度

(1) 移動感の主観評価

評価には、0~20 kHz の周波数成分を持つ定常白雑音を音源として用いた。立ち上がり、立ち下がり時間は、いずれも 10 ms である。HRTF を方位角が $0^\circ \sim 355^\circ$ まで 5° おきに変化するように設定した 7 秒の呈示音を作成し、評価を行なった。

実験は HRTF を測定した 22~25 才の正常な聴力を有する男性 6 名を対象に、被験者本人の HRTF を用いて行なった。呈示はヘッドホン (AKG K-240) を用いて行なった。呈示音圧は、各被験者が最も聴き易い音圧に各自で設定させた。評価は、音圧や方向が不連続ではなく、滑らかに頭部周辺を移動していくように呈示音が聞こえるかを Mean Opinion Score (MOS) 評価で行なった。評価項目と評価点を表 2.2 に示す。

(2) 定位の評価

評価には、0~20 kHz の周波数成分を持つ 100 ms の定常白雑音を音源として用いた。立ち上がり・立ち下がり時間は、いずれも 10 ms である。次に、HRTF を方位角が $0^\circ \sim 355^\circ$ の間を 5° 間隔でランダムに変化するように設定し、1 回分の呈示音を作成した。実験では、このように作成した呈示音を計 12 回被験者に呈示した。なお、白雑音と白雑音の間には、回答時間として予備実験より決定した 1 秒間の無音区間

表 2.2: 移動感の評価値

評価点	評価項目
0	不連続感がある
1	やや不連続感がある
2	普通
3	ほとんど不連続感はない
4	全く不連続感はない

を設けた。被験者は HRTF を測定した 22~25 才の正常な聴力を有する男性 3 名であり、被験者本人の HRTF を用い行なった。呈示はヘッドホン (AKG K-240) を用いて行なった。呈示音圧は、各被験者が最も聴き易い音圧に各自で設定させた。回答は、5° 間隔の印を付けた円が描かれた回答用紙に、知覚した方向を印の上に記入する方法で行なった。このため回答方向は 5° おきとなる。

実験結果は、正答率および前後知覚誤り率で評価した。ここで、正答は呈示方向から $\pm 10^\circ$ までのずれを許容したものとした。次に、前後知覚誤りは、前方に呈示した音が後方に知覚されたり、後方に呈示した音が前方に知覚される現象であることである。本実験では、回答の信頼区間を考慮して評価を行なうため、式 (2.19) から求まる平滑化標準偏差 $\hat{\sigma}(\theta)$ を導入した。この平滑化標準偏差 $\hat{\sigma}(\theta)$ の範囲外かつ、前後が逆の $\pm \hat{\sigma}(\theta)$ の範囲内の回答を本論文における前後知覚誤りとした (図 2.7)。

$$\hat{\sigma}(\theta) = \{\sigma(\theta - 5) + \sigma(\theta) + \sigma(\theta + 5)\} / 3 \quad (2.19)$$

ここで、 θ は方位角を表し、単位は度である。また、 $\sigma(\theta)$ は θ 方向の回答の標準偏差で、 θ 方向における回答のばらつきを表す。なお、本実験では $11^\circ \leq \sigma(\theta) \leq 14^\circ$ であった。

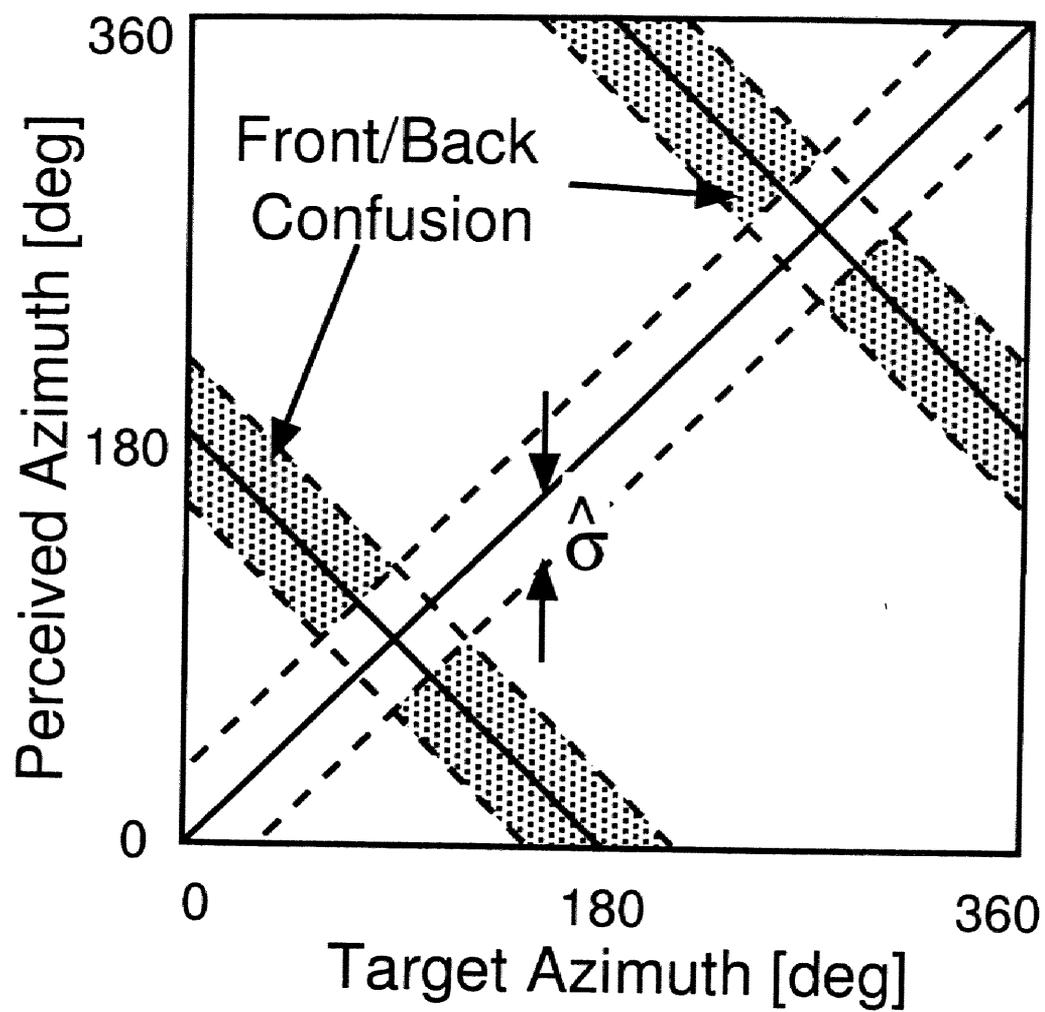


図 2.7: 前後知覚誤りの定義 (点線は $\hat{\sigma}$ だけ離れた角度を表す)

2.5 実験結果

主成分分析による手法では、主成分重みの次数を決定するにあたり、SDRで40dB以上、SDで1dB以下という条件で予備実験を行なった。その結果から、主成分重みの次数は、インパルス応答の補間で40、振幅応答の補間で35とした。このとき寄与率はともにほぼ1であった。なお、このSDR、SDの値では、目視による波形の比較ならびに、試聴による比較において、測定したHRTFとの差異は見られなかった。

2.5.1 客観評価結果

評価は測定した6名のHRTFを対象に行なった。図2.8にSDRで評価した平均を、図2.9にSDで評価した平均を示す。なお、右耳のHRTFを補間した場合と左耳のHRTFを補間した場合とでは、結果に有意な差は見られなかったため、両図とも右耳のHRTFを補間した結果についてのみ示す。

図2.8、図2.9より、インパルス応答の補間および振幅応答の補間とも角度の間隔が大きくなるに従って補間精度が悪くなることが分かる。図2.3、図2.4より、HRTFはインパルス応答、振幅応答とも局所的には方位角に沿って緩やかに変化する関数である。従って、選定した5条件の中で、 10° 、 15° といった間隔の小さい条件では補間精度が高くなる。また、角度間隔が 45° までは、線形2点補間は、主成分分析による補間よりも精度が良いことが分かる。

次に最も補間精度の良かった条件1の角度間隔が 10° の場合において、右耳HRTFの方位角ごとの評価を図2.10、図2.11に示す。図2.10、図2.11より、補間は正中面(0° 、 180°)や音源に近い角度(270°)付近での補間精度が高いのに対して、音源と反対側に耳が位置する角度(90°)付近での補間精度が悪くなっている。これは、音波が頭部を回折することによって生じるスペクトルの変化が複雑であるためと考えられる。

客観評価結果から、SDR、SDの評価では測定角度の間隔が小さな場合にHRTFは精度の高い補間が可能であると言える。しかし、どの程度のSDR、SDであれば知覚上問題無いかについては、次節の主観評価結果とあわせて議論する必要がある。

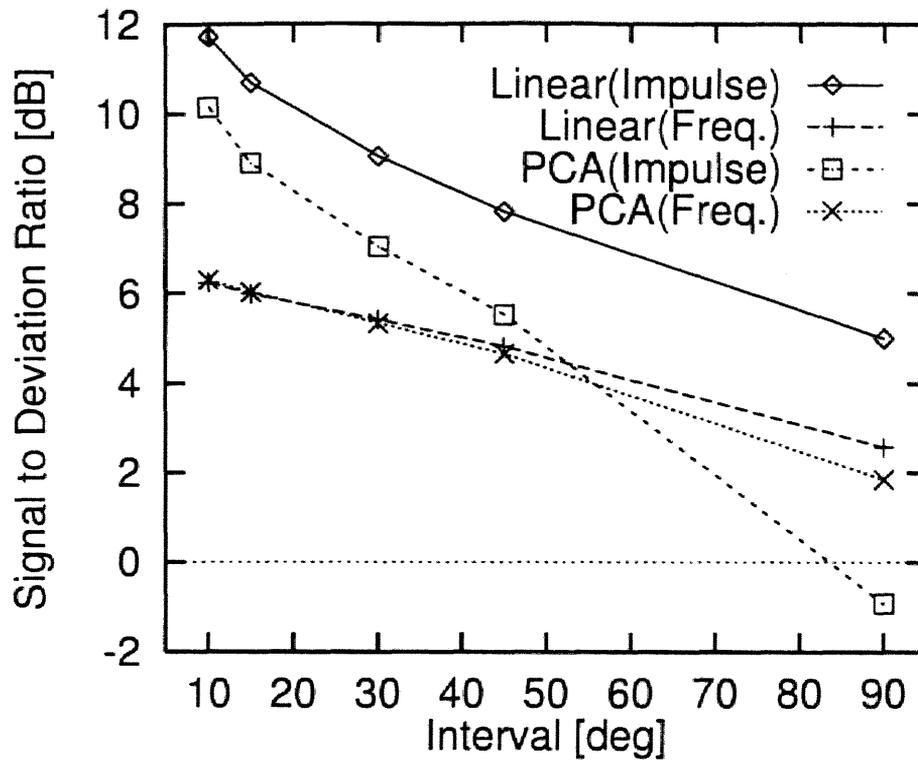


図 2.8: 平均 SDR(Linear は線形 2 点補間を, PCA は主成分分析による補間を表す。また, Impulse はインパルス応答の補間, Freq. は振幅応答の補間を表す。)

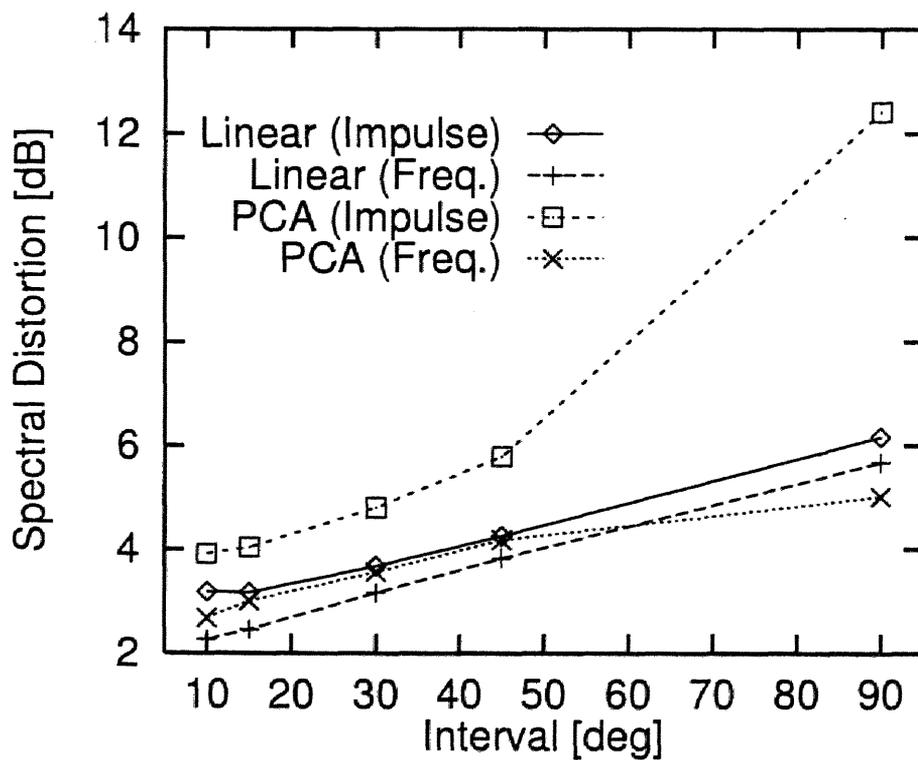


図 2.9: 平均 SD(Linear は線形 2 点補間を, PCA は主成分分析による補間を表す。また, Impulse はインパルス応答の補間, Freq. は振幅応答の補間を表す。)

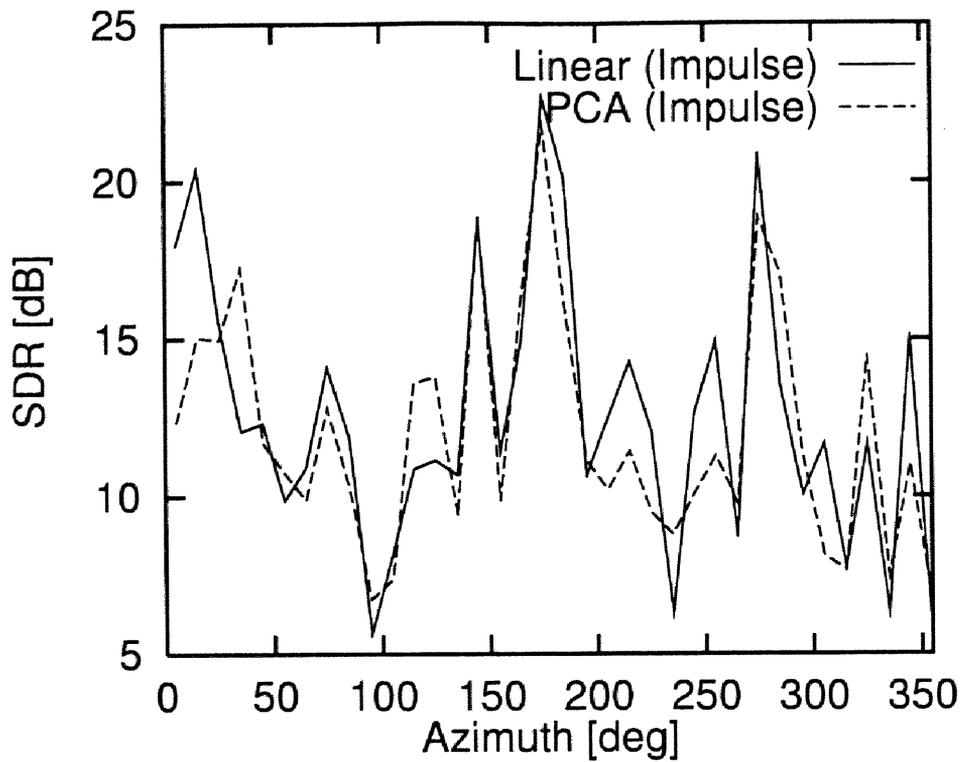


図 2.10: 方位角ごとの SDR (右耳に対する補間条件 1(角度間隔 10°)でのインパルス応答の補間)

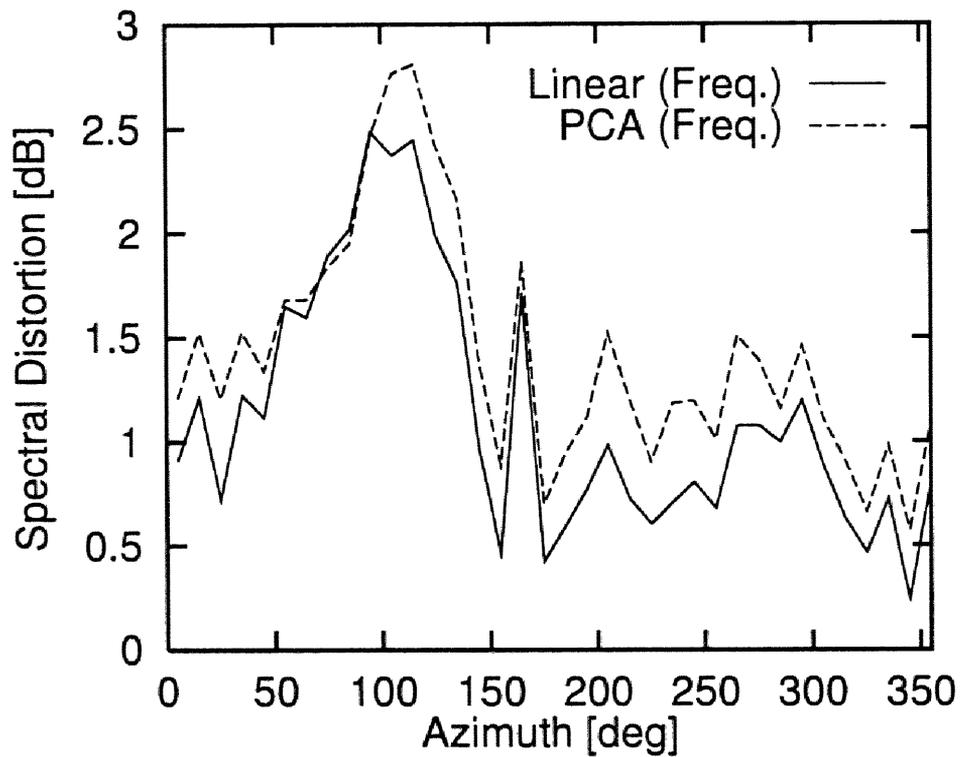


図 2.11: 方位角ごとの SD (右耳に対する補間条件 1(角度間隔 10°)での振幅応答の補間)

2.5.2 主観評価結果

(1) 移動感の主観評価

図 2.12に、補間した HRTF を用いた音像の移動感の主観評価結果を示す。結果は被験者 6 名の平均である。図より、補間した HRTF と測定した HRTF との評価の差は大きく、有意水準 5% で t 検定した結果、すべて有意な差があった。よって、補間により HRTF が劣化していると言える。しかし、MOS 値が 2(移動感が普通の場合) 以上の場合は、移動感が得られたものとして、有意水準 5% で t 検定した結果、45°までは、補間手法、補間対象ともに有意に 2 を下回っているとは言えなかった。また、振幅応答を補間した場合は、角度間隔が 90°であっても、有意に 2 を下回っているとは言えず、移動感が得られていると言える。

次に、客観評価の結果と移動感の評価を対比させる。SDR の結果と MOS 値の結果の対比を図 2.13に、SD の結果と MOS 値の結果の対比を図 2.14に、それぞれ示す。図 2.13より、SDR と MOS 値の相関係数は 0.67、図 2.14より、SD と MOS 値の相関係数は-0.75 であった。よって、SD は SDR よりも移動感の客観評価尺度として適していると言える。これをふまえて、SD と MOS 値の関係に対し有意水準 5% で回帰分析を行ない、回帰式を求めた。図 2.15は、図 2.14に回帰式を併せて示したものであり、図 2.15の実線は回帰式による予測値である。この予測値と、主観評価実験で有意に 2 を下回っているとは言えなかった場合(45°までの全ての場合および 90°の振幅応答を補間した場合) とを併せて考えると、SD で 5.7dB 以下であれば移動感が得られると考えられる。

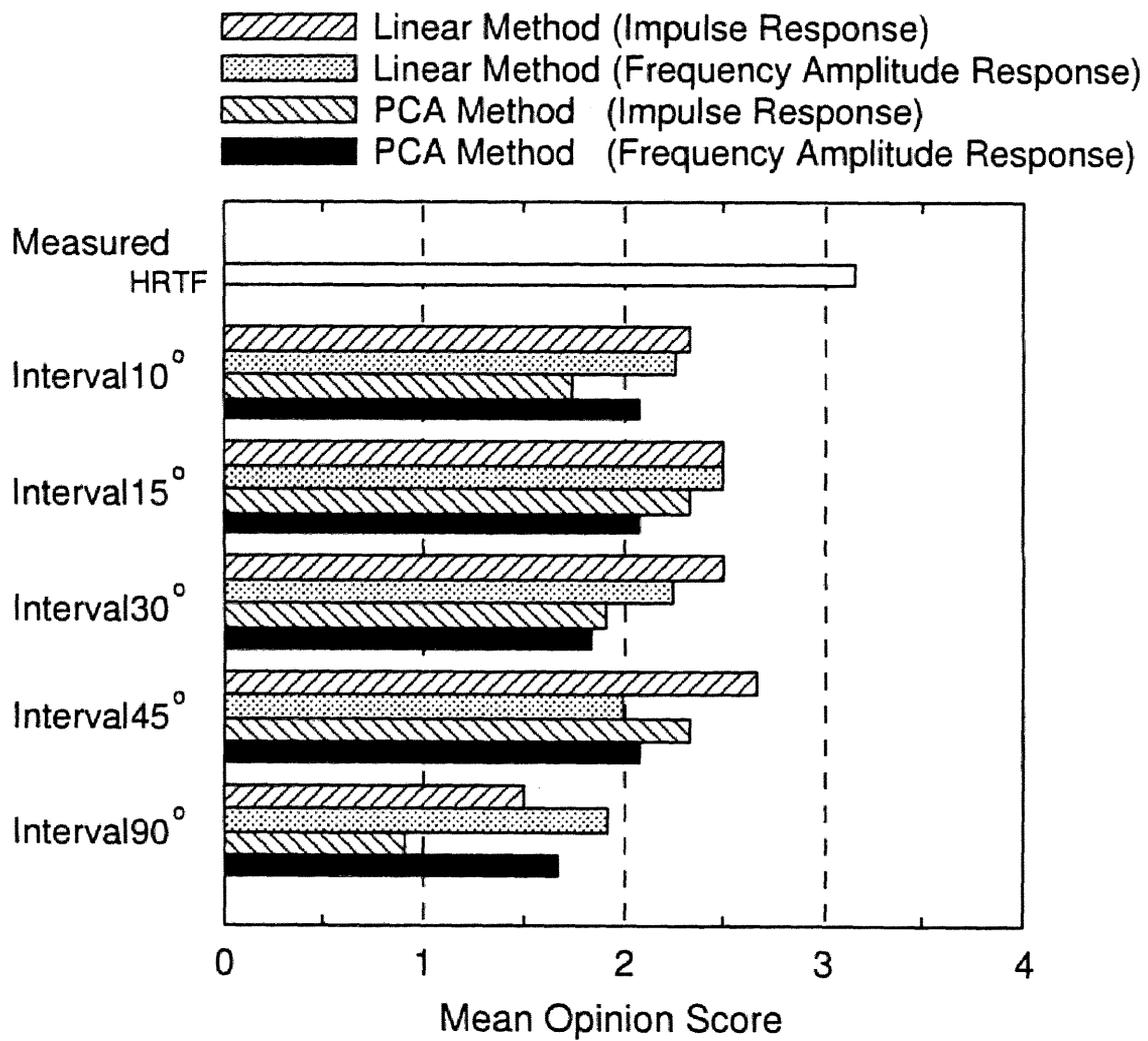


図 2.12: MOS 値による移動感の主観評価結果

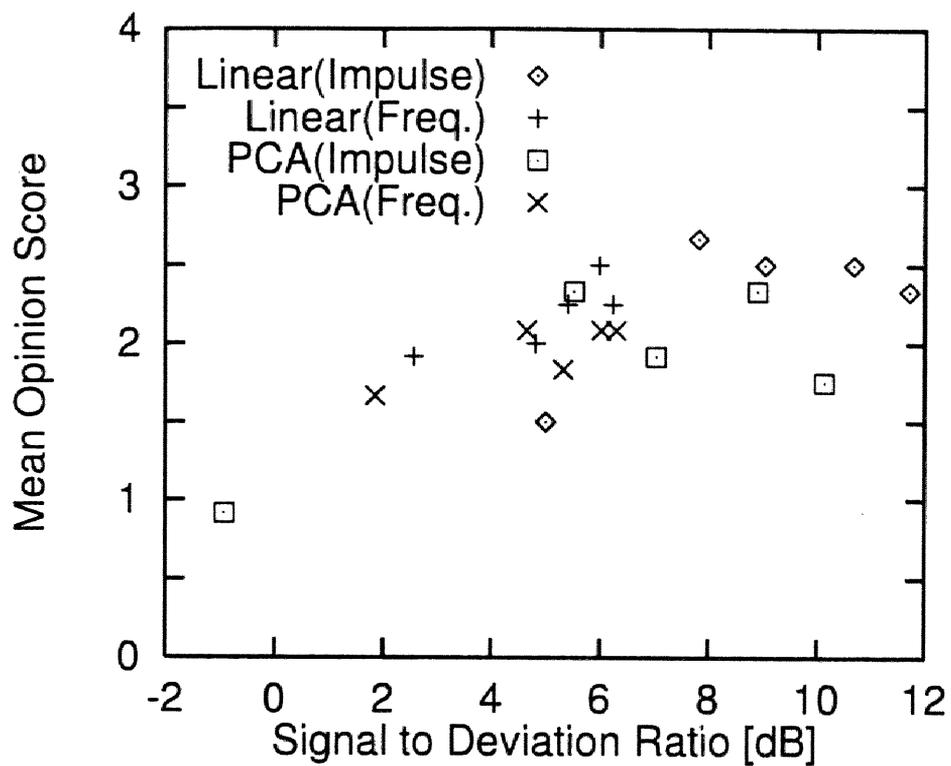


图 2.13: SDR 对 MOS 值

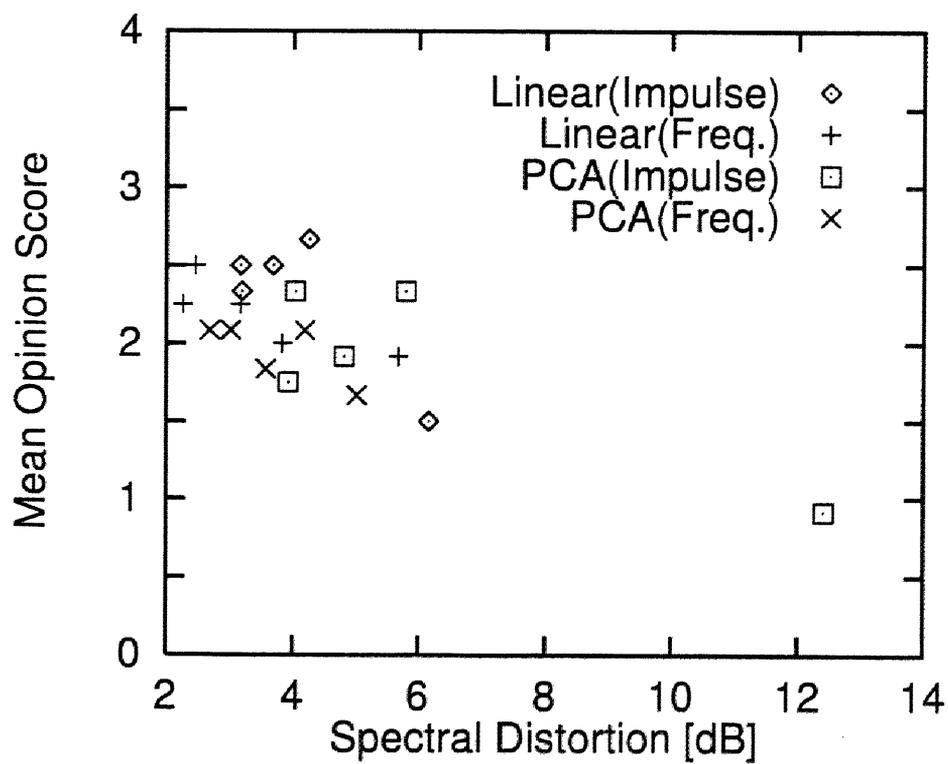


图 2.14: SD 对 MOS 值

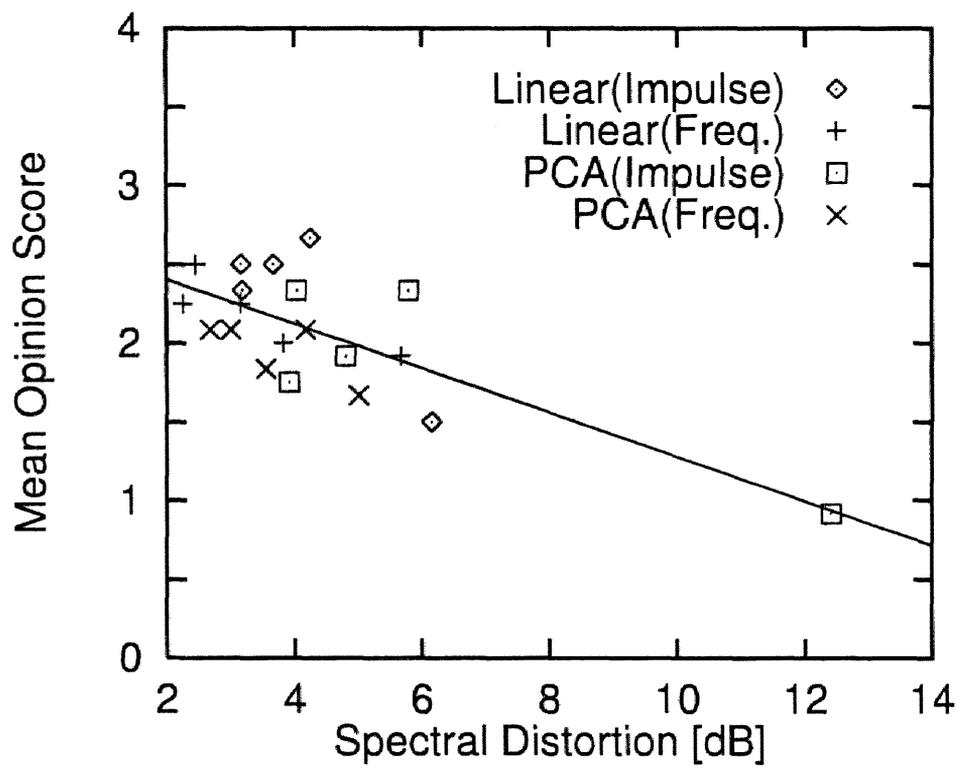


図 2.15: 回帰式による MOS 値の予測

(2) 音源定位による評価

角度間隔 45°までは、補間手法、補間対象に関わらず移動感が得られていた。そこで、最大間隔である 45°について、音源定位 (方向定位感) の評価を行なった。

被験者 3 名の回答結果を図 2.16 から図 2.20 に濃淡図で示す。濃い部分ほど回答数が多いことを表す。なお、補間した HRTF を用いた場合の方位角度 0°, 45°, …, 315° は測定した HRTF そのものであるため、被験者には呈示していない。よって、図 2.17 から図 2.20 中の 0°, 45°, …, 315° については、回答数は 0 となっている。

方位別に見ていくと、後方 (180°付近) に関しての定位は比較的良好であったが、側方 (90°および 270°付近) での定位結果が悪かった。

次に、被験者 3 名の平均正答率と平均前後知覚誤り率を表 2.3 に示す。正答率の結果から、補間した HRTF の正答率は測定した HRTF の正答率よりも低く、有意水準 5% で t 検定したところ有意な差があった。よって、補間により HRTF が劣化したことが分かる。有意水準 5% で t 検定した結果、インパルス応答の補間に対しては、線形 2 点補間が主成分分析による補間よりも良い結果であった。振幅応答に対しては、線形 2 点補間と主成分分析による補間とは、有意な差が無かった。また、インパルス応答を補間した場合と振幅応答を補間した場合とは、有意な差は無かった。以上より、線形 2 点補間を用いた場合は、主成分分析による補間と同等もしくはより良い補間が可能と言える。前後知覚誤り率を、有意水準 5% で t 検定したところ、補間手法間および補間対象間での有意な差は見られなかった。これより、補間手法については線形 2 点補間が主成分分析による補間と同等もしくはより良い補間精度を持ち、補間対象はインパルス応答であっても、振幅応答であってもどちらでも良いと言える。

続いて、移動感の評価結果と同様、客観評価の結果と正答率の結果を対比させる。SDR の結果と正答率の対比を図 2.21 に、SD の結果と正答率の対比を図 2.22 に、それぞれ示す。図 2.21 より、SDR と正答率の相関係数は 0.28、図 2.22 より、SD と正答率の相関係数は -0.94 であった。よって、SD は SDR よりも正答率の客観評価尺度として適していると言える。これをふまえて、SD と正答率の関係に対し有意水準 5% で回帰分析を行ない、回帰式を求めた。図 2.23 は、図 2.22 に回帰式を併せて示したものであり、図 2.23 の実線は回帰式による予測値である。この予測値から、測定した HRTF と同等の正答率を得るためには、補間した HRTF の SD は、3 dB 以下

である必要があると考えられる。

なお、本人の HRTF を用いた場合でも、正答率が低かった (表 2.3)。この原因として、再生系の厳密な補正を取っていないこと、被験者に絶対的な角度で回答をさせたことが挙げられる。

表 2.3: 条件ごとの正解率と前後誤り率

	正解率	前後誤り率
測定した HRTF	46.3%	4.3%
線形 2 点補間 (インパルス応答)	42.1%	6.7%
線形 2 点補間 (振幅応答)	41.4%	6.8%
主成分分析による補間 (インパルス応答)	37.1%	6.7%
主成分分析による補間 (振幅応答)	40.9%	6.1%

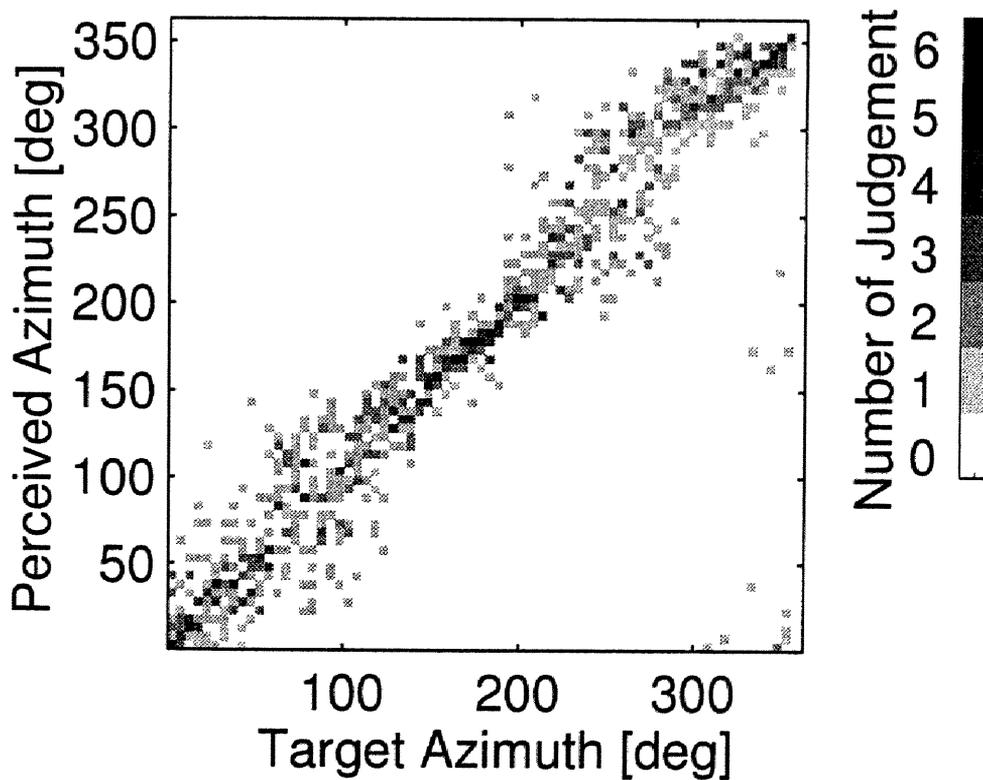


図 2.16: 音源定位結果 (測定した HRTF)

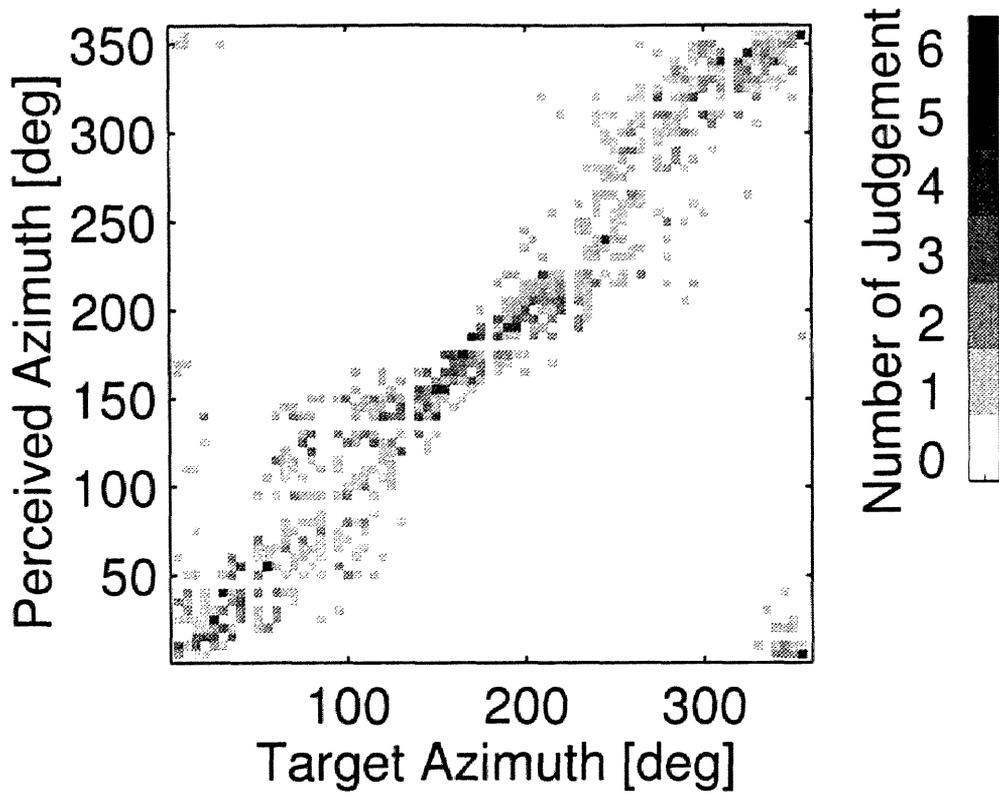


図 2.17: 音源定位結果 (線形 2 点補間によるインパルス応答の補間)

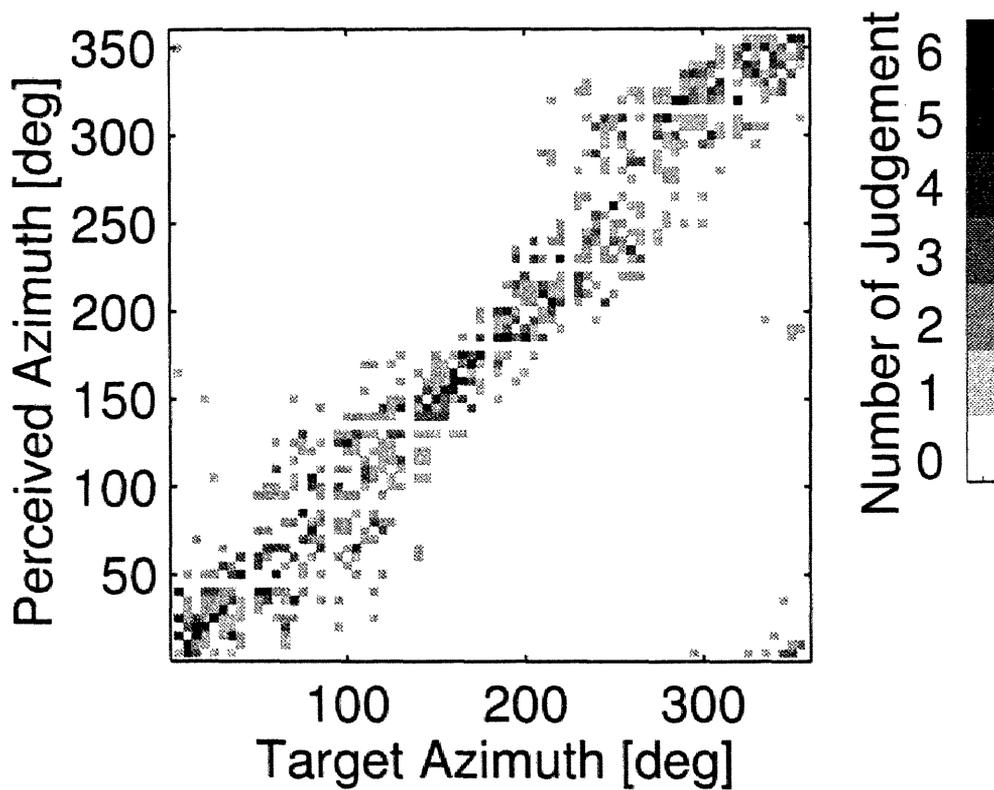


図 2.18: 音源定位結果 (線形 2 点補間による振幅応答の補間)

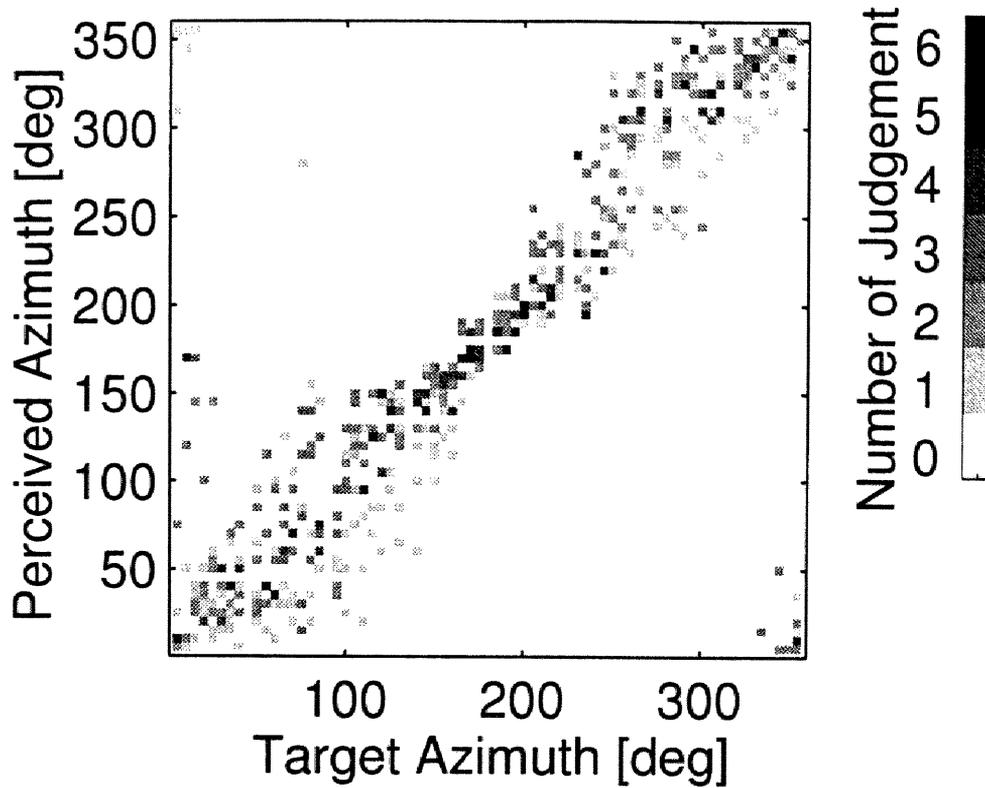


図 2.19: 音源定位結果 (主成分分析によるインパルス応答の補間)

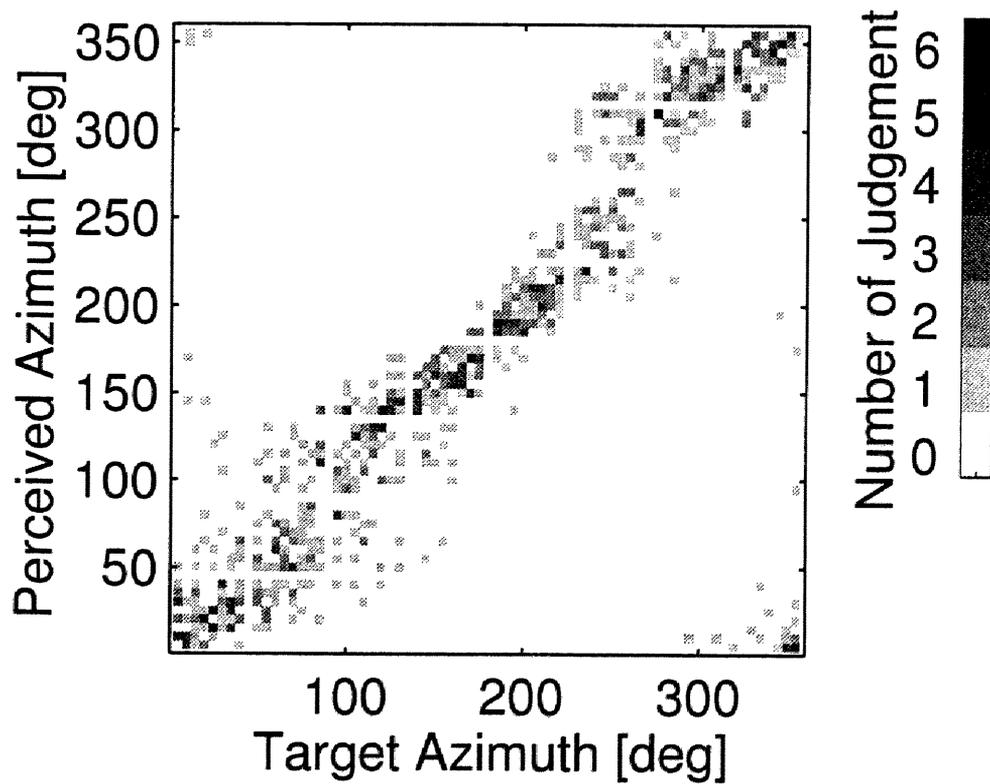


図 2.20: 音源定位結果 (主成分分析による振幅応答の補間)

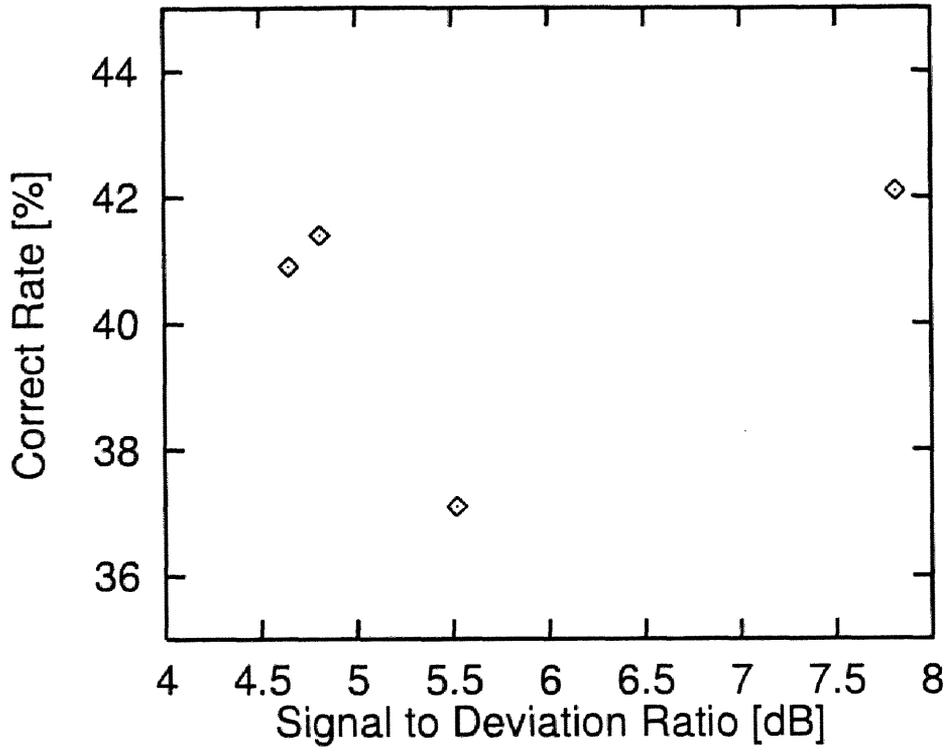


图 2.21: SDR 对正答率

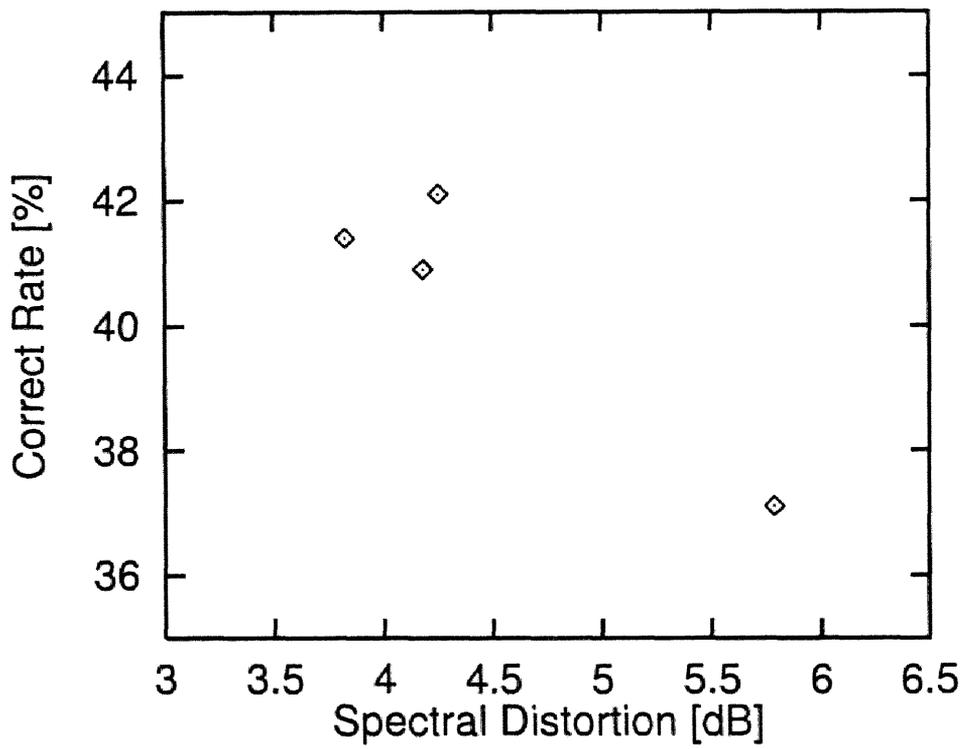


图 2.22: SD 对正答率

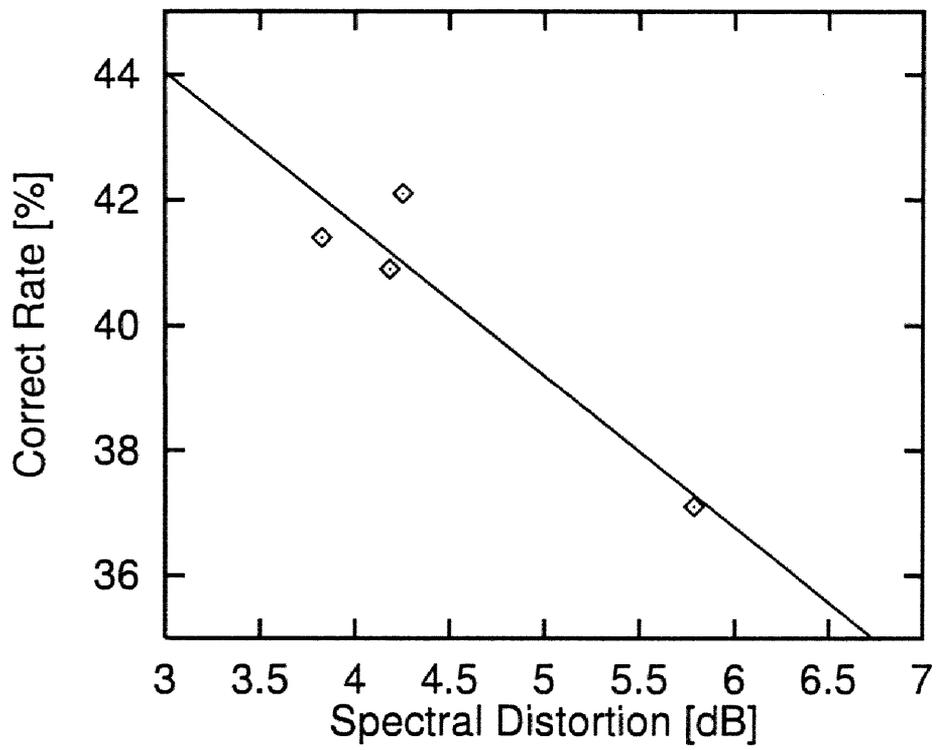


図 2.23: 回帰式による正答率の予測

2.5.3 まとめ

主観評価の結果から、補間した HRTF は角度間隔が 45° においても移動感が得られた。客観評価と移動感の主観評価の結果を対応付けて考えると、 5.7dB 以下の SD であれば移動感が得られると言える。

また、音源定位の結果から、線形 2 点補間と主成分分析による補間では、線形 2 点補間の方が補間精度がより良いこと、補間対象がインパルス応答と振幅応答とでは有意な差は無いことが明らかとなった。以上の結果から、水平面上の音源定位の大きな鍵と言われる両耳間の時間差と音圧差成分は、 45° 間隔までは、線形近似可能と言える。さらに、主観評価結果から、水平面上の HRTF は、位相を最小位相と置き換えても定位性能に影響を与えないと言える。

2.6 むすび

本章では、限られた音源方位で測定した水平面上の HRTF から、測定されていない方位の HRTF を補間する問題について、線形 2 点補間を用いた手法、および主成分分析を用いた手法を提案し、HRTF のインパルス応答および振幅応答に対して補間可能な角度を検討した。

客観評価の結果から、HRTF は測定角度間隔が小さい場合 ($10^\circ, 15^\circ$) においては高い精度の補間が可能であり、間隔が大きくなるほど補間精度が劣化することが確かめられた。主観評価の結果から、測定間隔が大きい場合 ($30^\circ, 45^\circ$) においても、滑らかな移動感が得られた。さらに 45° の場合において定位方向感の評価を行なった結果、線形 2 点補間は主成分分析を用いた補間よりも補間精度がより良いことが示された。

また、主観評価の結果から、インパルス応答を補間した場合と振幅応答を補間した場合との間で有意な差は無く、水平面上の HRTF は、最小位相フィルタとして構成可能であることも確かめられた。

以上の結果から水平面上の HRTF は、 45° 以下の間隔で測定し補間を行なえば、滑らかな移動感を与える HRTF が推定可能なことが示された。

第 3 章

水平方向および仰角方向に関する頭部伝達関数の補間

3.1 はじめに

第 2 章では、水平面上の頭部伝達関数 (Head Related Transfer Function: HRTF) に対し、線形 2 点補間と主成分分析による補間の 2 手法を適用し、補間の検討を行なった。客観評価結果と音源の移動感および定位感による主観評価結果から 45° 間隔で測定した HRTF から推定された HRTF を用いても滑らかな移動感が得られることを明らかとした。これにより、HRTF を利用するシステムにおいて、水平方向のデータ削減が可能となった。ここで、水平方向に加え仰角方向に関して、HRTF の補間が可能であれば、さらなるデータ削減に繋がる。仰角方向を含めた HRTF の補間に関しては、E. M. Wenzel らにより、水平方向 30° 間隔、仰角方向 36° 間隔の線形補間を用いた検討が行なわれている [80]。しかし、主観評価の結果、補間した HRTF を用いた場合では、定位誤りが増加した。また、HRTF の振幅特性および群遅延特性の特徴点を利用した補間手法も検討されている [82]。しかし、これらの報告では補間の角度間隔を固定とした検討であり、角度間隔を変化させた場合について検討がなされていないという問題点がある。

そこで本章では、方位および仰角に関して、補間の角度間隔の違いによる補間精度の検討について述べる。補間の角度間隔は、一定の角度間隔とした場合だけでなく、補間精度が最も良くなる角度の組み合わせを、おおよそ 30 万通りについて調査し、本提案手法の性能限界を明らかにする。補間精度は、客観評価 (Spectral Distortion) および主観評価 (方位に関する音源定位実験および仰角に関する知覚実験) を用いて

評価した。

まず、3.2節にて、本章で用いた HRTF の測定条件および測定結果について述べる。3.3節では、HRTF の補間手法を提案し、3.4節において提案手法の有効性を検証するための評価方法 (客観評価および主観評価) を述べる。3.5節において、評価実験により得られた結果を述べ、最後に、3.6節において、本章のまとめを述べる。

3.2 頭部伝達関数の測定

補間実験に用いる HRTF を、B&K 4128 型の疑似頭および1名の被験者の疑似頭を用いて2種類測定した。ラウドスピーカ (BOSE, ACOUSTIMASS, 口径 63mm) から、信号長 0.3 s の Time Stretched Pulse (TSP)[125, 126] を出力し、疑似頭の外耳道入口に装着したコンデンサマイクロホン (SONY ECM-77B) との間のインパルス応答を求めることにより、HRTF を測定した。なお、マイクロホンは、マイクロホンの振動面が外耳道入口に位置するように、疑似頭の外耳道を塞ぐ形式で外耳道内に設置した。測定対象である疑似頭とラウドスピーカとの配置を図 3.1 に示す。ここで、第2章で行なった Golay 信号を用いた測定では音源が疑似ノイズで、TSP 信号を用いた測定では時間に対し周波数が変化するスイープ音が音源であるが、得られたインパルス応答間に差は無い。次に、測定した方向を表 3.1 に示す。この表中の角度は、方位については、図 3.2 のように、 0° は音源が正面に、 90° は左、 180° は後方、 270° は右に位置することを意味する。仰角については、 0° が水平面上に音源が位置することを意味し、負の角度は水平面より下に位置する場合を、正の角度は水平面より上に位置する場合を意味する。なお、水平面は鼻尖点と両耳珠点を含む平面とした。測定された HRTF の標本化周波数は 44.1 kHz、信号長は 11.6ms (512 点) である。また、測定は図 3.3 に示すような環境で行なった。この測定室は残響時間が 0.15 s で、暗騒音レベルは 22.0 dB(A) であった。

測定した HRTF の振幅応答の例を図 3.4 から図 3.8 に示す。なお、いずれの図も

表 3.1: 測定方向

方位 (Azimuth)	0° から 355° まで 5° 間隔で 72 方向
仰角 (Elevation)	-45° から 90° まで 5° 間隔で 28 方向
合計	1945 方向

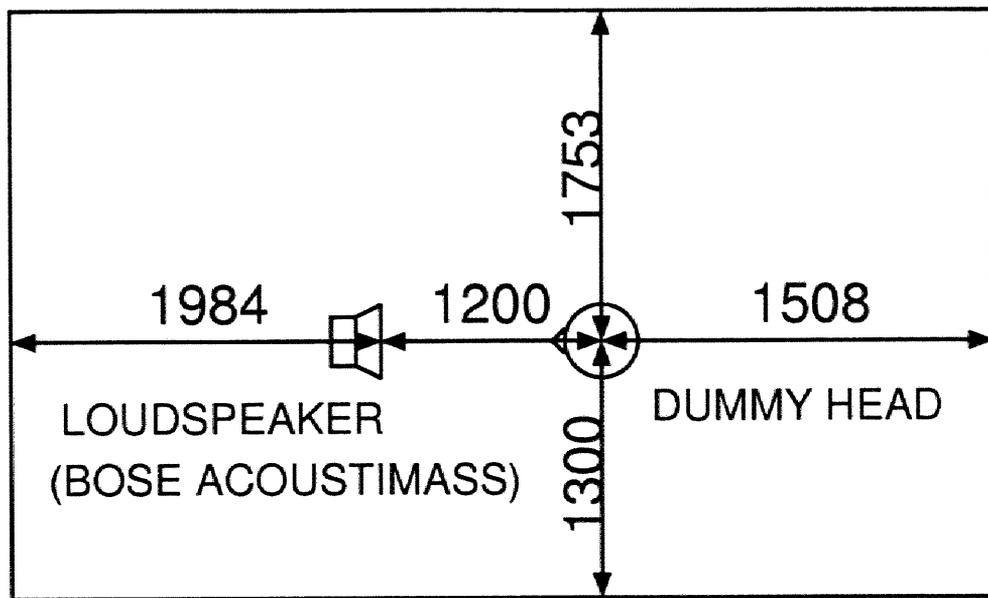


図 3.1: 測定環境 (単位: mm)

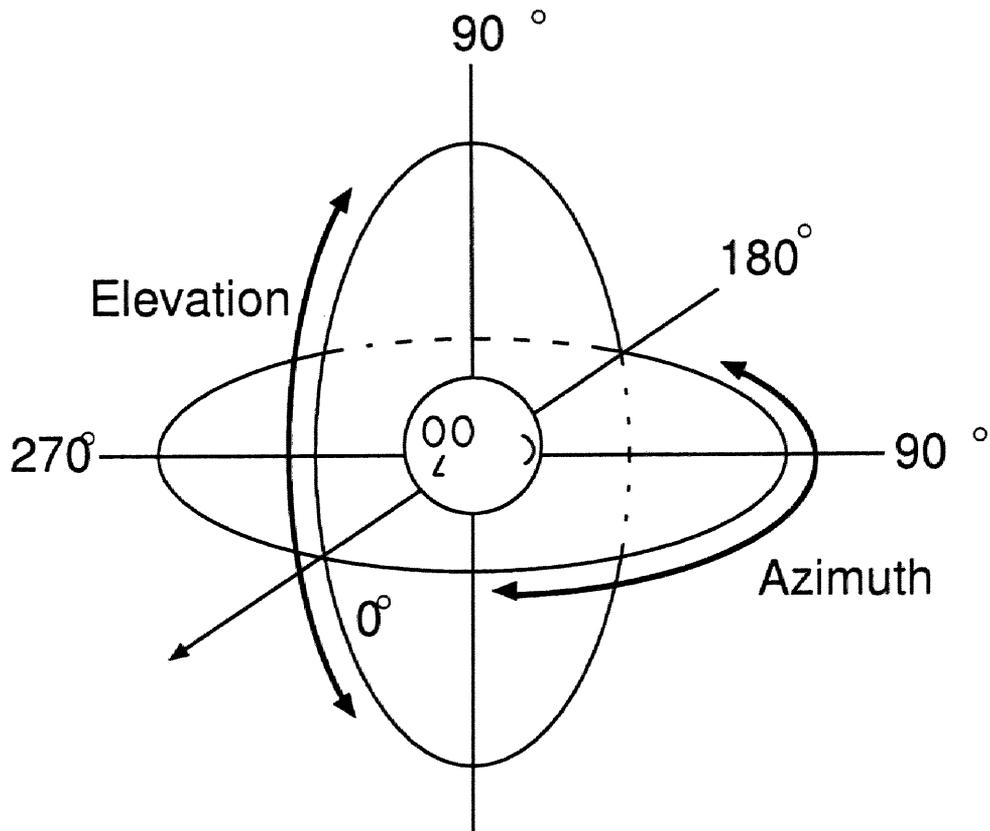


図 3.2: 方向の定義

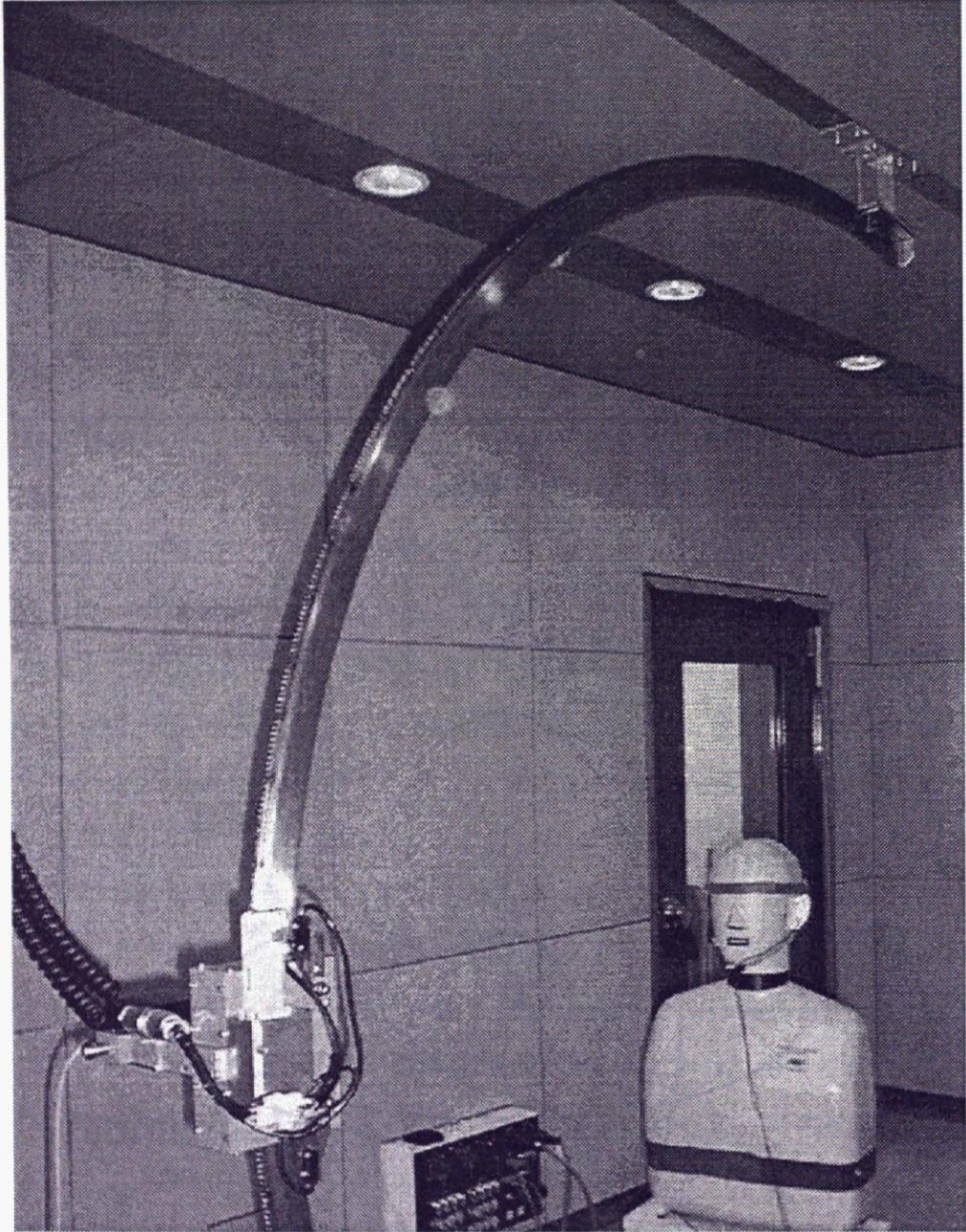


图 3.3: 测定室

被験者の疑似頭の左耳にて測定された HRTF の場合を示してある。仰角を一定として方位のみを変化させて表示した場合 (図 3.4, 図 3.5, 図 3.6) では, 角度に関して局所的に緩やかに変化する部分が多いことが分かる。また, 仰角が大きくなるにつれて, 振幅応答の起伏が小さくなることが分かる。次に, 方位を一定として仰角のみを変化させて表示した場合 (図 3.7, 図 3.8) では, 方位のみを変化させて表示した場合と同様, 角度に関して局所的に緩やかに変化する部分が多いことが分かる。以上のことから, HRTF の振幅応答の補間可能性がうかがえる。

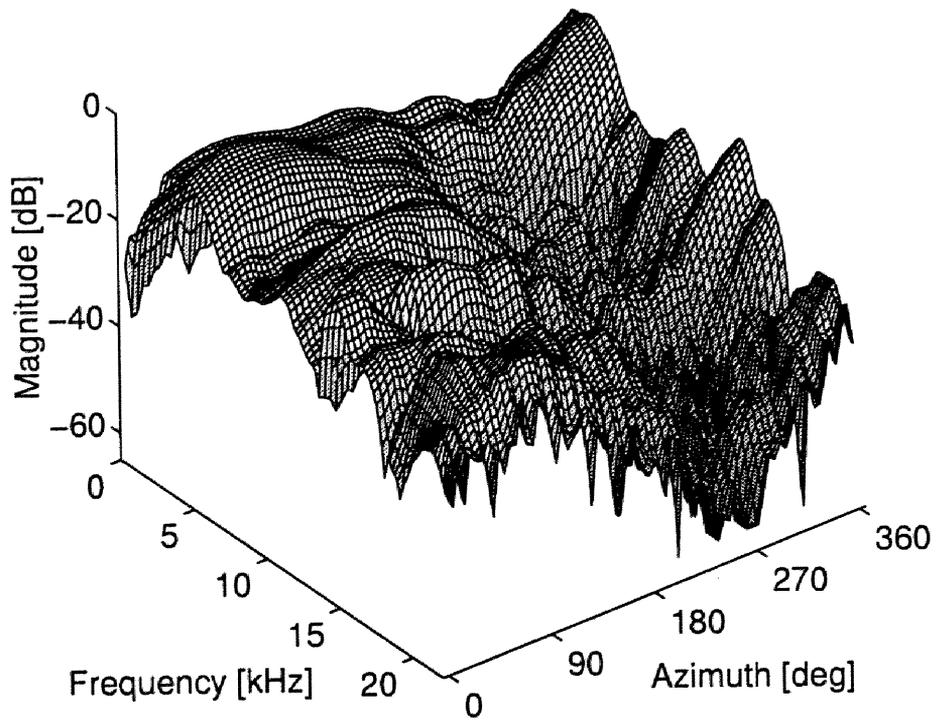


図 3.4: 測定した HRTF の振幅応答 (仰角 -45°)

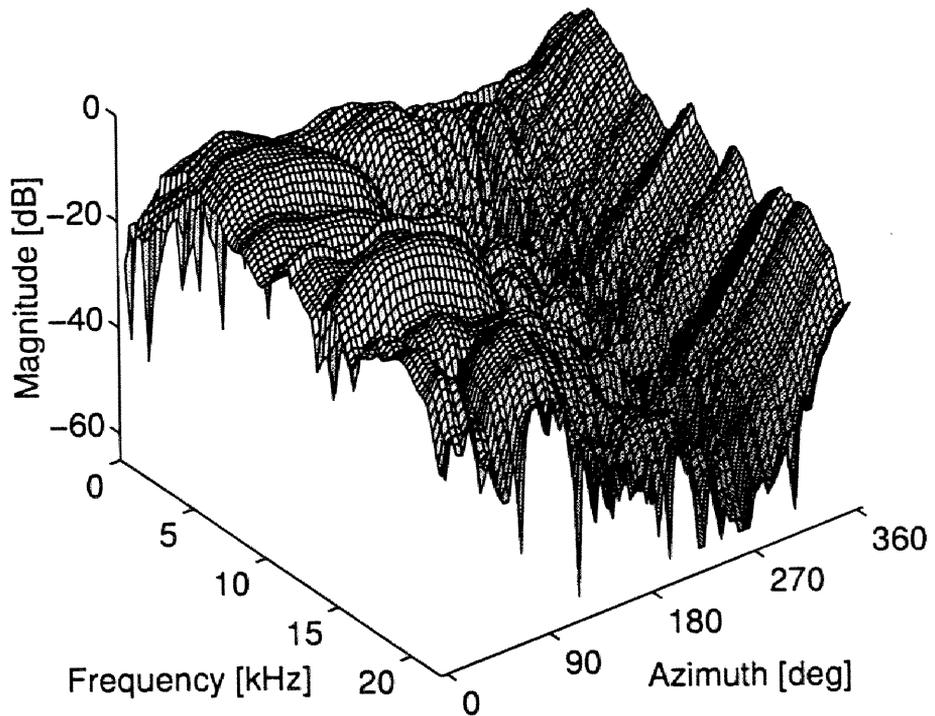


図 3.5: 測定した HRTF の振幅応答 (仰角 0°)

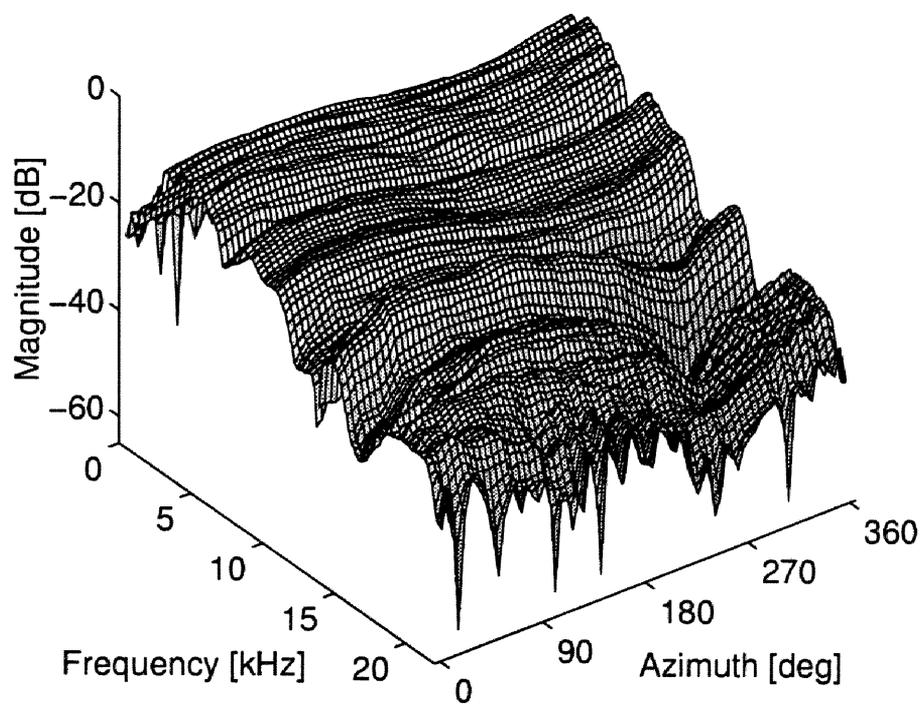


図 3.6: 測定した HRTF の振幅応答 (仰角 75°)

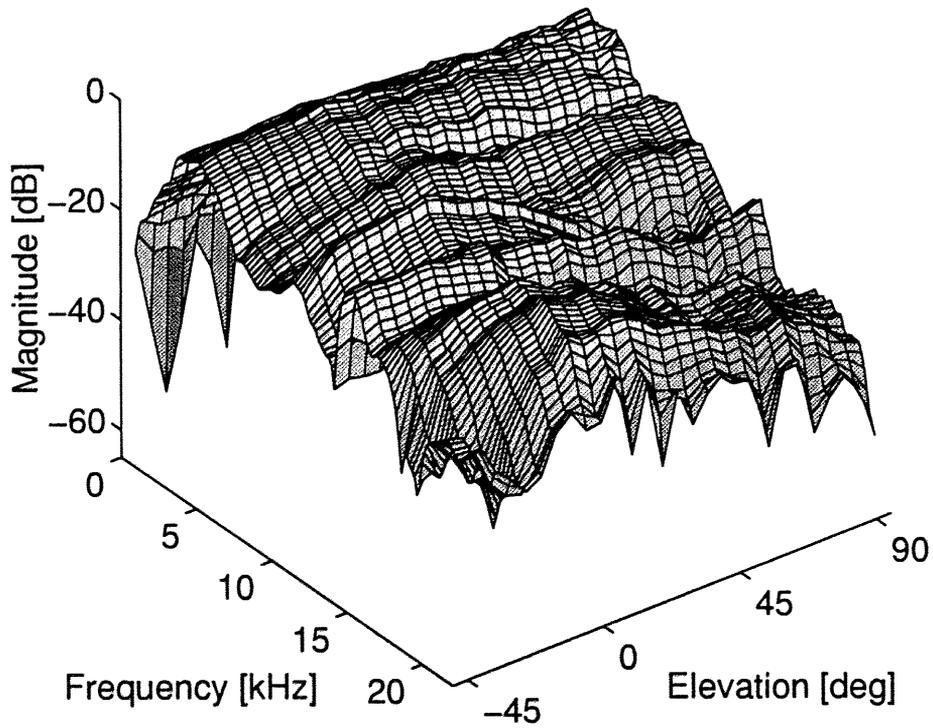


図 3.7: 測定した HRTF の振幅応答 (方位 0°)

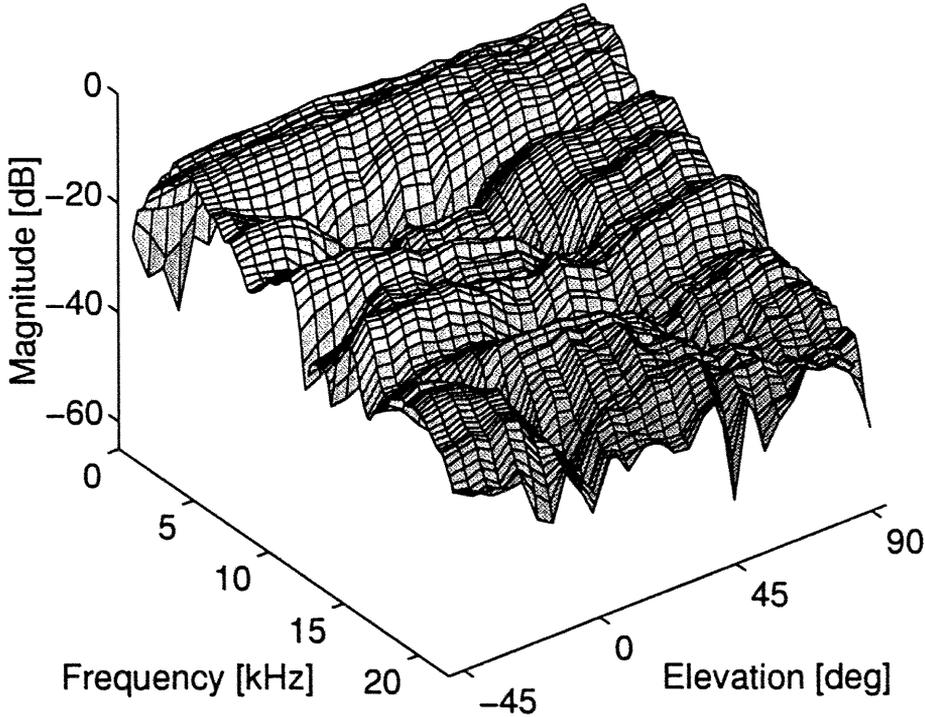


図 3.8: 測定した HRTF の振幅応答 (方位 165°)

3.3 補間手法

本章では、補間手法として線形 2 点補間およびスプライン補間を用い、HRTF の振幅応答に対して補間を行なう。第 2 章では、主成分分析による補間手法の検討を行なったが、この主成分分析による補間手法は、離散値フーリエ級数展開を用いているため、補間の角度間隔が一定でなくてはならない。これに対し、本実験で補間に用いる角度間隔は、3.4 節で述べるとおり、不等間隔となる条件があり、離散値フーリエ級数展開を用いることができない。さらに、第 2 章の結果では、主成分分析による補間手法の補間結果よりも線形 2 点補間の補間結果が精度の良い結果であった。以上より、本章の実験では、主成分分析による補間手法は用いないこととした。なお、第 2 章において、HRTF は最小位相フィルタとして構成可能であることが確かめられたことをふまえ、補間実験の対象を HRTF の振幅応答のみとした。

3.3.1 線形 2 点補間

推定する振幅応答 $|\hat{H}[f_i]|$ は、2.3 節で述べた式 (2.2) により求めた。

$$|\hat{H}[f_i]| = r \times |H_1[f_i]| + (1 - r) \times |H_2[f_i]|, \quad 0 \leq r \leq 1 \quad (2.2)$$

ここで、 $|H_1[f_i]|$ 、 $|H_2[f_i]|$ は周波数 f_i での測定された HRTF の振幅応答、 r は $|H_1[f_i]|$ 、 $|H_2[f_i]|$ 間の内分比を表すパラメータである。 r を変えることにより $|H_1[f_i]|$ 、 $|H_2[f_i]|$ 間の任意の角度の HRTF の振幅応答を得る。なお、 $H_1[f_i]$ 、 $H_2[f_i]$ は 512 点の DFT により求めた。

3.3.2 スプライン補間

スプライン補間は N 個のデータのうち、連続する 2 個のデータ点を通る $k-1$ ($k < N$) 次関数を構成し、それらをできる限り滑らかに繋ぐための手法である。

本実験では、一般的に広く用いられている 3 次スプラインによる補間を用いて HRTF の補間を行なう。3 次スプラインは連続な関数で、区間上のいたるところで連続な 1 階および 2 階導関数を持ち、各小区間では 3 次以下の多項式で表されるものと定義される [127]。区間の両端での境界条件を与えることにより、3 次スプラインは一意に定まる。本実験では、スプラインの 2 階導関数が区間の両端で 0 となる自然境界を境界条件とした。ここでは、 $\theta_0 < \theta_1 < \dots < \theta_j < \dots < \theta_N$ に

において、HRTF の振幅応答に対する 3 次スプラインを求め、補間を行なう。区間 $[\theta_j, \theta_{j+1}]$, $j = 0, \dots, N-1$ における HRTF の振幅応答は、次式の 3 次多項式で表すことができる。

$$s_j(\theta) = a_j + b_j(\theta - \theta_j) + c_j(\theta - \theta_j)^2 + d_j(\theta - \theta_j)^3 \quad (3.1)$$

ここで、 $s_j(\theta)$ は HRTF の振幅応答 $|H_{\theta}[f_i]|$, $\theta_j \leq \theta \leq \theta_{j+1}$ を表す。また、 a_j は角度 θ_j における HRTF の振幅応答 $|H_{\theta_j}[f_i]|$ に等しい。スプライン補間の定義から式 (3.1) の係数 b_j , c_j , d_j は、以降のように求められる [128]。3 次スプラインは連続であることから、 $s_{j+1}(\theta_{j+1}) = s_j(\theta_{j+1})$ 。これより $g_j = \theta_{j+1} - \theta_j$ として、

$$a_{j+1} = a_j + b_j g_j + c_j g_j^2 + d_j g_j^3 \quad (3.2)$$

次に連続な 1 階導関数を持つことから、 $s'_{j+1}(\theta_{j+1}) = s'_j(\theta_{j+1})$ 。これより

$$b_{j+1} = b_j + 2c_j g_j + 3d_j g_j^2 \quad (3.3)$$

さらに連続な 2 階導関数を持つことから、 $s''_{j+1}(\theta_{j+1}) = s''_j(\theta_{j+1})$ 。これより

$$d_j = \frac{c_{j+1} - c_j}{3g_j} \quad (3.4)$$

式 (3.4) を式 (3.2)、式 (3.3) にそれぞれ代入し、

$$a_{j+1} = a_j + b_j g_j + \frac{g_j^2}{3}(2c_j + c_{j+1}) \quad (3.5)$$

$$b_{j+1} = b_j + g_j(c_j + c_{j+1}) \quad (3.6)$$

を得る。式 (3.6) を b_j について整理すると、

$$b_j = \frac{1}{g_j}(a_{j+1} - a_j) - \frac{g_j}{3}(2c_j + c_{j+1}) \quad (3.7)$$

となり、この式 (3.7) を式 (3.6) に代入して、

$$g_{j-1}c_{j-1} + 2(g_{j-1} + g_j)c_j + g_j c_{j+1} = \frac{3}{g_j}(a_{j+1} - a_j) - \frac{3}{g_{j-1}}(a_j - a_{j-1}) \quad (3.8)$$

を得る。ここで、 a_j は角度 θ_j における HRTF の振幅応答 $|H_{\theta_j}[f_i]|$ であるので、 c_j が求まれば、 b_j , d_j も求まる。ここで、スプラインの境界条件 $S''_0(\theta_0) = 0$ 、かつ

$S''_{N-1}(\theta_N) = 0$ から, 式 (3.8) は, ベクトル方程式 $\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{B}$ の形式で表すことができる。ここで,

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ g_0 & 2(g_0 + g_1) & g_1 & \ddots & & \vdots \\ 0 & g_1 & 2(g_1 + g_2) & g_2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & & \ddots & 0 \\ \vdots & & & & g_{N-2} & 2(g_{N-2} + g_{N-1}) & g_{N-1} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \cdots & 1 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{3}{g_1}(a_2 - a_1) - \frac{3}{g_0}(a_1 - a_0) \\ \vdots \\ \frac{3}{g_{N-1}}(a_N - a_{N-1}) - \frac{3}{g_{N-2}}(a_{N-1} - a_{N-2}) \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} c_0 \\ c_1 \\ \vdots \\ c_N \end{pmatrix}$$

であり, \mathbf{A} の逆行列を求めることにより, c_j が求まり, 3 次スプラインの各係数が定まる。

3.4 実験

3.4.1 実験条件

本実験では、水平方向および仰角について同時に補間した。これは、求めたい角度の近傍の2点もしくは4点の情報を用いて補間を行なうことである。例えば、図3.9に示すように、測定したHRTFの方向が M_1, M_2, M_3, M_4 であるとする、 I_1 に相当する方向のHRTFを求めるには、 M_1 と M_2 の2方向のHRTFを用いることとなる。 I_2, I_3, I_4 についても I_1 と同様に2方向のHRTFから求めることになる。また、 I_5 は、 M_1 から M_4 までの4方向のHRTFを用いて求めることとなる。

補間は、水平方向に関しては、第2章の検討結果を踏まえて、 45° 間隔固定とし、線形2点補間のみで行なうこととした。

また、仰角に関しては、角度間隔を固定した場合と、すべての角度の組み合わせの中から最も補間性能のよい組み合わせを選択する場合の2条件について、線形2点補間とスプライン補間を用いて検討した。

仰角の角度間隔を固定した場合では、 $10^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ の5条件について実験を行なった。角度間隔を固定とした場合の補間に用いた方向とHRTFの数を表3.2に示す。

また、すべての組み合わせから選択する場合では、天頂方向(仰角 90°)および最下端(仰角 -45°)を必ず用いることとしたため、組み合わせの数は ${}_{26}C_n$ ($n = 1, 2, \dots, 6$)となる。この組み合わせの中より、最も性能の良い角度の組み合わせを、総当たりで選びだした[129]。なお、選択基準は3.4.2節で述べるSpectral Distortionとした。

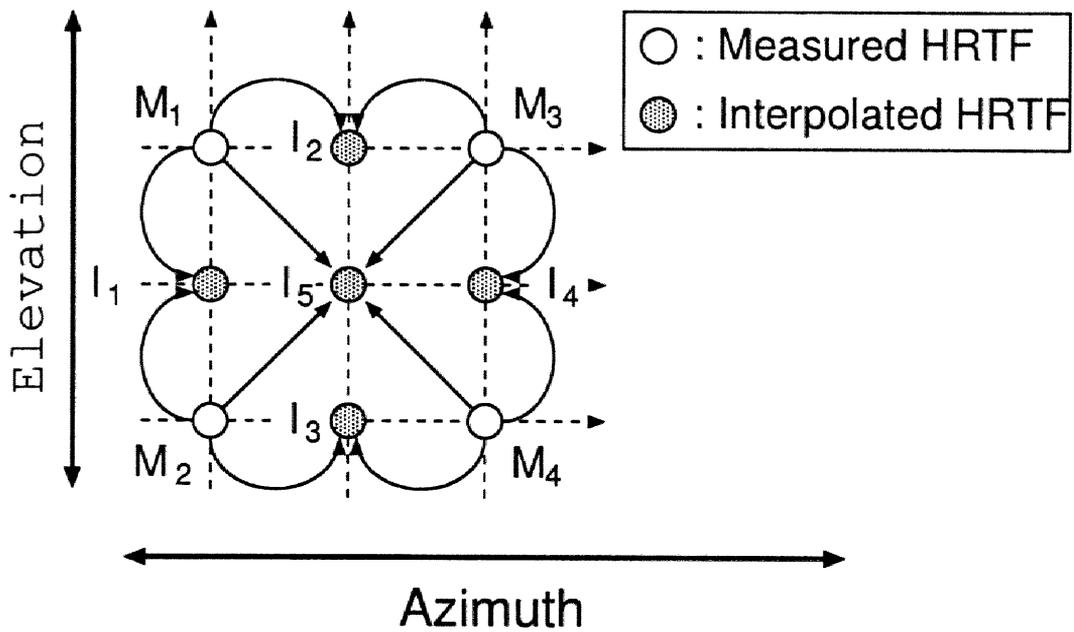


図 3.9: 方位・仰角共に補間する場合

表 3.2: 補間角度間隔と補間に用いた角度および方向の総数

角度間隔		総数
10°	方位: 0°, 45°, ..., 315° 仰角: -40°, -30°, ..., 90°	105
15°	方位: 0°, 45°, ..., 315° 仰角: -45°, -30°, ..., 90°	73
30°	方位: 0°, 45°, ..., 315° 仰角: -45°, -30°, 0°, ..., 90°	41
45°	方位: 0°, 45°, ..., 315° 仰角: -45°, 0°, 45°, 90°	25
90°	方位: 0°, 45°, ..., 315° 仰角: -45°, 0°, 90°	17

3.4.2 評価尺度

客観評価尺度

B&K 4128 型の疑似頭の HRTF, および 1 名の被験者の疑似頭の HRTF を補間した結果について客観評価を行なった。補間精度の客観評価尺度として, 式 (2.18) の Spectral Distortion(SD) を用いた。

$$D_f = \sqrt{\frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \left(20 \log \frac{|H[f_i]|}{|\hat{H}[f_i]|} \right)^2} \quad [\text{dB}] \quad (2.18)$$

ここで, $|H[f_i]|$ は測定した HRTF の振幅応答, $|\hat{H}[f_i]|$ は補間した HRTF の振幅応答である。また, 評価する帯域を 0.3 kHz から 20.0 kHz としたため, $I = 229$, $f_1 = 0.3 \text{ kHz}$, $f_{229} = 20.0 \text{ kHz}$ となる。なお, D_f の値が小さいほど補間の精度が高い。

主観評価尺度

主観評価尺度として, 方位に関する定位実験と仰角に関する知覚実験の 2 実験を行なった。なお, 実験に用いた HRTF は, 1 名の被験者の疑似頭の HRTF である。

(1) 方位に関する定位実験

方位に関する定位実験では, 呈示音を 0° から 330° の間を 30° 間隔でランダムに変化するように設定し, 被験者に呈示した。呈示した刺激音には, 信号長 200 ms の定常白雑音 (立ち上がり・立ち下がり 10 ms) を帯域制限せずに用いた。また, 呈示した仰角に関しては, -15° と 15° の HRTF を用いたが, 被験者には仰角に関する知覚の回答は求めず, 知覚した方位のみを回答させた。

実験に際して, 被験者には 30° 間隔で呈示される旨の教示のみを行ない, 仰角についての教示は行っていない。また, 30° 間隔で印を付けた円を描いた回答用紙に, 知覚した方位を印の上に記入する方法で回答させた。このため回答方位は 30° 間隔となる。本実験では, 知覚した角度を回答する際に, 相対的な角度ではなく, 絶対的な角度で回答させているが, 被験者それぞれが持つ, 角度に対する感覚にばらつきがあるため, 被験者間の差を少なくする目的でこの回答方法を採用した。

なお、呈示音と呈示音の間には、3秒間の無音区間を設け、呈示回数は、各方位4回で行なった。

実験結果は、正答率および前後知覚誤り率で評価した。ここで、呈示方位と回答方位が一致したものを正答とした。また、前方(60°, 30°, 0°, 300°, 330°)に呈示した音を後方(120°, 150°, …, 240°)に、または後方に呈示した音を前方に知覚した回答を前後知覚誤りとした。

被験者は、22~28才の正常な聴力を有する成人男性5名である。この被験者は、正常な聴力を有する成人男性12名に対して、本実験条件と同一条件で方位に関する定位の予備実験を行なった結果の上位5名である。呈示は、ヘッドホン(AKG K-240)を用いて行なった。また、方位に関する定位実験すべてに渡って実験条件を被験者間および呈示刺激間で統一するため、呈示音圧は80.0 dB(A)で行なった。

(2) 仰角に関する知覚実験

仰角に関する知覚実験では、評価する仰角を、-35°, 0°, 35°, 70°の4方向とし、評価を行なった。ここで、正中面以外では、仰角が変わるにつれて両耳間時間差が変化するため、被験者が知覚実験の際に時間差を手がかりとして判別する可能性がある。そこで、両耳間時間差による影響を取り除くために、正中面上で行なうこととした。ここで、呈示に用いる方位に関しては、方位に関する定位の予備実験にて、正面(0°)と後方(180°)では、前後知覚誤りがほとんど起きなかったこと、および正面(0°)と後方(180°)との方向弁別能力にほとんど差が無いという方向弁別能力の報告[2]から、正面および後方のどちらの場合であっても、同等の知覚結果が得られると考えられる。また、補間により得られたHRTFをバーチャルリアリティシステム等へ適用した場合において、正面方向は聴覚情報以外に視覚情報が利用できるため、聴覚情報が主として利用される後方について、音源の知覚を評価することが有効であると考えられる。そこで本知覚実験では、呈示する方位は後方(180°)のみとした。刺激音は、信号長1sの定常白雑音(立ち上がり・立ち下がり10ms)を帯域制限せずに用いた。

実験は、基準音、評価音の順に呈示し、評価音が基準音と比較して、仰角をどう知覚したかを、表3.3に示す評価項目で回答させた。なお、基準音は測定したHRTFの仰角0°とした。基準音と評価音との間は3秒間の無音区間を設け、呈示回数は、

表 3.3: 仰角の知覚の評価項目

評価項目
基準音と比較して高く知覚できる
基準音と比較して同じ高さに知覚できる
基準音と比較して低く知覚できる

各仰角 10 回で行なった。

被験者は、方位に関する定位実験を行なった、22～28 才の正常な聴力を有する成人男性 5 名で、ヘッドホン (AKG K-240) を用いて呈示した。また、仰角に関する知覚実験すべてに渡って実験条件を被験者間および呈示刺激間で統一するため、呈示音圧は 80.0 dB(A) で行なった。

3.5 実験結果

3.5.1 客観評価結果

客観評価結果を図 3.10 に示す。図の横軸は補間に用いた HRTF の方向数を、縦軸は SD を表している。また、図に示した SD は、補間実験に用いた 2 種類の HRTF、および補間手法により求めたすべての方向での平均 SD である。なお、左右それぞれの HRTF の補間結果に差はみられなかったため、左耳 HRTF の結果のみを示している。図より、線形 2 点補間およびスプライン補間ともに、補間に用いる角度の間隔が大きくなるにつれて、補間精度が劣化することが分かる。

また、補間の角度間隔を一定とした場合 (Equally)、線形 2 点補間の結果とスプライン補間の結果とでは、補間に用いる HRTF の数が少ないほど、線形 2 点補間の性能が良く、HRTF の数が増えると両手法での性能差はなくなることが分かる。

次に、角度間隔を一定とした場合 (Equally) の結果と最適な角度を選択した場合 (Optimal) の結果とでは、SD の差は約 0.2 dB しかなく有意な差では無い。また、常に最適な角度を選択することは現実的ではない。これらより、補間は角度間隔を一定として行なって良いと言える。

以上のことから、HRTF の振幅応答に対しては、角度間隔を一定として、線形 2 点補間を行なうことが有効であると言える。

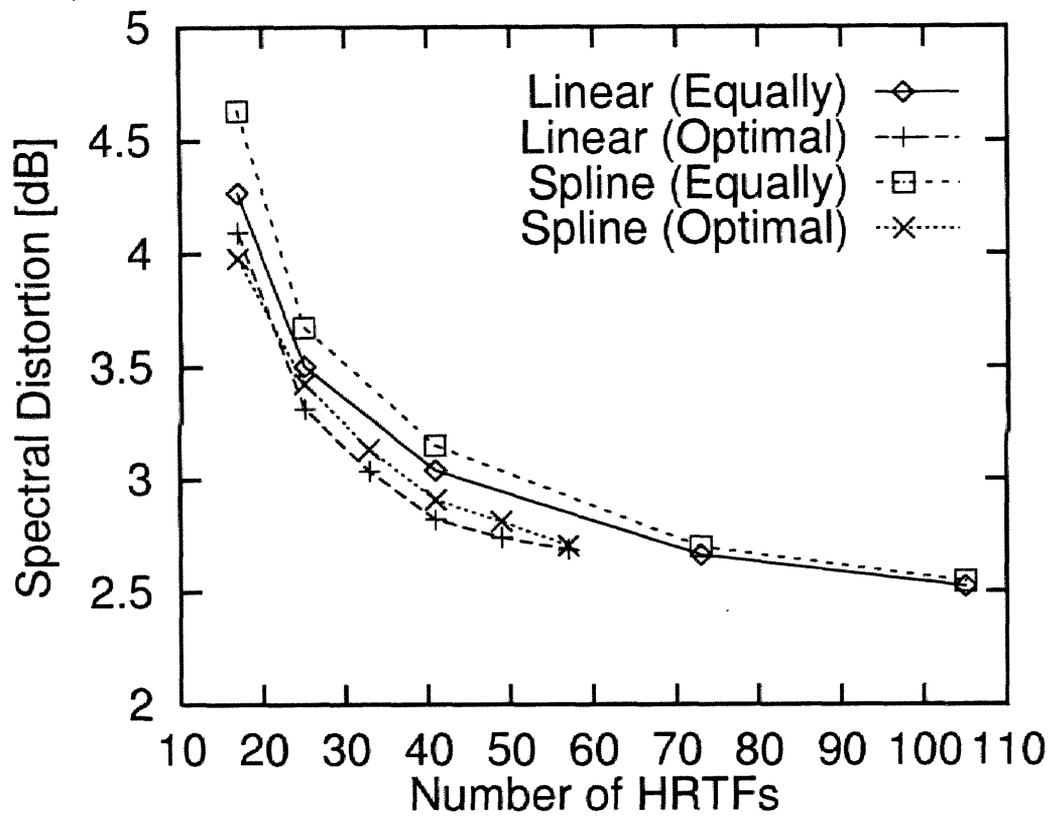


図 3.10: 補間結果 (方位・仰角共に補間した場合)

3.5.2 主観評価結果

評価に用いた HRTF は、(1) 1名の被験者の疑似頭で測定した HRTF(以下、測定した HRTF)、および (2) 1名の被験者の疑似頭で測定した HRTF の振幅応答に対し、補間手法を適用して求めた HRTF(以下、補間した HRTF) の2種類である。ここでは、定位精度に着目し、第2章で検討した水平面上での補間の結果を考慮して、補間した HRTF の SD が 3 dB となる条件を選択する。客観評価結果から、41 方向以下の条件で補間した HRTF の SD は 3 dB 以下となる。よって、最大の方向数である 41 方向 (方位 45° 間隔, 仰角 30° 間隔) で補間した HRTF を用いた。

補間した HRTF は、振幅応答を逆 FFT した後に、その逆 FFT 信号の自己相関を求め、Levinson-Durbin 法を用いて最小位相フィルタとした後、初期遅延時間を加えた。初期遅延時間は、2.4.1 節で述べた式 (2.15) により求めた。

$$\frac{\text{Cov}(\mathbf{H}, \mathbf{H}_\tau)}{\sqrt{\text{Var}(\mathbf{H})\text{Var}(\mathbf{H}_\tau)}} > 0.997 \quad (2.15)$$

$$\mathbf{H} = (|H[f_1]|, |H[f_2]|, \dots, |H[f_{256}]|)^t$$

$$\mathbf{H}_\tau = (|H_\tau[f_1]|, |H_\tau[f_2]|, \dots, |H_\tau[f_{256}]|)^t$$

ここで $|H[f_i]|$, $i = 1, 2, \dots, 256$ は、測定した HRTF $h[n]$ の振幅応答, $|H_\tau[f_i]|$, $i = 1, 2, \dots, 256$ は、 $h[n - \tau]$ の振幅応答である。補間した HRTF の初期遅延時間 $\hat{\tau}$ は、上記の手順で求めた遅延時間を用いて、式 (3.9) により求めた。

$$\hat{\tau} = r \times \tau_1 + (1 - r) \times \tau_2, \quad 0 \leq r \leq 1 \quad (3.9)$$

ここで、 τ_1, τ_2 は補間に用いた 2 方向の HRTF の初期遅延時間、 r は内分比である。 r の値を変えることにより、補間に用いた 2 方向の間の任意の角度の初期遅延時間を得る。

(1) 方位に関する定位実験

実験結果を、図 3.11 と図 3.12 に示す。両図は、横軸が呈示した方位角度を縦軸が知覚した方位角度を表す。また円の大きさは回答数を表している。なお、両図とも、仰角 -15° と 15° の結果を同時に示してある。図 3.11 と 図 3.12 を比較すると、どちら

の HRTF を用いた場合でも、横方向 ($60^{\circ}\sim 120^{\circ}$, $240^{\circ}\sim 300^{\circ}$) で回答のばらつきが多いことが分かる。

次に、正答率および前後知覚誤り率の結果を仰角- 15° の場合を表 3.4に、 15° の場合を表 3.5にそれぞれ示す。被験者ごとに、正答率に対して呈示方位角度と用いた HRTF を因子とする 2 元配置の分散分析を行なった。有意水準 5 % で検定を行なった結果、すべての被験者で全方位に関して両 HRTF を用いた場合の定位結果には、有意な差はみられなかった。また、仰角による正答率の違いについて、測定した HRTF に関して、被験者ごとに、呈示方位角度と呈示した仰角を因子とする 2 元配置の分散分析を元に有意水準 5 % で検定した結果、有意な差が無いことが分かった。補間した HRTF の場合も同様に有意な差は見られなかった。前後知覚誤り率について、正答率と同様の検定を行なったところ、測定した HRTF を用いた場合の結果と補間した HRTF を用いた場合とでは、有意な差が見られた。しかし、正答率と同様に、仰角の違いでは有意な差は無かった。

ここで、実験の際に行なった教示および回答方法の影響の有無について、第 2 章で得られた定位結果を利用して評価した。測定した HRTF を用いた場合の定位結果について、第 2 章の定位結果を呈示方位から $-10^{\circ}\sim +15^{\circ}$ のずれまでを許容するように再集計して得られた正答率と、本実験により得られた定位の正答率との間で、同様の分散分析を行ない検定を行なった。その結果、正答率に有意な差はみられなかった。このことから、教示および回答方法による正答率への影響は無いと考えられる。

これより、補間した HRTF と測定した HRTF を比較すると、正答率に有意な差は無いいため、補間した HRTF は測定した HRTF と同等の定位性能を持つと言える。しかし、補間した HRTF の場合は測定した HRTF と比較して前後知覚誤り率が有意に増加した。これは、補間した HRTF では、測定した HRTF と比較して呈示した音像がぼやけたため、特に両耳方向 (図 3.11 および図 3.12 の 90° および 270° 付近) で前後知覚誤りが増加したためと言える。また、Kistler らの報告 [121] と同様、位相は最小位相であっても良いと言える。

(2) 仰角に関する知覚実験

実験結果を図 3.13 と図 3.14 に示す。図はそれぞれ横軸が呈示した仰角、縦軸は知覚した結果を表す。

表 3.4: 方位に関する定位実験の正答率および前後知覚誤り率 (仰角-15°)

	正答率	前後誤り率
測定した HRTF	63.8 %	3.8 %
補間した HRTF	55.8 %	10.0 %

表 3.5: 方位に関する定位実験の正答率および前後知覚誤り率 (仰角 15°)

	正答率	前後誤り率
測定した HRTF	57.9 %	5.4 %
補間した HRTF	57.0 %	9.6 %

図 3.13 および図 3.14 より、どの仰角について呈示しても、正しく知覚がなされていることが分かる。被験者ごとに、各呈示仰角ごとの正答に対して、呈示した仰角と用いた HRTF を因子とする 2 元配置の分散分析を行なった。有意水準 5 % で検定を行なった結果、すべての被験者で測定した HRTF を用いた場合と補間した HRTF を用いた場合とでは、有意な差はみられなかった。ただし、1 名の被験者に関して、仰角 35°での正答は、測定した HRTF および補間した HRTF 共に、他の仰角の正答よりも有意に低かった。

以上より、仰角 30°間隔で線形 2 点補間手法により補間した HRTF は、測定した HRTF と同等の仰角の知覚が可能であると言える。

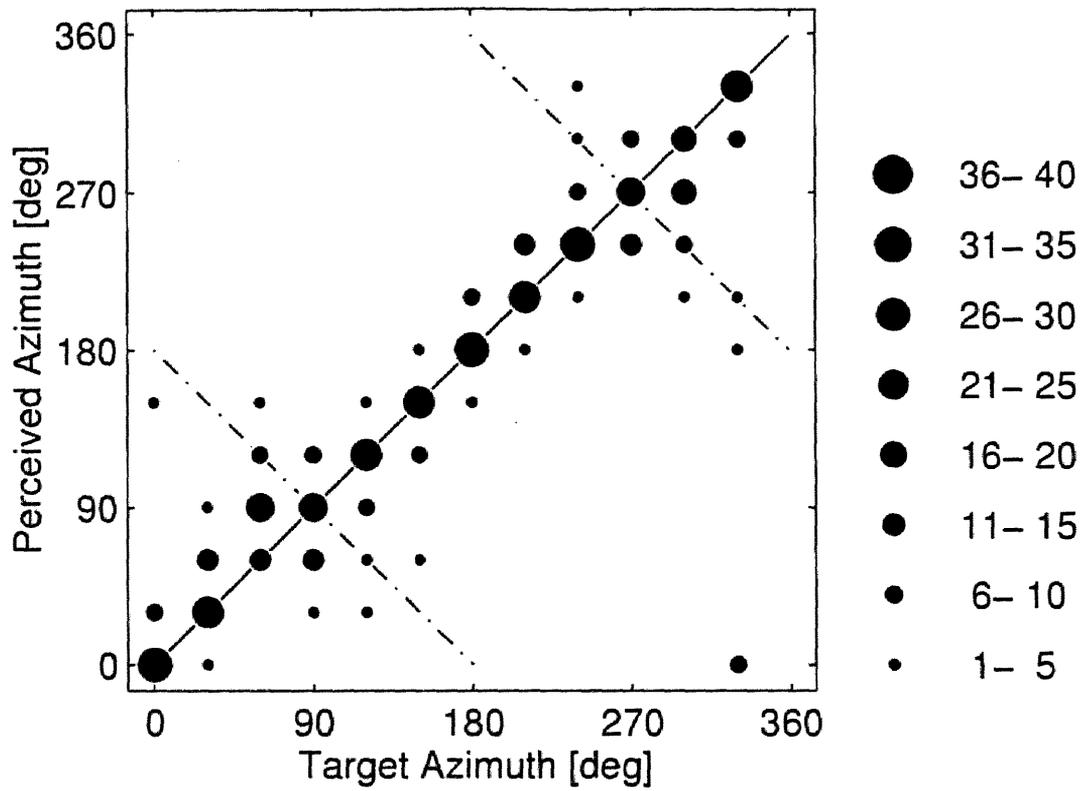


図 3.11: 測定した HRTF を用いた場合の方位に関する定位実験結果

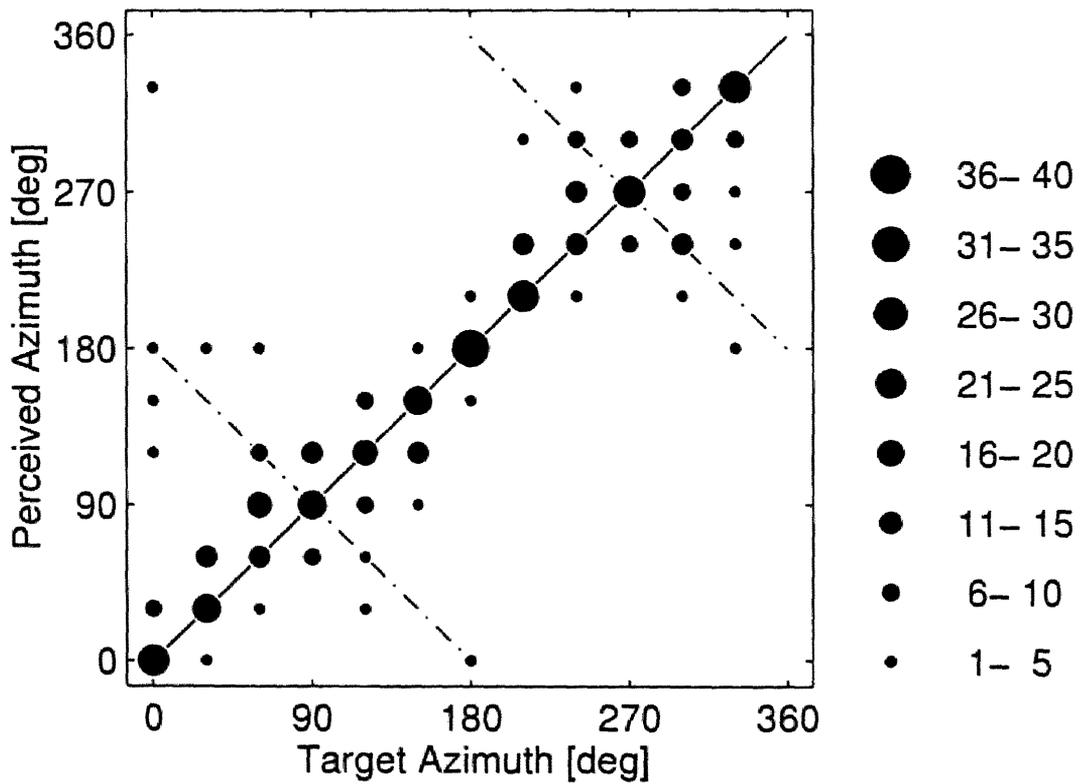


図 3.12: 補間した HRTF を用いた場合の方位に関する定位実験結果

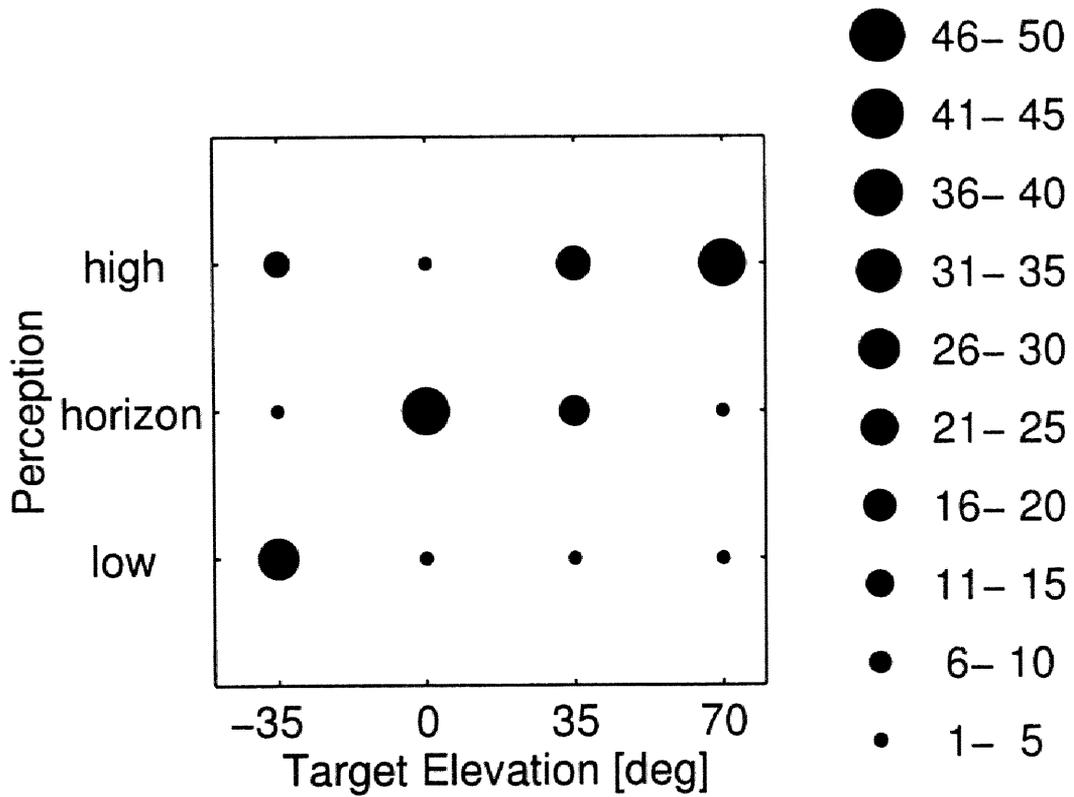


図 3.13: 測定した HRTF を用いた場合の仰角に関する知覚実験結果

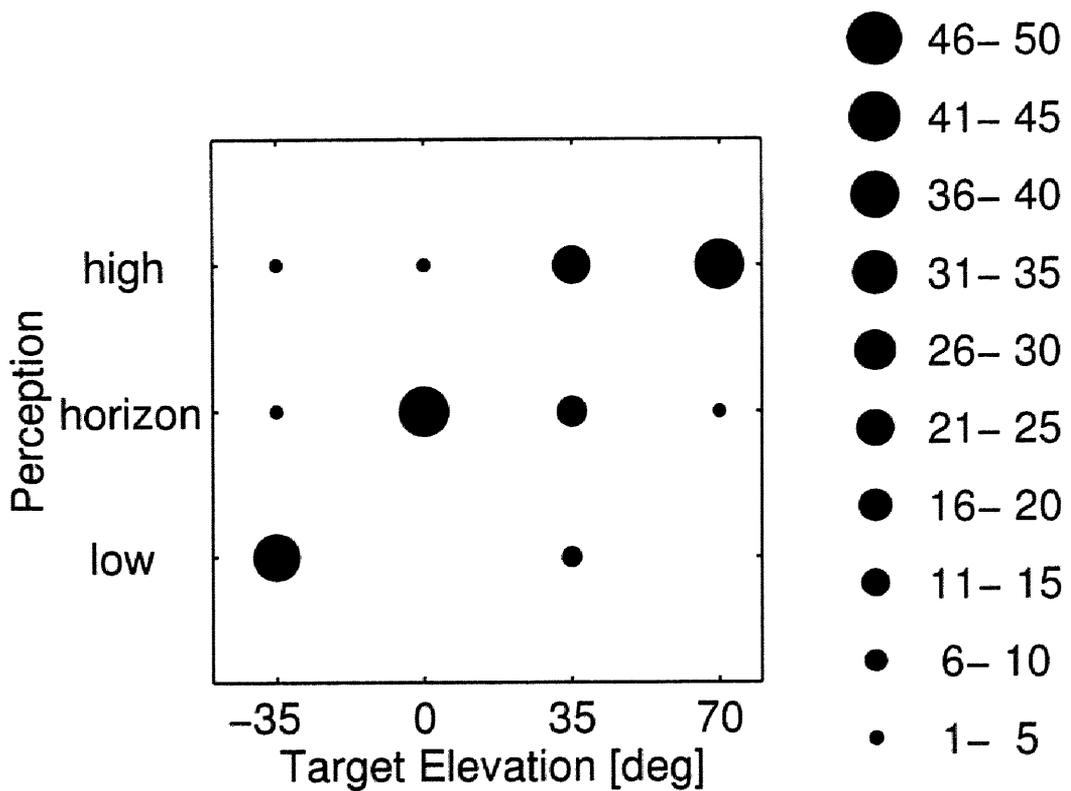


図 3.14: 補間した HRTF を用いた場合の仰角に関する知覚実験結果

3.5.3 まとめ

主観評価の結果から、方位 45° 間隔、仰角 30° 間隔で線形 2 点補間により補間した HRTF は、測定した HRTF と聴覚的に同等であると言える。また、客観評価結果と主観評価結果を対応づけて考えると、SD で平均 3 dB 以下であれば、音源方向を正しく知覚することが可能であると言える。2.5.2 節では回帰式による正答率の予測から、3 dB 以下であれば測定した HRTF と同等の正答率が得られるとした。本実験で得られた SD は、2.5.2 節の予測結果と一致する。よって、SD で 3 dB 以下であれば、測定した HRTF と同等の音源定位が可能であると言える。

3.6 むすび

本章では、限られた水平方向および仰角方向で測定された HRTF から、任意の方向の HRTF を補間する問題について、(1) 線形 2 点補間、および (2) スプライン補間を適用し、HRTF の振幅応答に対する補間に必要な方向について検討した。

客観評価の結果から、補間に用いる HRTF の方向数が多くなるにつれて、補間精度は高くなった。また、補間に用いる HRTF の方向数が多い場合 (73, 105 方向の HRTF) では、両補間手法による性能差は見られなかった。これに対し、補間に用いる HRTF の方向数が少なくなると補間性能は劣化し、両補間手法での差も大きくなった。また、角度間隔を一定とした場合と最適な角度を選択する場合とでは、両者に大きな差は無いため、最適な組み合わせを求めなくても、一定の角度間隔で補間を行えば良いことが明らかとなった。

主観評価の結果から、方位 45°、仰角 30° 間隔で HRTF の振幅応答に線形 2 点補間を適用し求めた HRTF を用いた場合に、方位および仰角の知覚は、測定した HRTF と同等であることが確かめられた。

以上により、41 方向の HRTF を測定すれば、測定した 1945 方向の HRTF は再現可能であると言える。

第 4 章

重回帰分析を用いた頭部伝達関数の推定

4.1 はじめに

第 2 章および第 3 章では、頭部伝達関数 (Head Related Transfer Function:HRTF) の方向に関する補間の検討を行ない、少数の音源方向で測定した HRTF から、任意の音源方向の HRTF を推定することが可能であることを示した。しかし、HRTF は頭部や耳介などで、音波が回折・反射した特性の変化を表す伝達関数であるため、音源の方向ごとに異なる特性を持つだけでなく、聴取者ごとにも異なる特性を持つ。そのため、HRTF を利用するシステムでは、聴取者ごとに HRTF を測定する必要がある。しかし、HRTF を一般的に利用するという観点では、個人ごとに HRTF の測定を行なうことは現実的ではない。仮に、HRTF を実際に測定することなく、聴取者ごとに適切な HRTF が合成できれば、HRTF をより広く活用することができる。このような問題に対して、多くの測定データをもとに、汎用性のある HRTF を作製する方法 [100, 101] や、頭部形状から数値解析的に求める手法 [106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113] などが提案されている。しかし、汎用性のある HRTF を適切に選択する手法が未確立である [130] ことや、複雑な耳介の形状を 3 次元データ化することが困難であると言った問題点がある。

ここで、HRTF が身体的特徴量に依存することをふまえた、HRTF の推定法が検討されている。両時間距離と耳介形状から HRTF を推定する手法 [75] や、耳介や胴体での音波の反射に着目したモデルから仰角方向の HRTF を推定する手法 [103] が提案されている。また、両耳間距離と頭部形状から Interaural Time Difference(ITD)

を推定する手法 [104] や、耳介形状から HRTF を推定する手法 [105] も検討されている。これらは、低周波領域では身体的特徴量から HRTF を精度良く推定できると報告している。そこで本章では、HRTF が身体的特徴に依存することをふまえて、身体的特徴との関係が深い HRTF の周波数帯域において、身体的特徴量と HRTF の振幅応答との関係を調査した。さらに、身体的特徴量と HRTF の振幅応答との関係をもとに、広帯域の HRTF の振幅応答を推定することを試みた。まず、4.2節にて、本章で用いた HRTF と頭部・耳介形状の測定条件および測定結果について述べる。4.3節では、頭部・耳介形状から HRTF を推定する手法について述べ、4.4節において推定手法の有効性を検証するための実験方法を述べる。4.5節において、実験により得られた結果を述べ、4.6節において、本章を結ぶ。

4.2 実験データの測定

実験を行なうに当たり、HRTF と身体的特徴量を 78 名分測定した。被験者は、年齢が 17~33 歳まで (平均 21.8 歳) の男性 63 名、女性 15 名である。

4.2.1 頭部伝達関数の測定

本実験では、HRTF を音源から外耳道入口までの伝達関数とする。ラウドスピーカ (BOSE ACOUSTIMASS, 口径 63mm) から、1.0 s の Time Stretched Pulse (TSP) 信号 [125, 126] を出力し、被験者の外耳入口に装着したコンデンサマイクロホン (SONY ECM-77B) との間のインパルス応答を求めることにより、HRTF を測定した。なお、マイクロホンは、マイクロホンの振動面が外耳道入口に位置するように、被験者の外耳道を塞ぐ形式で、外耳道内に設置した。測定は、図 4.1 に示す室内にて、高さを水平面上とし、方位を 5° 間隔の 72 方向として行なった。なお、この水平面は、鼻尖点と両耳珠点を含む平面とした。また、方位は、両耳間の中点を原点として、0° は音源が正面に、90° は左、180° は後方、270° は右に音源が位置するよう定義した (図 4.2)。HRTF の測定は、残響時間が 0.3 s の部屋にて行なった。実験では、直接音のみを取り扱うこととしたため、反射音を除外した後に零詰めを行ない、512 点のインパルス応答とした。標本化周波数は 48.0 kHz である。

続いて、測定した HRTF が個人に関して、どのようなばらつきとなっているか、対数振幅応答の分散を求め評価する。角度 θ 、周波数 f における HRTF の対数振幅

応答の分散 $V_{\theta,f}$ は次式により求める。

$$V_{\theta,f} = \frac{1}{78} \sum_{m=1}^{78} \left\{ 20 \log_{10} |H_{\theta,m}[f]| - \frac{1}{78} \sum_{k=1}^{78} 20 \log_{10} |H_{\theta,k}[f]| \right\}^2 \quad (4.1)$$

なお、対数振幅応答は 512 点の DFT により求めた。図 4.3 は、78 名の右耳で測定した HRTF の対数振幅応答の分散を濃淡図で表したものである。ただし、分散が 64 を超えた場合は、すべて同じ色で表した。図 4.3 から、特に 1 kHz 以下の帯域では分散が小さいことから、個人による特性の変動が他の周波数域と比較して小さいと考えられる。なお、本実験に用いた HRTF の一部については、

<http://www.itakura.nuee.nagoya-u.ac.jp/HRTF/>

にて取得可能である。

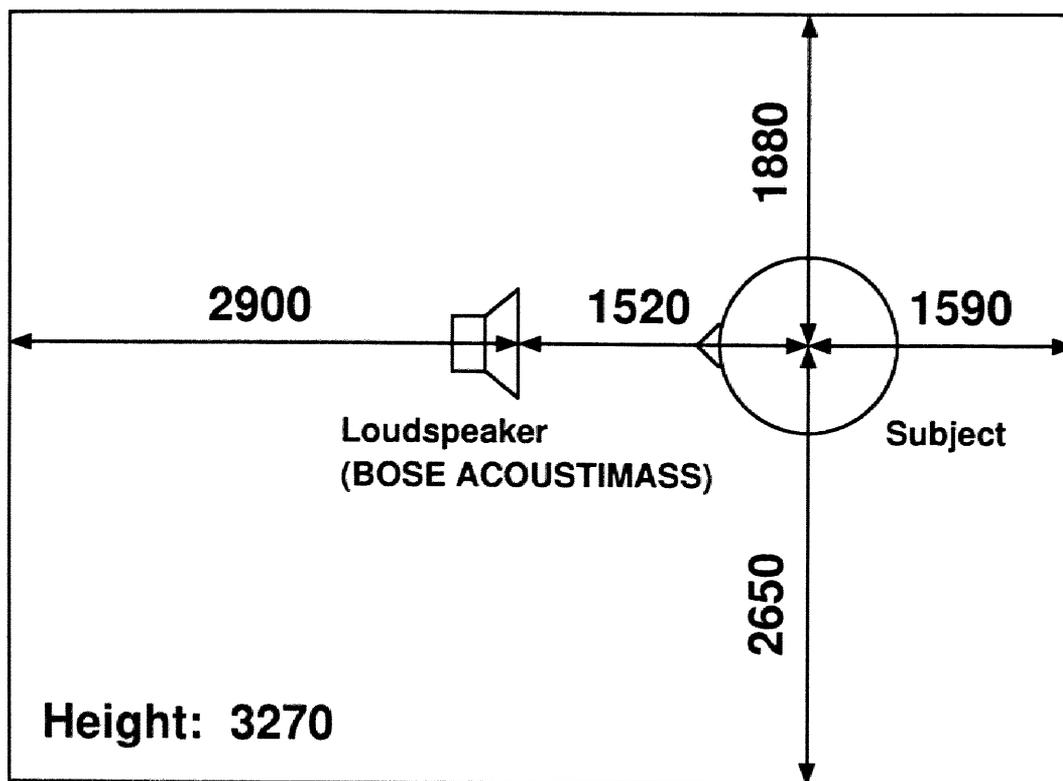


図 4.1: 測定環境 (単位: mm)

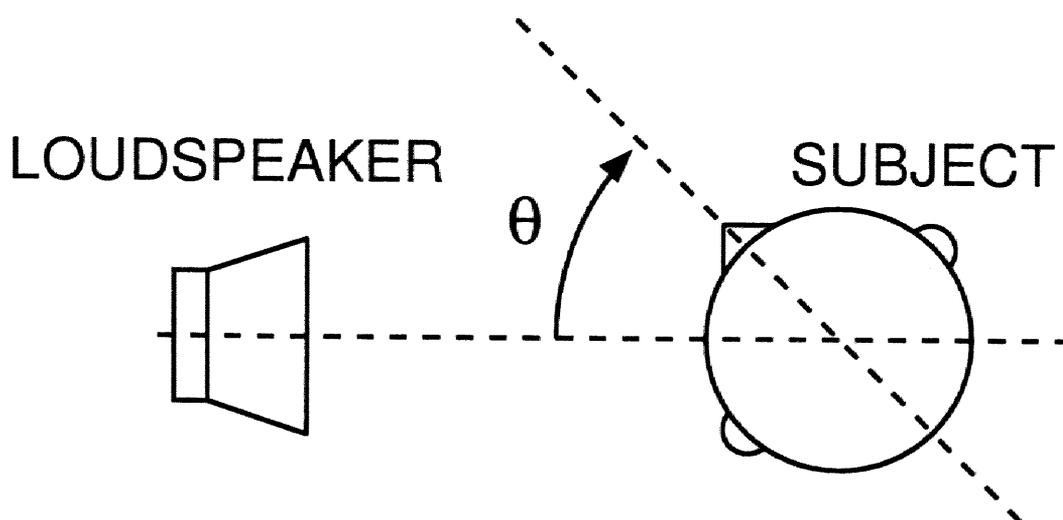


図 4.2: 角度の定義

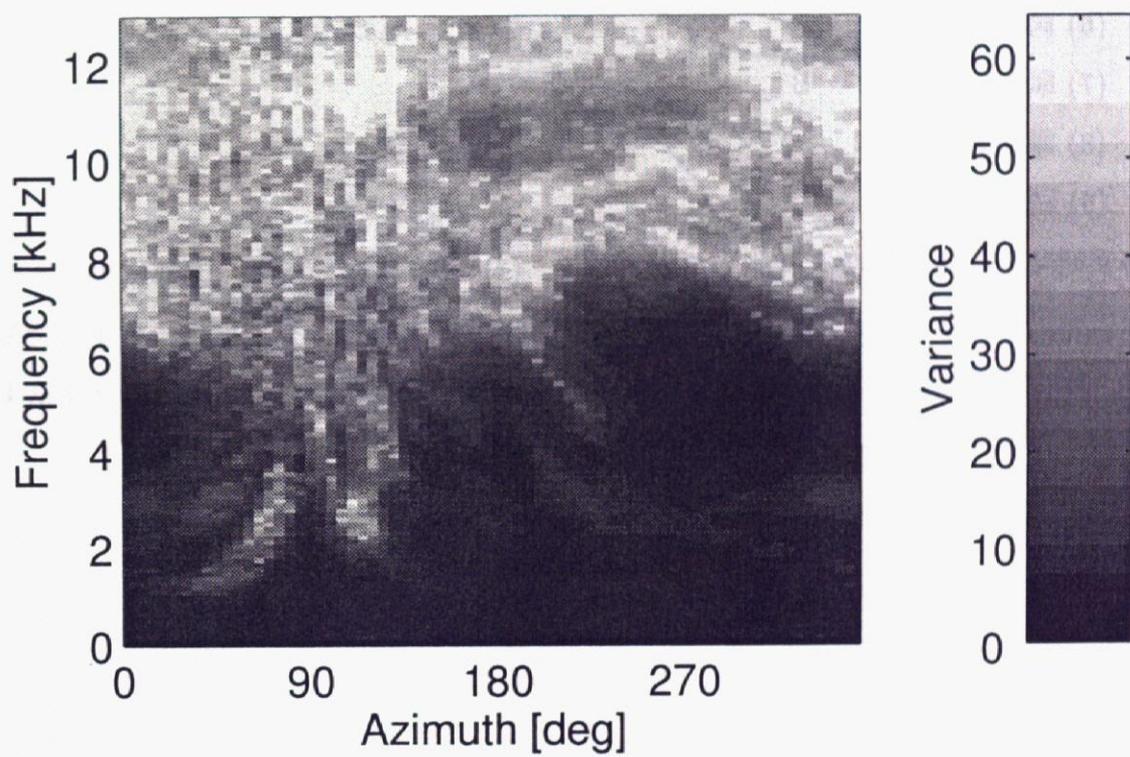


図 4.3: 全方位角に対する 78 名の右耳で測定した HRTF の対数振幅応答の分散

4.2.2 身体的特徴量の計測

HRTF は頭部や耳介の形状に依存すると考えられる。そこで、KEMAR ダミーヘッド作製時に定められた基準点 [41] を参考に、図 4.4に示す

- (1) 耳介 (縦)
- (2) 耳介 (横)
- (3) 耳甲介腔 (縦)
- (4) 耳甲介腔 (横)
- (5) 頭部・耳介距離
- (6) 両耳間距離
- (7) 頭囲 (前)
- (8) 頭囲 (後)
- (9) 頭部 (縦)

の 9 種類の身体的特徴を計測した。ここで、(7)~(9) については、頭部に接する経路で測定を行なった。ただし、頭髪による影響が含まれている。また、身体的特徴は、HRTF の測定で定義した水平面を基準平面として計測した。これらの計測結果を表 4.1に示す。

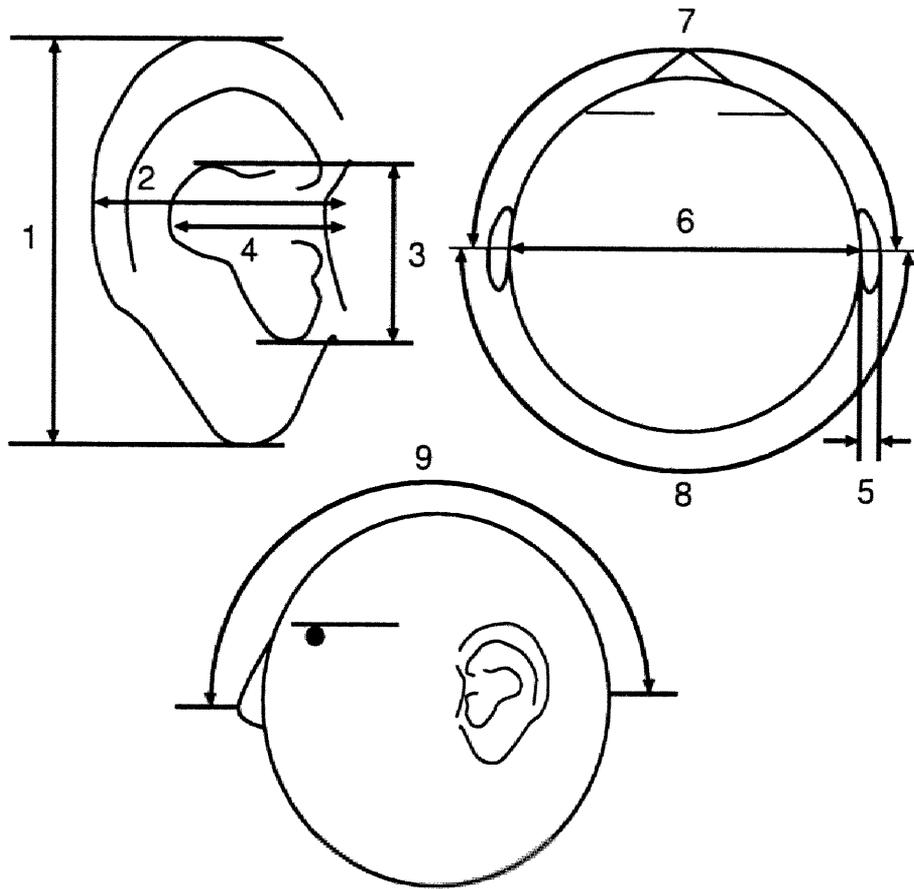


図 4.4: 計測した身体的特徴

表 4.1: 身体的特徴量の計測結果 (単位: mm)

計測点	平均	最大	最小	標準偏差
(1) 耳介 (縦)	66.2	82	55	4.6
(2) 耳介 (横)	32.3	40	22	3.4
(3) 耳甲介腔 (縦)	17.4	22	10	2.1
(4) 耳甲介腔 (横)	18.4	24	13	2.3
(5) 頭部・耳介距離	22.4	30	15	3.4
(6) 両耳間距離	145.7	172	113	11.8
(7) 頭圍 (前)	302.7	345	270	13.0
(8) 頭圍 (後)	225.4	265	195	14.6
(9) 頭部 (縦)	423.9	482	360	21.2

4.3 手法

HRTF の振幅応答と身体的特徴量とを対応づける手法には、重回帰分析を用いた。重回帰分析は、2 個以上の説明変数から一つの目的変数を推定するための回帰分析法である。ここで、重回帰分析では説明変数が独立、または説明変数間での相関が低くなければならない。測定した身体的特徴量間の単相関係数を求めたところ、すべての場合で単相関係数は 0.5 よりも小さかった。これより、身体的特徴量間の相関は中程度もしくはそれ以下であることから、本実験では説明変数として身体的特徴量をそのまま用いた。また、目的変数は HRTF の対数振幅応答を主成分分析して求めた主成分重みとした。

4.3.1 HRTF の主成分分析

主成分分析は、観測値間の相関関係を解析し、全体の観測値の持つ変動を一つまたは少数個の総合的指標で説明しようとするもので、できるだけ損失無しに情報を圧縮することを目的とした多変量統計解析法である。これにより、膨大な変量のある HRTF の振幅応答を、少ない変数で特徴づけることができる。ここで、HRTF の振幅応答から HRTF の合成を行なった際に、負の振幅応答の推定値となる場合が生じたため、本実験では HRTF の対数振幅応答を用いることとし、以下の手順により主成分分析を行なった。なお、HRTF の振幅応答を主成分分析した場合に負の推定値となる条件を除外した実験結果と、HRTF の対数振幅応答を主成分分析した場合の実験結果との比較は 4.5.3 節で述べる。

1. ある角度 θ において、零平均化 HRTF を式 (4.2) を用いて求める。

$$20 \log |\bar{H}_{\theta,k}[f_i]| = 20 \log |H_{\theta,k}[f_i]| - \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M 20 \log |H_{\theta,m}[f_i]| \quad (4.2)$$

ここで $|H_{\theta,k}[f_i]|$ は、分析に用いる HRTF 集合の中の k 人目の HRTF の振幅応答で、 f_i は周波数を表す。なお、 $H_{\theta,k}[f_i]$ は 512 点の DFT により求める。また、 M は分析に用いる HRTF の総被験者数である。

2. 零平均化 HRTF に対する共分散行列を、式 (4.3) によって求める。

$$s_{ij} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left\{ 20 \log |\bar{H}_{\theta,m}[f_i]| \times 20 \log |\bar{H}_{\theta,m}[f_j]| \right\} \quad (4.3)$$

ここで、 s_{ij} は共分散行列 \mathbf{S} の第 i 行 j 列要素である。なお、 i, j および f_i, f_j は、評価する帯域ごとに値が変わる。

3. 共分散行列 \mathbf{S} の固有ベクトルを求め、固有ベクトル行列 \mathbf{C} を作る。 \mathbf{C} を用いて、 $20 \log |\bar{H}_{\theta,k}[f]|$ に対する主成分重みを式 (4.4) により求める。

$$\mathbf{W}_{\theta,k} = \mathbf{C}^T \bar{\mathbf{H}}_{\theta,k} \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_{\theta,k} &= (w_{\theta,k}[1], \dots, w_{\theta,k}[N])^T \\ \bar{\mathbf{H}}_{\theta,k} &= (20 \log |\bar{H}_{\theta,k}[f_1]|, \dots, 20 \log |\bar{H}_{\theta,k}[f_i]|)^T \end{aligned}$$

ここで T は転置を表すものとする。

この手順で求めた $w_{\theta,k}[n] (n = 1, \dots, N)$ を目的変数として取り扱う。

4.3.2 重回帰分析による主成分重みの推定

被験者 k の身体的特徴量を $x_{lk} (l = 1, \dots, 9)$ とすると、重回帰分析により、ある角度 θ における第 n 主成分重みは、次式で表すことができる。

$$w_{\theta,k}[n] = \beta_{0n} + \sum_{l=1}^9 \beta_{ln} x_{lk} + \varepsilon_n \quad (4.5)$$

ここで β_{ln} は重回帰係数、 ε_n は誤差で、主成分重みの次数 n ごとに求める。 ε_n を最小 2 乗誤差基準により最小化するため、以下の操作を行なう。

$$\begin{aligned} E &= \sum_{m=1}^M \varepsilon_n^2 \\ &= \sum_{m=1}^M \left(w_{\theta,m}[n] - \beta_{0n} - \sum_{l=1}^9 \beta_{ln} x_{lk} \right)^2 \end{aligned} \quad (4.6)$$

とにおいて、各重回帰係数で偏微分を行なう。

$$\frac{\partial E}{\partial \beta_{ln}} = 0 \quad (l = 0, \dots, 9) \quad (4.7)$$

ここから、

$$\begin{pmatrix} \sum 1 & \sum x_{1m} & \dots & \sum x_{9m} \\ \sum x_{1m} & \sum x_{1m}^2 & \dots & \sum x_{1m} x_{9m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum x_{9m} & \sum x_{1m} x_{9m} & \dots & \sum x_{9m}^2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \beta_{0n} \\ \beta_{1n} \\ \vdots \\ \beta_{9n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum w_{\theta,m}[n] \\ \sum w_{\theta,m}[n] x_{1m} \\ \vdots \\ \sum w_{\theta,m}[n] x_{9m} \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

ここで,

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{91} \\ 1 & x_{12} & \dots & x_{92} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{1M} & \dots & x_{9M} \end{pmatrix} \\ \mathbf{W} &= (w_{\theta,1}[n], w_{\theta,2}[n], \dots, w_{\theta,M}[n])^T \\ \mathbf{B} &= (\beta_{0n}, \beta_{1n}, \dots, \beta_{9n})^T \end{aligned}$$

とおくと, 式(4.8)は,

$$(\mathbf{X}^T \mathbf{X}) \mathbf{B} = \mathbf{X}^T \mathbf{W} \quad (4.9)$$

のようにおける。ここで両辺に $\mathbf{X}^T \mathbf{X}$ の逆行列をかけると, 最終的に次の式が導かれる。

$$\mathbf{B} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{W} \quad (4.10)$$

この操作により, 各被験者の HRTF の対数振幅応答の主成分重みと身体的特徴量から構成される行列 \mathbf{X}, \mathbf{W} を用いて, 被験者によらず一定の回帰係数 \mathbf{B} を推定することができる。このようにして求めた重回帰式を用いて, 身体的特徴から HRTF の対数振幅応答の主成分重み $\hat{w}_{\theta,k}[n]$ を求めることができる。

$$\hat{w}_{\theta,k}[n] = \beta_{0n} + \sum_{l=1}^9 \beta_{ln} x_{lk} \quad (4.11)$$

この $\hat{w}_{\theta,k}[n]$ と, 式(4.4)の固有ベクトル行列 \mathbf{C} を用いて零平均化 HRTF を求め, 平均値を加算することで HRTF の対数振幅応答を合成することができる。

4.4 実験

4.4.1 実験条件

本実験では、HRTF の対数振幅応答を主成分分析し、各次数の主成分重みと身体的特徴量とを重回帰分析によりそれぞれ対応づける。主成分分析および重回帰分析は、測定した 78 名のデータ ($M = 78$) に対して行なった。また、図 4.3 において 1kHz 以下の帯域では個人による変動が少ないこと、および計測した身体的特徴量の大きさを考慮して、1.0 kHz から 8.0 kHz までの帯域と、1.0 kHz から 12.0 kHz までの帯域の 2 条件に対して、主成分重み $W_{\theta,k}$ を各角度ごとに求めた。なお、実験には 78 名分の右耳で測定した HRTF に対し、512 点の DFT をすることで求めた振幅応答を用いた。

4.4.2 評価尺度

HRTF の振幅応答の再現度合は、2.4.2 節で述べた式 (2.18) の Spectral Distortion(SD) により評価した。

$$D_f = \sqrt{\frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \left(20 \log \frac{|H(f_i)|}{|\hat{H}(f_i)|} \right)^2} \quad [\text{dB}] \quad (2.18)$$

ここで、 $|H(f_i)|$ は測定した HRTF の振幅応答で、 $|\hat{H}(f_i)|$ は合成した HRTF の振幅応答である。 I は評価する帯域により異なり、1.0 kHz から 8.0 kHz の場合で $I = 75$ 、1.0 kHz から 12.0 kHz の場合で $I = 117$ である。また、 D_f の値が小さいほど合成の精度が高いと言える。

4.5 実験結果

4.5.1 重回帰分析に基づく HRTF の振幅応答の合成

主成分重みに関して、第5次主成分までを用いれば、主観的に十分な再現精度があるとの報告 [115, 121], および予備実験において第6次以降の主成分と身体的特徴量との重相関係数が低かったことをふまえて、実験に用いる HRTF の振幅応答の主成分重みの次数は、第5主成分 ($N = 5$) までとし、第6次以降の成分は用いないこととした。

ここで、主成分の次数削減のみによる HRTF の振幅応答の精度の変化は、この第5主成分までを用いた場合で、72方位かつ78名の平均で、1.0 kHz から 8.0 kHz の帯域では、式 (2.18) の SD は 1.6 dB (累積寄与率 82.0 %) であった。また、1.0 kHz から 12.0 kHz の帯域の場合では、SD 2.5 dB (累積寄与率 75.5 %) であった。

図 4.5に 1.0 kHz から 8.0 kHz の帯域の HRTF の対数振幅応答を合成した場合、および 1.0 kHz から 12.0 kHz の帯域の HRTF の対数振幅応答を合成した場合における 78名の平均 SD を方位角ごとに示す。これより、どちらの帯域においても、右耳が音源から最も遠ざかる $40^{\circ} \sim 140^{\circ}$ の範囲では精度が悪くなっていることが分かる。この音源から遠ざかる角度では、HRTF は回折波や反射波により構成されるため、HRTF は複雑な特性となる。そのため、精度の良い合成が困難になったと言える。また、帯域幅が広いほど精度の高い合成が難しくなっていることが分かる。上限帯域が上がるにつれて、より小さな部位の影響が出てくるため、今回計測した部位だけでは、広帯域での対応づけが不十分であると言える。

次に、図 4.6に 1.0 kHz から 12.0 kHz の帯域の 290° の HRTF の対数振幅応答を合成した例を示す。図には比較のため測定した HRTF の振幅応答も同時に示してある。図 4.6は比較的精度良く合成できた被験者の場合である。この結果のように、帯域幅が広い場合であっても、右耳と音源との距離が近くなる方位では、精度良く合成できていることが分かる。

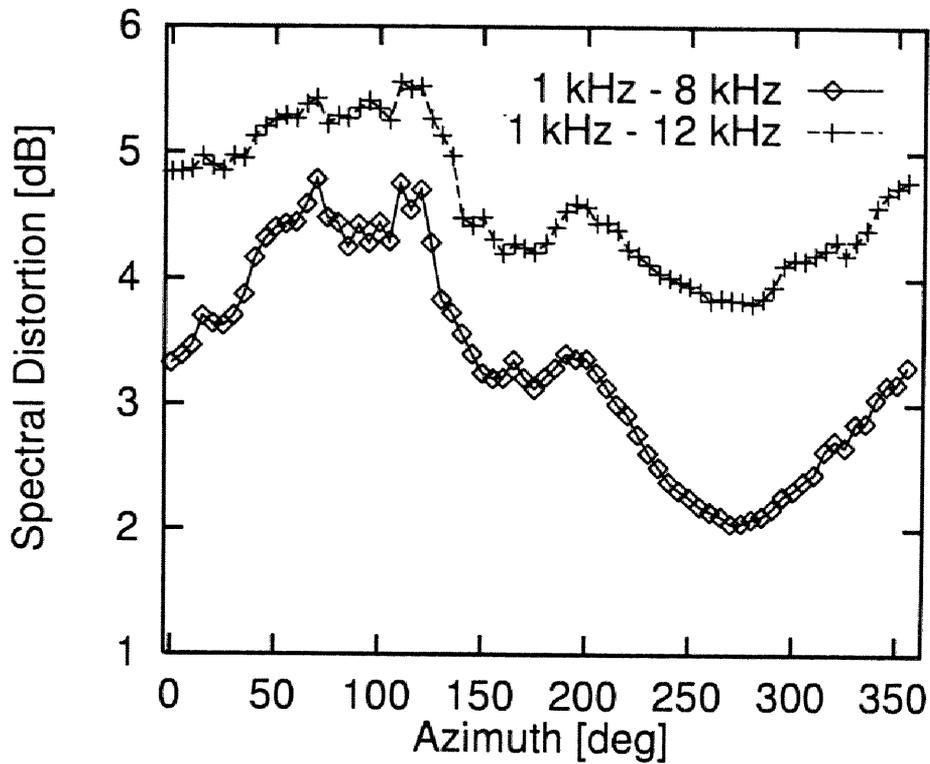


図 4.5: 78 名の平均 SD による合成した HRTF の振幅応答の方位角ごとの精度 (1.0 kHz~8.0 kHz の場合, 72 方位の平均 SD=3.3 dB。1.0 kHz~12.0 kHz の場合, 72 方位の平均 SD=4.6 dB)

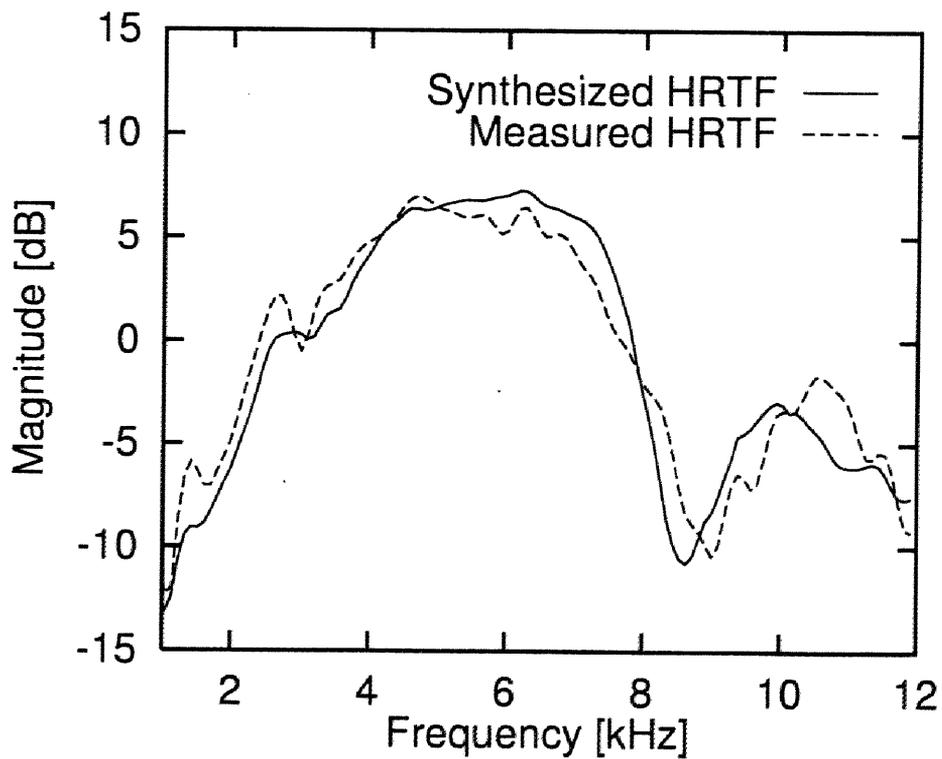


図 4.6: HRTF の振幅応答の合成の良い例 (1.0 kHz~12.0 kHz, 290°, SD=1.8 dB)

4.5.2 HRTF の振幅応答に対する身体的特徴の寄与率

HRTF の振幅応答の合成実験において、比較的精度の良い合成ができた 1.0 kHz から 8.0 kHz, 270°の重回帰モデルについて、どの身体的特徴が HRTF に影響を及ぼしているかを、偏相関係数の寄与率から調査した。

まず $w_{\theta,k}$ と x_{1k} の偏相関係数を求めるために、 $w_{\theta,k}$ および x_{1k} を残りの変数から予測する次の 2 つの重回帰モデルを考える。

$$\begin{aligned} w_{\theta,k}[n] &= c_0 + \sum_{l=2}^9 c_l x_{lk} + u_k \\ x_{1k} &= d_0 + \sum_{l=2}^9 d_l x_{lk} + v_k \end{aligned} \quad (4.12)$$

ただし $k = 1, 2, \dots, 78$ とする。最小 2 乗法により求めた重回帰式の予測誤差を、

$$\begin{aligned} u_k &= w_{\theta,k} - \left(c_0 + \sum_{l=2}^9 c_l x_{lk} \right) \\ v_k &= x_{1k} - \left(d_0 + \sum_{l=2}^9 d_l x_{lk} \right) \end{aligned} \quad (4.13)$$

とおくと、変数 u_k と v_k の偏相関係数は、

$$r = \frac{s_{u_k v_k}}{\sqrt{s_{u_k u_k} s_{v_k v_k}}} \quad (4.14)$$

$$\begin{aligned} s_{u_k u_k} &= \frac{1}{78} \sum_{m=1}^{78} (u_m - \bar{u})^2 \\ s_{v_k v_k} &= \frac{1}{78} \sum_{m=1}^{78} (v_m - \bar{v})^2 \\ s_{u_k v_k} &= \frac{1}{78} \sum_{m=1}^{78} (u_m - \bar{u})(v_m - \bar{v}) \\ \bar{u} &= \frac{1}{78} \sum_{m=1}^{78} u_m, \quad \bar{v} = \frac{1}{78} \sum_{m=1}^{78} v_m \end{aligned}$$

となり、この r が $w_{\theta,k}$ と x_{1k} の偏相関係数となる。これをもとに偏相関係数の寄与率を算出した。

表 4.2 に、HRTF の振幅応答の第 1 から第 3 主成分について、寄与率が高い身体的特徴を示す。この結果より、第 1 主成分に対しては両耳間距離、第 2 主成分に対しては頭囲、第 3 主成分に対しては耳介の影響が大きいことが分かる。

表 4.2: HRTF の振幅応答の各主成分重みに対する身体的特徴とその寄与率

第 1 主成分	両耳間距離	0.68	頭囲 (前)	0.14	頭囲 (後)	0.12
第 2 主成分	頭囲 (後)	0.36	頭囲 (前)	0.33	両耳間距離	0.22
第 3 主成分	耳甲介腔 (横)	0.29	耳介 (横)	0.23	頭囲 (前)	0.19

ここで、第 1 主成分は、音圧に関するパラメータと言われ、方位に関して三角関数的な振る舞いをする [115, 121]。また、頭部の水平方向を円または楕円と捉え、両耳間距離が円の直径に、頭囲が円周に対応するとみなせば、方位に関係のある特徴量であると言える。以上により、表 4.2 の結果は、合理的であると考えられる。図 4.7 に、両耳間距離と第 1 主成分の大きさの分布を示す。図より、両耳間距離の平均 (145.7 mm) より大きい場合には負の重み、小さい場合には正の重みとなる傾向にあることが分かる。

また、いずれの主成分に対しても、水平方向の身体的特徴量が寄与していることが分かる。逆に、水平面上の HRTF の振幅応答を合成する際には、頭部・耳介距離や耳介の縦の長さなどは、用いる必要が少ないと考えられる。

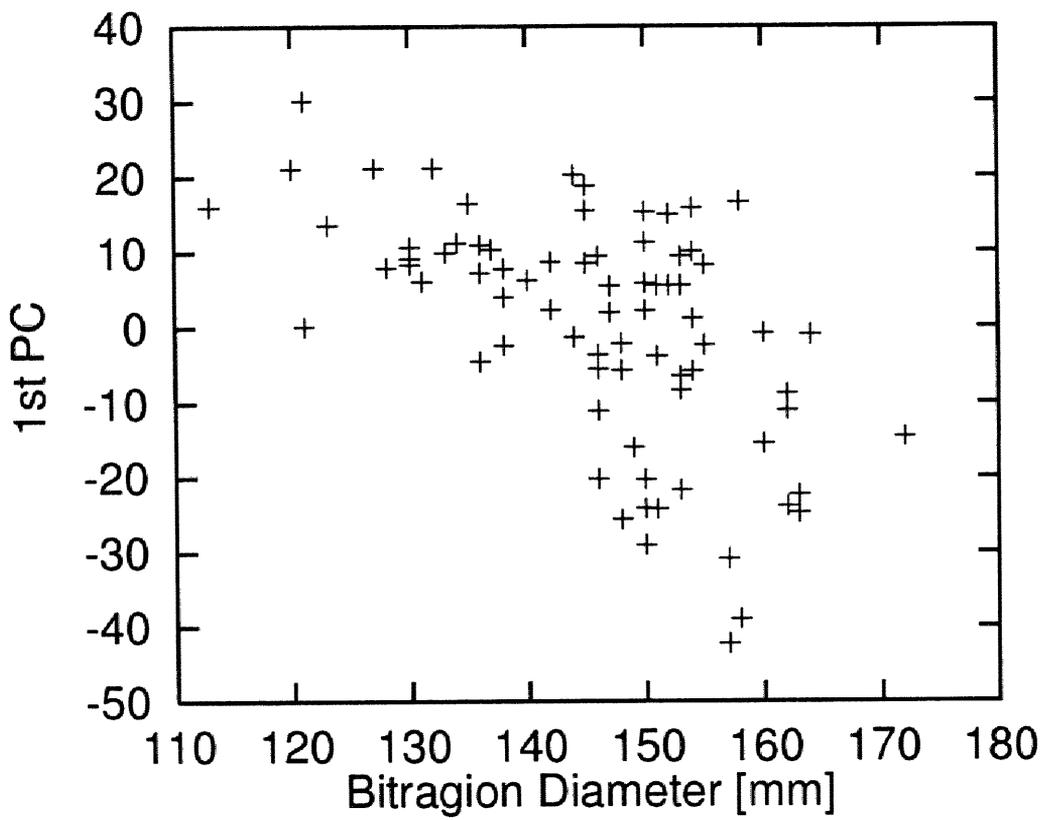


図 4.7: 両耳間距離と第 1 主成分重み (1.0 kHz~8.0 kHz, 270°)

4.5.3 HRTF 測定外被験者への適用

本節では HRTF を測定することなく、身体的特徴から合成可能かを調査する。ここでは、70 名分の HRTF から重回帰モデルを作成し、回帰係数 β_i を求め、残りの 8 名分の HRTF をこの回帰係数 β_i および身体的特徴より合成し評価した。モデルの作成に用いた HRTF と評価に用いた HRTF は、重複の無い 71 通りの組合せで選択した。また評価帯域を、

(1) 下限周波数は 1.0 kHz に固定。上限周波数は 8.0 kHz, 12.0 kHz

(2) 下限周波数は 0.0 kHz に固定。上限周波数は 4.0 kHz, 8.0 kHz, 12.0 kHz, 16.0 kHz, 20.0 kHz, 22.0 kHz, 24 kHz

の 9 条件とした [102]。HRTF の対数振幅応答を合成するにあたり、すべての条件において主成分重みは第 5 次まで用いた。

図 4.8 に 1.0 kHz から 8.0 kHz の場合の方位角ごとの SD を、図 4.9 に 1.0 kHz から 12.0 kHz の場合の方位角ごとの SD を、それぞれ示す。なお、結果は 71 通りの平均である。両図より、重回帰モデルの作成に用いた HRTF の合成精度は、1.0 kHz から 8.0 kHz の場合で全方位での平均 SD は 3.4 dB、1.0 kHz から 12.0 kHz の場合で全方位での平均 SD は 4.7 dB となり、78 名の HRTF での実験結果と同等の精度と言える。また、身体的特徴より合成した場合の精度は、1.0 kHz から 8.0 kHz の場合で全方位での平均 SD が 3.8 dB、1.0 kHz から 12.0 kHz の場合で全方位での平均 SD は 5.2 dB となった。

図 4.8、図 4.9 より、身体的特徴のみから HRTF の振幅特性を合成した場合、重回帰モデルの作成に用いた HRTF の振幅特性を再合成した場合と比べて、合成精度が落ちることが明らかとなった。また、測定した被験者の場合と同様に、音源と遠くなる角度では精度が悪くなることが分かる。しかし、右耳と音源が最も近くなる 270°周辺では、高い精度の合成ができていることが分かる。

次に、図 4.10 に下限周波数を 0.0 kHz とし、上限周波数を変化させた場合の実験結果を示す。図中の SD は、全方位に渡る平均値である。図より、上限周波数が高くなるにつれて、合成精度が悪くなる。ここで、水平面上の HRTF の補間の報告 [81] では、0.0 kHz ~ 22.05 kHz の帯域において、SD が 5.7 dB であっても、音像の移動感が得られた。図 4.10 より、補間の報告と最も条件に近い、上限周波数が 22.0 kHz の場合では、重回帰モデルの作成に用いた HRTF の振幅特性の合成精度は、全方位

の平均 SD で 5.4 dB となり、音像の移動感を得ることが可能であると言える。これに対し、身体的特徴のみから HRTF の振幅特性を合成した場合は、全方位の平均 SD が 5.8 dB であった。ここで、補間の報告の平均 SD と本実験結果の平均 SD に有意な差があるかどうか、有意水準 1% で t 検定した結果、両者には有意な差は見られなかった。これにより、身体的特徴量のみから HRTF の振幅特性を合成した場合においても、音像の移動感を得ることが可能であると予想される。

また、主成分分析に HRTF の振幅応答を用いて、下限周波数を 0.0 kHz に固定した (2) の条件で同様の実験を行ない、負の推定値となる条件を除外し SD を求めた。HRTF の対数振幅応答を用いた場合の実験結果と比較した結果、HRTF の振幅応答を用いた場合は、同等かそれ以下の合成精度であった。これより、HRTF の対数振幅応答を用いることが有効であることが明らかとなった。

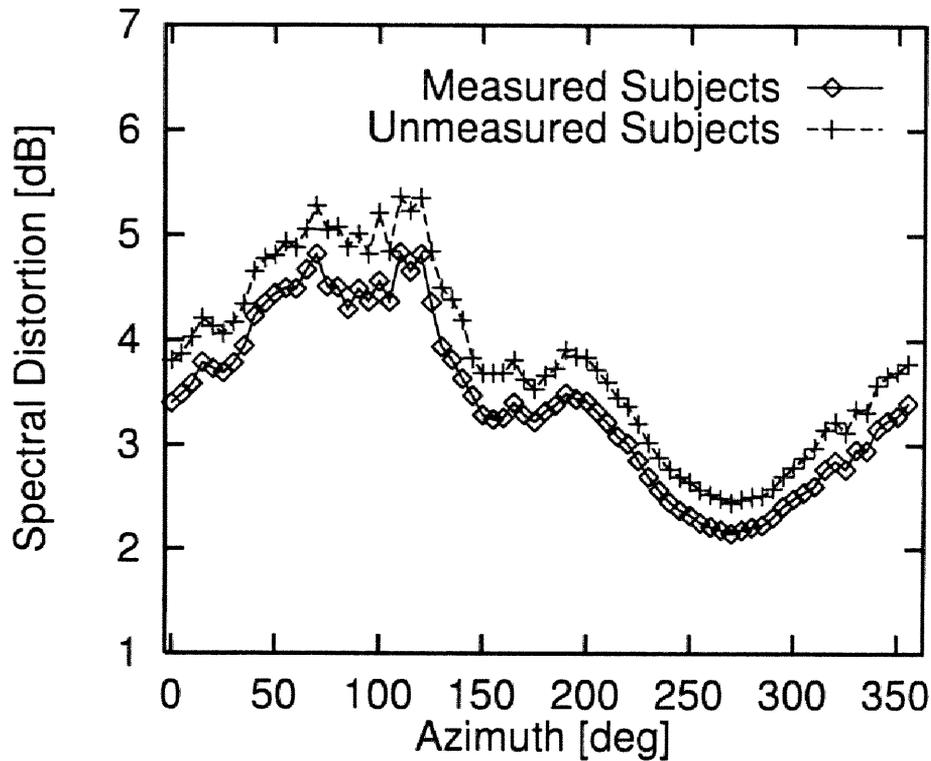


図 4.8: 合成した HRTF の精度 (1.0 kHz~8.0 kHz, 測定した被験者の場合: 平均 SD=3.4 dB, 測定外被験者の場合: 平均 SD=3.8 dB)

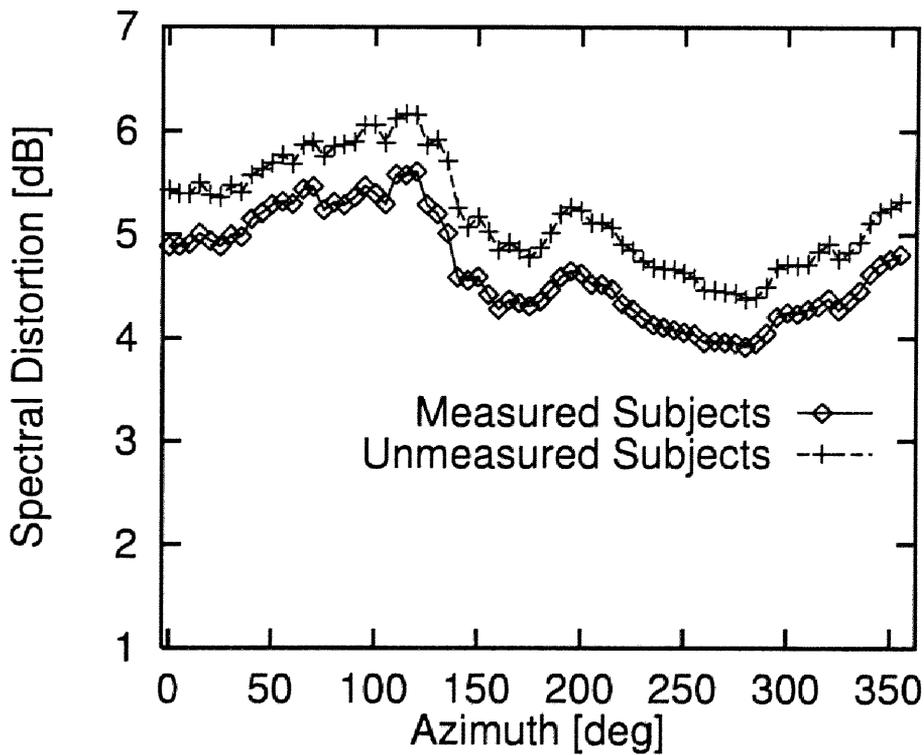


図 4.9: 方位角ごとの合成した HRTF の精度 (1.0 kHz~12.0 kHz, 測定した被験者の場合: 平均 SD=4.7 dB, 測定外被験者の場合: 平均 SD=5.2 dB)

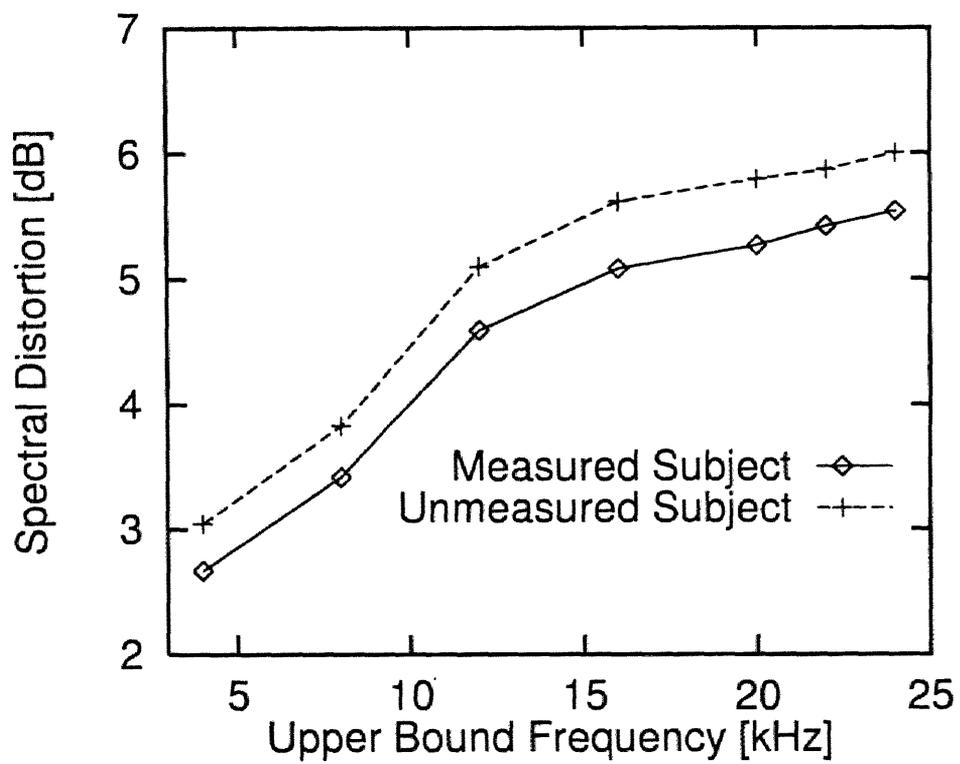


図 4.10: 上限周波数の違いによる合成精度

4.5.4 まとめ

客観評価の結果から、帯域幅が広がるにつれて、合成の精度は劣化し、対応付けが困難になることが明らかとなった。また、身体的特徴量のみから合成した場合には、さらに精度が劣化することが明らかとなった。しかし、第2章で述べた水平面上の HRTF の補間の報告と比較した結果、身体的特徴量のみから合成した場合であっても、補間により HRTF を合成した報告結果と有意な差はないことが確かめられた。

次に、身体的特徴量の寄与率の調査結果からは、9箇所 of 身体的特徴量の内、両耳間距離と水平方向に関する特徴量が、HRTF の振幅応答に寄与することが分かった。この原因としては、今回対象とした HRTF が水平面上のものに限られていたためであると考えられる。

4.6 むすび

本章では、HRTF の振幅応答と両耳間距離などの身体的特徴とを関連づけ、身体的特徴から HRTF の振幅応答を推定することを検討した。

実験では、右耳の HRTF の振幅応答の主成分重みと身体的特徴とを、重回帰分析を用いて関連づけることにより、HRTF の振幅応答の推定を行なった。推定の精度を Spectral Distortion(SD) により評価した結果、1.0 kHz から 8.0 kHz の帯域では、平均 3.3 dB、1.0 kHz から 12.0 kHz の帯域では、平均 4.6 dB の SD をそれぞれ得た。

さらに、重回帰分析の結果を用いて、計測した身体的特徴量の内、どの特徴量が HRTF の振幅応答の主成分に寄与するかの調査を行なった。その結果、9種類の身体的特徴量の内、両耳間距離と水平方向に関する特徴量が寄与することが明らかとなった。これにより、水平面上の HRTF の振幅応答を身体的特徴量から推定するには、両耳間距離および水平方向に関する特徴量を計測し用いることが有効であると言える。

また、実際に HRTF を測定していない被験者に対し、身体的特徴量のみから HRTF の振幅応答を推定した。ここで、0.0 kHz から 22.0 kHz の帯域での合成結果を、水平面上の HRTF の補間の報告結果と比較したところ、両者に有意な差はなく、本手

法により、主観的に有効な HRTF の振幅応答が得られたと考えられる。

以上から、HRTF および身体的特徴量に関する多数の測定データを用いて、重回帰モデルを作成することにより、実際に HRTF を測定することなく、身体的特徴量から HRTF を求めることが可能であると言える。

第 5 章

結論

頭部伝達関数 (Head Related Transfer Function: HRTF) は、音源方向および個人に依存する伝達関数であることから、あらゆる音源の方向および、聴取者すべてについて HRTF の測定を行わなくてはならないといった問題点がある。そこで本論文では、方向に関する問題に関して、限られた方向で測定された HRTF をもとに、測定されていない方向の HRTF を推定し補間する検討を行なった。また、個人依存に関する問題に関して、頭囲や耳介の大きさといった身体的特徴量から、HRTF を推定する検討を行なった。

まず方向に関する問題に関して、第 2 章にて、水平面上の HRTF について補間可能性を検討した。補間手法には、線形 2 点補間および、主成分分析を用いた補間の 2 手法を用いた。水平面上の HRTF のインパルス応答と周波数応答を補間対象として、これら 2 手法による HRTF の補間実験を行なった。補間手法により得られた HRTF を、客観基準と主観基準 (移動感ならびに方向定位感) により評価した。客観評価および主観評価結果より水平面上の HRTF は 45° (8 方位) もしくはそれ以下の角度間隔で測定された HRTF から補間可能であることが明らかとなった。また客観評価により両補間手法を比較したところ、線形 2 点補間は主成分分析による補間手法と比べて、精度の高い補間が可能となったことが明らかとなった。さらにインパルス応答を補間した結果と振幅応答を補間した結果の間には、補間精度の有意な差はなく、位相は最小位相であっても良いことが明らかになった。

次に、客観評価結果と主観評価結果とを比較・対比させることで、Spectral Distortion (SD) による振幅応答の歪みが、5.7 dB 以下であれば、聴感上、音源の移動感が得られることが明らかとなった。この結果より、従来、HRTF の再現精度の評

価には、主観評価実験を行ない検証する必要があったが、客観評価から、主観評価の予測も含んだ評価が可能となった。さらに同じ客観評価基準を用いることで他の研究との性能比較も容易に行なうことが可能となった [83, 87]。また、HRTF の測定が困難な音源方向であっても、本章の結果から推定が可能となった。これにより、より滑らかな音源の移動感を呈示するために、音源方向の角度間隔が微小な場合の HRTF データを作成することが可能となった [131]。

続く第3章では、第2章で行なった水平面上の HRTF の補間の検討に加え、仰角方向の HRTF を含んだ、全方位の HRTF について補間可能性に関する検討を行なった。補間手法には、線形2点補間および、スプライン補間の2手法を用いた。HRTF の振幅応答を補間対象とし、これら2手法により得られた HRTF を、客観基準と主観基準(方位に関する音源定位および仰角に関する知覚)により評価した。客観評価および主観評価結果より、HRTF は、水平方向 45°間隔、仰角方向 30°間隔もしくはそれ以下の角度間隔で測定した HRTF から補間可能であることが明らかとなった。検討結果より、任意方向の HRTF を 41 方向の HRTF で表現することが可能であることが示された。また、客観評価結果より、HRTF は一定の角度間隔で測定しても良いこと、および線形2点補間はスプライン補間と比較して、より精度の高い補間が可能ながことが明らかとなった。

次に、HRTF が個人に依存した音響特性関数であるという問題点に関して、第4章では、頭部および耳介の物理的形狀から HRTF を推定する検討を行なった。

実験では、重回帰分析により、頭囲や耳介の長さといった身体的特徴量と、水平面上の HRTF との関係を調査し、身体的特徴量から HRTF を推定する検討を行なった。実験結果から、計測した身体的特徴量の大きさに密接に関わるような周波数帯域である 1.0 ~ 8.0 kHz の帯域の HRTF を推定した場合には、78 標本の全方位 (72 方位) の平均で SD は 3.3 dB となり、精度の良い対応付けが可能であることが明らかとなった。さらに、各身体的特徴量が HRTF の主成分に及ぼす寄与率を求めたところ、水平面上の HRTF に対しては、両耳間距離や頭囲が寄与することが確かめられた。

また続いて、重回帰モデルと身体的特徴量のみから、実際に HRTF を測定することなく、聴取者に適した HRTF が推定可能かどうかについて評価を行なった。この

結果、0.0～22.0 kHz の HRTF を重回帰モデルと身体的特徴量のみから推定した場合には、SD で 5.8 dB となった。この結果と第 2 章で聴感上有効であるとした SD との間に有意差があるか否かを有意水準 1 % で t 検定した結果、両者に有意な差はないことが確かめられた。これにより、第 4 章にて検討した重回帰モデルを用いることにより、実際に HRTF を測定することなく頭部や耳介の大きさを計測するだけで HRTF が推定可能となることが明らかとなった。

以上より本論文では、HRTF の方向依存性および個人依存性に関する問題点について述べ、解決手法を提案し検討を行なった。第 2 章、第 3 章において、HRTF の方向依存性に関する検討を行なった。その結果、水平方向では、8 方向の HRTF を測定することで、水平面上の任意方向からの音の到来を模擬することが可能となった。また全方位に関しては、水平・仰角方向を含む 41 方向の HRTF を測定することで、空間内の任意方向からの音の到来を模擬することが可能となった。また、第 4 章では、個人依存性に関して、頭部や耳介の大きさといった身体的特徴量から HRTF を推定する手法について提案し検討を行なった。その結果、9 種類の身体的特徴量のみを測定することで、聴取者に適した HRTF が推定可能となった。

これらの検討結果から、HRTF を用いたシステムは、限られた HRTF および身体的特徴量の測定を行なうことによって、すべての方向およびすべての聴取者の HRTF を用意することが可能となったと言える。

今後の課題として、まず、本論文で検討したよりもさらに高精度に HRTF を推定する手法の検討が挙げられる。HRTF を高精度に推定するため、HRTF を頭部や耳介の影響ごとに分離するなどし [132, 133, 134]、個人性や音源方向・距離がパラメータとして反映されるモデル化を行なう必要があると考えられる。また、音源定位・移動感・頭外定位感といった主観評価と関連する客観評価手法の検討や、HRTF および身体的特徴量に関する大規模データベースの作成も今後検討する必要がある課題である。

参考文献

- [1] A. W. Mills, "On the minimum audible angle," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 30, pp. 237-246, 1958
- [2] 黒澤明, 都木徹, 山口善司, "頭部伝達関数と方向弁別能力について," *音響学会誌*, vol. 38, pp. 145-151, 1982
- [3] R. G. Klumpp and H. R. Eady, "Some measurements of interaural time difference thresholds," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 28, pp. 859-860, 1956
- [4] J. Zwillocki and R. S. Feldman, "Just noticeable differences in dichotic phase," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 28, pp. 860-864, 1956
- [5] Lord Rayleigh, "On our perception of sound direction," *Philos. Mag.*, vol. 13, pp. 214-232, 1907
- [6] D. C. Teas, "Lateralization of acoustic transients," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 34, pp. 1460-1465, 1962
- [7] B. Sayers, "Acoustic-image lateralization judgment with binaural tones," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 36, pp. 923-926, 1964
- [8] F. E. Toole and B. Sayers, "Inferences of neural activity associated with binaural acoustic images," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 38, pp. 769-779, 1965
- [9] D. R. Perrott and M. A. Nelson, "Limits for the detection of binaural beats," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 46, pp. 1477-1481, 1969
- [10] D. R. Perrott and M. A. Nelson, "Limits for the detection of binaural beats," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 47, pp. 663-664, 1970

- [11] H. Kietz, "Das räumliche Hören," *Acustica*, vol. 3, pp. 73-86, 1953.
- [12] 永井健三, 佐藤利三郎, 岩崎俊一, "立体録音に於ける方向感の実験的検討," 音響学会誌, vol. 10, pp. 149-155, 1954
- [13] M. L. Pinheiro and H. Tobin, "Interaural intensity difference for intercranial lateralization," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 46, pp. 1482-1487, 1969
- [14] 二階堂誠也, "両耳聴研究のステレオ音響技術への応用," 音響学会誌, vol. 37, pp. 166-173, 1981
- [15] J. Blauert, "Spatial Hearing (revised edition)," The MIT Press, 1996
- [16] J. Garas, "Adaptive 3D Sound Systems," Kluwer Academic Publishers, 2000
- [17] 中林克己, "水平面内における方向定位," 音響学会誌, vol. 30, pp. 151-160, 1974
- [18] M. B. Gardner and R. Gardner, "Problem of localization in the median plane," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 53, pp. 400-408, 1973
- [19] M. B. Gardner, "Some monaural and binaural facets of median plane localization," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 54, pp. 1489-1495, 1973
- [20] S. K. Roffler and R. A. Butler, "Factors that influence the localization of sound in the vertical plane," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 43, pp. 1255-1259, 1968
- [21] S. K. Roffler and R. A. Butler, "Localization of tonal stimuli in the vertical plane," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 43, pp. 1260-1266, 1968
- [22] J. Blauert, "Localization in the median plane," *Acustica*, vol. 22, pp. 205-213, 1969/70
- [23] M. Morimoto and H. Aokata, "Localization cues of sound sources in the upper hemisphere," *J. Acoust. Soc. Jpn.(E)*, vol. 5, pp. 165-173, 1984
- [24] F. Asano, Y. Suzuki and T. Sone, "Role of spectral cues in median plane localization," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 88, pp. 159-168, 1990

- [25] J. C. Middlebrooks, "Narrow-band sound localization related to external ear acoustics," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 92, pp. 2607-2624, 1992
- [26] E. I. Knudsen and M. Konishi, "A neural map of auditory space in the owl," *Science*, vol. 200, pp. 795-797, 1978
- [27] 古川茂人, 牧勝弘, 柏野牧夫, 力丸裕, 平原達也, "両耳間位相差に対する下丘神経細胞の時間的反応特性," 音響学会講演論文集, 2-3-10, pp. 507-508, 2001
- [28] P. Damaske, "Head-related two-channel stereophony with loudspeaker reproduction," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 50, pp. 1109-1115, 1971
- [29] 高尾秀伸, 野呂影勇, "仮想音響空間における音像の学習に関する研究," 音響学会聴覚研究会資料, H-99-1, 1999
- [30] F. A. Firestone, "The phase difference and amplitude ratio at the ears due to a source of pure tones," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 2, pp. 260-270, 1930
- [31] W. E. Kock, "Binaural localization and masking," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 22, pp. 801-804, 1950
- [32] J. D. Harris, "Sound shadow, cast by head and ears," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 36, pp. 1049, 1964
- [33] L. L. Torick, A. di Mattia, A. J. Rosenheck, L. A. Abbagnaro and B. B. Bauer, "An electric dummy for acoustical testing," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 16, pp. 397-403, 1968
- [34] 柳沢武三郎, 二村忠元, "室内音響に関する物理量と心理量との対応に関する実験結果について (II)," 音響学会誌, vol. 24, pp. 187-196, 1968
- [35] von H. Wilkens, "Kopfbezügliche stereophonie – ein hilfsmittel für vergleich und beurteilung verschiedener raumeindrücke," *Acustica*, vol. 26, pp. 213-221, 1972
- [36] V. Mellert, "Construction of a dummy head after new measurements of the threshold of hearing," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 51, pp. 1359-1361, 1972

- [37] J. Blauert and P. Laws, "Verfahren zur orts- und klanggetreuen simulation von lautsprecherbeschallungen mit hilfe von kopfhörern," *Acustica*, vol. 29, pp. 273-277, 1973
- [38] D. D. Dirks and S. Gilman, "Exploring azimuth effects with an anthropometric manikin," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 66, pp. 696-701, 1979
- [39] 浜田晴夫, "基準的收音・再生を目的とする Orthostereophonic System の構成," *音響学会誌*, vol. 39, pp. 337-348, 1983
- [40] 沢口真生, "ダミーヘッド收音による制作例," *音響学会誌*, vol. 46, pp. 644-649, 1990
- [41] M. D. Burkhard and R. M. Sachs, "Anthropometric manikin for acoustic research," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 58, pp. 214-222, 1975
- [42] K. Fukudome, "A three-dimensional measurement of human head - For the purpose of dummyhead construction," *J. Acoust. Soc. Jpn.(E)*, vol. 4, pp. 35-43, 1983
- [43] H. Hudde and J. Schroter, "Verbesserungen am neumann-kunstkopfsystem," *Rundfunktech. Mitt*, vol. 25, pp. 1-6, 1981
- [44] H. Hamada, N. Ikeshoji, Y. Ogura and T. Miura, "Relation between physical characteristics of orthostereophonic system and horizontal plane localization," *J. Acoust. Soc. Jpn.(E)*, vol. 6, pp. 143-154, 1985
- [45] K. Okabe, H. Hamada and T. Miura, "System for simulated in situ measurement of hearing aids," *J. Acoust. Soc. Jpn.(E)*, vol. 5, pp. 95-103, 1984
- [46] 岡部馨, "Orthostereophonic System を用いた水平面定位試験- 解析と標準ダミーヘッド構成への応用- ," *音響学会誌*, vol. 44, pp. 282-292, 1988
- [47] 岡部馨, 三浦種敏, "基準的音響伝送系 OSS のための HATS 構成," *音響学会誌*, vol. 46, pp. 885-892, 1990
- [48] G. Plenge, "On the difference between localization and lateralization," *J. Acoust. Soc. Am.* vol. 56, pp. 944-951, 1974

- [49] M. Morimoto and Y. Ando, "On the simulation of sound localization," J. Acoust. Soc. Jpn.(E), vol. 1, pp. 167-174, 1980
- [50] F. L. Wightman and D. J. Kistler, "Headphone simulation of free-field listening. I: Stimulus synthesis," J. Acoust. Soc. Am., vol. 85, pp. 858-867, 1989
- [51] F. L. Wightman and D. J. Kistler, "Headphone simulation of free-field listening. II: Psychophysical validation," J. Acoust. Soc. Am. vol. 85, pp. 868-878, 1989
- [52] 川浦淳一, 鈴木陽一, 浅野太, 曾根敏夫, "頭部伝達関数の模擬によるヘッドホン再生音像の定位," 音響学会誌, vol. 45, pp. 756-766, 1989
- [53] J. Blauert and K. Genuit, "Evaluating sound environments with binaural technology - Some basic consideration," J. Acoust. Soc. Jpn.(E), vol. 14, pp. 139-145, 1993
- [54] 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., vol. 44, pp. 240-249, 1968
- [55] 飯田一博, 伊藤元邦, 林英吾, 森本政之, "両耳間差と正中面 HRTF による 3 次元音像定位 - I. 側方角知覚と上昇角知覚に基づく新しい音像定位方式 -," 音響学会講演論文集, 1-5-20, pp. 457-458, 2001
- [56] 伊藤元邦, 飯田一博, 林英吾, 森本政之, "両耳間差と正中面 HRTF による 3 次元音像定位 - II. 側方角知覚に及ぼす ITD と ILD の効果 -," 音響学会講演論文集, 1-5-21, pp. 459-460, 2001
- [57] 飯田一博, 伊藤元邦, 森本政之, "矢状面間の HRTF の類似性," 音響学会講演論文集, 2-4-18, pp. 597-598, 2002
- [58] 山口善司, 壽司範二, "受話器の實耳レスポンスについて," 音響学会誌, vol. 12, pp. 8-13, 1956
- [59] 山田崇晴, 梶川嘉延, 野村康雄, "ヘッドホン・イヤホンの設計目標としての頭部伝達関数の有効性について," 電子情報通信学会技術報告, EA99-102, 2000

- [60] 小林互, 阪本憲成, 尾上孝雄, 白川功, “3次元音像定位リアルタイムアルゴリズムとその低消費電力DSP実装,” 電子情報通信学会技術報告, DSP2000-34, 2000
- [61] 阪本憲成, 小林互, 尾上孝雄, 白川功, “3次元音像定位リアルタイムアルゴリズムのDSP実装とその評価,” 電子情報通信学会技術報告, DSP2001-69, 2001
- [62] F. M. Wiener and D. A. Ross, “The pressure distribution in the auditory canal in a progressive sound field,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 18, pp. 401-408, 1946
- [63] F. M. Wiener, “On the diffraction of a progressive sound wave by the human head,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 19, pp. 143-146, 1947
- [64] E. A. G. Shaw, “Ear canal pressure generated by a free sound field,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 39, pp. 465-470, 1966
- [65] E. A. G. Shaw, “Transformation of sound pressure level from the free field to the eardrum in the horizontal plane,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 56, pp. 1848-1862, 1974
- [66] S. Mehrgardt and V. Mellert, “Transformation characteristics of External human ear,” *J. Acoust. Soc. Am.* vol. 61, pp. 1567-1576, 1977
- [67] 足達吉倫, 杉山精, 三好正人, “疑似頭のHRTFを用いた音像定位の検討,” 電子情報通信学会技術報告, EA2000-24, 2000
- [68] W. Gardner and K. Martin, “HRTF measurements of a KEMAR,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 97, pp. 3907-3908, 1995
<http://sound.media.mit.edu/KEMAR.html>
- [69] A. Farina, Univ. of Parma
<http://pcangelo.eng.unipr.it/Public/HRTF/>
- [70] Hearing Development Research Laboratory, Univ. of Wisconsin
<http://www.waisman.wisc.edu/hdrl/>
- [71] 高根昭一, 曾根敏夫, 新井大輔, 宮島徹, 渡邊貫治, 鈴木陽一, “上半球における全方向の頭部伝達関数のデータベース,” 音響学会講演論文集, 1-P-21, pp. 633-634,

2001

<http://www.ais.riec.tohoku.ac.jp/lab/db-hrtf/>

- [72] V. R. Algazi, R. O. Duda, D. M. Thompson and C. Avendano, "The CIPIC HRTF Database," Proc. of IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, pp. 99-102, 2001
<http://phosphor.cipic.ucdavis.edu/>
- [73] G. Vandernoot and E. Rio, "Listen HRTF Database," 2002
<http://www.ircam.fr/equipes/salles/listen/>
- [74] 小泉宣夫, "バーチャル・リアリティと音響技術," 音響学会誌, vol. 49, pp. 497-501, 1993
- [75] A. Sibbald, "Virtual EarTM Technology," Sensaura Technical White Paper, DEVPC011, 1997
<http://www.sensaura.com/whitepapers/pdfs/devpc011.pdf>
- [76] D. R. Begault, "3-D Sound for Virtual Reality and Multimedia," Academic Press, 1994
- [77] M. D. Good and R. H. Gilkey, "Sound localization in noise: The effect of signal-to-noise ratio," J. Acoust. Soc. Am., vol. 99, pp. 1108-1117, 1996
- [78] R. A. Butler and K. Belendiuk, "Spectral cue utilized in the localization of sound in median sagittal plane," J. Acoust. Soc. Am., vol. 61, pp. 1264-1269, 1977
- [79] E. M. Wenzel, M. Arruda, D. J. Kistler and F. L. Wightman, "Localization using nonindividualized head-related transfer functions," J. Acoust. Soc. Am., vol. 94, pp. 111-123, 1993
- [80] E. M. Wenzel and S. H. Foster, "Perceptual Consequences of Interpolating Head-Related Transfer Functions During Spatial Synthesis," Proc. of IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, Paper 5-2, 1993

- [81] 西野隆典, 梶田将司, 武田一哉, 板倉文忠, “水平面上の頭部伝達関数の補間,” 音響学会誌, vol. 55, pp. 91-99, 1999
- [82] 福留公利, “特徴点軌跡補間法による球面波入射時の球の回折情報辞書の作製,” 音響学会講演論文集, 1-6-18, pp. 465-466, 1999
- [83] 山中晋, 野村博昭, 東山三樹夫, “個人別頭部伝達関数の補間推定,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会 (基礎・境界), pp. 132, 1999
- [84] L. Savioja, J. Huopaniemi, T. Lokki and R. Väänänen, “Creating interactive virtual acoustic environments,” J. Audio Eng. Soc., vol. 47, pp. 675-705, 1999
- [85] S. Carlile, C. Jin and V. van Raad, “Continuous virtual auditory space using HRTF interpolation: acoustic and psychophysical errors,” Proc. of International Symposium on Multimedia Information Processing, pp. 220-223, 2000
- [86] L. Tronchin, V. Tarabusi, A. Farina and A. Giusto, “Spatialization and acoustical simulation in the binaural technology,” Proc. of International Symposium on Musical Acoustics, pp.461-464, 2001
- [87] 渡邊貫治, “頭部伝達関数の符号化に関する基礎的研究,” 東北大学審査修士学位論文, 2001
- [88] L. W. P. Biscainho, F. P. Freeland and P. S. R. Dinz, “Using inter-positional transfer functions in 3D-sound,” Proc. of IEEE ICASSP, pp. 1961-1964, 2002
- [89] F. P. Freeland, L. W. P. Biscainho and P. S. R. Dinz, “Efficient HRTF interpolation in 3D moving sound,” Proc. of the Audio Engineering Society 22nd International Conference in Virtual, Synthetic and Entertainment Audio, pp. 106-114, 2002
- [90] H. Hacıhabiboglu, “Interpolation of low-order HRTF filters using a zero displacement measure,” Proc. of Forum Acusticum Sevilla 2002, PHA-Gen-021, 2002

- [91] D. Brungart, "Auditory parallax effects in the HRTF for nearby sources," Proc. of IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, Paper 9-2, pp.171-174, 1999
- [92] 二宮知子, 立蔵洋介, 猿渡洋, 鹿野清宏, "直線上を移動する仮想音源のための HRTF の外挿," 音響学会講演論文集, 1-P-18, pp. 627-628, 2001
- [93] 寺野香織, 柴多直樹, "立体音響生成のための頭部伝達特性の補間方法の検討," 情報処理学会講演論文集, vol. 3, pp. 275-276, 1995
- [94] Y. Haneda, S. Makino and Y. Kaneda, "Common acoustical poles independent of sound directions and modeling of head-related transfer functions," J. Acoust. Soc. Jpn.(E), vol. 15, pp. 277-279, 1994
- [95] 藤浪喜久, 中曾二郎, "頭外音像定位へのウェーブレット解析の応用," 音響学会講演論文集, 2-6-13, pp. 567-568, 1996
- [96] M. A. Blommer and G. H. Wakefield, "Pole-zero approximations for head-related transfer functions using a logarithmic error criterion," IEEE Trans. on Speech Audio Processing, vol. 5, pp. 278-287, 1997
- [97] 春日正男, 目加田慶人, 長谷川光司, 安田晴剛, "IIR フィルタによる頭部伝達関数の近似法," 音響学会誌, vol. 54, pp. 482-488, 1998
- [98] E. A. Durant and G. H. Wakefield, "Efficient model fitting using a genetic algorithm: pole-zero approximations of HRTFs," IEEE Trans. on Speech and Audio Processing, vol.10, pp. 18-27, 2002
- [99] H. Hacıhabiboglu, B. Gunel, F. Murtagh, "Wavelet-based Spectral Smoothing for Head-Related Transfer Function Filter Design," Proc. of the Audio Engineering Society 22nd International Conference on Virtual, Synthetic and Entertainment Audio, pp. 131-136, 2002
- [100] S. Shimada, N. Hayashi, and S. Hayashi, "A Clustering Method for Sound Localization Transfer Functions," J. Audio Eng. Soc., vol. 42, pp. 577-584, 1994

- [101] 米田成吾, 西野隆典, 武田一哉, 板倉文忠, “単一方位角情報に基づくクラスタリングによる汎用 HRTF の評価,” 電子情報通信学会技術報告, EA99-84, 1999
- [102] 西野隆典, 中井勇祐, 武田一哉, 板倉文忠, “重回帰分析を用いた頭部伝達関数の推定,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会 (基礎・境界), pp. 317-318, 2000
- [103] V. R. Algazi, C. Avendano and R. O. Duda, “Elevation localization and head-related transfer function analysis at low frequencies,” J. Acoust. Soc. Am., vol. 109, pp. 1110-1122, 2001
- [104] V. R. Algazi, C. Avendano and R. O. Duda, “Estimation of a spherical-head model from anthropometry,” J. Aud. Eng. Soc., vol. 49, p.472-479, 2001
- [105] D. N. Zotkin, R. Duraiswami and L. S. Davis, “Customizable Auditory Displays,” Proc. of the 8th International Conference on Auditory Display, pp. 167-176, 2002
- [106] 杉山精, 坂口達矢, 青木茂明, 木下郁一郎, “回転楕円体モデルによる両耳間の音響諸係数の予測,” 音響学会誌, vol. 51, pp. 117-122, 1995
- [107] 大西崇浩, 広林茂樹, 谷島潔, 東山三樹夫, “散乱波に着目した頭部伝達関数の推定,” 音響学会講演論文集, 1-7-4, pp. 471-472, 1996
- [108] R. O. Duda and W. L. Martens, “Range dependence of the response of a spherical head model,” J. Acoust. Soc. Am., vol. 104, pp. 3048-3058, 1998
- [109] Y. Kahana, P. A. Nelson, M. Petyt and S. Choi, “Numerical modeling of the transfer functions of a dummy-head and of the external ear,” Proc. of Audio Engineering Society 16th International Conference, pp. 330-345, 1999
- [110] 工藤純一, 陳国躍, 高根昭一, 鈴木陽一, 曾根敏夫, “3次元スキャナを用いた測定データに基づく頭部伝達関数の数値解析,” 音響学会講演論文集, 1-6-19, pp. 467-468, 1999
- [111] 岩瀬俊秀, 杉山精, “大型扁平回転楕円体の回折係数について,” 音響学会誌, vol. 56, pp. 318-323, 2000

- [112] 大谷真, 伊勢史郎, “境界要素法を用いた頭部伝達関数の予測,” 音響学会講演論文集, 1-1-12, pp. 727-728, 2000
- [113] 大谷真, 伊勢史郎, “境界要素法により求めた頭部伝達関数の聴感実験による検討,” 音響学会講演論文集, 2-6-3, pp. 595-596, 2001
- [114] P. Damaske and V. Mellert, “Ein Verfahren zur richtungstreuen Schallabbildung des oberen Halbraumes über zwei Lautsprecher,” *Acustica*, vol. 22, pp. 154-162, 1969/70
- [115] 西野隆典, 武田一哉, 板倉文忠, “主成分分析による頭部伝達関数の特徴量の調査,” 電子情報通信学会技術報告, DSP96-74, 1996
- [116] 西野隆典, 梶田将司, 武田一哉, 板倉文忠, “頭部伝達関数の補間法の検討,” 音響学会講演論文集, 1-7-10, pp. 483-484, 1996
- [117] T. Nishino, S. Mase, S. Kajita, K. Takeda, and F. Itakura, “Interpolating HRTF for Auditory Virtual Reality,” *Proc. of ASA and ASJ Third Joint Meeting*, pp. 1261-1266, 1996
- [118] M.J.E. Golay, “Complementary series,” *IRE Trans. Inf. Theory*, vol. 7, pp. 82-87, 1961
- [119] S. Foster, “Impulse response measurement using Golay codes,” *Proc. of IEEE ICASSP*, pp. 929-932, 1986
- [120] 柳井晴夫, 高木廣文, “多変量解析ハンドブック”, 現代数学社, pp. 70-97, 1986
- [121] D. J. Kistler and F. L. Wightman, “A model of head-related transfer functions based on principal components analysis and minimum-phase reconstruction,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 91, pp. 1637-1647, 1992
- [122] 木下郁一郎, 青木茂明, “主成分重み係数を利用した頭外音像定位伝達関数の補間,” 音響学会講演論文集, 2-P-14, pp. 601-602, 1997
- [123] I. Kinoshita and S. Aoki, “Representation of sound localization transfer function and psychoacoustical evaluation,” *J. Acoust. Soc. Jpn.(E)*, vol. 20, pp. 271-280, 1999

- [124] G. M. Jenkins and D. G. Watts, "Spectral analysis and its applications," Holden-Day, San Francisco, 1968
- [125] N. Aoshima, "Computer-generated pulse signal applied for sound measurement," J. Acoust. Soc. Am., vol. 69, pp. 1484-1488, 1981
- [126] 鈴木陽一, 浅野太, 曾根敏夫, "音響系の伝達関数の模擬をめぐって(その2)," 音響学会誌, vol. 45, pp. 44-50, 1989
- [127] E. Kreyszig, 北川源四郎, 阿部寛治, 田栗正章, "技術者のための高等数学 5. 数値解析," 培風館, 1988
- [128] 横田壽, "数値解析入門," 2002
<http://next1.cc.it-hiroshima.ac.jp/numeanall/numeanall.html>
- [129] T. Nishino, S. Kajita, K. Takeda and F. Itakura, "Interpolating Head Related Transfer Functions in the median plane," Proc of IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, Paper 9-1, pp. 167-170, 1999
- [130] 島田正治, "頭外音像定位受聴の問題点とその解決一手法," 音響学会講演論文集, 1-5-4, pp. 587-590, 1999
- [131] 植松尚, 加藤正晴, 柏野牧夫, "頭外音像定位における移動音の影響," 音響学会講演論文集, 1-10-17, pp. 403-404, 2000
- [132] 福留公利, 末次利充, "頭部音響伝達関数に及ぼす頭部・胴体による回折と耳介共振の効果について-回折情報の有効な補間方法の検討のために-, " 電子情報通信学会技術報告, EA98-74, 1998
- [133] V. R. Algazi, R. O. Duda, R. P. Morrison and D. M. Thompson, "Structural composition and decomposition of HRTFs," Proc. of IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, 2001
- [134] T. Horiuchi, H. Hokari, S. Shimada and T. Inada, "Adaptive estimation of transfer functions for sound localization using stereo earphone-microphone combination," IEICE Trans. Fundamentals, vol. E85-A, pp 1841-1850, 2002

研究業績

論文

1. 西野隆典, 梶田将司, 武田一哉, 板倉文忠, “水平面上の頭部伝達関数の補間,” 日本音響学会誌, Vol. 55, No. 2, pp.91-99 (1999. 2)
2. 西野隆典, 中井勇祐, 武田一哉, 板倉文忠, “重回帰分析に基づく頭部伝達関数の推定,” 電子情報通信学会誌, Vol. J84-A, No. 3, pp.260-268 (2001. 3)
3. 西野隆典, 梶田将司, 武田一哉, 板倉文忠, “水平方向および仰角方向の頭部伝達関数の補間,” 日本音響学会誌, Vol. 57, No. 11, pp.685-692 (2001. 11)

国際会議

1. T. Nishino, S. Mase, S. Kajita, K. Takeda and F. Itakura, “Interpolating HRTF for Auditory Virtual Reality,” The Third Joint Meeting of the Acoustical Society of America and the Acoustical Society of Japan, 1pSP6, pp.2602, Honolulu, USA (1996. 12)
2. T. Nishino, S. Kajita, K. Takeda and F. Itakura, “Interpolating Head Related Transfer Functions in the median plane,” IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics (WASPAA'99), Paper 9-1, pp.167-170, New Paltz, USA (1999. 10)
3. T. Nishino, M. Ikeda, K. Takeda and F. Itakura, “Interpolating Head Related Transfer Functions,” The Seventh Western Pacific Regional Acoustics Conference (WESTPRAC VII), 1A-1-3, pp.293-296, Kumamoto, JAPAN (2000. 10)

技術研究報告

1. 西野隆典, 武田一哉, 板倉文忠, “主成分分析による頭部伝達関数の特徴量の調査,” 電子情報通信学会技術研究報告, DSP96-74, pp.1-7 (1996. 9)
2. 西野隆典, 梶田将司, 武田一哉, 板倉文忠, “頭部伝達関数の補間可能性の検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, EA97-13, pp.25-30 (1997. 5)
3. 西野隆典, 梶田将司, 武田一哉, 板倉文忠, “頭部伝達関数の補間の検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, SP97-38, pp.9-14 (1997. 9)
4. 西野隆典, 梶田将司, 武田一哉, 板倉文忠, “水平方向および鉛直方向に関する頭部伝達関数の補間の検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, EA99-25, pp.1-8 (1999. 7)
5. 米田成吾, 西野隆典, 武田一哉, 板倉文忠, “単一方位角情報に基づくクラスタリングによる汎用 HRTF の評価,” 電子情報通信学会技術研究報告, EA99-84, pp.9-14 (1999. 12)
6. 中井勇祐, 西野隆典, 武田一哉, 板倉文忠, “重回帰分析による頭部伝達関数の推定,” 電子情報通信学会技術研究報告, EA2000-11, pp.9-14 (2000. 5)
7. 西野隆典, 田島英和, 米田成吾, 武田一哉, 板倉文忠, “クラスタリング手法に基づく汎用頭部伝達関数の作成と評価,” 電子情報通信学会技術研究報告, EA2001-12, pp.1-8 (2001. 5)

その他国内口頭発表

1. 西野隆典, 梶田将司, 武田一哉, 板倉文忠, “頭部伝達関数の補間法の検討,” 日本音響学会平成 8 年度秋季研究発表会, 1-7-10, pp.483-484 (1996.9)
2. 西野隆典, 梶田将司, 武田一哉, 板倉文忠, “頭部伝達関数の補間法の検討,” 平成 8 年度電気関係学会東海支部連合大会, 487, pp.244 (1996.10)

3. 西野隆典, 梶田将司, 武田一哉, 板倉文忠, “時間領域・周波数領域における頭部伝達関数の補間法の検討,” 日本音響学会平成9年度春季研究発表会, 2-P-11, pp.595-596 (1997.3)
4. 西野隆典, 梶田将司, 武田一哉, 板倉文忠, “水平面上の頭部伝達関数の補間性能の評価,” 日本音響学会平成9年度秋季研究発表会, 3-P-11, pp.601-602 (1997.9)
5. 西野隆典, 梶田将司, 武田一哉, 板倉文忠, “補間した HRTF の音源定位による評価,” 平成9年度電気関係学会東海支部連合大会, 475, pp.238 (1997.9)
6. 西野隆典, 梶田将司, 武田一哉, 板倉文忠, “頭部伝達関数の帯域毎の補間性能の評価,” 日本音響学会平成10年度春季研究発表会, 2-5-6, pp.499-500 (1998.3)
7. 西野隆典, 梶田将司, 武田一哉, 板倉文忠, “頭部伝達関数の群遅延特性の検討,” 平成10年度電気関係学会東海支部連合大会, 539, pp.270 (1998.9)
8. 西野隆典, 梶田将司, 武田一哉, 板倉文忠, “頭部伝達関数の群遅延特性の検討,” 日本音響学会平成10年度秋季研究発表会, 1-9-7, pp.483-484 (1998.9)
9. 西野隆典, 梶田将司, 武田一哉, 板倉文忠, “鉛直方向の頭部伝達関数の補間の検討,” 日本音響学会1999年春季研究発表会, 1-6-17, pp.463-464 (1999.3)
10. 西野隆典, 梶田将司, 武田一哉, 板倉文忠, “水平方向および鉛直方向の頭部伝達関数の補間の検討,” 平成11年度電気関係学会東海支部連合大会, 521, pp.261 (1999.9)
11. 田島英和, 西野隆典, 武田一哉, 板倉文忠, “刺激音と HRTF の組み合わせの違いによる前後誤り率の変動の調査,” 平成11年度電気関係学会東海支部連合大会, 529, pp.265 (1999.9)
12. 米田成吾, 西野隆典, 武田一哉, 板倉文忠, “頭部伝達関数のクラスタリングの検討,” 平成11年度電気関係学会東海支部連合大会, 530, pp.265 (1999.9)
13. 西野隆典, 梶田将司, 武田一哉, 板倉文忠, “水平方向および鉛直方向の頭部伝達関数の補間の検討,” 日本音響学会1999年秋季研究発表会, 1-5-7, pp.595-596 (1999.9)

14. 西野隆典, 梶田将司, 武田一哉, 板倉文忠, “鉛直方向に関する頭部伝達関数の補間性能の評価,” 日本音響学会 2000 年春季研究発表会, 3-P-10 , pp.539-540 (2000.3)
15. 田島英和, 西野隆典, 武田一哉, 板倉文忠, “頭部伝達関数における前後の相違の検討,” 日本音響学会 2000 年秋季研究発表会, 3-P-10 , pp.467-468 (2000.9)
16. 西野隆典, 中井勇祐, 武田一哉, 板倉文忠, “重回帰分析を用いた頭部伝達関数の推定,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, SA-4-4, pp.317-318 (2000.10)
17. 米田成吾, 西野隆典, 武田一哉, 板倉文忠, “方位角情報に基づくクラスタリングによる汎用 HRTF の評価,” 日本音響学会 2001 年春季研究発表会, 1-P-22 , pp.635-636 (2001.3)
18. 田島英和, 西野隆典, 武田一哉, 板倉文忠, “頭部伝達関数を用いた前後知覚に関する検討,” 日本音響学会 2001 年春季研究発表会, 1-P-25 , pp.641-642 (2001.3)
19. 西野隆典, 武田一哉, 板倉文忠, “頭部伝達関数の補間および推定に関する検討,” HRTF 徹底討論ワークショップ, B-4 (2002. 6)