

人間の聴覚的空間知覚特性の研究

大 倉 典 子

## 人間の聴覚的空間知覚特性の研究

1994 年 12 月 20 日

大 倉 典 子

# 目次

1 緒論	1
1.1 研究の背景	1
1.1.1 インタフェース技術へのこれまでのアプローチ	1
1.1.2 インタフェース技術としての人工現実感あるいはトレイグジスタンスの位置付け	2
1.1.3 人工現実感あるいはトレイグジスタンスにおける聴覚情報の利用	3
1.1.4 聴覚的空間知覚特性研究の必要性	3
1.2 本研究の目的と本論文の構成	4
1.2.1 本研究の目的	4
1.2.2 本論文の構成	4
2 距離に関する音源定位と聴空間におけるホロボタ	7
2.1 研究の背景	7
2.2 実験システムの構成	9
2.3 実験方法	11
2.3.1 音源定位の測定法	11
2.3.2 音刺激の提示方法	12
2.3.3 音刺激の提示位置	13
2.3.4 被験者への提示条件	15
2.3.5 試行の構成	15
2.4 実験結果と解析	16
2.4.1 実験結果	16
2.4.2 実験結果の解析	17
2.4.3 解析結果の統計的検証	18
2.4.4 考察	20



2.5	視覚ホロボタとの比較	21
2.5.1	視覚ホロボタ実験の構成	21
2.5.2	実験結果および聴覚ホロボタとの比較	21
2.5.3	考察	26
2.6	まとめ	26
3	聴空間の特性解明を目的とした仮想環境提示システムの構成	27
3.1	研究の背景	27
3.2	実験システムの構成	29
3.3	HMDの距離に関する校正	35
3.3.1	新校正法の必要性	35
3.3.2	視点位置ずれの新しい校正法	36
3.3.3	誤差の感度解析	38
3.3.4	検証実験	40
3.4	まとめ	41
4	音源距離定位の知覚特性の解明	43
4.1	研究の背景	43
4.2	実験システムの構成と実験方法	43
4.3	実験結果	46
4.3.1	M.B.Gardnerの実験と同等の実験	46
4.3.2	音の強さとみかけの音源距離の範囲を変更した実験	48
4.4	調整法による音源定位実験	50
4.4.1	実験方法	50
4.4.2	実験結果	51
4.5	考察	54
4.5.1	実験結果の評価	54
4.5.2	距離定位における手がかりとしての音のスペクトル	54
4.6	まとめ	55
5	聴空間における平行アレイと等距離アレイ	56
5.1	研究の背景	56
5.2	実験システムの構成	58
5.3	等間隔音源対の主観的位置の測定実験	63
5.3.1	実験の背景	63



5.3.2	実験方法	66
5.3.3	実験結果	67
5.4	平行および等距離アレイの測定実験	68
5.4.1	平行および等距離アレイの測定法	68
5.4.2	実験方法	68
5.5	実験結果と解析	71
5.5.1	実験結果	71
5.5.2	実験結果の解析	71
5.6	考察	73
5.7	まとめ	75
6	考察	76
6.1	ホロプタやアレイの距離依存性を説明する心理空間モデル	76
6.1.1	Luneberg の幾何学的モデル	76
6.1.2	スカラ加算モデル	77
6.2	空間知覚を利用するインタフェースへの応用	82
6.2.1	聴覚信号の親密度の影響	82
6.2.2	空間知覚を利用するインタフェースにおける本研究の役割	83
7	結論	84
	謝辞	87
	参考文献	89
	関連発表文献	94
A	プロビット法	95
B	Luneberg の幾何学モデル	98
B.1	両眼視空間におけるホロプタやアレイの近似式	98
B.2	両眼視空間におけるホロプタの形状やアレイの位置関係の説明	98
C	スカラ加算モデル	102
D	音源定位の神経生理学的解明の現状	105
D.1	人間の聴覚情報伝達経路	105

D.2 聴ニューロンの周波数特異性	105
D.3 フクロウの音源方向定位	107

E 参考図および表 111

# 図目次

1.1	本論文の構成	5
2.1	Helmholtz のホロプタ	8
2.2	触空間におけるホロプタ	8
2.3	音源定位実験システム	9
2.4	精神測定関数の定義	12
2.5	シグナルジェネレータの出力	13
2.6	試験音のタイムチャート	14
2.7	中央スピーカの可動範囲と可動位置	15
2.8	被験者と中央スピーカの基本位置との設定距離	16
2.9	精神測定関数の代表例	17
2.10	プロビット法による推定結果	18
2.11	解析結果（聴覚ホロプタ）	19
2.12	視覚における解析結果（視覚ホロプタ）	22
2.13	解析結果の聴覚と視覚との比較	23
3.1	距離定位に関する特性解明のアプローチ	28
3.2	仮想環境提示システムの構成	31
3.3	仮想環境提示プロセスの構成	33
3.4	STHMD の RMS 誤差と距離に関する誤差との関係	36
3.5	新校正法による視覚パラメータの校正	37
3.6	校正法 I による視覚パラメータの校正	38
4.1	M.B.Gardner の実験のセットアップ	44
4.2	HMD への提示画像	45
4.3	M.B.Gardner の実験と同等の実験の結果（音刺激が音声の場合）	46



4.4	M.B.Gardner の実験と同等の実験の結果 (音刺激が疑似ランダムノイズの場合)	47
4.5	M.B.Gardner の実験結果を, 縦軸をみかけの音源距離の対数値にとってプロットしなおしたもの	49
4.6	HMD への提示画像 (指標となる仮想音源)	52
4.7	調整法による音源定位実験の結果	53
5.1	視空間における平行アレイと等距離アレイ	57
5.2	触空間におけるアレイ	57
5.3	聴覚アレイ実験に必要なセットアップ	59
5.4	平行および等距離アレイの実験システムの構成	60
5.5	HMD への提示画像	61
5.6	音源から両耳までの距離の差の近似計算	62
5.7	等間隔音源対の測定実験の構成	65
5.8	等間隔音源対の測定実験結果	67
5.9	平行アレイ測定実験における想定音源の提示順序と知覚される音源位置関係	69
5.10	等距離アレイ測定実験における想定音源の提示順序と知覚される音源位置関係	70
5.11	精神測定関数	72
5.12	プロビット法による推定結果	73
5.13	解析結果	74
6.1	両耳時間差一定 (1)	79
6.2	両耳時間差一定 (2)	79
6.3	スカラ加算モデルから得られるホロプロット ((a) 学習領域 1 ~ 10m, (b) 学習領域 1 ~ 4m)	81
A.1	確率とプロビットとの関係	96
A.2	プロビット変換の効果	96
B.1	物理空間と心理的な両眼視空間における座標系	99
B.2	平行アレイと等距離アレイの理論曲線	100
C.1	スカラ加算モデル	103
C.2	幅視角および視線方向角	103
D.1	人間の聴覚器官の構成	106

D.2	人間の聴覚情報伝達経路概念図	106
D.3	聴ニューロンの同調曲線	107
D.4	メンフクロウの脳内聴覚回路 (1)	108
D.5	メンフクロウの脳内聴覚回路 (2)	109
E.1	M.B.Gardner による音の強さとみかけの音源距離に関する実験	111
E.2	M.B.Gardner による音の強さとみかけの音源距離に関する別の実験	112
E.3	G.von Békésy の実験結果	112
E.4	D.R.Begault の実験課題	113
E.5	D.R.Begault の実験結果	113
E.6	2 音源間の現象的間隔	114
E.7	頭部伝達関数の測定を用いる仮想音源創製技術	115

## 表目次

2.1 中央スピーカの主観的相対位置の検定	20
2.2 視覚ホロプタと聴覚ホロプタのプロビット法による解析結果の比較	24
2.3 視覚ホロプタと聴覚ホロプタの信頼区間を与える閾値の差の検定	25
3.1 ヘッドフォンとスピーカの比較	30
3.2 HMD の設計仕様	35
3.3 検証実験の結果	40
3.4 較正された視覚パラメータ	41
3.5 較正後のカーソル位置ずれ(仮想面上の変位)	41
4.1 M.B.Gardner の実験と同等の実験における回帰直線の比例係数	48
4.2 音の強さとみかけの音源距離の範囲を変更した実験における回帰直線の比例係数	50
4.3 調整法による音源定位実験における回帰直線の比例係数	51
5.1 種々の音源距離および音源間隔に対する音圧比と時間差	64
B.1 $\angle C$ を $90^\circ$ とする直角三角形 ABC に対する三角法	99
E.1 音源から被験者までの客観的距離と現象的距離および2音刺激間の現象的間隔	114



## 第 1 章

### 緒論

#### 1.1 研究の背景

##### 1.1.1 インタフェース技術へのこれまでのアプローチ

近年、科学技術の進展によるシステムの高度化・複雑化に伴い、その使いやすさに対する要請が急速に高まり、インタフェース技術の研究が重要な課題となってきた。その過程を以下に概説する（文献 [1] を基にして整理し直した）。

1. インタフェース技術に関する概念は、1960 年代まで「人間工学 (ergonomics)」あるいは「ヒューマンファクタ」と呼ばれ、機器物理的形狀や寸法などの設計において人間に配慮するという段階にあった。そこでは高価なコンピュータは「中央処理装置」と位置付けられ、人間は「エンドユーザ」にすぎなかった。
2. 1970 年代に入り、関連技術の進歩が機器の設計に多様性と自由度を許すようになり、機器と人間とを対等な立場で見、インタフェース技術を「マン・マシンインタフェース」あるいは「ヒューマン・コンピュータインタフェース」と呼ぶようになった。ここでは機器の使いやすさに対する配慮が、人間の心理的要素にも扱われるようになった。筆者の以前行っていた手動制御系における人間の動特性に関する研究 [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8] も、この範疇に含まれる。しかしこの段階においても、インタフェースは依然としてコンピュータの処理ソフトウェアにも人間の思考過程にも立ち入らない、これらとは独立した変換機能として考えられていた [9]。
3. 最近システムの高度化・複雑化はますます進み、人間にとって本質がつかみにくく制御の困難な状態、すなわち柳田により「スバゲッティ症候群」と名付けられた現象 [10] を引き起こしやすい状況になっている。その中でインタフェース技術に関する概念も、

人間を中心に置いて考える「ヒューマン・インタフェース」というとらえ方になってきた。このような考え方による研究は現在多数行なわれており、たとえばヒューマン・インタフェースロボットの研究 [11] などその一例である。ここではシステムの最適化の議論においても、人間にとって「もっとも自然で」とか「もっとも楽で」などという当初の皮相的観察や先入観による理解ではなく、人間の認知過程や思考過程まで考慮に入れなければ、真の最適化は図れないことが明らかになってきた。そこで現在では、一方では思考過程を究める認知科学や大脳生理学、感覚を対象とする心理学、運動機能を取り上げる生理学、労働障害を調べる労働医学などに始まる人間サイドの学問を一端とし、コンピュータや通信などの電子工学やセンサなどの計測・制御工学を他端とする幅広い研究分野が、「ヒューマン・インタフェース」の裾野となっている。

### 1.1.2 インタフェース技術としての人工現実感あるいはトレイグジスタンスの位置付け

以上に述べたような過程の中で、人間とシステムとのインタフェースとして新しく「空間」を利用しようとする方法が、人工現実感あるいはトレイグジスタンスとして実用化されてきている [12, 13, 14]。文献 [12] では、人工現実感およびトレイグジスタンスの概念が以下のように説明されている。

人工現実感とは、人間がいま現在実際に存在している環境以外の仮想環境を、あたかもそれが現実の環境のような感覚をもって体験し、かつその仮想世界で行動することを可能とする新しい技術である。

一方トレイグジスタンスとは、人間が従来の時空の制約から解放され、時間と空間ないしはそれらの両者を隔てた仮想環境に存在することを目指す新しい概念であって、人工現実感を別の観点からいい表わしている。

人間の脳では、言語や論理などの継起的処理は左半球主導、空間的知覚や操作などの並行的処理は右半球主導といわれている [15, 16]。人間の進化の過程の中で、言語や論理などの処理のような左半球の機能はせいぜいここ 50 万年から数万年ぐらい以前に生物が獲得した機能である。それに対し空間的知覚や操作などの右半球の機能は、最初の脊椎動物であった 2, 3 億年前の古代魚においてもすでにかなり高度の発達をみており、左半球の機能より高い円熟度に達した機能であるとみなされている [1]。これまでの人間の認知に関する研究においては、自覚できる点および機能的に継起的かつ単純である点から、左半球主導の言語や論理などに関係している研究が多かった。しかし通常は潜在意識内に留まっていて自覚されていないにもかかわらず、右半球はおそらくずっと複雑な処理を大量かつ円滑に実行している。したがって人工現実感あるいはトレイグジスタンスは、この人間の持つ優れた右半球

の機能である空間知覚能力を生かして、使いやすいインタフェースを創出しようとする技術であると言える。

### 1.1.3 人工現実感あるいはテレイグジスタンスにおける聴覚情報の利用

人工現実感あるいはテレイグジスタンスにおける人間への感覚入力としては、視覚を通じての提示が最も一般的であるが、触覚や聴覚の利用も次第に検討されるようになってきた[13]。聴覚は、筆者が以前にも研究対象としていたモダリティであり[2, 3, 4, 5, 6, 7, 8],

- 情報源が3次元空間全体のどこにあっててもかまわず、視覚のように物体が視野外や障害物の背後に存在してはならない等の制限のない点
- 警告あるいは方向性の反応を生じる点
- 視覚信号より検知が早い点
- 本質的に過渡的な感覚であり、時系列中の変化に対して敏感である点

などの優れた特質をもつ[17]。そこで、視覚の代替あるいは相補的にセンサフュージョン[18, 19]の対象となる情報チャンネルとして、その利用が考えられる。

### 1.1.4 聴覚的空間知覚特性研究の必要性

従来の「ヒューマンファクタ」あるいは「マン・マシンインタフェース」の時代には、人間をブラックボックスとしてその入出力関係から特性を評価し、人間の（あるいはシステム全体の）性能が高い場合に、そのシステム（人間への入力や出力）は人間にとって使いやすいとみなす傾向があった。しかし人間を中心に置いて考える「ヒューマン・インタフェース」という観点から人間の受け取る情報の根本的な使いやすさを検討するためには、人間がその情報のどのような部分を手がかりとしてどのような認知をしているのかという、人間のその情報に対する認知特性を把握しておくことが必要である。

たとえば空間知覚手段としての視覚を例にとれば、単眼の情報として水晶体調節・網膜像の大きさ・線透視・模様・勾配・空気透視・重なり合い・陰影など、両眼の情報として輻輳角や両眼視差などが空間知覚の手がかりとして知られており[13]、また脳内の知覚空間としての視空間の構造に関する知見も得られている[20]。そこでそれらの知見に基づき、人工現実感システムが設計され、また評価されている[21]。

これに対し聴覚については、その情報を空間提示手段として利用するに際し、視覚同様に聴覚的空間知覚の手がかりや聴空間の構造などに関する知見が必要となるにもかかわらず、これまで十分な研究が行なわれてこなかった。それは、



- 生理学的には音源定位（音源の空間知覚）の神経生理学的解明が未だ研究途上にあること（付録D参照）
- 心理学的には音の要素や楽音・音声などの研究が比較的主流であったこと
- 工学的には音響機器における高忠実度再生技術やコンサートホールの音響効果など建築音響に関する応用研究が先行したこと

などの原因により、聴空間という概念に至らなかったためではないかと推察される。

そこで筆者は、人間の聴空間の構造や聴覚的空間知覚の手がかりなどの特性を明らかにするために以下に述べるような研究を行ない、本論文にまとめた。

## 1.2 本研究の目的と本論文の構成

### 1.2.1 本研究の目的

以上述べてきたことから、本論文に記述される研究の目的は以下のようにまとめられる。

「システムの人間とのインタフェースにおいて、その真の最適化を図るためには、人間の認知特性の把握が不可欠である。本研究の目的は、人間の持つ優れた空間知覚能力を利用するインタフェースにおいて聴覚的な空間情報提示を利用する際の、提示法の設計の最適化や最適性の評価に必要な、人間の聴覚的空間知覚特性に関する知見を提供することである。」

### 1.2.2 本論文の構成

このような目的に沿って、本論文では人間の聴空間の構造や聴覚的空間知覚の手がかりなどの特性を明らかにするために、以下のような研究を行ない、その結果をまとめた。

1. 距離に関する音源定位と聴空間におけるホロプロタの研究
2. 聴空間の特性解明を目的とした仮想環境提示システムの構成
3. 音源距離定位の知覚特性の解明
4. 聴空間における平行アレイと等距離アレイの研究
5. 考察

本論文の構成を、Fig.1.1に図示する。

まず第2章では、視覚において視空間上の主観的額面平行線の概念を表わすものとして知られているヘルムホルツのホロプロタと同様の現象が聴空間においても存在するかどうかを確

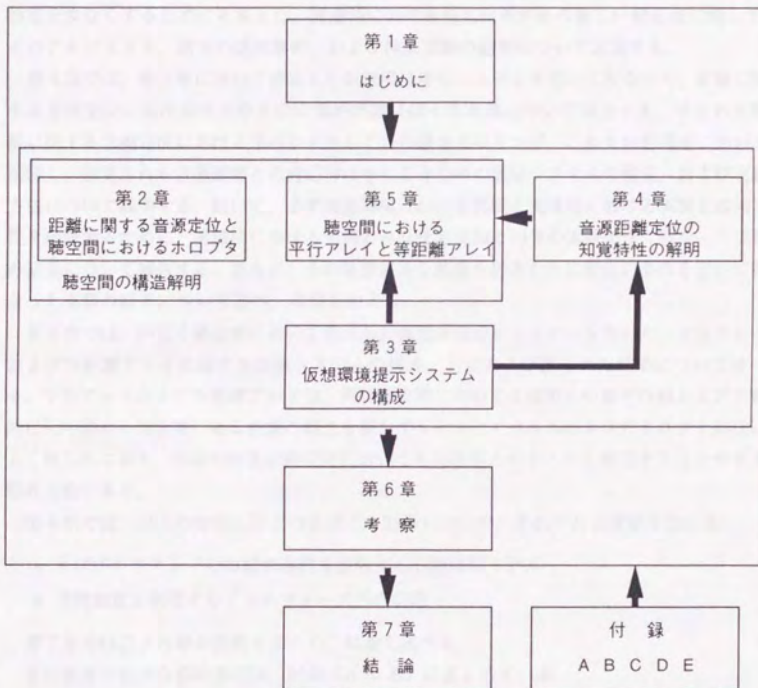


Fig. 1.1 本論文の構成

認する目的で行なった、距離に関する音源定位の基礎実験の構成や用いた手法および得られた結果について述べる。また視覚ホロプロタとの比較結果についても述べる。

つぎに第3章では、音源距離定位に関する特性解明のアプローチを明確にし、そのために構成した視覚および聴覚に関する仮想環境提示システムについて述べる。また視覚情報提示用に用いる STHMD (See-Through 型 Head-Mounted Display) に対し、特に距離に関する誤差を少なくするために考案した、装着時における視点位置ずれの新しい校正法に関して、そのアルゴリズム、誤差の感度解析、および検証実験の結果について記述する。

第4章では、第3章において構成した仮想環境提示システムを用いて行なった、距離に関する音源定位における手がかりの定量的把握に関する実験について詳述する。すなわち距離に関する音源定位における手がかりとして音の強さを取り上げ、これを仮想環境において制御し、知覚される音源距離との対応付けを行なうための実験システムの構成、および実験方法について説明する。続いて、まず仮想環境における実験と実環境における実験との同等性を確認するために、実環境における先例とみなせる実験と同等の実験条件で行なった実験の結果について報告する。さらに、その後普遍的な結果を得るために独自の条件を用いて行なった実験の結果について述べ、考察を加える。

第5章では、同じく第3章において構成した仮想環境提示システムを用いた、平行アレイおよび等距離アレイに関する実験システムの構成、方法および得られた結果について述べる。平行アレイおよび等距離アレイは、両眼視空間において主観的正中面平行線および主観的に正中面から等距離にある直線の概念を表わすものとしてヘルムホルツのホロプロタ同様によく知られており、同様の現象が聴空間においても存在するかどうかを確認することが本実験の目的である。

第6章では、以上の研究と以下の各項との関係について、それぞれに考察を加える。

- ホロプロタやアレイの距離依存性を説明する心理空間モデル
- 空間知覚を利用するインタフェースへの応用

第7章では以上各章の内容をまとめ、結論を述べる。

また各章で必要な参照事項は、付録 (A ~ E) にまとめている。



## 第 2 章

# 距離に関する音源定位と 聴空間におけるホロプタ

本章では、視覚において視空間上の主観的額面平行線概念を表わすものとして知られているヘルムホルツのホロプタと同様の現象が聴空間においても存在するかどうかを確認する目的で行なった、距離に関する音源定位の基礎実験の構成や用いた手法および得られた結果について述べる。また視覚ホロプタとの比較結果についても述べる。

### 2.1 研究の背景

視覚において、視空間上の主観的額面平行線概念を表わすものとして、ヘルムホルツのホロプタが古くから知られている [22]。ヘルムホルツのホロプタとは、観察者の目の高さの水平面と正中面との交線を  $x$  軸、同じ水平面と両眼を通る前額平行面との交線を  $y$  軸としたときに、主観的に  $y$  軸に平行であると知覚される線の形状が、物理的平行線とは必ずしも一致しないという現象である。このときの主観的平行線の物理的形状は、観察者と平行線との  $x$  軸上の距離によって異なり、Fig.2.1 に示すような曲線になる。

また触覚においても、上肢の運動感覚に基づく触空間における主観的額面平行線は、物理的には観察者に対して凹型の曲線を描くことが発見されている [23, 24]。この曲線は、Fig.2.2 に示すように観察者に対して遠方のものほどその曲率の小さくなることが知られており、視空間におけるホロプタに相当するものであると考えられている。

感覚モダリティの類似性から考えて、聴覚においても同様の現象の存在が予測されるが、これまでそれを確認した研究は行なわれていなかった。聴空間上における主観的額面平行線（以下聴覚ホロプタと称する）の測定には、距離に関する音源定位の測定が必要である。音

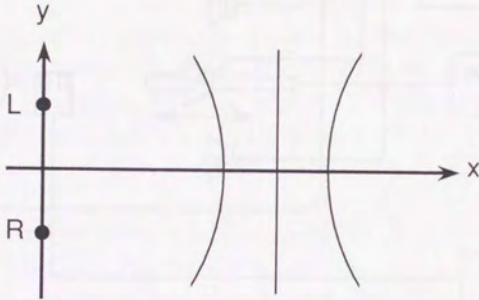


Fig. 2.1 Helmholtz のホロプタ

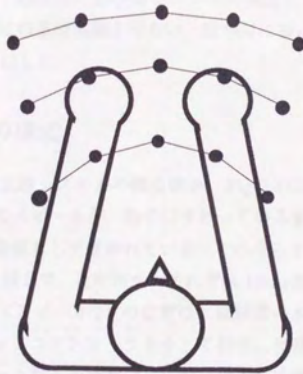


Fig. 2.2 触空間におけるホロプタ (文献 [25] より引用)

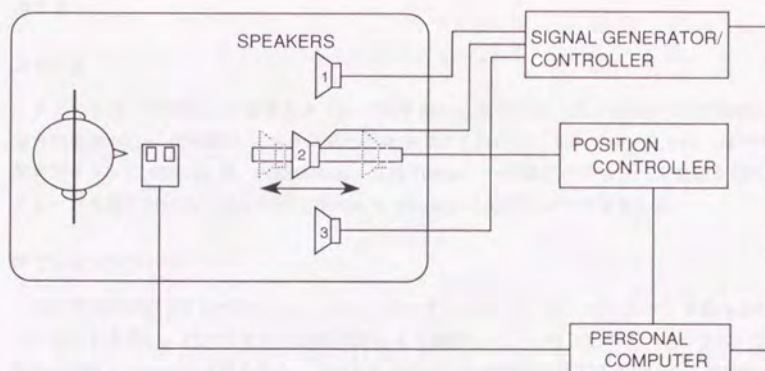


Fig. 2.3 音源定位実験システム

音源定位に関しては、水平方向や上下方向など、音源の方向の定位についてはこれまで多くの研究が行なわれてきているが、音源の距離に関する定位の研究はあまり行なわれておらず [26, 27, 28, 29], したがって聴空間におけるホロボタの概念に至らなかったと推察される。そこで距離に関する音源定位の基礎実験を行ない、聴空間においてホロボタの現象が存在するかどうかを確認することにした。

## 2.2 実験システムの構成

本研究で用いた音源定位実験システムの概念図を、Fig.2.3に示す。

暗い無響室内には、3台のスピーカが、椅子にすわっている被験者の両外耳道の上縁を結ぶ線分を含む水平面上に、音源として置かれている。このうち2台のスピーカ（スピーカ1・3）は、この線分に平行な直線上で、正中面からそれぞれ17cm離れた対称な位置に固定されている。また中央スピーカ（スピーカ2）の位置は、被験者の水平面と正中面の交線上にあり、コンピュータがポジションコントローラを介して前後に移動させることができるようになっている。被験者とスピーカ群との距離は、この交線上を被験者が移動することにより設定される。また図示していないが、実験中被験者の両耳の位置を固定するために、あご台を用いる。被験者の応答は、2個の押しボタンスイッチを用いて行なう。シグナルジェネレータ/コントローラは、コンピュータの制御により、各スピーカから音刺激（聴覚信号）を出



力させる。

#### スピーカ

スピーカは、点音源とみなせるように、外径 41mm 角のスピーカ (Foster C040A0001, 周波数帯域 500 ~ 7000Hz) にエンクロージャをつけて用いた。エンクロージャは、塩ビの配管用キャップ (50mm 用, 内径 60mm, 外径 70mm) の内部にグラスウールを貼り付け、スピーカを取り付けたアルミの板 (70mm × 90mm) に両面テープで接着した。

#### ポジションコントローラ

日本電油社製の XY ロボユニット (パルスモータ・リニアガイド・ボールネジを組み合わせたもの) を用い、パルスモータ駆動回路により制御した。この XY ロボユニットは、位置決め精度 0.05mm の仕様を有し、実測でも 100 回の移動後の位置誤差が 1mm 以下であった。またパルスモータ駆動回路は、速度制御に応じたシリアルパルス列の生成部とパルス列に応じた励磁パターン生成部からなり、それぞれパルスモータ専用のコントロール IC を用いて構成されていた [30]。パルスモータは、実験条件の都合上動作時間を一定に保つ必要があるため、定速動作で使用した。定速パルスレート等の設定には文献 [31] を参照した。

#### シグナルジェネレータ/コントローラ

シグナルジェネレータは、JEIC 社製 (オーディオシグナルジェネレータ TYPE0102B, ハイパスフィルタ TYPE3201, ローパスフィルタ TYPE3101, パワーアンプ TYPE0301A) を用いた。コンピュータからの信号を受けて各スピーカの出力の ON/OFF を制御する機能と出力アンプの機能とを合わせ持つコントローラは、自作したものをを用いた。

#### コンピュータ

コンピュータは EPSON386LS を用いた。

#### 押しボタンスイッチ

押しボタンスイッチは、2 個のボタンを持つマウス (MAGNETIC LABORATRY PC MOUSE-PRO PC MOUSE-200 COUNT) を利用した。

あご台

あご台は、アルミ製の板(150mm × 50mm × 5mm)の上に、紙粘土で被験者に合うあごの形を作って用いた。

## 2.3 実験方法

### 2.3.1 音源定位の測定法

上述した実験システムを用いて、両側にあるスピーカと共に主観的な額面平行線を形成するとき、中央スピーカの物理的(実際の)位置を測定するのが、今回の音源定位実験である。音源定位の測定には、精神物理学の測定法の一つである恒常法を用いた。

精神物理学の測定法とは、G.T.Fechnerの精神物理学に用いられた測定法に由来する一群の心理学的測定法をいい、

「知覚や感覚のように、刺激と対応して比較の一定の方向に漸次的に変化する性質をもった過程を、物理的刺激と関係させて数量的に研究する実験法の一群」

を指す[32]。その伝統的な方法は基本的に3種類に分類され、それぞれの概略は以下に示す通りである[32, 33]。

1. 調整法: 被験者自身が比較刺激を調整し、標準刺激と比較刺激がある感覚属性(長さ、大きさなど)に関して等しいと知覚された点で調整を止める。調整の出発点が明らかに大きい場合と小さい場合を同数回行ない、実験者は各回の調整値を平均して、主観的等価点を求める。ただし主観的等価点とは、標準刺激と比較刺激とを同時または継時的に提示し、ある感覚属性に関して両者が等しいと判断される場合の比較刺激の値のことである。
2. 極限法: 刺激をわずかずつ段階的に変化し、被験者に2件法または3件法による反応を求める。明らかに小さい場合から始める上昇系列と、明らかに大きい場合から始める下降系列とを同数回ずつ反復する。通常3件法において、「大」反応と「等」反応の境となる刺激値の平均と、「等」反応と「大」反応との境となる刺激値の平均とをたして2で割ったものを主観的等価点とする。
3. 恒常法: あらかじめ決められた数段階の刺激値をランダム順に多数回提示し、反応の出現率が50%になる刺激値を推定して主観的等価点とする。被験者の予想が入る余地のない点が優れているが、反復数が多く時間がかかるのが欠点である。反応の出現率を刺激値の関数として示したもの(刺激-反応曲線)を、精神測定関数という(Fig.2.4)。

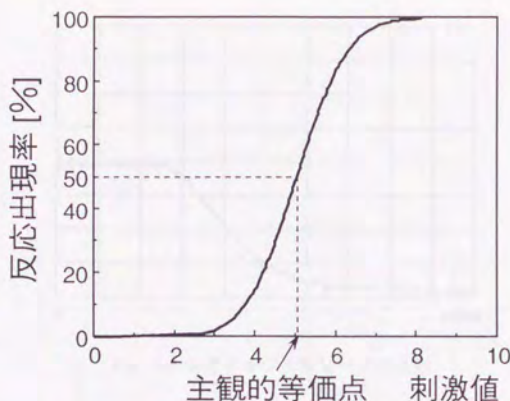


Fig. 2.4 精神測定関数の定義

本研究では、測定に時間がかかるという短所はあるものの、被験者の先見的知識や履歴などの影響を受けにくく、最も信頼性の高い結果が得られるという長所を持つことから、恒常法を採用して実験を行なうことにした。

恒常法では、あらかじめ決められた数段階の刺激値をランダムに多数回提示し、「大きい」・「小さい」、「近い」・「遠い」などの2件法の場合、得られた精神測定関数において反応の出現率が50%になる刺激値を、主観的等価点とする。そこで本実験では、中央スピーカを前後に移動させて種々の位置にランダムな順序でおき、3台のスピーカから音を出し、中央スピーカの位置が両側にあるスピーカを結んだ直線に対して手前にあるか奥にあるかを被験者に判断させ、その確率が50%ずつになる位置を推定することにした。これにより、両側にあるスピーカと共に主観的額面平行線を形成するときの、中央スピーカの物理的な位置が推定されることになる。

### 2.3.2 音刺激の提示方法

試験音として、カットオフ周波数2800Hzのローパスフィルタを通したホワイトノイズを用いた。シグナルジェネレータの出力を、騒音・振動解析装置(RION SA-73)を用いて周波数軸上で16回加算平均した例をFig.2.5に示す。ここで横軸は周波数でフルスケールが10000Hz(1目盛が1000Hz)、縦軸は音圧(1目盛が10dB)となっている。



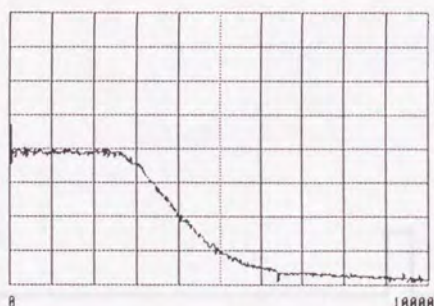


Fig. 2.5 シグナルジェネレータの出力

視覚ホロボタの測定では、通常複数の小光点を同時に表示する。しかし聴覚ホロボタの測定では、複数のスピーカから同時に同じ周波数特性をもつ音刺激を出した場合、それを聴空間で分離することは不可能である。したがって各スピーカからの音刺激は、順次断続的に提示することになる。その場合の音刺激の持続時間や音間隔は、

- 仮現運動を起こさない。
- 音刺激の相互比較が可能である。

の2条件を満足する必要がある。これらは、予備実験の結果から、持続時間 200msec., 音間隔 300msec. と設定した。また一連の音刺激（スピーカ 1, スピーカ 2, スピーカ 3）を出して 1sec. の休止時間を入れ、つぎに逆の一連の音刺激（スピーカ 3, スピーカ 2, スピーカ 1）を出してまた 1sec. の休止時間を入れ、これを被験者の応答があるまで繰り返した。タイムチャートを Fig. 2.6 に示す。

音の大きさは、スピーカ群からの距離が約 2.0m の位置で 45dB SPL になるようにした。

### 2.3.3 音刺激の提示位置

中央スピーカの可動範囲は、その両端で被験者が手前か奥かを 100% 正しく判定できる範囲をとり、予備実験の結果から、基本位置（被験者の正中面と、両側にあるスピーカを結んだ直線との交点）の前後 30cm と設定した。移動可能位置は Fig. 2.7 に示すように 10cm 刻みの 7 箇所（基本位置の手前 30cm, 20cm, 10cm, 基本位置, 基本位置の奥 10cm, 20cm, 30cm）とし、コンピュータの制御により、ランダムな順序で位置を移動するようにした。移

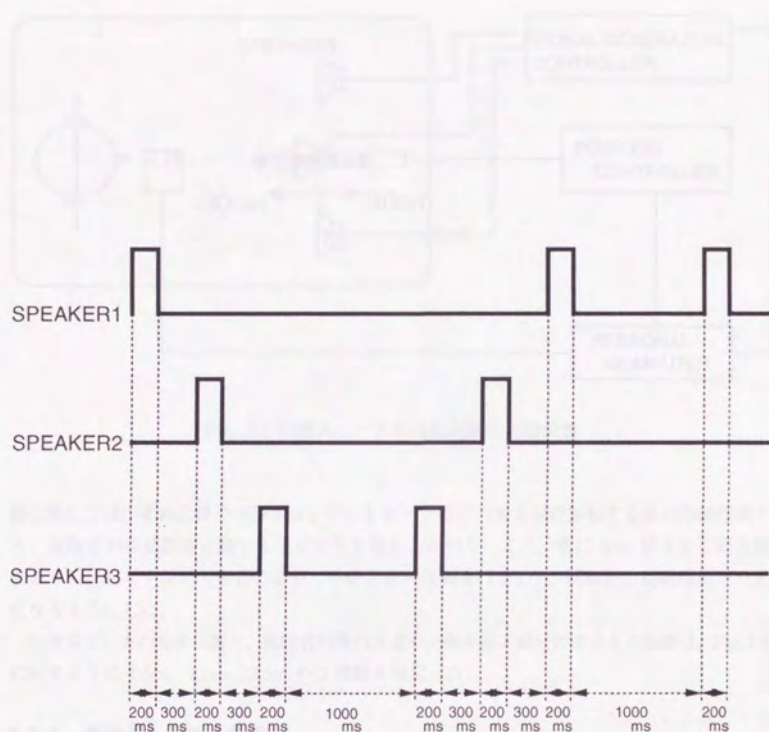


Fig. 2.6 試験音のタイムチャート

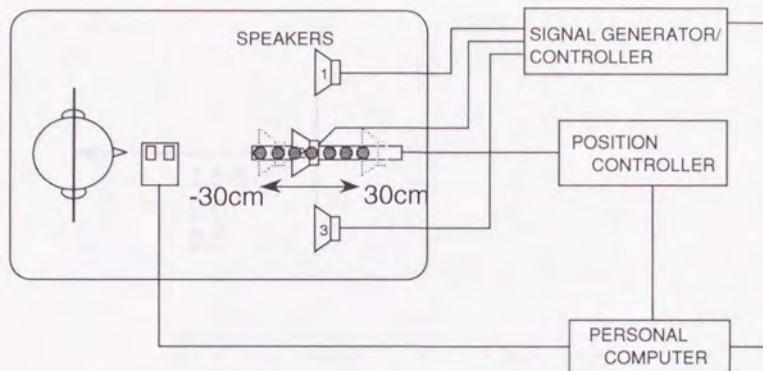


Fig. 2.7 中央スピーカの可動範囲と可動位置

動に際しては、それに伴うポジションコントローラのボールネジの回転する音の持続時間から、被験者が移動距離に関する手がかりを得ることのないよう、常に5cm刻みで6回移動するものとし（すなわち必要に応じて移動方向の反転を行ない）、回転音の持続時間が一定になるようにした。

中央スピーカの基本位置と、被験者の両外耳道の上縁を結ぶ線分の中点との距離は、Fig.2.8に示すように1.5m、2.0m、2.5mの3種類を設定した。

#### 2.3.4 被験者への提示条件

実験中に両耳の位置が変化しないように、被験者は椅子に座った状態で頭部をあご台で固定された。また被験者には、両手で押しボタンスイッチをもち、音刺激の系列を聞き、中央スピーカからの音刺激が手前にあるか奥にあるかの判断がついた時点で、利き手の人差し指または中指で手前または奥の押しボタンのいずれか一つを押すように指示した。

#### 2.3.5 試行の構成

1回の試行では、

1. 中央スピーカを、可動位置のいずれかをランダムに選び、その位置へ移動する。



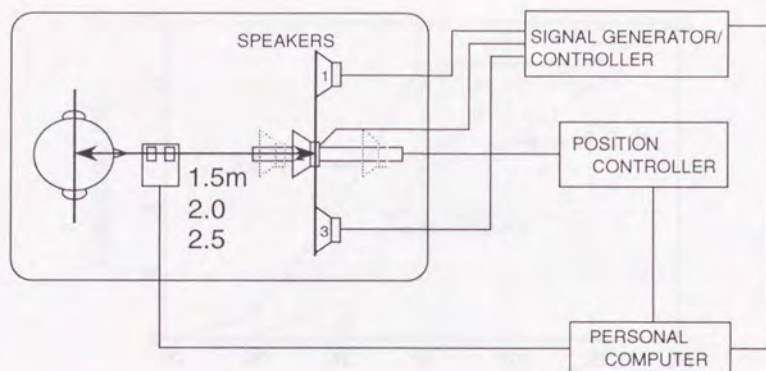


Fig. 2.8 被験者と中央スピーカの基本位置との設定距離

2. 音刺激の系列を出力し、被験者が押しボタンで応答するまで持続する。

を29回繰り返した。29回の内訳は、7個所の位置のうち両端の2個所が2回ずつとほかの位置が5回ずつである。一回の試行に要する時間は、個人の判断に必要な時間にもよるが概ね30分程度であり、これを中央スピーカの基本位置と被験者との3種類の距離について各1回ずつ試行を行ない、その3試行を1セッションとした。

予備実験は8名の被験者（男性6名女性2名、年齢22～41才）に対して行ない、音源が水平面上に定位しない、あるいは左右の音源が正中面に対称に定位しない2名を除く6名の被験者について現象の存在を確認した。さらにそのうち3名の被験者について、数量的な解析に必要な詳細なデータを取得するために実験を繰り返した。実験方法確立後に試行したセッション数は、総計51セッションであった。

## 2.4 実験結果と解析

### 2.4.1 実験結果

Fig.2.9に、実験結果として得られた精神測定関数の代表的な例を示す。ここで横軸は中央スピーカの基本位置からの相対位置（手前が負、奥が正）、縦軸は中央スピーカの位置を「奥」と判定した割合を示している。3種類のいずれの距離においても、精神測定関数は両

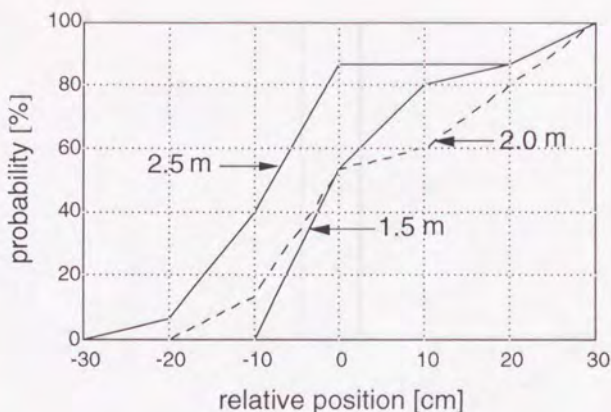


Fig. 2.9 精神測定関数の代表例

端において確率 0% および 100% をとる広義単調増加関数となっている。

距離に関する音源定位では特に正中面方向において弁別能力が低いという報告がある [29]。しかし今回のスピーカ間の相対比較実験においては、Fig. 2.9 にも示されているように、1.5 ~ 2.5 m の距離において  $\pm 30$  cm 以上で音源の前後関係を 100% 正しく認識することが可能であった。

#### 2.4.2 実験結果の解析

聴空間上の中央スピーカの主観的額面平行位置の推定、すなわち精神測定関数における反応出現率 50% を与える主観的等価点の推定には、直線補間法・正規補間法・最小二乗法などさまざまな方法がある [33]。本研究では、Fig. 2.9 に示したような精神測定関数のグラフを累積正規分布曲線であるとみなし、プロビット法 [34] を用いて解析を行なうことにした。プロビット法の概要は付録 A に記す。

Fig. 2.8 のそれぞれの精神測定関数について、プロビット法を適用して中央スピーカの主観的等価点すなわち主観的額面平行線上の物理的相対位置を推定した結果を、Fig. 2.10 に示す。ここで実線が距離 1.5 m の場合、破線が 2.0 m、一点鎖線が 2.5 m の場合の中央スピーカの相対位置を示している。

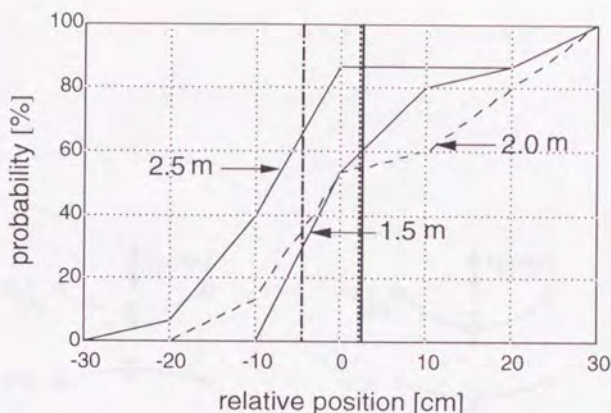


Fig. 2.10 プロビット法による推定結果

さらにこの解析結果を、両側にあるスピーカの位置と共に図示したのが、Fig.2.11(a)である。ここで中央部の点が中央スピーカの相対位置の推定された平均値、上下の線分が標準偏差を示している。ただし相対位置の平均値と標準偏差は横軸と同一の縮尺で表示し、被験者と中央スピーカの基本位置との距離の縮尺は、表示の都合上大きくとってある。さらにFig.2.11(b)は、Fig.2.9、Fig.2.10およびFig.2.11(a)とは異なる被験者についての実験結果を同様に解析した例である。

Fig.2.11から、以下の事項が確認できる。

- 距離が1.5mの場合、両端のスピーカと共に主観的額面平行線を形成するときの中央スピーカの相対位置は、物理的平行線上の位置（基本位置）より被験者から遠方にある。
- 距離が2.5mの場合、両端のスピーカと共に主観的額面平行線を形成するときの中央スピーカの相対位置は、物理的平行線上の位置（基本位置）より被験者の手前側にある。

### 2.4.3 解析結果の統計的検証

距離が1.5mの場合について、相対位置の推定値が基本位置より被験者から遠方にあることを統計的に検証するため、各被験者について、推定された相対位置が0より大きいという対立仮説に対して、片側検定を行なった [35]。すなわち  $x$  を中央スピーカの相対位置の推



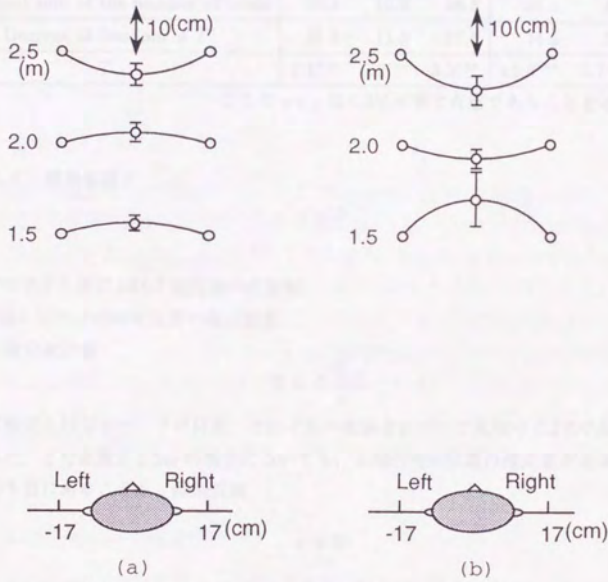


Fig. 2.11 解析結果（聴覚ホロボタ）

Table 2.1 中央スピーカの主観的相対位置の検定

Distance[m]	1.5			2.5		
Subject	A	B	C	A	B	C
Estimated relative position[cm]	2.5	8.1	1.9	-4.8	-6.8	-2.4
Standard error[cm]	1.7	5.6	3.2	2.1	3.0	3.3
Weighted sum of the number of trials	36.8	12.8	28.5	35.5	6.5	21.0
Degrees of freedom of $T$	35.8	11.8	27.5	34.5	5.5	20.0
$T$	9.1***	5.2***	3.2***	13.9***	5.7***	3.4***

ここで \*\*\* は 0.5%水準で有意であることを示している。

定値として、帰無仮説を

$$x < 0 \quad (2.1)$$

とおき、

$n$ : プロビット法における試行数の荷重和

$s$ : 中央スピーカの相対位置の推定誤差

として、検定統計量

$$T = \frac{\sqrt{n} \cdot x}{s} \quad (2.2)$$

に対して検定を行なった。その結果、それぞれの被験者について危険率 0.5%で帰無仮説は棄却された。また距離が 2.5m の場合についても、主観的相対位置の推定値が基本位置より被験者の手前であることを、帰無仮説

$$x > 0 \quad (2.3)$$

に対して上記検定統計量の検定を行なった。その結果、それぞれの被験者について危険率 0.5%で帰無仮説は棄却された。

両検定に関係する諸元を Table 2.1 に示す。

#### 2.4.4 考察

第 2.4.2 節および第 2.4.3 節の解析結果から、額面平行であると知覚されているときに中央スピーカが実際に存在する相対的な位置は、距離が 1.5m の場合には実際（物理的に平行な

位置)よりも被験者から遠方にあり、距離が2.5mの場合には実際よりも被験者の手前側にあると推定されることがわかった。すなわち聴空間における主観的額面平行線の実空間における形状は音源までの距離に依存し、近い距離では被験者に対して手前に凹型、逆に距離が遠くなると被験者に対して手前に凸型の曲線になることが確認され、統計的にも検証された。この形状の傾向は、視空間におけるホロボタ [22] と同様の傾向であり、常に被験者に対して手前に凹型の曲線となる聴空間におけるホロボタ [23, 24] とは傾向が異なっている。

以上から、本実験により聴覚ホロボタにも視覚や触覚と同様の現象(形状の距離依存性)が存在すること、さらにその形状の傾向が視覚型であり触覚型とは異なることが確認できたと考えられる。

## 2.5 視覚ホロボタとの比較

### 2.5.1 視覚ホロボタ実験の構成

聴覚ホロボタを測定した被験者に対し、その形状の傾向をさらに詳細に比較する目的で、視覚ホロボタの測定実験を行なった。実験装置は Fig.2.3に示した音源定位実験システムを利用し、各スピーカ上部に加工したLEDを取り付け、各スピーカから音を出力する代わりに3個のLEDを点灯した。実験方法は、聴覚ホロボタ測定の場合と同様に恒常法を用いた。3個のLEDは同時に提示した。中央のLEDの可動範囲は、予備実験の結果から、基本位置(被験者の正中面と、左右のLEDを結んだ直線との交点)に対して被験者の手前側8cmから奥側4cmと設定した。移動可能位置は2cm刻みの7個所(基本位置の手前8cm, 6cm, 4cm, 2cm, 基本位置, 基本位置の奥2cm, 4cm)とした。また、被験者の両眼を結ぶ線分の中点と中央のLEDの基本位置との距離は、聴覚ホロボタ測定実験同様、1.5m, 2.0m, 2.5mの3種類を設定した。

### 2.5.2 実験結果および聴覚ホロボタとの比較

視覚ホロボタの測定実験結果を、音源定位実験の結果と同様にプロビット法を用いて解析した。

Fig.2.11に解析結果を示した2名の被験者に対し、3個のLEDが主観的額面平行線を形成するときの、推定された中央LEDの物理的相対位置を、両側にあるLEDの位置と共に図示したのが、Fig.2.12(a)(b)である。ここで中央部の点が中央LEDの相対位置の推定された平均値、上下の線分が標準偏差を示している。また縮尺は、Fig.2.11と同じにしている。この図(Fig.2.12)をFig.2.11と重ね合わせて図示したのが、Fig.2.13である。ここでは、やや薄く描かれた実線で視覚ホロボタの形状を示している。



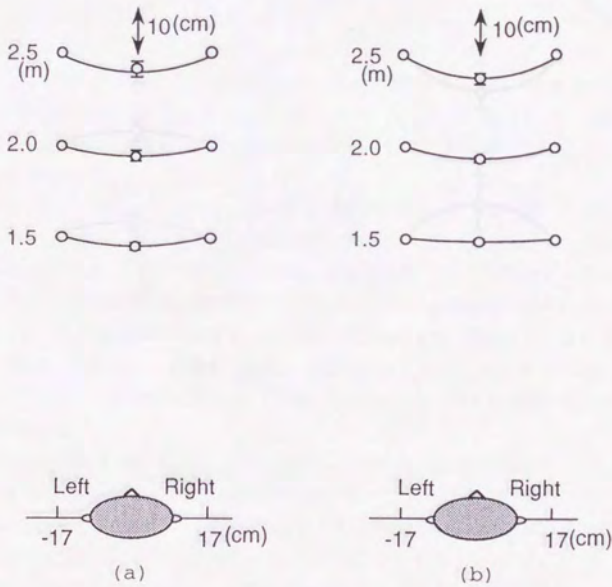


Fig. 2.12 視覚における解析結果 (視覚ホロボタ)

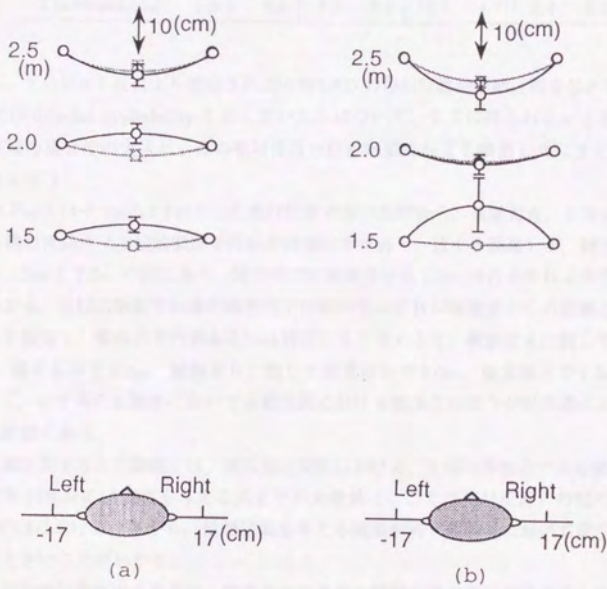


Fig. 2.13 解析結果の聴覚と視覚との比較

Table 2.2 視覚ホロプラと聴覚ホロプラのプロビット法による解析結果の比較

Subject	A				B			
Display	auditory		visual		auditory		visual	
Distance[m]	1.5	2.5	1.5	2.5	1.5	2.5	1.5	2.5
Relative position[cm]	2.5	-4.8	-1.9	-3.4	8.1	-6.8	-0.2	-4.7
Threshold[cm]	6.8	8.1	1.5	3.2	12.7	4.7	0.4	2.3

さらに、プロビット法により推定された中央LEDの相対位置や信頼区間を与える閾値（文献[34]ではfiducial probabilityと称している）について、すでに得られている聴覚ホロプラ測定実験の場合の中央スピーカの相対位置や信頼区間を与える閾値と共にまとめた表を、Table 2.2に示す。

以上のFig. 2.13やTable 2.2に示した相対位置の値の比較から、被験者A、B共に、主観的額面平行線の変曲点（主観的額面平行線が物理的平行線と一致する距離）が、聴空間では被験者から1.5mと2.5mの間にあり、視空間では被験者から1.5m付近かそれより手前にあることがわかる。主観的額面平行線の物理的平行線からのずれが被験者からの距離と線形な関係にあると仮定し、変曲点を内挿あるいは外挿により求めると、被験者Aに関して聴覚表示で1.8m、視覚表示で0.2m、被験者Bに関して聴覚表示で2.0m、視覚表示で1.5mとなる。したがって、いずれの被験者においても聴空間における変曲点のほうが視空間における変曲点より遠距離にある。

また信頼区間を与える閾値とは、精神測定関数における、主観的等価点である確率50%の点から確率25%および75%を与える点までの刺激値（ここでは相対位置）の幅のことである。Table 2.2における比較から、信頼区間を与える閾値が同一被験者において視空間よりも聴空間で大きいことがわかる。

これを統計的に検証するために、聴覚表示の場合の閾値が視覚表示の場合より小さいという帰無仮説をたて、片側検定を行なった[35]。検定には、

- $X$  : 聴覚表示の場合の主観的相対位置の推定値
- $Y$  : 視覚表示の場合の主観的相対位置の推定値
- $S_x^2$  : 聴覚表示の場合の主観的相対位置の推定分散
- $S_y^2$  : 視覚表示の場合の主観的相対位置の推定分散
- $n$  : 聴覚表示の場合の試行数の荷重和
- $m$  : 視覚表示の場合の試行数の荷重和



Table 2.3 視覚ホロボタと聴覚ホロボタの信頼区間を与える閾値の差の検定

Distance[m]	1.5				2.5			
Subject	A		B		A		B	
Display(auditory/visual)	a	v	a	v	a	v	a	v
Threshold[cm]	6.8	1.5	12.7	0.4	8.1	3.2	4.7	2.3
Standard error[cm]	1.0	0.4	3.9	0.4	1.4	1.3	2.1	0.8
Weighted sum of trials	36.8	10.8	12.8	3.4	35.5	11.5	6.5	11.2
Degree of freedom of T	38.9		12.6		18.9		6.5	
T	24.4***		11.1***		11.0***		2.8*	

ここで \*\*\* は 0.5%水準で有意であることを示し、

\* は 5%水準で有意であることを示す。

として、つぎの検定統計量を用いた。

$$T = \frac{|X - Y|}{\sqrt{\frac{S_x^2}{n} + \frac{S_y^2}{m}}} \quad (2.4)$$

ここで T の自由度  $\nu$  は次式で与えられる。

$$\frac{\left(\frac{S_x^2}{n} + \frac{S_y^2}{m}\right)^2}{\nu} = \frac{\left(\frac{S_x^2}{n}\right)^2}{n-1} + \frac{\left(\frac{S_y^2}{m}\right)^2}{m-1} \quad (2.5)$$

Table.2.3に、それぞれの距離および被験者について検定を行なった結果を示す。仮説は危険率 0.5%（一例のみ 5%）で棄却され、聴覚表示における閾値のほうが有意に大きいことが検証できた。すなわち信頼区間を与える閾値が、同一被験者においては視空間よりも聴空間で大きいことが検証された。

以上から、以下の結論を得た。

1. いずれの被験者においても、聴空間における変曲点のほうが視空間における変曲点より被験者から遠方にある。
2. 信頼区間を与える閾値が、同一被験者においては視空間よりも聴空間で大きい。

### 2.5.3 考察

以上の結果から、同一被験者において、視空間と聴空間は類似の形状をもつが、同一ではない（座標系が共通ではない）ことが確認された。

従来より、同一の物理量に対して視覚と聴覚の間でくいちがいの生ずることが知られていたが[36, 37]、今回の実験により、視覚と聴覚とに関してもこのくいちがいのあることが示唆された。

また信頼区間を与える閾値の大きさの比較結果は、聴覚における主観的位置知覚の精度が視覚に比べて低いことを示していると考えられる。しかしこれは同時に、たとえば視覚と聴覚との異感覚間の位置情報の統合において、聴覚のほうが主観的位置に対する許容度が大きいことを示しているとも解釈できる。この場合、統合の結果知覚される位置は、聴覚よりも視覚からの推定結果に、より強く依存するであろうと予測される。距離ではなく方向に関してではあるが、音と映像の方向を  $5^{\circ} \sim 15^{\circ}$  ずらした場合、知覚される音の方向が映像の方向に数度引き寄せられたという実験結果があり[38]、上記予測の傍証とみなすことができる。

## 2.6 まとめ

距離に関する音源定位の基礎実験を行ない、つぎの結果を得た。

1. 聴空間における主観的額面平行線の物理的空間における形状が音源までの距離に依存すること、すなわち聴覚ホロプタ現象の存在を確認した。
2. さらにその形状は、音源までの距離が近い場合には被験者に対して手前に凹型、逆に距離が遠い場合には被験者に対して手前に凸型の曲線になることを検証した。この形状の傾向は、視空間におけるホロプタの形状と同様の傾向であり、聴空間におけるホロプタとは傾向が異なっている。
3. 同一被験者に対して視覚ホロプタの測定実験を行なった。その結果と上記の聴覚ホロプタの測定実験結果とを比較し、同一被験者の視空間と聴空間は構造が類似しているものの、聴空間の変曲点のほうが被験者から遠方にあり座標系は同一でないことなどを示した。

## 第 3 章

# 聴空間の特性解明を目的とした 仮想環境提示システムの構成

本章では、まず第 3.1 節において音源距離定位に関する特性解明のアプローチを明確にした上で、そのために構成した視覚および聴覚に関する仮想環境提示システムについて第 3.2 節で述べる。また第 3.3 節では、視覚情報提示用に用いる STHMD (See-Through 型 Head-Mounted Display) に対し、特に距離に関する誤差を少なくするために考案した、装着時における視点位置ずれの新しい校正法に関して、そのアルゴリズム、誤差の感度解析、および検証実験の結果を説明する。

### 3.1 研究の背景

前章において、距離に関する音源定位の基礎実験を行ない、その結果として聴空間の構造に関する知見、すなわち

「聴空間においても視空間や触空間と類似したホロプロタの距離依存性があること」

を得た。この実験は距離定位に関するものであったが、その定位の要因まで明らかにするものではなかった。

Fig.3.1 に示すように、音源定位は方向定位と距離定位とに分けられる。そのうち方向定位に関しては、両耳聴における強度差・時間差・位相差などの左右差という手がかりの存在がこれまでの研究により明らかになっている [39, 26, 27, 28, 40, 29, 41]。それに対し距離定位の手がかりに関しては、その研究事例が比較的少なく、また得られている知見もやや不明確である [26, 27, 28, 29, 41]。



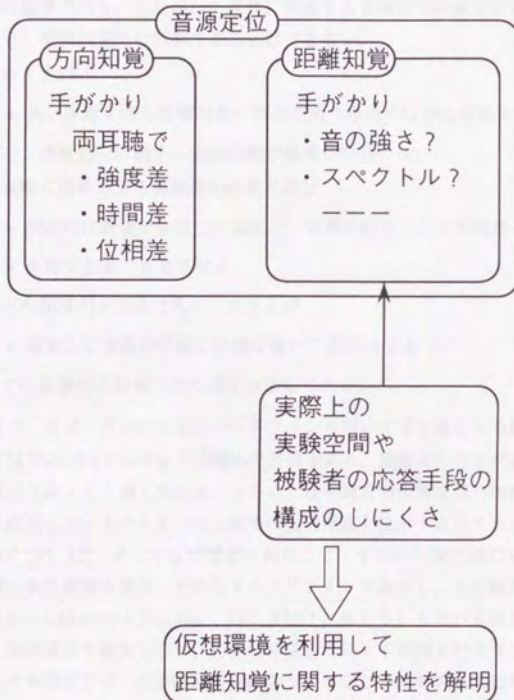


Fig. 3.1 距離定位に関する特性解明のアプローチ

その原因としては、距離定位実験に関する実際上の実験空間の構成のしにくさや被験者の応答手段の構成のしにくさなどが考えられる。すなわち実空間では、以下のような困難さが距離定位研究の進展の妨げとなっていたと推察される。

1. 両耳に到達する音刺激の波形は、空気中の伝播や周囲の反響、耳介の影響などを受けた結果である。したがって両耳に到達する音刺激の距離定位に関する知覚の手がかりを、個別に完全に制御することはできない。
2. たとえば
  - 長い距離を持ち反響のない自由空間の任意の位置に音源を置く
 など、距離定位に関する実験空間の構成は容易でない。
3. 実際に構成できる被験者の応答手段は、
  - 閉眼時に聴覚で知覚した結果を、音源を除去したのち開眼して指標で指示させる
  - 距離を数値で答えさせる
 などの間接的な方法であり、たとえば
  - 知覚した音源の位置に指標を置いて指示させる
 などの直接的な応答手段の設定は困難である。

従来より、スピーカの代わりにヘッドフォンを用いて音を提示する場合があった。ヘッドフォンにはTable3.1に示すような優れた特質があり、距離定位の手がかりを解明するための音刺激提示手段として適している。さらに、近年視覚的仮想環境の創製技術が進歩し、実際の環境を直視しているのとまったく同等の視覚情報を提示するシステムが実現できるようになってきた[21, 42]。そこで仮想環境を利用して、すなわち実空間に実音源を置く代わりに仮想空間に仮想音源を置き、その音をヘッドフォンで提示し、その画像を頭部搭載型画像提示装置(Head-Mounted Display 以下HMDと称する)を用いて提示することにより、実空間の上記問題点を解決しつつ、聴空間の構造に関する解明を行なうことが可能となってきた。そこで本研究では、音源距離定位の手がかりなどの聴覚的空間知覚特性に関する知見を得ることを目的として、仮想環境提示システムを構成した。

## 3.2 実験システムの構成

### システムの概要

本研究で構成した仮想環境提示システムの概要を、Fig.3.2に示す。

Table 3.1 ヘッドフォンとスピーカの比較 (E.M.Wenzel の講演 [39] スライドに基づき作成)

Headphones:
<ul style="list-style-type: none"><li>•complete control over the acoustic waveforms entering the two ears</li><li>•an "infinite" sweet spot: stable acoustic environment even if listener moves around</li><li>•full head-coupling of the virtual sources (orientation &amp; position)</li><li>•better control of reverberant conditions through modeling</li><li>•very low frequency sounds (e.g., explosions) not well synthesized</li></ul>
Loudspeakers:
<ul style="list-style-type: none"><li>•much harder to control the acoustic waveforms entering the two ears (need transaural techniques)</li><li>•a limited sweet spot: stable acoustic environment only if listener stays relatively still</li><li>•limited head-coupling of the virtual sources (orientation only)</li><li>•very difficult to control effects of reverberation</li></ul>



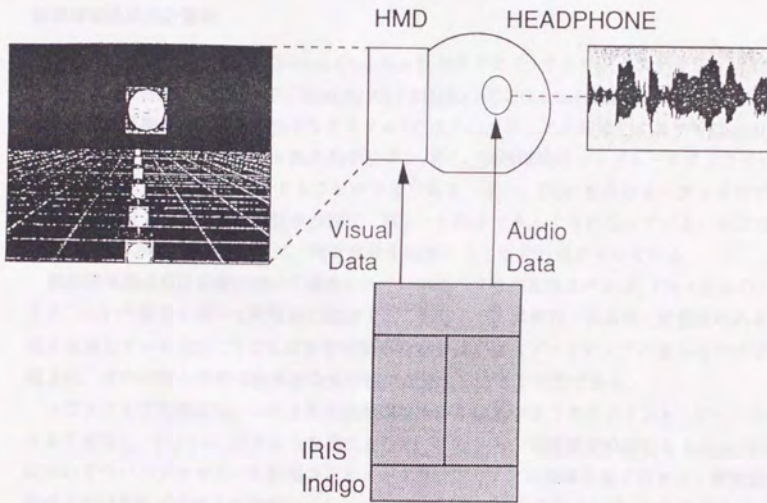


Fig. 3.2 仮想環境提示システムの構成

このシステムは、文献[43]に記載されたシステムに基づき、任意の聴覚信号を合成して提示する機能および被験者の応答を採取する機能を付加したものである。仮想環境構成用計算機 (IRIS Indigo) は、仮想環境モデルに基づいて、左眼および右眼用のコンピュータグラフィックス画像を創製する。その画像は、被験者の装着したHMDにおいて提示され、被験者に対する視覚入力となる。一方同じ計算機を用いて任意の聴覚信号を合成または再生し、DSP(Digital Signal Processor)を介して出力し、被験者の両耳にヘッドフォンにより提示する。

#### 仮想環境構成用計算機

仮想環境構成用計算機は、Silicon Graphics社のグラフィックスワークステーション IRIS Indigo/Elan およびXS24 (CPU R3000/3010 33MHz) をEthernetで接続して運用している。これらの計算機は、いずれも高速なグラフィックスハードウェアを搭載しており (Elan:100k 四角形ポリゴン/秒, XS24:25k 四角形ポリゴン/秒)、仮想環境のコンピュータグラフィックス画像をリアルタイムで生成することが可能である。また、DSPを含むオーディオサブシステムも搭載しており、聴覚信号の録音・再生・生成ができるようになっている。そこで画像の生成と同時にかつ統合的に、聴覚信号を処理することが可能となっている。

仮想環境構成用計算機において構築されている3次元仮想環境モデルは、C++言語の“クラス”という構造を用いて階層的に記述することにより、柔軟性・汎用性・拡張性のある構成を実現している[43]。たとえば仮想環境中の物体は、物体プリミティブの組み合わせで表現され、その位置や姿勢は物理的な実寸値で記述することが可能である。

ソフトウェアの構成は、この3次元仮想環境モデルに基づき、クライアント・サーバシステムを適用し、Fig.3.3に示すような構成とした。すなわち、処理速度の高速なIndigo/Elanにおいてサーバプロセス・左眼用コンピュータグラフィックス画像生成プロセス・聴覚信号生成または再生プロセスを稼動し、Indigo/XS24において右眼用コンピュータグラフィックス画像生成プロセスを稼動した。また各プロセスの基本的な役割は、以下のように設定した。

- 仮想環境の創製に必要な各プロセス間のデータの授受は、サーバプロセスを通じて行なう。
- 聴覚信号生成または再生プロセスは、サーバプロセスからの制御指令に従い、任意の聴覚信号の生成または再生を順次行なう。
- 左右眼それぞれのコンピュータグラフィックス画像生成プロセスは、3次元仮想環境モデルに基づき、それぞれ独立にその視点位置と物体の位置からウィンドウ投影変換<sup>1</sup>

<sup>1</sup>文献[43]に記載されたシステムでは透視投影を用いているが、次節(第3.3節)に述べる視覚パラメータの較正を行なう必要上、非対称な視野を表現することができるウィンドウ投影を用いた。

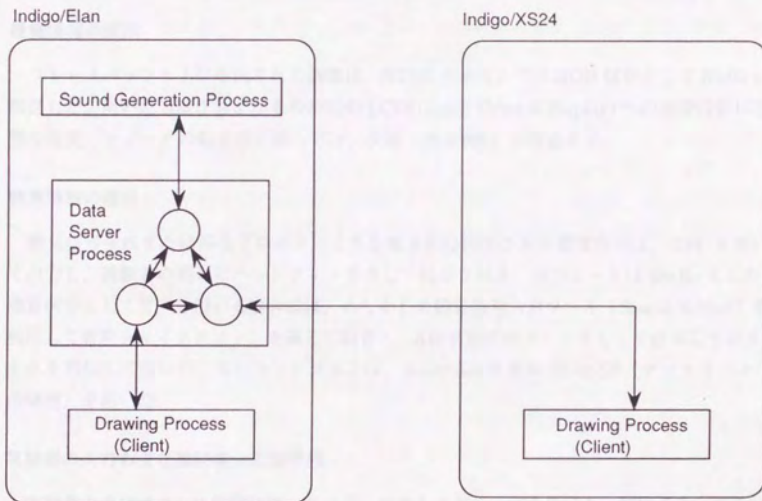


Fig. 3.3 仮想環境提示プロセスの構成



を行ない、計算により求められた2次元提示画像をフレームバッファ上に生成する。また実験プロセスの進行の手がかりとなるキー入力およびマウスボタン入力の受け付けや、その制御データのサーバプロセスへの伝送も行なう。

被験者がマウスを操作して音源指標画像を移動させる実験においては、マウスボールの移動量を左眼用画像生成プロセスが計測し、音源指標の新しい位置を計算して新しい左眼用画像を生成すると共に、位置データをサーバプロセスに伝送した。右眼用画像生成プロセスはサーバプロセスからこのデータを受け取り、同様に新しい右眼用画像を生成した。

#### 視覚情報の提示

フレームバッファ上に生成された画像は、NTSC タイミングのRGB 信号としてHMDに伝送した。用いたHMDおよびその左右のLCD(Liquid Crystal Display)への画像投影に必要な視覚パラメータの較正法に関しては、次節(第3.3節)で詳述する。

#### 聴覚情報の提示

聴覚信号生成または再生プロセスにより生成または再生された聴覚信号は、DSPを用いて出力し、被験者の両耳にヘッドフォンを介して提示される。出力レートは48kHzとした。聴覚信号として音声を用いる場合には、あらかじめ聴覚信号入力ツール(Sound Editor)を利用して音声をマイクロフォンを通じて録音し、AIFF形式のファイルとして保存しておき、それを再生して用いた。またヘッドフォンは、Senheiser社製のHD25SP(ダイナミック・密閉型)を用いた。

#### 実験者の入力および被験者の応答手段

実験者の実験プロセス制御には、キーボードからのキー入力を用いた。被験者の応答手段には、マウス(左・中央・右ボタンおよびボールの $x$ ・ $y$ 方向移動量)を利用した。

#### はみ台

Fig.3.2には示していないが、被験者の頭部とHMDとの位置関係を固定するのに“はみ台”を用いた。“はみ台”とは、被験者がそれを噛むことにより、被験者自身の頭部を固定する装置である。本実験においては、HMDを固定する機能と“はみ台”としての機能を具備し、HMDと頭部との両方を固定し、かつ両者の関係を一定にする装置を、アングルとその固定金具を用いて自作した。噛む部分は、あらかじめ被験者ごとに歯型をコンパウンド(歯

Table 3.2 HMD の設計仕様 (文献 [42] より引用)

Field of view		$d_{vir}$	Distance between two lenses
Horizontal	Vertical		
40°	30°	1m	65mm

科で菌型をとる際に用いられる、加熱により変形可能で、冷却により固化する材料)を用いて作成しておき、それをアイスクリームバー状の木の棒を利用して、金具で装置に固定した。

### 3.3 HMD の距離に関する較正

#### 3.3.1 新較正法の必要性

音源距離定位に関する実験を目的とした仮想環境創製には、まず HMD で視覚的に提示される距離を実環境における距離と一致させるために、HMD の距離に関する較正を行なう必要がある。

実環境と視覚的な仮想環境とを比較するために、HMD として STHMD (See-Through 型 Head-Mounted Display) を用いる。STHMD とは、コンピュータグラフィクスにより生成された仮想世界を現実の空間にスーパーインポーズするために、ビームスプリッタ (半透明鏡) を利用することにより両空間の同時提示を可能にした HMD である [13]。そこでは仮想空間と実空間とを重ね合わせて同時に提示するため、その両者の整合性が実用上の大きな課題となっている [44]。今回用いた STHMD は、文献 [42] の著者らにより設計されたもので、映像の提示には 2 枚の 5.7 インチの LCD を使い、Table 3.2 のような設計仕様に基づいて製作されていた。

この STHMD に対し、装着する人間が実際に存在する実環境の座標系とコンピュータグラフィクスで生成された仮想環境の座標系とを一致させるため、文献 [42] の方法により、

- HMD 製作時の光学系の設計値との誤差
- 装着時の視点位置の設計値とのずれ

の二つの誤差要因について既に較正が行なわれ、ウィンドウ投影変換に必要な視覚パラメータ (視点位置、視線方向、および投影面の形状とその視点からの距離) が求められていた。ここで行なわれた較正の方法は、実環境内に較正点を用意し、対応する実環境内の点と仮想環境内の点との位置合わせを行なうことで、上記二つの要因による誤差を順次較正する方法

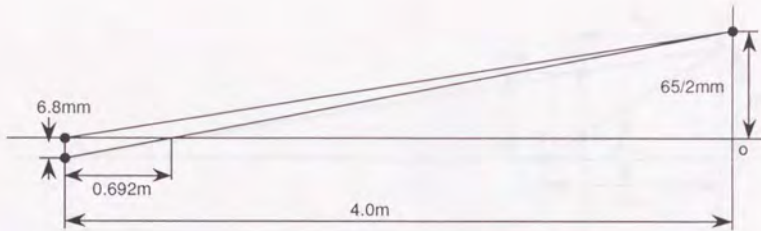


Fig. 3.4 STHMD の RMS 誤差と距離に関する誤差との関係

であった。しかし予備実験の結果、今回の使用目的に対しては、この方法による校正が奥行き方向（距離の方向）に関して不十分であることが明らかになった。そこで特に距離に関する誤差に対して有効な、視点位置ずれの新たな校正法を考案することにした。

### 3.3.2 視点位置ずれの新しい校正法

装着時の視点位置ずれの大きな原因として、瞳孔間距離（inter-pupil distance, IPD）の個人差がある。これに起因する水平方向の視点位置ずれは、高さ方向や奥行き方向の偶発的なずれとは異なり、装着法の工夫などによって小さくすることが、左右両眼同時には不可能である。

文献 [42] における視点位置ずれの校正結果において、例えば 4.0m の距離における RMS 誤差として、1.7mm（距離が 1.0m の場合の換算値）という結果が得られている。この結果は、校正前の RMS 誤差を半分以下に減少させているが、それでもなお実際には

$$0.0017 \times 4.0 = 0.0068 \text{ [m]} \quad (3.1)$$

の RMS 誤差が存在することを示している。これを距離に関する誤差に換算すると、Fig.3.4 に示すように、瞳孔間距離を 65mm として、

$$\frac{0.0068}{(0.065/2) + 0.0068} \times 4.0 = 0.692 \text{ [m]} \quad (3.2)$$

となる。これは距離 4.0m の 17.3% にあたり、仮想空間において距離知覚を問題にする実験を想定した場合には無視できない大きさである。

そこで特に距離に関する誤差を少なくするような、装着時における視点位置ずれの校正法として、以下のような校正法を考案した。



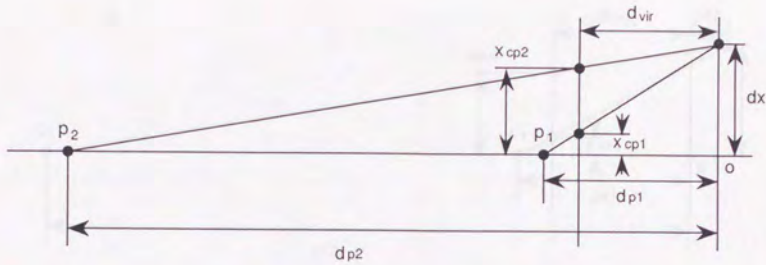


Fig. 3.5 新較正法による視覚パラメータの校正

1. Fig.3.5に示すように、実環境内で被験者の正中面上の目の高さ、指標を2点 ( $p_1$ ,  $p_2$ ) 用意する。(この較正法では、被験者の正中面と目の高さについては、あらかじめ誤差がなくなるように被験者と STHMD との位置関係を調整してあるものとする。これらは、瞳孔間距離の個人差による視点位置ずれとは異なり、実環境上の指標と仮想環境上の指標とが重ね合するように視点の位置を動かすことにより、調整が可能である。)
2. 仮想面 (HMD で仮想環境を提示する際の仮想的なスクリーン) 上に2個のカーソルを表示し、これらを動かして各指標に重ね合わせ、その最終位置を記録する。
3. 記録されたカーソルの位置と実環境上の指標の位置を結ぶ直線の交点が  $x$  軸上にあると仮定して、視点の位置と仮想面の原点からの距離とを求める。すなわち、実環境における2指標の位置  $d_{p1}$ ,  $d_{p2}$  に対し、カーソルの  $x$  座標を  $x_{cp1}$ ,  $x_{cp2}$  とおくと、視点の位置 (瞳孔間距離の半分の値)  $dx$ , 仮想面の距離  $d_{vir}$  は、それぞれ

$$d_{p1} : dx = (d_{p1} - d_{vir}) : x_{cp1} \quad (3.3)$$

$$d_{p2} : dx = (d_{p2} - d_{vir}) : x_{cp2} \quad (3.4)$$

より

$$dx = \frac{d_{p1}x_{cp1} - d_{p2}x_{cp2}}{d_{p1} - d_{p2}} \quad (3.5)$$

$$d_{vir} = d_{p1} \left( 1.0 - \frac{x_{cp1}}{dx} \right) \quad (3.6)$$

となる。



$$\Delta dx \sim -\Delta d_{p1} \frac{x_{cp1}(d_{vir} + dz)}{(d_{p1} + \Delta d_{p1} - d_{vir})(d_{p1} - d_{vir})} \quad (3.9)$$

$$\Delta dz \sim O(\Delta d_{p1}) \quad (3.10)$$

となる。

同様にカーソル位置  $x_{cp1}$  に測定誤差  $\Delta x_{cp1}$  が存在すると、 $dx$  の誤差  $\Delta dx_c$ 、および  $dz$  の誤差  $\Delta dz_c$  はそれぞれ

$$\Delta dx_c = \Delta x_{cp1} \quad (3.11)$$

$$\Delta dz_c \sim \Delta x_{cp1} \frac{O(d_{p1})}{O(x_{cp1})} \quad (3.12)$$

となる。

すなわち単位を m として、 $dx$  ( $O(10^{-2})$ ) に対して、その誤差  $\Delta dx$  は  $O(10^{-4})$ 、 $\Delta dx_c$  は  $O(10^{-3})$  と問題のないオーダーとなっているが、一方  $dz$  (cm オーダー) に対しては、その誤差  $\Delta dz$  は  $\Delta d_{p1}$  のオーダーすなわち  $O(10^{-1})$ 、 $\Delta dz_c$  は  $O(10^0)$  となり、指標・カーソルどちらの測定誤差も拡大伝播することがわかる。

## (2) 較正法 II の場合

較正法 II についても式 (3.5) および式 (3.6) より同様に誤差を解析する。指標位置  $d_{p1}$  の測定誤差  $\Delta d_{p1}$  に対しては、 $dx$  の誤差  $\Delta dx$ 、および  $d_{vir}$  の誤差  $\Delta d_{vir}$  はそれぞれ

$$\Delta dx \sim \frac{x_{cp1}}{d_{p1}} \Delta d_{p1} \quad (3.13)$$

$$\Delta d_{vir} = (1.0 - \frac{x_{cp1}}{dx}) \Delta d_{p1} \quad (3.14)$$

となる。

同様にカーソル位置  $x_{cp1}$  に測定誤差  $\Delta x_{cp1}$  が存在すると、 $dx$  の誤差  $\Delta dx_c$ 、および  $d_{vir}$  の誤差  $\Delta d_{vir_c}$  はそれぞれ

$$\Delta dx_c = \frac{d_{p1}}{d_{p1} - d_{p2}} \Delta x_{cp1} \quad (3.15)$$

$$\Delta d_{vir_c} = \frac{d_{p1}}{dx} \Delta x_{cp1} \quad (3.16)$$

となる。



Table 3.3 検証実験の結果

Subject		A	B
$x_{ep1}$ [m]		0.004725	0.005725
$x_{ep2}$ [m]		0.01869	0.02119
Method I	$dx$ [m]	0.025	0.028
	$dz$ [m]	-0.31	-0.37
Method II	$dx$ [m]	0.028	0.032
	$d_{vir}$ [m]	0.83	0.82
Measured IPD/2[m]		0.028	0.030

すなわち  $dx$  ( $O(10^{-2})$ ) に対して、その誤差  $\Delta dx$  は  $O(10^{-4})$ 、 $\Delta dx_c$  は  $O(10^{-3})$ 、また  $dv$  (1m 程度) に対して、その誤差  $\Delta d_{vir}$ 、 $\Delta d_{vire}$  は共に  $O(10^{-1})$  となり、指標・カーソルどちらの測定誤差もそれほど大きく伝播しない。

以上の検討から、校正法 II では測定誤差の拡大伝播がないのに対し、校正法 I では測定誤差が視点位置の  $z$  軸方向の誤差を極めて大きくすることがわかった。視点位置の  $z$  軸方向の誤差は、式 (3.10) の関係から、そのまま指標の仮想環境における距離の誤差に反映される。

### 3.3.4 検証実験

前節 (第 3.3.3 節) の解析結果を検証するために、今回用いる STHMD を用いて、上記校正法の評価実験を行なった。視覚パラメータは製作時の誤差について校正した結果を初期値として用い、実環境上の指標を 1.0m と 2.5m の位置に設定した。まず 2 名の被験者に対して指標とカーソルを重ね合わせる実験を行ない、2 種類の校正法についてそれぞれ新しい視覚パラメータを求めた。結果を Table 3.3 に示す。

また上記被験者を含めて計 4 名の被験者に対して校正法 II による校正手続を行ない、Table 3.4 に示すような新視覚パラメータを得た。なお Table 3.3、Table 3.4 共に、最下段には瞳孔間距離の実測値を 2 で割った値を示してある。

前節の結果から予測されたように、校正法 I では視点位置の  $z$  軸方向の校正値が  $-31 \sim -37$ cm となっており、この値は顔の形状 (鼻の高さ) の個人差に起因する値の差の範囲を大きく超えている。これに対し校正法 II では、計算により求められた  $dx$  が、最下段に示した瞳孔間距離の実測値を 2 で割った値とよく一致している。ここで、本来は一定値であるべ

Table 3.4 校正された視覚パラメータ

Subject	A	B	C	D
$dx[m]$	0.028	0.032	0.033	0.031
$d_{vir}[m]$	0.82	0.82	0.72	0.78
$IPD/2[m]$	0.028	0.030	0.033	0.031

Table 3.5 校正後のカーソル位置ずれ (仮想面上の変位)

Distance[m]	1.0	2.0	2.5	5.0
Displacement[m]	0.000	0.000	0.000	0.001

き仮想面までの距離  $d_{vir}$  が個人ごとに異なっているが、これが仮想環境における距離に及ぼす影響は、式 (3.14) から元の  $d_{vir}$  の誤差と同じオーダーとなることがわかるので問題ないといえる。

また Table 3.4 の新しい視覚パラメータを用いて、それぞれの被験者にあらためて指標位置に対応する仮想空間上の位置にカーソルを表示したところ、校正前は最大 3mm 程度あった指標とカーソルとのずれが、すべての被験者について 0.0mm となった。

さらに被験者 A に対して、実空間上 2.0m と 5.0m の位置にも指標を置き、同時に新視覚パラメータを用いて仮想空間上の同じ位置にカーソルを表示したところ、Table 3.5 に示すようなカーソル位置ずれがあった。距離 5.0m におけるカーソル位置ずれによる距離の誤差は 0.12m と計算され、これは 5.0m の 2.4% に相当し、実用上十分満足できる範囲内であるといえる。

これらの結果から、ここで提案した校正法は STHMD の距離に関する視点位置の校正法としてきわめて有効であることが、確認された。

### 3.4 まとめ

音源距離定位の手がかりなどの聴覚的空間知覚特性に関する知見を得る目的で、視覚および聴覚に関する仮想環境提示システムを構成した。

さらに STHMD における仮想空間と実空間の整合性を図るために、特に距離に関する誤差に対して有効な、視点位置ずれに対する新たな視覚パラメータ校正法を考案した。またそ

の有効性を、視覚パラメータの感度解析により評価し、さらに個人ごとの STHMD の校正実験により検証した。



## 第 4 章

# 音源距離定位の知覚特性の解明

本章では、前章において構成した仮想環境提示システムを用いて行なった、距離に関する音源定位における手がかりの定量的把握に関する実験について詳述する。すなわち距離に関する音源定位における手がかりとして音の強さを取り上げ、これを仮想環境において制御し、知覚される音源距離との対応付けを行なうための実験システムの構成、および実験方法について説明する。つぎに、まず仮想環境と実環境との同等性を確認するために、実環境における先例とみなせる実験と同等の実験条件で行なった実験の結果について報告する。さらに、その後普遍的な結果を得るために独自の条件を用いて行なった実験の結果について述べ、考察を加える。

### 4.1 研究の背景

前章（第3章）において、聴覚的空間知覚特性に関する知見を得るための仮想環境提示システムを構成し、さらにHMDで視覚的に提示される距離を実環境における距離と一致させるための距離に関する校正法を確立した。そこでこの仮想環境提示システムを用いて、距離に関する音源定位における手がかりに関して定量的に把握するための実験を行なうことにした。ここではまず、Fig.3.1に示したように距離に関する音源定位において重要な役割をはたしていると予測される音の強さについて、これを仮想環境下で制御し、知覚される音源距離との対応付けを行なうことにした。

### 4.2 実験システムの構成と実験方法

実験システムおよび方法は、M.B.Gardnerの音の強さとみかけの音源距離に関する実験（文献[45]第III章）に基づいて設定した。

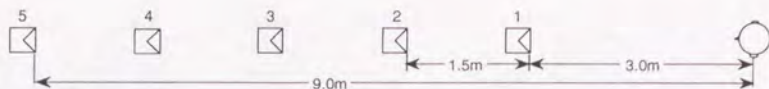


Fig. 4.1 M.B.Gardner の実験のセットアップ

M.B.Gardner の音源距離に関する実験とは、Fig.4.1に示すように被験者の正中面上にスピーカを等差系列的 (3 ~ 9m, 1.5m ごと) に配置し、外耳道に到達する音 (音声) を種々の強さで被験者に聞かせたところ、実際に音源となったスピーカが被験者からみて一番手前 (1) か一番奥 (5) のスピーカのみであったにもかかわらず、音の強さに応じて音源位置が判断されたという実験である (実験結果は付録 E の Fig.E.1 に示す)。この実験では、両耳の外耳道を通る水平面と正中面との交線上に複数個のスピーカを設置してあり、実際には最も手前のスピーカしか被験者に見えない。そこでワイヤメッシュを表示した床の上にも同じ大きさのダミーのスピーカを元のスピーカの直下に置き、各スピーカの位置を示している。

本実験でも、HMD を装着した被験者には、両耳の外耳道を通る水平面と正中面との交線上に複数個のスピーカの画像を提示した。そしてこれらも実際には最も手前のスピーカしか見えないので、ワイヤメッシュで表示した床の上にも同じ大きさのダミーのスピーカ画像を元のスピーカの直下に表示し、各スピーカの位置が認識できるようにした。表示画面の一例を Fig.4.2 に示す。

また両耳にヘッドフォンを通して提示する音刺激としては、音声または疑似ランダムノイズを用いた。音声には、M.B.Gardner の実験で用いられた文章の第一文

The different speech sounds have been moulded into sentences.

を話す音声を DSP を用いて録音し、強さを制御して再生した。ある特定の強さの音刺激を持続時間 4sec.、音間隔 1sec. で提示し、同じ強さの音刺激をもう一度繰り返したのち、次の強さの音刺激の提示に移った。提示する音刺激の強さの順序は、直前との強さの組合せが、すべての組合せについて 1 セッション中に同数回現われるようにした。

被験者には、「2 回ずつ同じ音が提示されるので、それが、表示されているどのスピーカからの音だと思うかを答えてほしい。」と指示し、提示される音の強さが相異なることやその種類などについては、言及していない。

実験の開始時に、被験者の頭部をはみ台で固定し、仮想環境上の距離が実環境上の距離と一致するように HMD の視覚パラメータの校正を行なった。

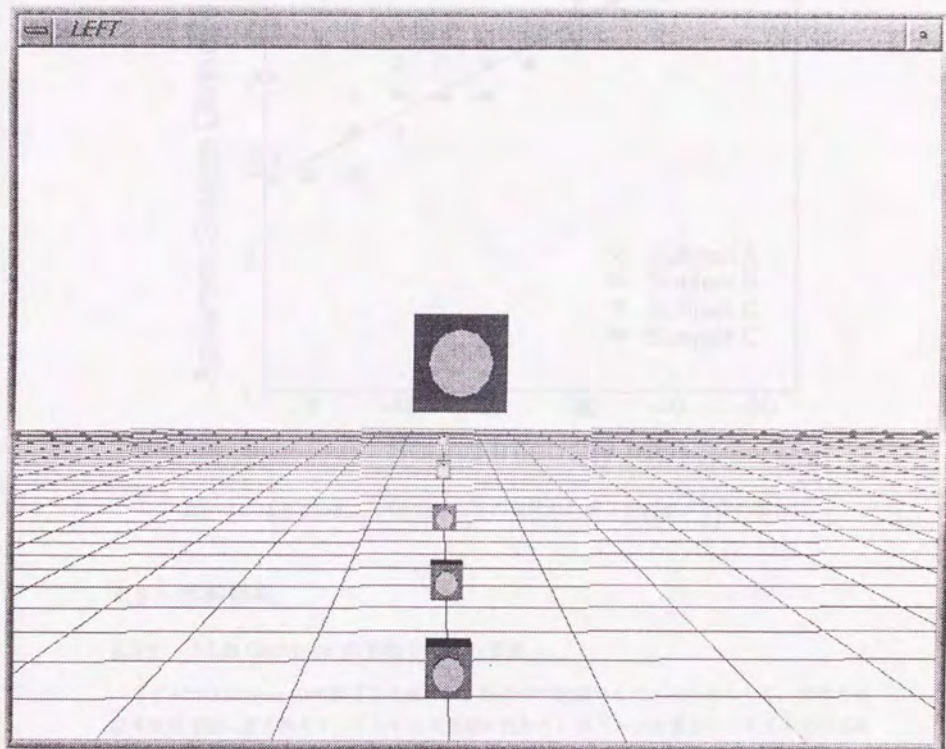


Fig. 4.2 HMD への提示画像



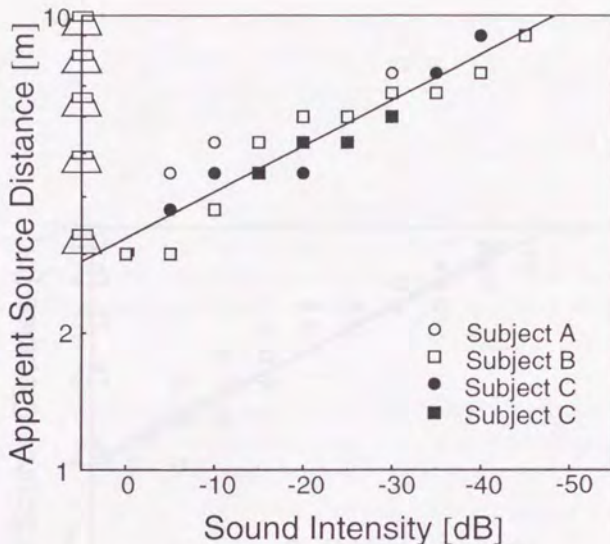


Fig. 4.3 M.B.Gardner の実験と同等の実験の結果（音刺激が音声の場合）

### 4.3 実験結果

#### 4.3.1 M.B.Gardner の実験と同等の実験

まず M.B.Gardner の実験をより厳密な実験条件で検証することを目的として、同等の実験を仮想環境に置き換えて、すなわち実音源の代わりにスピーカ画像とヘッドフォンによる音刺激を用いて行なった。スピーカ画像の位置は 5 箇所、音刺激の強さは音圧を 5dB ごとに 10 段階とした。音刺激の種類は、音声と疑似ランダムノイズを用いた。

Fig.4.3は、仮想環境における音声の場合の実験結果を、横軸を音の強さ、縦軸をみかけの音源距離の対数値にとってプロットしたものである。横軸の音の強さは音圧で、最大値を 0 として表示している。従来より横軸の音の強さ（音圧）については対数軸で（つまり dB を単位として）表わすのが一般的であったが、予備実験の結果から、今回の実験で得られるデータは、縦軸も対数軸とすると 99%程度の相関比で直線で表現できることがわかった。す

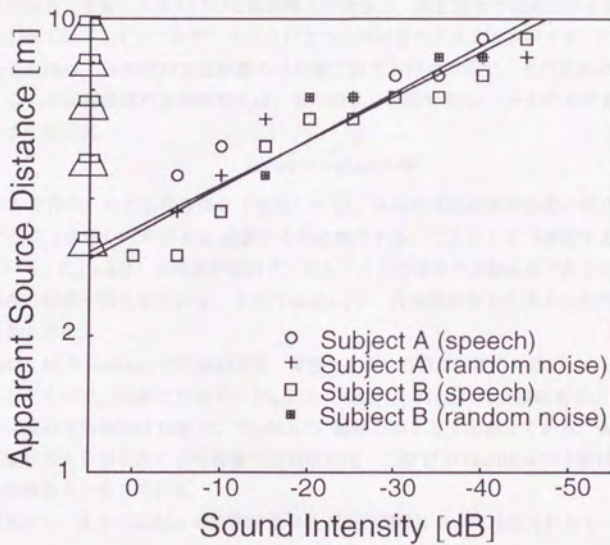


Fig. 4.4 M.B.Gardner の実験と同等の実験の結果（音刺激が疑似ランダムノイズの場合）

Table 4.1 M.B.Gardner の実験と同等の実験における回帰直線の比例係数

Subject	A		B		C		Gardner's
Sound(speech/noise)	s	n	s	n	s	s	s
Coef.	0.06	0.06	0.06	0.07	0.06	0.06	0.06

なわち音の強さ（音圧）とみかけの音源距離との関係は、指数関数で表現できる関係にあった。したがって以下、すべてのデータはこのように両対数のグラフで表示する。Fig.4.3に示されている直線は、みかけの音源距離の平均値に対する回帰直線で、その比例係数は0.06である。ここで回帰直線の比例係数とは、音の強さ（音圧）を  $x$ 、みかけの音源距離を  $y$  としたときの回帰式

$$\log_{10} y = \log_{10} a + bx \quad (4.1)$$

における  $b$  を指す。ただし音の強さ（音圧）  $x$  は、以後の実験結果の処理の都合上、音圧が1/2になる（音圧レベルが6dB減衰するのに相当する）ごとに1ずつ増加する量として定義している。Fig.4.4は、音刺激が疑似ランダムノイズの場合の実験結果であるが、Fig.4.3とはほぼ同様の結果が得られている。またTable.4.1に、各実験結果から求められた回帰直線の比例係数を示す。

Fig.4.5は、M.B.Gardnerの実験結果を、縦軸をみかけの音源距離の対数値にとってプロットしなおしたもので、実線は付録EのFig.E.1（文献[45] Fig.1）の実験結果を示している。その回帰直線の比例係数は0.06で、Table.4.1に最後の項として記載してある。仮想環境における実験結果から得られた回帰直線の比例係数は、このM.B.Gardnerの実験結果の回帰直線の比例係数と一致している。

この結果から、M.B.Gardnerの実験結果[45]が仮想環境において検証されたといえる。すなわち、

- ・ 構成した仮想環境が実環境と同等の結果を与えることが確認された。
- ・ 「みかけの音源距離は、両耳に到達する音の強さを重要な手がかりとしている。」という結果が、仮想環境の利用により実現した、音の強さ以外の手がかりがまったくないという厳密な実験条件下で確認された。

#### 4.3.2 音の強さとみかけの音源距離の範囲を変更した実験

M.B.Gardnerの実験では、音の強さ（音圧）が45dBすなわち  $1:128\sqrt{2}$  もの広範囲にわたっているのに対し、みかけの音源距離の範囲は1:3と極めて小さくなっている。そこ



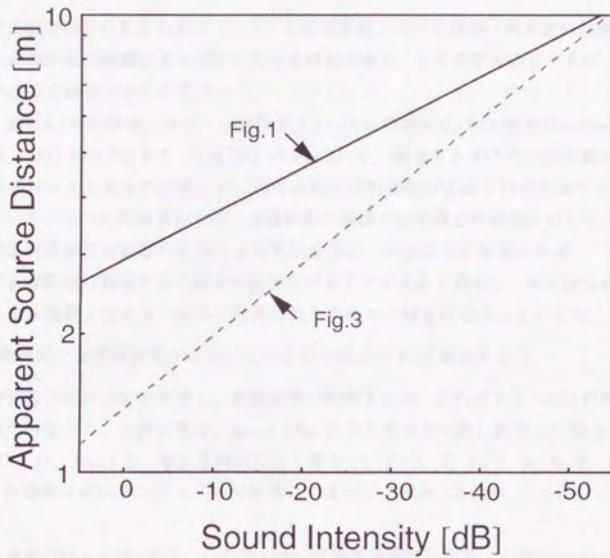


Fig. 4.5 M.B.Gardnerの実験結果 [45] を、縦軸をみかけの音源距離の対数値にとってプロットしなおしたもの

Table 4.2 音の強さとみかけの音源距離の範囲を変更した実験における回帰直線の比例係数

Subject	A		B		D	
Prop./ Exp.	prop.	exp.	prop.	exp.	prop.	exp.
Coefficient	0.09	0.21	0.23	0.24	0.23	0.20

で、この実験で得られた音の強さ（音圧）と音源距離との対応関係（両対数の比例係数）は、この狭い音源距離の範囲により制限を受けた結果であり、この範囲が変化すれば、比例係数も変化するのではないかと予想される。

実際、Fig.4.5の点線は、スピーカ位置を1.5～9mの間に広げたM.B.Gardnerの別の実験の結果（付録EのFig.E.2、文献[45]のFig.3）を、縦軸をみかけの音源距離の対数値にとって再プロットしたものであるが、回帰直線の比例係数が実線とは相異なり0.10と大きくくなっている。この処理結果からも、音源距離の範囲が音の強さの範囲に対して小さい場合には、対応関係が音源距離の範囲による制限を受けていることが推測される。

そこで音源距離の範囲を音の強さの範囲に対して十分大きく設定し、対応関係が音源距離の範囲による制限を受けない条件で比例係数を求める実験を行なうことにした。

「物理的には音源距離が2倍になると音の強さが6dB減衰する、」

という物理的な結果[46]を考慮し、音源距離の範囲を8倍、音の強さを12dBの範囲に設定した実験を行なった。音源位置は、2m～16mの中を等差系列的に配置した場合（2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16m）と、等比系列的にした場合（2,  $2\sqrt{2}$ , 4,  $4\sqrt{2}$ , 8,  $8\sqrt{2}$ , 16m）を設定した。音刺激は疑似ランダムノイズを用い、強さは3種類（基準値、-6dB、-12dB）とした。

実験結果をTable.4.2に示す。ここでprop.は等差系列的に配置した場合、exp.は等比系列的に配置した場合を示している。被験者Aの等差系列表示の場合を除き、ほぼ一定の比例係数が得られており、これらはTable.4.1に示したM.B.Gardnerの実験を検証した実験において得られた値より大きな値となっている。

## 4.4 調整法による音源定位実験

### 4.4.1 実験方法

これまでの実験において、被験者は複数個の音源位置の候補の中から音源位置を選択していた。これに対し、被験者自身に音源位置を指示させる、いわゆる調整法による音源定位実

Table 4.3 調整法による音源定位実験における回帰直線の比例係数

Subject	A	D	
Coef.	0.23	0.23	0.22

験を行ない、これまでの結果と比較することにした。

このような被験者の応答法を実空間で構成することはむずかしいが、仮想環境では容易に構成できる。この実験では、HMDを装着した被験者にFig.4.6に示すような画像を提示した。すなわち、ワイヤメッシュを表示した床の上に置かれ、水平面と被験者の正中面との交線上を、被験者のマウス操作により移動することのできる音源指標画像である。音源指標画像は、被験者のマウス操作により前後に移動する。

また両耳にヘッドフォンを通して提示する音刺激は、疑似ランダムノイズとした。ある特定の強さの音刺激を持続を時間4sec.、音間隔1sec.で提示し、同じ強さの音刺激を、被験者が音源位置を確定するまで繰り返した後、次の強さの音刺激の提示に移った。提示する音刺激の強さの順序は、直前との強さの組合せが、すべての組合せについて1セッション中に同数回現われるようにした。強さは3種類（基準値、-6dB、-12dB）、マウス操作による音源指標位置の可動範囲は、被験者からの距離が1.35m～25.55mと設定した。

被験者には、「同じ音が繰り返し提示されるので、その音源位置だと思う場所に音源画像をマウスを操作して移動し、音源位置が決まった時点でマウスの左ボタンをクリックしてほしい。そうすると次の新しい音の提示が始まるので、また音源位置の決定を行なってほしい。」と指示し、提示される音の強さや種類については、言及していない。

#### 4.4.2 実験結果

Fig.4.7に、被験者Dの実験結果を前節（第4.3.2節）で行なった実験の結果と共に図示する。ここでprop.は前節において仮想音源を等差系列的に配置した場合、exp.は等比系列的に配置した場合を表わし、(1)および(2)はそれぞれ調整法による2回の実験結果を表わしている。またTable.4.3に実験結果から求めた回帰直線の比例係数を示す。この結果は、前節の実験結果（Table.4.2）とよく一致している。すなわち調整法により求められた音の強さと定位される音源位置との対応関係は、音源距離の設定範囲を十分広くとった場合の実験結果と一致した。したがってこの結果から、Table.4.2およびTable.4.3に示した比例係数（0.20～0.24）が、音源提示条件に依存しない値であることが明らかになったと言える。



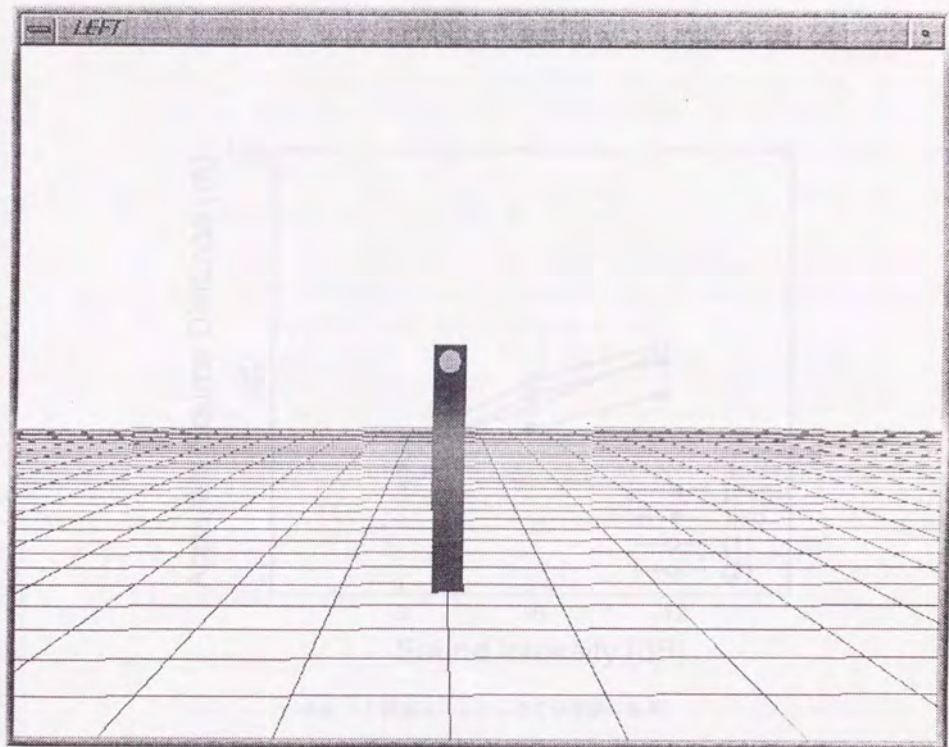


Fig. 4.6 HMD への提示画像（指標となる仮想音源）

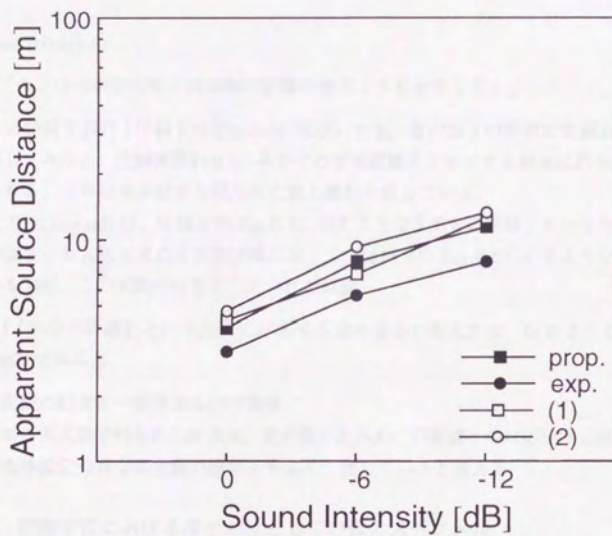


Fig. 4.7 調整法による音源定位実験の結果

## 4.5 考察

### 4.5.1 実験結果の評価

みかけの音源距離を2倍にするのに必要な音の強さの減衰比について、考える。今回の実験で得られた比例係数 (Table.4.2および Table.4.3) から、この減衰比を計算すると、約7.5 ~ 9.0dB となる。この値は、M.B.Gardnerの実験結果 (付録Eの Fig.E.1あるいは Fig.4.5) から求められる値 (> 20dB[28]) より小さく、音の強さの物理的な減衰比 6dB[46] より大きい。

G.von Békésy の

「みかけの距離の増大は実際の距離の増大よりも小さくなる。」

という実験結果 [47] (付録Eの Fig.E.3に図示) から、音の強さの物理的な減衰比に基づいて計算してみると、比例係数約0.2、みかけの音源距離を2倍にする減衰比約9dBという値が得られる。これは本実験から得られた値と概ね一致している。

またD.R.Begaultは、付録Eの Fig.E.4に示すような「半分の距離」という知覚に対応する音の強さの増大比を求める実験課題に対して、付録Eの Fig.E.5に示すような実験結果を得ている [48]。この実験の結果から出された結論

「『半分の距離』という知覚に対応する音の強さの増大比は、6dB よりむしろ9dB である。」

も、本実験の結果と一致するものである。

すなわち本実験で得られた結果は、音の強さとみかけの距離との対応付けに関する、本実験とは条件設定の異なる実験の結果ともよく一致していると言える。

### 4.5.2 距離定位における手がかりとしての音のスペクトル

本章では、音源距離定位における手がかりとして非常に重要と考えられる音の強さについて、その役割を定量的に把握した。本章の結果、音の強さのみを手がかりとした距離定位が可能であることがわかった。しかし距離に関する音源定位における手がかりとしては、Fig.3.1に図示したように、音の全体的な強さに加えてスペクトルも考えられる。付録Dにも概説したように、人間の聴覚情報処理過程では、入力された音刺激に対してまず蝸牛段階で周波数分析が行なわれる。したがってスペクトルを比較して距離知覚の手がかりとすることは、生理学的見地からも自然なことから考えられる。

文献 [46] には、物理現象として、音の強さが音源からの距離に反比例することの他に、音波の空気伝搬中の減衰率の周波数依存性が示されており、高周波数の領域では減衰率が大き



くなっている。また

「高周波数成分の減衰が、知覚される聴覚的な距離の相対的な手がかりになっている」

という A.D.Little らの報告もある [49]。また反響のある空間においては、反響成分の周波数依存性が距離定位の重要な要素であることを N.I.Durlach らが指摘している [50]。そこで第 6.2 節で紹介する仮想音源へのナビゲーションの研究 [51] においても、クロスオーバー周波数 1800Hz 以上の成分に対して 0.1dB/m の選択的減衰率が与えられている。

さらに伊福部らは、盲人の障害物知覚において、音の強さの減少に加えてスペクトルの変化が手がかりとなっている可能性を示唆している [52, 53]。

したがって、距離知覚に関する音の強さ以外の手がかりとして、音刺激のスペクトルを制御して、その役割を解明することも、ひとつの課題であると考えられる。

## 4.6 まとめ

本研究では、距離に関する音源定位において重要な役割をはたしている音の強さについて、その役割の定量的把握を目的として、仮想環境における音の強さと知覚される音源距離との対応関係についての基礎実験を行なった。その結果は、以下の通りである。

1. M.B.Gardner の実験を仮想環境に置き換えて追試し、同等の結果を得た。この結果から、仮想環境が実環境と同等の結果を与えることが保証され、また「音の強さが音源距離定位において極めて重要な手がかりである。」という結論が、他の手がかりのまったくない、より厳密な条件の下で検証された。
2. 音の強さとみかけの音源距離との関係が、指数関数の関係にある、すなわち両対数のグラフでは両者の関係が直線で表せることを確認した。
3. 音の強さとみかけの音源距離の両対数グラフにおける回帰直線の比例係数は、実験における音源距離の範囲と音の強さの範囲により、制約を受ける。制約のない条件での比例係数は 0.20 ~ 0.24 で、この値は制約のある M.B.Gardner の実験結果 (0.06) よりも大きい。物理的な音の減衰比から得られる値 (0.3) より小さい。
4. 仮想環境の利用により、調整法による実験が容易に構成できた。調整法により音源位置を被験者自身に指示させる定位実験において、表示された音源から選択する実験と同じ比例係数を得た。すなわち得られた比例係数は、実験条件によらない結果である。
5. 3, 4 で得られた実験結果は、G.von Békésy のみかけの距離と実際の距離との対応関係の実験結果や D.R.Begault の「半分の距離」という知覚に対応する音の強さの実験結果ともよく一致している。

## 第 5 章

# 聴空間における平行アレイと 等距離アレイ

本章では、前章と同じく第3章において構成した仮想環境提示システムを利用した、平行アレイおよび等距離アレイに関する実験システムの構成、方法および得られた結果について述べる。平行アレイおよび等距離アレイは、両眼視空間において主観的正中面平行線および主観的に正中面から等距離にある直線の概念を表わすものとしてヘルムホルツのホロプタ同様によく知られており、同様の現象が聴空間においても存在するかどうかを確認することが本章における実験の目的である。

### 5.1 研究の背景

両眼視空間において、主観的正中面平行線および主観的に正中面から等距離にある直線の概念を表わすものとして、平行アレイと等距離アレイが、第2章で述べたヘルムホルツのホロプタ同様によく知られている [54, 55, 56]。平行アレイとは、光点の2系列を水平面上の正中面とみかけ上平行で互いに対称な位置に並べたときに得られる視知覚的直線で、物理的には互いに平行な直線になるはずのものが、実際には観察者からの距離に依存する曲線になるものである。また等距離アレイとは、光点の2系列を水平面上の正中面からみかけ上等距離の互いに対称な位置に並べたときに得られる視知覚的直線で、物理的には互いに平行な直線になるはずのものが、実際には観察者からの距離に依存する曲線になるものである。視知覚実験では、両系列それぞれで最も観察者から遠方にある光点を出発点として観察者の手前側に主観的直線をひく課題を設定しており、その結果は通常、Fig.5.1に示すように、平行アレイ (p) が等距離アレイ (d) の内側に位置することが多いといわれてきた [57]。

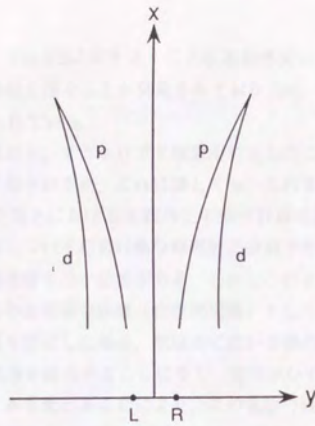


Fig. 5.1 視空間における平行アレイと等距離アレイ

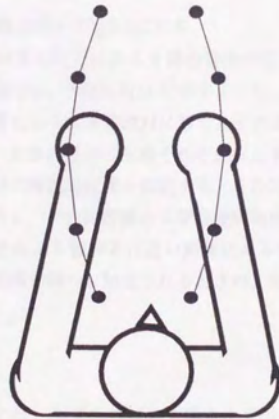


Fig. 5.2 触空間におけるアレイ (文献 [25] より引用)



また触空間においても、Fig.5.2に示すように上肢運動感覚に基づく主観的正中面平行線が正中面に対して凹型の曲線を描くことが発見されており [58]、視空間におけるアレイに相当するものであると考えられている。

感覚モダリティの類似性から、またホロプロタ現象が存在したことから考えて、聴覚においても同様の現象の存在が予測されるが、これに関しても、これまでそれを確認した研究は行なわれていなかった。聴空間上における主観的正中面平行線の測定には、Fig.5.3に概念を示すように、音源を正中面について左右対称な物理的正中面平行線の近傍上に複数個設置して、遠近両方の音源から順次音を出す必要がある。しかしこのような実験システムを実際に構成しようとする、左右の音源間の距離（音源間間隔）として視覚や触覚におけるアレイ実験の構成と同程度の距離を想定した場合、被験者に近い音源の物理的存在が、より遠方の音源からの音波の正常な到達を妨害することになり、実現がむずかしい。そこで第3章で構成した仮想環境提示システムを用いることにより、この実験の仮想環境における構成を実現し、平行アレイおよび等距離アレイの測定実験を行なうことにした。

## 5.2 実験システムの構成

### システム概念

構成する実験システムの概念図を Fig.5.4に示す。

被験者の正中面に対して対称な位置にある2個の音源の組を、以下“音源対”と称する。平行アレイに関する心理実験では、Fig.5.4(a)に示すように、一定の距離および音源間間隔で正中面に対して対称な位置にある基準音源対に対し、それより被験者に近い距離にある音源対（比較する音源対）が、基準音源対と左右それぞれに正中面平行線を形成すると知覚されるとき、比較する音源対の物理的位置を測定する。また等距離アレイに関する心理実験では、Fig.5.4(b)に示すように、一定の距離および音源間間隔で正中面に対して対称な位置にある基準音源対に対し、それより被験者に近い距離にある音源対（比較する音源対）が、基準音源対と等しい音源間間隔を持つと知覚されるとき、比較する音源対の物理的位置を測定する。

### 視覚情報の提示

HMDを装着した被験者には、両耳の外耳道を通る水平面上、正中面について対称な位置にある2個の音源指標の画像を、基準音源対の画像として提示した。表示画面の一例を Fig.5.5に示す。

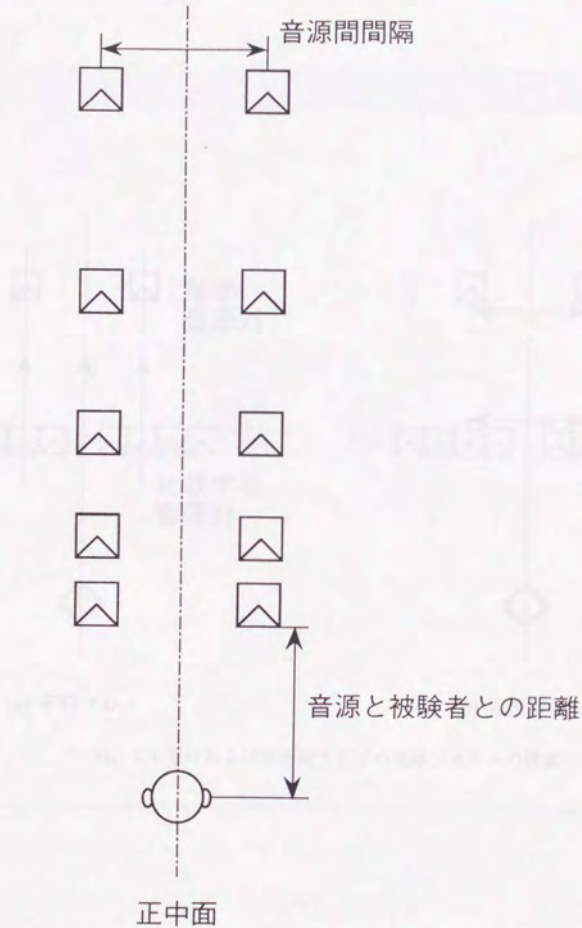


Fig. 5.3 聴覚アレイ実験に必要なセットアップ

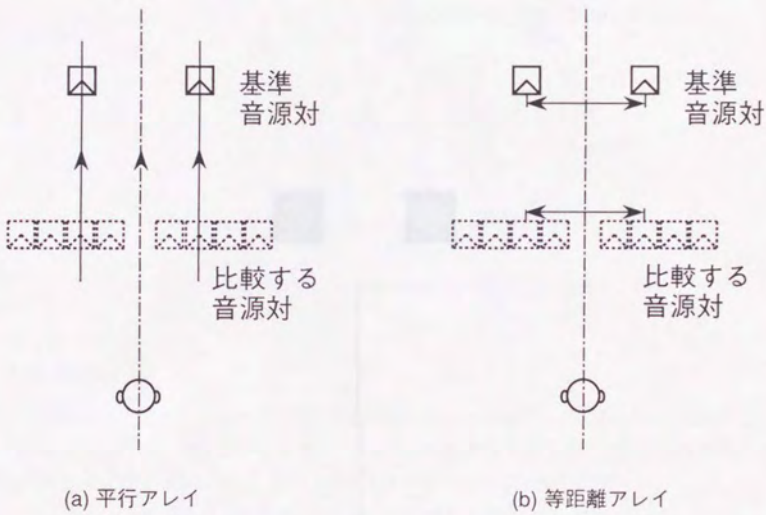


Fig. 5.4 平行および等距離アレイの実験システムの構成



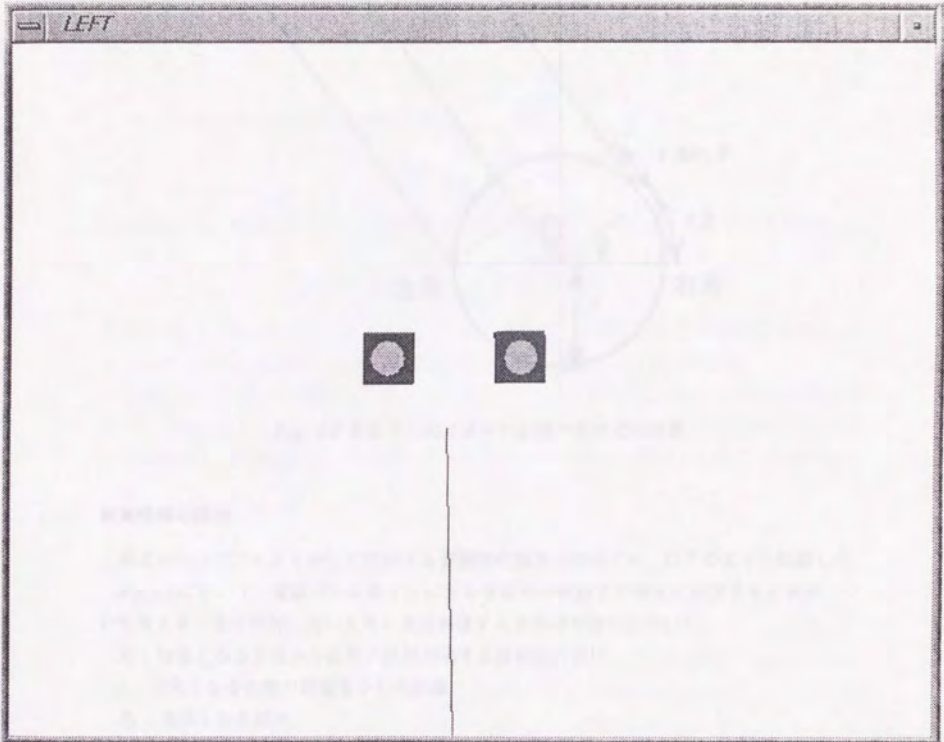


Fig. 5.5 HMD への提示画像

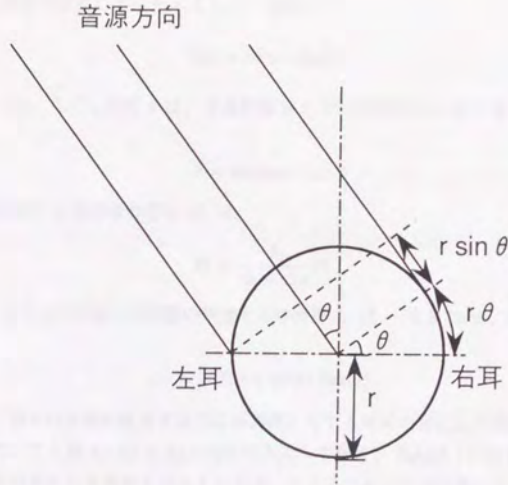


Fig. 5.6 音源から両耳までの距離の差の近似計算

## 聴覚情報の提示

両耳にヘッドフォンを介して提示する音刺激の強さと時間とを、以下のように制御した。  
Fig.5.5において、被験者から見て左にある音源から被験者の両耳に到達する音刺激について考える。まず音源に近い左耳に直接到達する音刺激の音圧について、

$P_l$  : 対象となる音源から左耳に直接到達する音刺激の音圧

$d$  : 対象となる音源の被験者からの距離

$P_0$  : 基準となる音圧

$d_0$  : 基準となる音圧が左耳に直接到達する音刺激の音圧となるような音源として、 $P_l$  が距離に反比例することから [27, 46],

$$P_l = \frac{d_0}{d} P_0 \quad (5.1)$$

と設定する。

これに対し、音源から遠い右耳に到達する音刺激は Fig.5.6に示すように被験者の頭部のまわりを回って右耳に到達する。したがって音源から右耳までの距離と左耳までの距離との

差  $\Delta d$  は、被験者の頭部の半径を  $r$  として、近似式

$$\Delta d = r\theta + r \sin \theta \quad (5.2)$$

で与えられる [40]。ただし角度  $\theta$  は、音源距離  $y$  と音源間隔の  $1/2$  の値  $x$  から次式で計算される。

$$\theta = \arctan(x/y) \quad (5.3)$$

そこで右耳に到達する音刺激の音圧  $P_r$  は、

$$P_r = \frac{d_0}{d_0 + \Delta d} P_l \quad (5.4)$$

と計算できる。また左右の耳に音刺激の到達する時間差  $\Delta t$  は、 $r$  を  $8.75\text{cm}$ 、音速を  $340\text{m/sec}$  として、

$$\Delta t = 257(\theta + \sin\theta) [\mu\text{sec}] \quad (5.5)$$

と計算できる。種々の音源距離および音源間隔に対する両耳の音圧比や時間差 ( $48\text{kHz}$  におけるデータのシフト数  $48000 \times \Delta t/1000$  で表示) の例を、Table 5.1 に示す。

音源対の左音源からの音刺激を想定するとき、ヘッドフォンの右耳側に与えられる聴覚信号は左耳側に与えられる聴覚信号に対して Table 5.1 に示すような音圧比や時間差をもつように制御する。右音源からの音刺激については、左右の音圧比と時間差を逆に両耳に与える。

## 5.3 等間隔音源対の主観的位置の測定実験

### 5.3.1 実験の背景

アレイの測定実験に先立ち、音源対を、被験者の正中面に関して左右対称で両者の音源間隔を常に一定に保持したまま、被験者からの距離の異なる種々の位置に置き、それがどのように知覚されるかを調べる等間隔音源対の主観的位置の測定実験を行なうことにした。実験の構成の概念図を Fig. 5.7 に示す。

物理的に常に一定の間隔で正中面について対称な位置にある音源対に対して、知覚される主観的音源間隔が常に一定ではなく被験者から両音源までの距離に依存すれば、逆に主観的音源間隔の方を一定に保つような物理的音源間隔は被験者からの両音源までの距離に依存することになる。これはすなわち、等距離アレイの距離依存性を示すことと等価である。また「物理的に常に一定の間隔で正中面について対称な位置にある」ということは「物理的に正中面に平行な位置にある」ということと同義であるので、この実験結果は同時に平行ア



Table 5.1 種々の音源距離および音源間間隔に対する音圧比と時間差

Distance[m]	4.0				
Inner distance[m]	0.0	0.4	0.8	1.2	1.6
Sound pressure ratio	1.0	0.912	0.832	0.760	0.696
Time difference	0	1	2	4	5
Distance[m]	$4\sqrt{2}$				
Inner distance[m]	0.0	0.4	0.8	1.2	1.6
Sound pressure ratio	1.0	0.937	0.878	0.823	0.772
Time difference	0	1	2	3	3
Distance[m]	8.0				
Inner distance[m]	0.0	0.4	0.8	1.2	1.6
Sound pressure ratio	1.0	0.955	0.912	0.871	0.832
Time difference	0	1	1	2	2
Distance[m]	$8\sqrt{2}$				
Inner distance[m]	0.0	0.4	0.8	1.2	1.6
Sound pressure ratio	1.0	0.968	0.937	0.907	0.878
Time difference	0	0	1	1	2

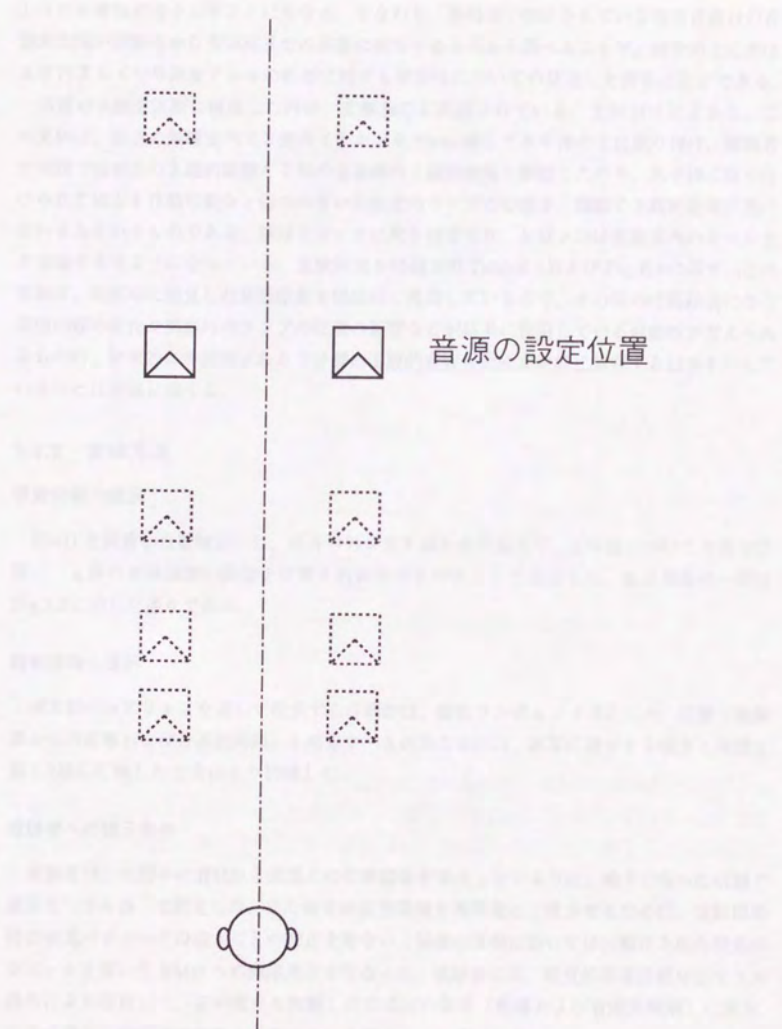


Fig. 5.7 等間隔音源対の測定実験の構成

レイの距離依存性を示すことにもなる。すなわち、等間隔と想定されている仮想音源対の音源間隔が被験者から音源対までの距離に依存するか否かを調べることで、聴空間上における平行アレイや等距離アレイの距離に対する依存性についての見通しを得ることができる。

同種の実験を実際に構成した例が、文献[47]に記載されている。文献[41]によると、この実験は、暗室の無響室内で2個のイヤホンに70cm離して水平棒の上に取り付け、被験者が閉眼で音刺激の主観的距離と2個の音源間の主観的間隔を観察したのち、水平棒に取り付けられて棒上を移動可能な2個の小さい白色光のランプの位置を、開眼で主観的音源位置に合わせるというものである。棒はトロッキに取り付けられ、トロッキは実験室内のレール上を移動できるようになっている。実験結果を付録EのTable E.1およびFig. E.6に示す。この実験は、閉眼時に知覚した音源位置を開眼時に再現している点で、その間の時間経過に伴う記憶内容の変化や開眼時のランプの位置の影響などが結果に作用している可能性が考えられるものの、物理的に等間隔にある2音源の主観的音源間隔が距離に依存する結果を示していることは考慮に値する。

### 5.3.2 実験方法

#### 視覚情報の提示

HMDを装着した被験者には、両耳の外耳道を通る水平面上で、正中面について対称な位置に、2個の音源指標の画像を位置を制御すべき対象として提示した。表示画面の一例はFig. 5.5に示した通りである。

#### 聴覚情報の提示

両耳にヘッドフォンを通して提示する音刺激は、疑似ランダムノイズとした。位置（被験者からの距離および音源間隔）を同定すべき仮想音源対は、両耳に提示する強さと時間を第5.2節に記載した方法により制御した。

#### 被験者への提示条件

被験者は、実験中にHMDと頭部との位置関係が変化しないように、椅子に座った状態で頭部を“はみ台”で固定した。また視覚的仮想環境を実環境と一致させるために、実験開始時に視覚パラメータの個人ごとの較正を行ない、以後の実験においては、較正された視覚パラメータを用いてHMDへの画像提示を行なった。被験者には、視覚的音源指標対をマウス操作により移動して、音刺激から判断した音源対の位置（距離および音源間隔）に置き、位置が確定した時点でマウスの左ボタンを押すように指示した。



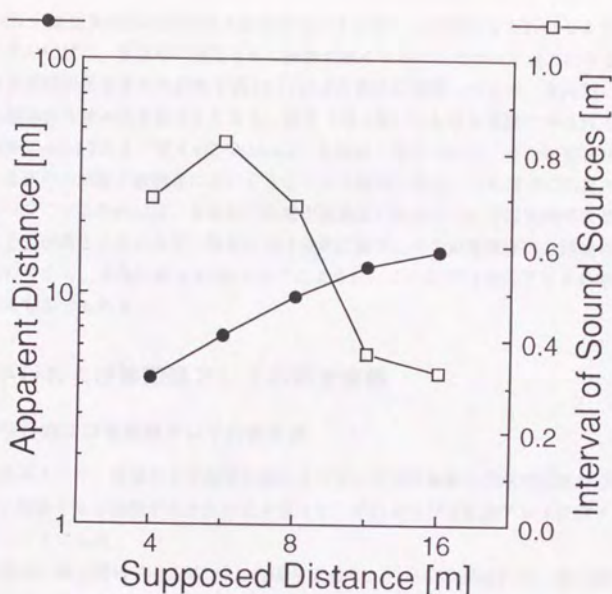


Fig. 5.8 等間隔音源対の測定実験結果

#### 試行の構成

本実験では、音源対の音源間隔の設定値を 0.2m, 0.4m または 0.8m とし、また音源対の位置の設定範囲を 4 ~ 16m とした。一試行中における音源対の音源間隔は一定とし、ある特定の距離にある音源対からの音刺激を右音源、左音源の順に持続時間 500msec., 音間隔 500msec. で順次提示し、同じ音刺激の組を、被験者が音源対の位置を視覚的指標対で指示して確定するまで繰り返した。被験者の応答を受けて、別の距離にある音源対からの音刺激の提示に移った。提示する音刺激の音源対設定距離の順序は、直前との組合せが、すべての組合せについて一試行中に同数回現われるようにした。一試行中に設定する音源対の距離は、5 種類 (4,  $4\sqrt{2}$ , 8,  $8\sqrt{2}$ , 16m) とした。

#### 5.3.3 実験結果

Fig.5.8に実験結果の代表的な例（被験者 D）を示す。この図からもわかるように、音源対のみかけの位置は、音源対の想定された距離が遠くなるにしたがって遠方になる。両者の関係は、音源対の想定された距離を式 (5.1) により音圧に変換した上で、両対数における回帰式の比例係数を求めると約 0.2 となり、前章（第 4 章）における実験で得られた実験結果（第 4.3.2 節 Table 4.2 および第 4.4 節 Table 4.3）と概ね一致している。また知覚される音源間隔は、音源対の距離が被験者に近いとき広くなる傾向にある。これは逆に知覚される音源間隔を一定にするためには、音源対の距離が被験者に近いところでは実際の音源間隔を狭くする必要があることになり、視覚における等距離アレイの距離依存性と同様の傾向を示唆するものである。さらに第 5.3.1 節で述べたように、この結果は平行アレイの距離依存性を示唆するものでもある。

## 5.4 平行および等距離アレイの測定実験

### 5.4.1 平行および等距離アレイの測定法

前節の結果として、聴覚的正中面平行線および正中面等距離線の形状が音源対の被験者からの距離に依存する可能性が示されたのを受けて、平行および等距離アレイに関する測定実験を行なうことにした。

実験の構成の概念図は Fig.5.4 に示した通りである。アレイの測定には、第 2 章で聴覚ホロボタの測定に用いた恒常法（第 2.3.1 節参照）を用いた。恒常法の利点は第 2.3.1 節に記述した通りであり、アレイの形状が被験者の意図に左右されないため、物理的な形状との差異の有無を検出するのに適当と考えられる。

### 5.4.2 実験方法

#### 視覚情報の提示

HMD を装着した被験者には、両耳の外耳道を通る水平面上、正中面について対称な位置にある 2 個の音源指標の画像を基準音源対として提示した。表示画面の一例は Fig.5.5 に示した通りである。

#### 聴覚情報の提示

両耳にヘッドフォンを通して提示する音刺激は、疑似ランダムノイズとした。仮想音源を基準音源対と比較すべき音源対の計 4 個とし、比較すべき音源対は、基準音源対よりも被験

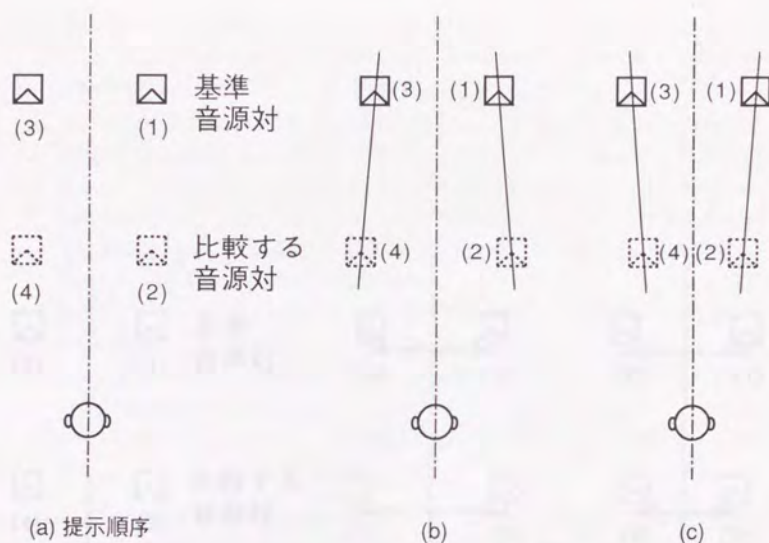


Fig. 5.9 平行アレイ測定実験における想定音源の提示順序と知覚される音源位置関係

者に近い距離にあり、種々の音源間隔を持つことを想定した。両耳に提示する強さと時間とは、前節と同様第5.2節に記載した方法により制御した。

#### 被験者への提示条件

被験者は、これまでの実験同様、椅子に座った状態で頭部を“はみ台”で固定した。また実験開始時に視覚パラメータの個人ごとの校正を行ない、校正された視覚パラメータを用いてHMDへの画像提示を行なった。被験者には、基準音源対の位置の指示には視覚的音源指標対のマウス操作とマウスの左ボタンによる確定という方法で応答させ、比較すべき音源対の音源間隔の広狭の応答にはマウスの左右両ボタンを用いるよう指示した。

#### 試行の構成

1. まず基準となる仮想音源対を、左右対称な物理的正中面平行線上で両耳から一定の距離にある位置に想定し、基準音源対を音源と想定した音刺激を、右、左の順に持続時



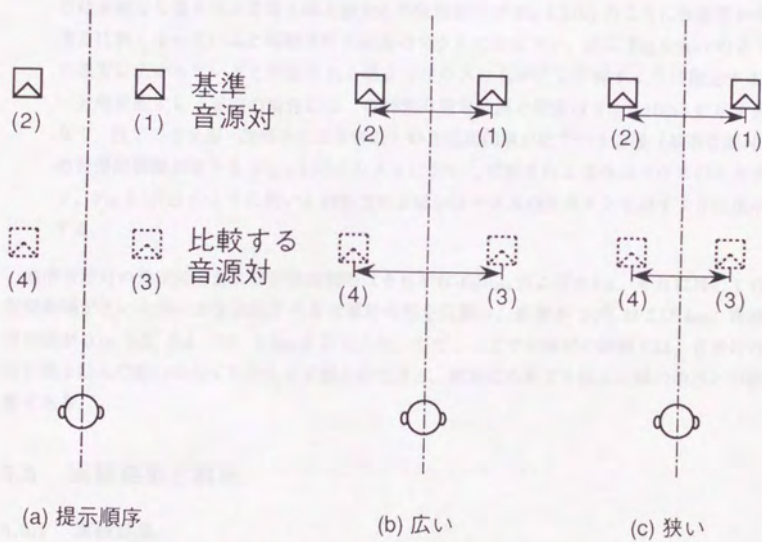


Fig. 5.10 等距離アレイ測定実験における想定音源の提示順序と知覚される音源位置関係

間 500msec., 音間隔 500msec. で順次繰り返して提示する。被験者にはそれが知覚される位置に視覚的音源指標対を移動させ、基準音源対の主観的位置を決定させる。以後この視覚的音源指標対の位置は不変である。

2. つぎに、基準音源対と比較すべき音源対の計 4 個の仮想音源からの両耳への音刺激を、持続時間 500msec., 音間隔を順に 500msec., 2500msec, 500msec として連続的に提示し、それを繰り返して、被験者に左右のマウスボタンで応答させる。平行アレイ実験の場合には、音刺激の想定音源の順序は Fig.5.9(a) に示す通りで、前半の 2 音源を結ぶ線分と後半の 2 音源を結ぶ線分との位置関係が Fig.5.9(b) のように被験者から遠方に狭くなっていると判断される場合はマウスの左ボタン、逆に Fig.5.9(c) のように遠方に広がっていると判断される場合はマウスの右ボタンを押すように指示する。一方等距離アレイ実験の場合には、音刺激の想定音源の順序は Fig.5.10(a) に示す通りで、後半の 2 音源（比較される音源対）の音源間隔が前半の 2 音源（基準音源対）の音源間隔がよりも Fig.5.10(b) のように広いと判断される場合はマウスの右ボタン、Fig.5.10(c) のように狭いと判断される場合はマウスの左ボタンを押すように指示する。

基準音源対の想定距離および音源間隔はそれぞれ  $4\sqrt{2}\text{m}$  および  $0.4\text{m}$ 、それに対して音源間隔が広い狭いかを比較すべき音源対の想定位置は、距離が  $2\sqrt{2}$  および  $4\text{m}$ 、音源間隔が  $0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8\text{m}$  と設定した。ただしここで音源対の距離とは、音源対の両音源を結んだ線の中点すなわち正中面との交点と、被験者の両耳を結んだ線の中点との距離である。

## 5.5 実験結果と解析

### 5.5.1 実験結果

Fig.5.11 に、平行アレイ測定実験の実験結果として得られた精神測定関数の代表的な例を示す。ここで横軸は比較すべき音源対のそれぞれの正中面からの距離（音源間隔の  $1/2$ ）、縦軸は Fig.5.9(b) のように被験者側に広がっていると判断された割合を示している。

### 5.5.2 実験結果の解析

Fig.5.11 のそれぞれの精神測定関数について、第 2 章と同様にプロビット法を適用して比較すべき音源対のそれぞれの正中面からの距離の主観的等価点すなわち主観的音源間隔の  $1/2$  の値を推定した結果を、Fig.5.12 に示す。ここで実線は被験者と基準音源対との距離が

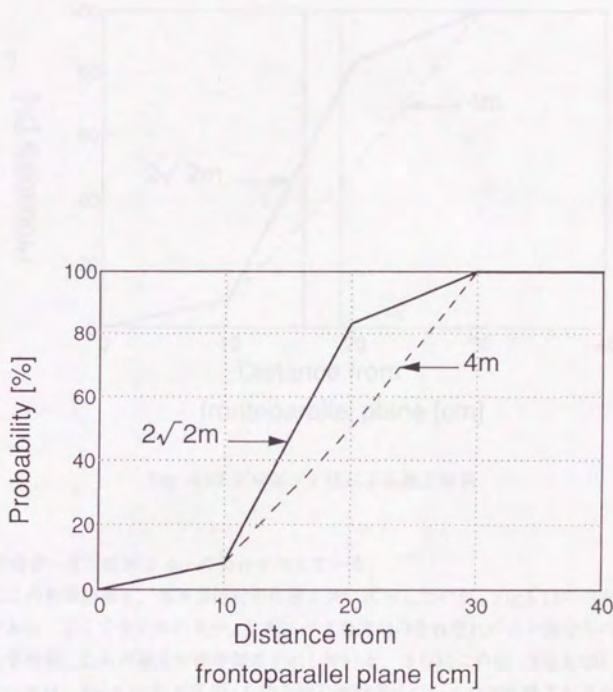


Fig. 5.11 精神測定関数



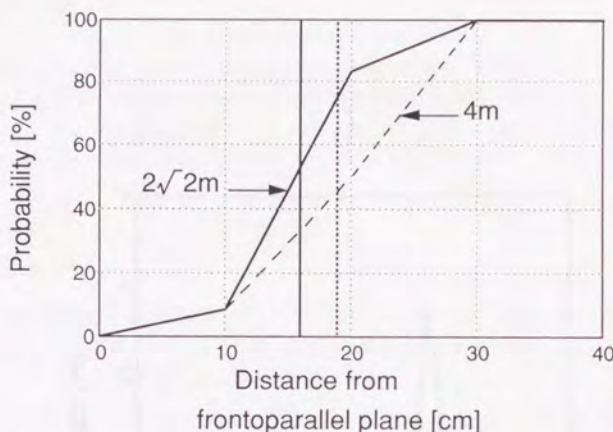


Fig. 5.12 プロビット法による推定結果

$2\sqrt{2}m$  の場合、また破線は  $4m$  の場合を示している。

さらにこの解析結果を、基準音源対の位置と共に図示したのが、Fig.5.13の白丸で示したデータである。ここで中央部の点々が、比較すべき音源対のそれぞれの正中面からの距離の推定された平均値、左右の線分が標準偏差を示している。さらにこの図（Fig.5.13）の黒丸で示したデータは、Fig.5.11および Fig.5.12と同じ被験者についての等距離アレイの測定実験の結果を同様に解析した結果である。この図から、平行アレイが等距離アレイよりも正中面よりにあることがわかる。

## 5.6 考察

前節に述べた聴空間における平行および等距離アレイの測定実験では、平行アレイが等距離アレイよりも正中面よりにあるという結果を得た。これは視空間や触空間における平行アレイと等距離アレイとの関係と同じ傾向である [59, 25]。

また今回の実験においては、平行アレイにおける音源間間隔が距離に関して単調増加しているのに対し、等距離アレイの場合には音源間間隔が中間の距離において極大値をとる（すなわち正中面に対して凹となる）傾向が、いずれの試行においても確認された。視空間の場

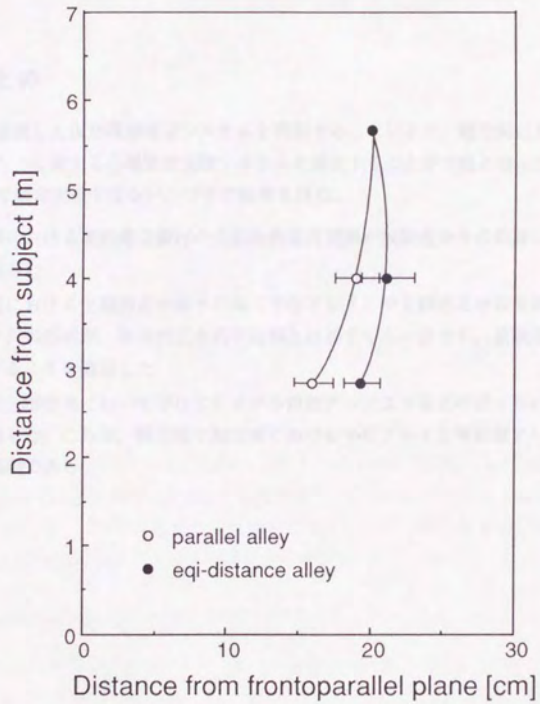


Fig. 5.13 解析結果

合、文献 [20] には平行アレイも等距離アレイも共におおむね単調増加している図が掲げられているが、文献 [57] や文献 [59] には等距離アレイの単調増加していない図が示されており、実験条件によって形状の傾向が異なっているようである。また触空間の場合には、平行アレイの正中面からの距離が被験者からの距離に関してむしろ単調に減少している場合もある [58]。したがって、第 2 章のホロボタ実験の場合には聴覚ホロボタの形状は触覚ホロボタより視覚ホロボタに近いと結論できたが、アレイの場合にはこのような簡単な比較はむずかしい。

## 5.7 まとめ

第 3 章で構成した仮想環境提示システムを利用することにより、聴空間における平行および等距離アレイに関する心理物理実験システムを構成することが可能となった。構成した実験システムで測定実験を行ない、つぎの結果を得た。

1. 聴空間における等距離音源対の主観的音源間間隔が被験者からの距離に依存することを確認した。
2. 聴空間における主観的正中面平行線（平行アレイ）や主観的正中面等距離線（等距離アレイ）の形状が、物理的正中面平行線とは必ずしも一致せず、被験者からの距離に依存することを確認した。
3. さらに、聴空間において平行アレイが等距離アレイよりも正中面よりに存在することを確認した。これは、視空間や触空間における平行アレイと等距離アレイの関係と同様の傾向である。



## 第 6 章

### 考察

本章では、以上の各章において述べた研究内容と関連が深く考慮すべき以下の各項について、それぞれに考察を加える。

- ホロプタやアレイの距離依存性を説明する心理空間モデル
- 空間知覚を利用するインタフェースへの応用

#### 6.1 ホロプタやアレイの距離依存性を説明する心理空間モデル

本研究においては、まず第 2 章で実空間における音源定位実験を行ない聴覚ホロプタ（聴覚的な主観的額面平行線）の距離依存性を明らかにした。さらに第 5 章では、仮想環境を利用することで測定が可能となった聴空間における平行および等距離アレイ（聴覚的な主観的正中面平行線および主観的等距離線）の距離依存性をも明らかにし、合わせて聴空間の構造を示す知見とした。ここでは視空間や触空間について提案されている数学モデルを取り上げ、それらとの関連における本研究の位置付けを示す。

##### 6.1.1 Luneberg の幾何学的モデル

両眼視空間については、ホロプタやアレイの距離依存性を説明するモデルとして Luneberg のモデルがよく知られている [20]。このモデルは、両眼視空間を非ユークリッドな計量空間で近似したモデルであり、物理的な空間と心理的な両眼視空間における座標系間の変数の対応関係を仮定して、ホロプタや平行および距離アレイの近似式が導出されている（座標系間の変数の対応関係の仮定や、ホロプタや平行および距離アレイの近似式については、付録 B.1 節で概略を説明している）。

Luneberg のモデルは、それまでの研究者の視空間に関する実験結果を統一的な幾何学的理論のもとに2個の個人定数  $K$  (視空間の曲率に関する定数) および  $\sigma$  (奥行知覚に関する定数) を用いて整理したもので、実験結果の良い近似となっている。すなわちこのモデルでは、視空間におけるホロプタの形状、すなわち Fig.2.1 に示したように、被験者から近い距離では被験者に対して凹、遠い距離では被験者に対して凸となる形状や、Fig.5.1 に示したように平行アレイが等距離アレイよりも正中面よりになることが、適切にパラメータの値を選ぶことによって現象論的に説明できる。たとえば後者(視空間における実験結果で、平行アレイが等距離アレイよりも正中面よりになっていること)の例は付録B.2節に示す通りで、この結果から、視空間は双曲幾何学の成り立つ Lobačevskii-Bolyai の空間であると考えられる。

上述した視空間におけるホロプタの形状や平行アレイと等距離アレイとの関係については、聴空間においても同様であることが、本論文の第2章および第5章において確認されている。したがって本論文に述べた結果から、聴空間についても、視空間と同様に Luneberg のモデルで双曲型の非ユークリッドな計量空間 (Lobačevskii-Bolyai の空間) として記述できる構造を有していると考えられる。

### 6.1.2 スカラ加算モデル

Luneberg のモデルは知覚の結果としての心理物理現象を少数のパラメータで記述するための幾何学モデルであり、たとえば個人定数の違いが何に起因するのかなどの現象の機序についての知見を得るものとはなっていなかった。

これに対し、ホロプタやアレイの距離依存性を、後天的な空間位置知覚機能の獲得過程における学習の限界によって生じたずれとして説明する神経回路網モデルが、前田らにより提案されている「スカラ加算モデル」である [60, 61] (スカラ加算モデルの概略を付録Cに記す)。スカラ加算モデルは、生理学的知見による制約を仮定したスカラ学習則を持つ神経回路網モデルであり、視空間と触空間のホロプタやアレイの距離依存性を、その知覚の手がかりとなっている生体内情報を変数とすることにより統一的に説明している。たとえば視空間におけるホロプタの物理空間における額面平行線とのずれは、両眼による注視を行なっている際の輻輳角および視線方向角を空間知覚に用いている生体内情報として説明されている。

本論文においても、第2章に述べた聴覚ホロプタを測定するための距離に関する音源定位実験において、音の強さが重要な手がかりとなっていることを、第4章において確認している。また第5章における仮想環境下の平行および等距離アレイの測定実験においては、両耳に到達する音刺激の強さと両耳強度差および両耳到達時間差のみを制御して、これらが手がかりとする平行および等距離アレイの距離依存性を確認した。

付録Dに概略を示したように、現在まだ音源定位の神経生理的解明は研究途上にあり、これらの手がかりが脳内でどのように処理されているのかは未知の部分が多い[62, 63, 64]。したがって、現段階で空間知覚に用いている生体内情報が何であるかは明らかでない。そこでここでは、第2章の音源定位実験において中央スピーカの位置を判断する手がかりとなっていたと考えられる情報として、音の強さと両耳時間差を取り上げ、これを生体内情報の代わりに用いて聴覚ホロプロタを生じる空間知覚モデルについて考えてみることにする。

すなわち聴覚ホロプロタを生じる空間知覚モデルとしてスカラ加算モデルを想定し、このモデルへの入力信号として、音の強さおよび両耳時間差の2変数を考える。視空間においてホロプロタを知覚するときのスカラ加算モデル(付録の式C.4)が、輻輳角一定の曲線 Vieth-Müller Circle を視線方向角の関数で加算補正する形となっていることから、音の強さ( $k$ )と両耳時間差( $\Delta t$ )の関数との和

$$\hat{H}(k, \Delta t) = k + \hat{H}_e(\Delta t) \quad (6.1)$$

として、聴覚ホロプロタを知覚するときのスカラ加算モデルを想定する。

ここで音の強さ $k$ は、文献[65]に基づき、左耳に到達する音の強さ $I_A$ と右耳に到達する音の強さ $I_B$ との積

$$k = I_A \cdot I_B \quad (6.2)$$

とする。これは、両耳の中点を原点とし、両耳を通る直線を $x$ 軸、これに直交する水平線を $y$ 軸にとった物理空間上の座標系において、音源の強さを $I_S$ 、原点から両耳までの各距離を $a$ として、次式で表現される[65]。

$$(x^2 + y^2 + a^2)^2 = 4a^2x^2 + \frac{I_S^2}{k} \quad (6.3)$$

また両耳時間差については、文献[65]に記載されている位相差の式より次式が求められる。

$$\Delta t = \frac{\sqrt{(x+a)^2 + y^2} - \sqrt{(x-a)^2 + y^2}}{v} \quad (6.4)$$

一方、第5章で利用した両耳到達時間差の式(5.5)は、式(5.3)を用い、 $v$ を音速とすれば次式になる。

$$\Delta t = \frac{a}{v} \left( \arctan \left( \frac{x}{y} \right) + \sin \left( \arctan \left( \frac{x}{y} \right) \right) \right) \quad (6.5)$$

$a = 8[\text{cm}]$  および  $v = 340[\text{m/sec}]$  における式(6.4)と式(6.5)のグラフをそれぞれFig.6.1およびFig.6.2に示す。両式の値は、第2章の音源定位実験において音源を置いた範囲( $x = \pm 17\text{cm}$ ,  $y = 1.5, 2.0, 2.5\text{m}$ )でおおむね一致している。そこでここでは、解析的に扱える式(6.4)を両耳時間差の式として用いることにする。



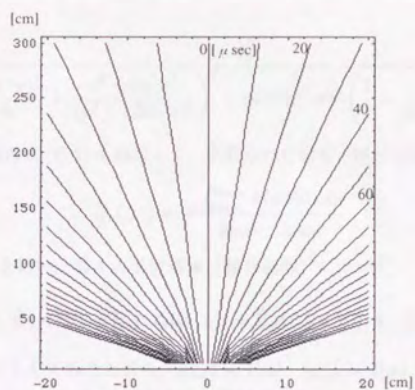


Fig. 6.1 両耳時間差一定 (1)

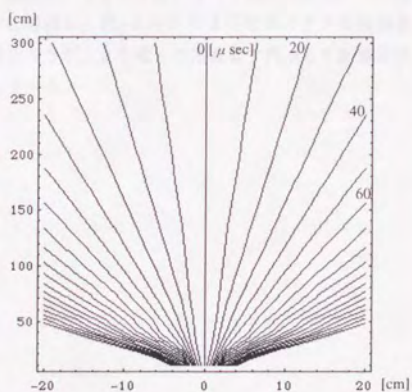


Fig. 6.2 両耳時間差一定 (2)

式 (6.3) および式 (6.4) を用いて、前額平行線 ( $y = \text{一定}$ ) における  $k$  を  $\Delta t$  で記述すると、

$$k(y, \Delta t) = \frac{I_S^2}{\left( \frac{(\Delta t \cdot v)^2}{4} + \frac{a^2 + 4y^2 a^2}{4a^2 - (\Delta t \cdot v)^2} \right)^2 - 4a^2 (\Delta t \cdot v)^2 \left( \frac{1}{4} + \frac{y^2}{4a^2 - (\Delta t \cdot v)^2} \right)} \quad (6.6)$$

となる。そこで付録の式 (C.3) を利用して、学習点の分布を一樣と仮定すると、次式を得る。

$$\hat{H}_c(\Delta t) = - \frac{\int_{y_{\min}}^{y_{\max}} k(y, \Delta t) dy}{y_{\max} - y_{\min}} \quad (6.7)$$

式 (6.4), (6.6), (6.7) を用い、種々の学習領域 (積分範囲) について

$$\hat{H}(k, \Delta t) = k(y, \Delta t(x, y)) + \hat{H}_c(\Delta t(x, y)) = \text{一定} \quad (6.8)$$

となる曲線をプロットしてみたところ、 $y_{\min} = 1[\text{m}]$ ,  $y_{\max} = 4[\text{m}]$  で Fig.6.3(a),  $y_{\min} = 1[\text{m}]$ ,  $y_{\max} = 10[\text{m}]$  で Fig.6.3(b) のような形状を得た。(ここで両図においては、 $x = \pm 17[\text{cm}]$ ,  $y = 1.5, 2.0, 2.5[\text{m}]$  の各点を通る曲線すなわち第2章において両端に置かれたスピーカの位置を通る曲線を示している。)

この2種類の形状は、第2章 Fig.2.11(a)(b) の形状とそれぞれ定性的に一致するものである。したがってこの結果は、第2章 Fig.2.11の2種類のホロプタの違いが、被験者の規範関数の学習領域の違いに起因し、Fig.6.3(b) のようなホロプタの被験者よりも Fig.6.3(a) のようなホロプタの被験者の方が、より遠くの情報まで利用して距離定位を行なっていると考えられることを示唆している。

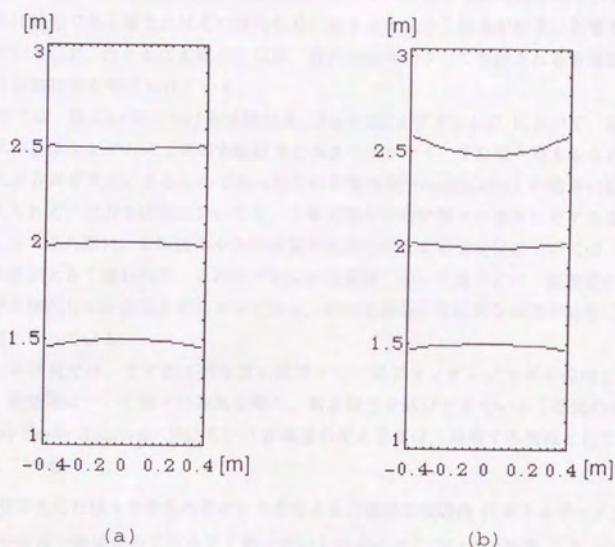


Fig. 6.3 スカラ加算モデルから得られるホロプタ ((a) 学習領域 1 ~ 10m, (b) 学習領域 1 ~ 4m)



## 6.2 空間知覚を利用するインタフェースへの応用

### 6.2.1 聴覚信号の親密度の影響

空間知覚を利用するインタフェースへの本研究の応用に際して、考慮すべき問題のひとつに、聴覚信号の親密度の影響がある。

本論文に述べた研究においては、いずれの実験にも聴覚信号として音声（英文）または疑似ランダムノイズを用いた。しかし音源定位において、聴覚信号が既知であるか未知であるか、さらに既知である場合にはその聴覚信号に対する先見的な知識が結果に影響を及ぼすといわれている [17]。たとえば文献 [45] には、音声の種類によって判断される音源距離が異なるという実験結果が掲げられている。

本研究では、第 4.3.1 節における実験結果 (Fig.4.3 および Fig.4.4) において、音声による実験結果が疑似ランダムノイズの実験結果とあまり差がなく、また個人差もみられなかったが、これは音声は英文によるものであったための親密度 (familiarity) の低さに起因するものと考えられる。実際本研究においても、予備実験の段階で種々の音声に対する音源距離定位を行なってみた際に、日本語の小さい音量の女声に対する音源定位については、被験者による個人差が大きく現われた。その中で定位が近距離であった場合には、被験者が音声をささやき声と解釈していたことがわかっており、親密度が高く先見的な知識が結果に影響を及ぼした例となっている。

しかし本研究では、まず基本的な音の種類として疑似ランダムノイズを採用して実験を行ない、聴空間について種々の知見を得た。最近脚光を浴びてきている「聴覚の情景分析」(Auditory Scene Analysis) [66] という音環境の捉え方では、利用する情報として次の 2 種類を考えている。

1. 外界で生じた様々な事象の手がかりを与える音響的な規則性（「ボトムアップ」の情報）
2. 声や楽器や機械音のようなよく知っている特定の音についての知識（「トップダウン」の情報）

そしてその提唱者である A.S.Bregman は、「ボトムアップ」の音響情報を利用する過程の方がより基礎的つまり生得的であり、用いられる規則性は広範な種類の音に対して当てはまると考え、これらの基礎的な過程に焦点を当てて研究を行なっている [67]。本研究で疑似ランダムノイズを用いたのも、これと同じ考え方によるものである。

一方、親密度が高い場合の先見的な知識は上記の「トップダウン」の情報に相当する。したがって、仮想環境創製への応用に際し、具体的な音源からの音刺激を創製するに当たっては、親密度による定位の違いは、個人差も含めて十分考慮に入れるべき問題であると考えられる。

## 6.2.2 空間知覚を利用するインタフェースにおける本研究の役割

本研究で得た結果は、いずれも人工現実感あるいはトレイグジスタンスをはじめとする空間知覚利用型インタフェースにおいて、聴覚的に空間内の位置情報を提示する際の設計・評価指針として有用な知見であると考えられる。

人工現実感における聴覚的空間位置情報生成法としては、Convolvotron というシステムで用いられている方法がよく知られている。Convolvotron は、松下電工ショールームのバーチャルキッチンにおける音源位置の提示にも用いられているシステムである [68]。この方法は、付録 E の Fig.E.7 に示すように、種々の方向におかれた音源について両耳に到達する音の伝達関数 (HRTF: Head-related transfer function) をあらかじめ測定しておき、専用ボードにより高速で畳み込み演算を行なう事によって、仮想音場を創製する方法である [17]。このシステムにおいては、基本的には音源距離に関する考慮がなされていない。

また別の例として、音源の方向に対する手がかりとして

- 両耳に到達する音の強度差
- 両耳に到達する音の時間差
- 耳介の効果

を用い、一方音源の距離に対する手がかりとして

- 距離に反比例する強さの物理的な減衰
- 強さの周波数選択的な減衰
- 反響成分の効果

などを用いて、仮想音源へのナビゲーションに成功したという J.M.Loomis らの研究もある [51]。

これらの仮想音源創製法は、いずれの場合も聴覚的空間知覚の手がかりの果たす役割についての定量的把握をその基本としていない。したがってシステムを改善するためには、前者の場合個人別頭部伝達関数の取得や距離知覚のための反響成分の付加 [39]、後者の場合運動視差に対応する聴覚的な時間差の考慮 [69] という新たな情報の付加によらざるをえない。

これらのアプローチに対し、本研究により得られた知見や同様の方法で得られる聴覚的空間知覚特性に関する知見を聴覚的仮想環境創製システムの設計や評価に用いれば、「人間の知覚に必要な情報の量と質を規定し、必要十分な情報のみを提示する」という、よりシンプルな情報提示法を有するシステムの実現が可能になると考えられる。またこれらは、そのシステムの情報提示法の限界や改善方向についても、すでに用いている手がかりの精度や限界をもとにした定量的な議論を可能とするものであると考える。

## 第 7 章

### 結論

本論文は、聴覚情報を人工現実感あるいはテレイグジスタンスをはじめとする空間知覚利用型インタフェースにおいて、人間への空間内の位置情報入力手段として利用することを直接の動機として、人間が聴覚情報のどのような部分を手がかりとしてどのような認知をしているのかという、人間の聴覚的空間知覚特性を把握するために行なった研究についてまとめたものである。

第 1 章では、本研究の動機となったインタフェース技術に関する背景について論じ、また本研究の目的および本論文の構成について述べた。

第 2 章では「距離に関する音源定位と聴空間におけるホロボタ」と題して、視覚において視空間上の主観的額面平行線概念を表わすものとして知られているヘルムホルツのホロボタと同様の現象が聴空間においても存在するかどうかを確認する目的で、距離に関する音源定位の基礎実験を実環境下で行ない、つぎの結果を得た。

1. 聴空間における主観的額面平行線の物理的空間における形状が音源までの距離に依存すること、すなわち聴覚ホロボタ現象の存在を確認した。
2. さらにその形状は、音源までの距離が近い場合には被験者に対して手前に凹型、逆に距離が遠い場合には被験者に対して手前に凸型の曲線になることを検証した。この形状の傾向は、視空間におけるホロボタの形状と同様の傾向であり、聴空間におけるホロボタとは傾向が異なっている。
3. 同一被験者に対して視覚ホロボタの測定実験を行なった。その結果と上記の聴覚ホロボタの測定実験結果とを比較し、同一被験者の視空間と聴空間は構造が類似しているものの、聴空間の変曲点のほうが遠方にあり座標系は同一でないことなどを示した。

第 3 章では「聴空間の特性解明を目的とした仮想環境提示システムの構成」と題し、音源距離定位の手がかりなどの聴覚的空間知覚特性の解明に関する現状および研究の必要性を概



説し、それについての知見を得る目的で、視覚および聴覚に関する仮想環境提示システムを構成した。さらにSTHMD (See-Through 型 Head-Mounted Display) における仮想空間と実空間の整合性を図るために、特に距離に関する誤差に対して有効な、視点位置ずれに対する新たな視覚パラメータ校正法を考案した。またその有効性を、視覚パラメータの感度解析により評価し、さらに個人ごとのSTHMDの校正実験により検証した。

第4章では「音源距離定位の知覚特性の解明」と題し、前章において構成した仮想環境提示システムを用い、距離に関する音源定位における音の強さの役割の定量的把握を目的として、仮想環境下の音の強さと知覚される音源距離との対応関係について基礎実験を行なった。その結果は、以下の通りである。

1. M.B.Gardnerの音の強さと知覚される音源距離との対応関係についての実環境における実験を仮想環境に置き換えて追試し、同等の結果を得た。この結果から、仮想環境が実環境と同等の結果を与えることが保証され、また「音の強さが音源距離定位において極めて重要な手がかりである。」という結論が、他の手がかりのまったくない、より厳密な条件の下で検証された。
2. 音の強さとみかけの音源距離との関係が、指数関数の関係にある、すなわち両対数のグラフでは両者の関係が直線で表せることを確認した。
3. 音の強さとみかけの音源距離の両対数グラフにおける回帰直線の比例係数は、実験における音源距離の範囲と音の強さの範囲により、制約を受ける。制約のない条件での比例係数は0.20～0.24で、この値は制約のあるM.B.Gardnerの実験結果(0.06)よりも大きい。物理的な音の減衰比から得られる値(0.3)より小さい。
4. 仮想環境の利用により、調整法による実験が容易に構成できた。調整法により音源位置を被験者自身に指示させる定位実験において、表示された音源から選択する実験と同じ比例係数を得た。すなわち得られた比例係数は、実験条件によらない結果である。
5. 3, 4で得られた実験結果は、G.von Békésyのみかけの距離と実際の距離との対応関係の実験結果やD.R.Begaultの「半分の距離」という知覚に対応する音の強さの実験結果ともよく一致している。

第5章では「聴空間における平行アレイと等距離アレイ」と題し、同じく第3章で構成した仮想環境提示システムを用いることにより構成が可能となった。聴空間における平行アレイと等距離アレイの測定実験を行なった。平行アレイと等距離アレイは、主観的正中面平行線概念を表わすものとしてヘルムホルツのホロプタ同様に両眼視空間においてよく知られている現象であり、同様の現象が聴空間においても存在するかどうかを確認するのが実験の目的であった。測定実験からつぎの結果を得た。

1. 聴空間における等距離音源対の主観的音源間間隔が被験者からの距離に依存することを確認した。
2. 聴空間における主観的正中面平行線（平行アレイ）や主観的正中面等距離線（等距離アレイ）の形状が、物理的正中面平行線とは必ずしも一致せず、被験者からの距離に依存することを確認した。
3. さらに、聴空間において平行アレイが等距離アレイよりも正中面より存在することを確認した。これは、視空間や触空間における平行アレイと等距離アレイの関係と同様の傾向である。

第6章では、以上の研究と以下の各項との関係について考察した。

- ホロプロタやアレイの距離依存性を説明する心理空間モデル
- 空間知覚を利用するインタフェースへの応用

本論文の目的は、

「人間の空間知覚能力を利用したインタフェースにおいて、空間に関する聴覚的な情報の提示法を、真に楽で自然なインタフェースとして最適に設計したり、またその最適性を評価したりする際に必要とされる、人間の聴覚的空間知覚特性に関する知見を提供する。」

であった。これに対し、以上述べてきたように本研究では、聴空間のホロプロタやアレイの距離依存性をはじめて明らかにし、また聴覚的距離定位の手がかりとしての音の強さの役割を、仮想環境を利用して解明した。このような研究結果は、人間の聴覚的空間知覚特性の一端を示す知見として価値があるものと考えられる。またこれらの研究は、人間の聴覚的空間知覚特性を解明するための方法としてもこれまでにない新しいアプローチからの研究であり、この点に関しても意義のあるものと考えられる。

## 謝辞

本論文は、筆者が東京大学大学院工学系研究科先端学際工学専攻後期博士課程在学中に行なった研究をまとめたものです。この間、多数の方々に多大なご指導、ご助言、ご協力等をいただきました。ここに記して感謝の意を表したいと思います。

この3年間、指導教官の東京大学工学部計数工学科 館岡教授には、研究の進め方、要素での方向付け、まとめ方など研究全体に関して、みっちりかつしっかりとご指導いただきました。

東京大学先端科学技術研究センター 大須賀節雄教授並びに佐藤知正教授には、本論文をまとめるに際し、数々の貴重なご助言をいただきました。いただいたご助言を生かすべく努力した結果、本論文の内容を向上させることができたと考えております。

東京大学工学部機械情報工学科 吉澤修治教授には、計数工学科卒業論文作成時より、計数工学専門課程修士課程在学中を含め、常に暖かい目で見守っていただき、多くのお教をいただきました。

東京大学工学部計数工学科 石川正俊助教授には、修士課程在学中より常にご指導、ご助言を受ける立場にありましたが、先端学際工学専攻後期博士課程入学に際しても館岡教授をご紹介いただき、また本論文をまとめるに際しても、数々のご教示をいただきました。

東京大学工学部計数工学科 山崎弘郎教授（（現）横河電機）、同 高橋弘太助手（（現）電気通信大学）、東レ滋賀事業場（昭和63年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了）河村明德氏には、第2章の実験装置の構成および運用に際し、ご助力、ご助言いただきました。

東京大学教養学部心理学科人間行動学分科 下條信輔助教授には、エキサイティングな知覚世界探究のおもしろさを存分に堪能させていただきました。心理物理実験の進め方やデータの処理法に関しても、ご教示いただきました。また下條研究室のメンバーの方々にも、研究会等において種々の興味深い情報を教えていただきました。

NTT 基礎研究所 柏野牧夫氏には、聴覚研究の基礎的な知識や課題についてご教示いただき、また心理物理実験における聴覚信号の構成についてもご助言いただきました。

NASA Ames Research Center の Elizabeth M. Wenzel 博士には、ご講演に関する資料の



提供や文献紹介などのご援助をいただきました。

東京大学先端科学技術研究センター館研究室の方々からは、毎日の討論や雑談の場を通じて多くの示唆やご意見をいただきました。柳田康幸助手には、音響関係や計算機に関する諸知識を始めとして、研究生活全般にわたり、あらゆることを教えていただきました。また第3章の仮想環境提示システムの基礎となるシステムを提供していただきました。(現)東京大学工学部計数工学科)前田太郎助手には、脳研究の生理学的あるいは工学的な話題に関して知的好奇心を大いに鼓舞していただき、また多くの示唆や助言をいただきました。櫻井彌壽雄技官には、実験に必要な器材の設計にあたってご助言いただき、またそれらを迅速に製作していただきました。博士課程在学中の江村晩氏からは、研究遂行上きわめて有益なご助言を幾度もいただきました。

また東京大学文学部心理学科4年の渡辺克巳氏、館研究室 和泉聡子事務補佐員、修士課程に在学された((現)東京電力)大石峰士氏をはじめとする研究室内外の被験者の方々には、制約時間の長い実験に快くご協力いただきました。

以上の方々には、この場を借りて厚くお礼申し上げます次第です。

また渡辺福德社長を始めとする(株)ダイナックスの方々のご理解とご声援にも感謝の意を表します。

最後に、本研究遂行に必要とした時間を与えてくれた府中市立小柳学童クラブの指導員の先生方、夫の大倉理、長男の務、二男の彬、母の高島富貴子の多大な協力と暖かい励ましに深く感謝します。

## 参考文献

- [1] 山田尚勇：ヒューマン・インタフェースの認知科学的側面，計測と制御，**27**-1，3/10 (1988)。
- [2] 高島典子：視聴覚入力に対する制御特性の実時間測定，東京大学工学部卒業論文 (1976)。
- [3] 高島典子，吉澤修治，南雲仁一：聴覚入力に対する手動制御特性の実時間測定，信学技報，MBE77-13 (1977)。
- [4] 高島典子：聴覚入力追跡制御系における人間の動特性の研究，東京大学大学院工学系研究科修士論文 (1978)。
- [5] M.Takashima, S.Yoshizawa, J.Nagumo：Human Operator Dynamics in Auditory Manual Tracking Systems, Proceedings of the International Conference on Cybernetics and Society, 1433/1438 (1978)。
- [6] 高島典子，吉澤修治，南雲仁一：制御行動における人間のダイナミックス，行動計量学，**6**-2，63/69 (1979)。
- [7] 高島典子，吉澤修治，南雲仁一：聴覚入力手動制御系における人間の動特性，医用電子と生体工学，**18**-5，341/346 (1980)。
- [8] M.Takashima, S.Yoshizawa, J.Nagumo：Human Operator Dynamics in Manual Tracking Systems with Auditory Input, Biological Cybernetics, **37**，159/166 (1980)。
- [9] 大須賀節雄編：ヒューマンインタフェース，オーム社 (1992)。
- [10] 柳田博明：21世紀のための賢材開拓者宣言，KDD クリエイティブ (1994)。
- [11] 佐藤知正，西田佳史，市川純理，畑村洋太郎：ヒューマンインタフェースロボット-遠隔微細作業への適用-，第11回日本ロボット学会学術講演会予稿集，363/366 (1993)。
- [12] 館璋：テレイグジスタンス，計測と制御，**30**-6，465/471 (1991)。
- [13] 館璋，廣瀬通孝編：バーチャル・テック・ラボ，工業調査会 (1992)。
- [14] 館璋：人工現実感，日刊工業新聞社 (1992)。

- [15] J.C.Eccles : The Understanding of the Brain, McGraw-Hill (1973). J.C. エクルズ (大村裕, 小野武年訳) : 脳 - その構造と働き -, 共立出版 (1976).
- [16] 杉下守弘編 : 右半球の神経生理学, 朝倉書店 (1991).
- [17] E.M.Wenzel : Localization in Virtual Acoustic Displays, PRESENCE, **1**-1, 80/107 (1992).
- [18] 石川正俊 : センサフュージョンシステム - 感覚情報の統合メカニズム -, 日本ロボット学会誌, **6**-3, 251/255 (1988).
- [19] 山崎弘郎, 石川正俊編 : センサフュージョン, コロナ社 (1992).
- [20] R. K. Luneberg : The Metric of Binocular Visual Space, Journal of the Optical Society of America, **40**-10, 627/642 (1950).
- [21] 館岡, 荒井裕彦 : テレインジスタンスにおける視覚情報提示系の設計と評価, 日本ロボット学会誌, **7**-4, 314/326 (1989).
- [22] H. V. Helmholtz : Treatise on Psychological Optics, Optical Society of America, **3**, 482 (1925).
- [23] E. Rubin : Haptische Untersuchungen, Acta Psychologica, **1**, 285/380 (1936)
- [24] G. Siemsen : Experimentelle Untersuchungen über die taktil-motorische Gerade, Psychologische Forschung, **19**, 61/101 (1934).
- [25] 前田太郎 : 空間位置知覚のための感覚統合過程に関する研究, 東京大学大学院工学系研究科学位論文 (1994).
- [26] B. C. J. Moore : An Introduction to the Psychology of Hearing, Academic Press (1989).
- [27] J. Blauert : Spatial Hearing, MIT Press (1983). イェンス ブラウエルト, 森本政之, 後藤敏幸 : 空間音響, 鹿島出版会 (1986).
- [28] 難波精一郎編 : 聴覚ハンドブック, ナカニシヤ出版 (1984).
- [29] 境久雄, 中山剛 : 聴覚と音響心理, コロナ社 (1978).
- [30] 河村明徳 : 自律性を有する非接触型疑似触覚システムの研究, 東京大学大学院工学系研究科修士論文 (1988).
- [31] アンペール PPMC-102A パルスモータコントロール LSI 仕様書 (1985).
- [32] 藤永保他編 : 新版心理学事典, 平凡社 (1981).
- [33] J.P.Guilford : Psychometric Methods, McGraw-Hill (1954). J.P. ギルホード (秋重義治監訳) : 精神測定法, 培風館 (1959).



- [34] D. J. Finney : Probit Analysis, Cambridge University Press (1971).
- [35] 統計数値表編集委員会編 : 簡約統計数値表, 日本規格協会 (1977).
- [36] C. Prablanc et al. : Optimal Response of Eye and Hand Motor System in Pointing at a Visual Target, Biological Cybernetics, **35**, 113/124 (1979).
- [37] 前田太郎, 館璋 : 視覚性到達運動における両眼視と上肢位置感覚の統合, 計測自動制御学会論文集, **29-2**, 201/210 (1993).
- [38] 黒住幸一 : 聴覚におけるメカニズム, テレビジョン学会誌, **45-4**, 438/445 (1991).
- [39] E.M.Wenzel : Perceptual Factors in Virtual Acoustic Displays, Proc. Inter. Conf. Artificial Reality and Tele-existence, 83/98 (1994).
- [40] P.H.Lindsay, D.A.Norman : Human Information Processing -An Introduction to Psychology-, Academic Press (1977). P.H. リンゼイ, D.A. ノーマン (中溝幸夫, 箱田裕司, 近藤倫明訳) : 情報処理心理学入門 I -感覚と知覚-, サイエンス社 (1983).
- [41] 秋永義治編 : 知覚的世界の恒常性 認識心理学 III, 534/535, 理想社 (1970).
- [42] 大石峰士, 館璋 : シースルー型 HMD における視覚パラメータの較正法, 日本ロボット学会誌, **12-6**, 911/918 (1994).
- [43] 柳田康幸, 館璋 : 運動感覚と視覚を融合する人工現実感システム, ヒューマンインタフェースニュースアンドリポート, **8-3**, 325/330 (1993).
- [44] 廣瀬通孝, 木島竜吾, 佐藤洋一, 石井威望 : シースルー型 HMD を用いた仮想空間による実空間の修飾の研究, 第 6 回ヒューマンインターフェイスシンポジウム論文集, 1/8 (1990).
- [45] M.B.Gardner : Distance Estimation of  $0^\circ$  or Apparent  $0^\circ$  -Oriented Speech Signals in Anechoic Space, Journal of the Acoustical Society of America, **45-1**, 47/53 (1969).
- [46] P.D.Coleman : An Analysis of Cues to Auditory Depth Perceptin in Free Space, Psychological Bulletin, **60-3**, 302/315 (1963).
- [47] G.von Békésy : The moon illusion and similar auditory phenomena, American Journal of Psychology, **62**, 540/552 (1949).
- [48] D.R.Begault : Preferred Sound Intensity Increase for Sensation of Half Distance, Perceptual and Motor Skills, **72**, 1019/1029 (1991).
- [49] A.D.Little, D.H.Mershon, P.H.Cox : Spectral content as a cue to perceived auditory distance, Perception, **21**, 405/416 (1992).
- [50] N.I.Durlach, B.G.Shinn-Cunningham, R.M.Held : Supernormal Auditory Localization I. General Background, PRESENCE, **2-2**, 89/103 (1993).

- [51] J.M.Loomis, C.Hebert, J.G.Cicinelli : Active Localization of Virtual Sounds. Journal of the Acoustical Society of America, **88**-4, 1757/1764 (1990).
- [52] 関喜一, 伊福部達, 田中良広 : 盲人の障害物知覚における障害物の遮音効果の影響. 日本音響学会誌, **50**-5, 382/385 (1994).
- [53] 伊福部達 : 聴覚による空間知覚, bit 別冊仮想現実学への序曲-バーチャルリアリティドリーム-(原島博, 廣瀬通孝, 下條信輔 編), 48/56, 共立出版 (1994).
- [54] F.Hillebrand : Theorie der scheinbaren Größe bei binocularen Sehen, Denkschriften der Wiener Akademie, Mathematisch-Naturwissenschaft Klasse **72**, 255/307 (1902).
- [55] W.Blumenfeld : Untersuchungen über die scheinbare Größe in Sehräume, Zeitschrift für Psychologie **65**, 241/404 (1913).
- [56] T.Indow : An Approach to Geometry of Visual Space with No A Priori Mapping Functions:Multidimensional Mapping According to Riemannian Metrics, Journal of Mathematical Psychology **26**-3, 204/236 (1982).
- [57] 和田陽平, 大山正, 今井省吾編 : 感覚+知覚・心理学ハンドブック, 誠信書房 (1969).
- [58] W.Blumenfeld : The relationship between the optical and haptic construction of space, Acta Psychologica II, **2**, 125/174 (1937).
- [59] 大山正, 今井省吾, 和気典二編 : 新編感覚・知覚・心理学ハンドブック, 誠信書房 (1994).
- [60] 前田太郎, 館暲 : ホロボタを生じる空間知覚モデル, 計測自動制御学会論文集, **25**-10, 1111/1118 (1989).
- [61] 前田太郎, 館暲, 大山英明 : スカラ加算モデルによるホロボタ現象の数理的解明, 電子情報通信学会技術研究報告, **NC92**-161, 255/262 (1993).
- [62] 谷口郁雄, 福西宏有 : 脳の聴覚情報処理, 情報処理, **30**-2, 129/136 (1989).
- [63] 福西宏有 : 電位感受性色素を用いた能の聴覚野の観測, 日本音響学会誌, **48**-5, 313/319 (1992).
- [64] M.Konishi : Listening with Two Ears, Scientific American, **268**-4, 34/41 (1993). 小西正一 (森浩一訳) : メンフクロウの両耳による聴覚情報処理, 日経サイエンス, 1993年6月号, 90/99 (1993).
- [65] 館暲 : バイスベクトル分析による雑音に埋もれた周期信号の分離, 計測自動制御学会論文集, **9**-6, 105/114 (1973).
- [66] A.S.Bregman : Auditory Scene Analysis: The Perceptual Organization of Sound, The MIT Press (1990).

- [67] アルバート S. プレグマン (河原英紀訳) : 聴覚の情景分析とは, 日本音響学会誌, **50**-12, 1007/1010 (1994).
- [68] 四宮 葉一, 沢田一哉, 野村淳二 : 住空間音疑似体験システムの開発, 日本音響学会誌, **49**-7, 515/521 (1993).
- [69] J.M.Speigle and J.M.Loomis : Auditory Distance Perception by Translating Observers, IEEE 1993 Symposium on Research Frontiers in VR, San Jose California, 92/99 (1993).



## 関連発表文献

1. 大倉典子, 柳田康幸, 館璋: 聴覚情報を利用したヒューマンインタフェースの研究 (第一報) - 距離に関する音源定位と聴空間におけるホロプター, 第 32 回計測自動制御学会学術講演会予稿集, 659/660 (1993).
2. 大倉典子, 館璋: 距離に関する音源定位に基づく聴覚ホロプターの検討 - 聴覚情報を利用したヒューマンインタフェースの研究 (第 2 報) -, 日本音響学会平成 6 年春季研究発表会講演論文集, 387/388 (1994).
3. 大倉典子, 柳田康幸, 館璋: 聴覚情報を利用したヒューマンインタフェースの研究 (第 3 報) - 仮想空間における距離に関する音源定位 -, 第 33 回計測自動制御学会学術講演会予稿集, 205/206 (1994).
4. 大倉典子, 館璋: 距離に関する音源定位と聴空間におけるホロプター, 計測自動制御学会論文集, 30-11, 1287/1292 (1994).
5. M.Ohkura, S.Tachi: Horopter in Auditory Space, Journal of the Acoustical Society of America (投稿中)
6. 大倉典子, 大石峰士, 館璋: シースルー型 HMD における視覚パラメータの距離に関する較正法, 日本ロボット学会誌 (投稿中)
7. 大倉典子, 柳田康幸, 館璋: 仮想環境を利用した距離に関する音源定位, 計測自動制御学会論文集 (投稿中)

## 付録 A

### プロビット法

以下は、文献 [34] による。

プロビット法とは、得られた精神測定関数が累積正規分布曲線であると仮定して、重み付きの最尤法により、特定の出現率（ここでは 50%）を与える刺激値を推定する方法である。ここで用いられる重みはプロビット（"probit" = probability unit）と呼ばれる。

平均  $\mu$ 、標準偏差  $\sigma$  で正規分布にしたがうような反応曲線をもつある特性が、特定の値  $X$  をとる場合の反応の確率

$$P = \int_{-\infty}^X \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} dx \quad (\text{A.1})$$

に対し、 $P$  のプロビット  $Y$  が

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Y-5} \exp\left\{-\frac{1}{2}u^2\right\} du \quad (\text{A.2})$$

と定義される。このときの反応の確率  $P$  とプロビット  $Y$  との関係は、Fig.A.1 に図示する通りである。

ここで式 (A.1) および式 (A.2) より、線形な式

$$Y = 5 + \frac{1}{\sigma}(x - \mu) \quad (\text{A.3})$$

が成り立つ。

累積正規分布曲線では、確率の小さい部分（0%近傍）と大きい部分（100%近傍）において、特性の変化率に対する反応確率の変化率が小さい。それに対し、プロビットの変化率は Fig.A.2 に示すように特性のあらゆる値に関して一定である。したがって、重みとして反応確率ではなくプロビットを用いることは、特性の値が平均値に近い場合の変化のみを重要視するのではなく、取り得る値全体についてその変化を均等に扱うことを意味すると考えられる。

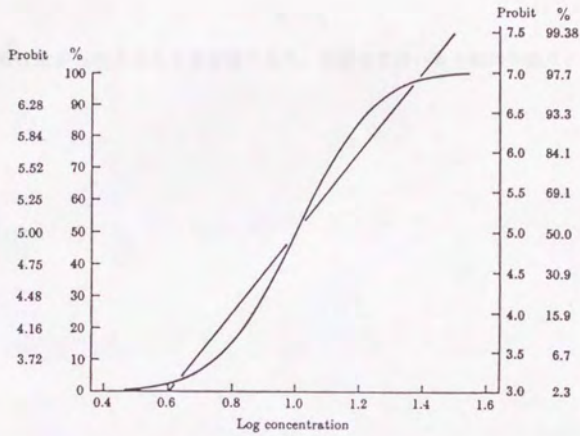


Fig. A.1 確率とプロビットとの関係 (文献 [34] より引用)

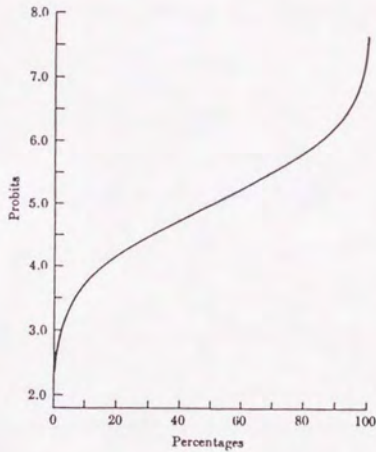


Fig. A.2 プロビット変換の効果 (文献 [34] より引用)



$$Y = 5 \quad (\text{A.4})$$

## 付録 B

# Luneberg の幾何学モデル

### B.1 両眼視空間におけるホロプタやアレイの近似式

本節は、文献 [20, 21] による。

Luneberg の幾何学モデルは、両眼視空間におけるホロプタやアレイの距離依存性を説明するために、両眼視空間を非ユークリッドな計量空間で近似したモデルである。すなわち物理的な空間と心理的な両眼視空間における座標系をそれぞれ Fig.B.1 の上図および下図に示すようにとり、座標系間の変数の対応関係として以下の仮定をおく。

$$\phi = \varphi \quad (\text{B.1})$$

$$\theta = \vartheta \quad (\text{B.2})$$

$$\rho = 2 \exp(-\sigma\gamma) \quad (\text{B.3})$$

このときホロプタや平行および距離アレイは、それぞれ次式により近似される。

$$\frac{K}{4}(\xi^2 + \eta^2) - 1 = A\xi \quad (\text{B.4})$$

$$\frac{K}{4}(\xi^2 + \eta^2) - 1 = B\eta \quad (\text{B.5})$$

$$\frac{K}{4}(\xi^2 + \eta^2) + 1 = C\eta \quad (\text{B.6})$$

### B.2 両眼視空間におけるホロプタの形状やアレイの位置関係の説明

このモデルでは、視空間におけるホロプタの形状や、平行アレイと等距離アレイとの相対的な位置関係が、適切にパラメータ ( $K, \sigma$ ) の値を選ぶことによって現象論的に説明でき

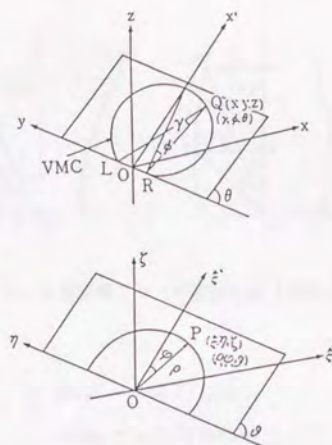


Fig. B.1 物理空間と心理的な両眼視空間における座標系 (文献 [21] より引用)

る。たとえば文献 [59] によれば、平行アレイと等距離アレイとの関係は以下のように説明できる。

まず双曲幾何学、ユークリッド幾何学および楕円幾何学における三角法を Table B.1 に示す。平行アレイを  $\eta$  軸に直交する測地線 (Fig. B.2 左図の 2 点  $P_1^+$  と  $U$  を結ぶ最短距離) であるとして、点  $P_1^+$  および平行アレイ上で原点  $O$  からみかけの距離

$$\gamma = \gamma_k \quad (B.7)$$

にある点  $P_p(\gamma_k, \varphi_p)$  のそれぞれを含むみかけの直角三角形  $P_1^+OU$  および  $P_pOU$  に対して、

Table B.1  $\angle C$  を  $90^\circ$  とする直角三角形  $ABC$  に対する三角法

	hyperbolic geometry	Euclidean geometry	elliptic geometry
$\cos A$	$\tanh \gamma_b / \tanh \gamma_c$	$\gamma_b / \gamma_c$	$\tan \gamma_b / \tan \gamma_c$
$\sin A$	$\sinh \gamma_a / \sinh \gamma_c$	$\gamma_b / \gamma_c$	$\sin \gamma_a / \sin \gamma_c$
$\tan A$	$\tanh \gamma_a / \sinh \gamma_b$	$\gamma_a / \gamma_b$	$\tan \gamma_a / \sin \gamma_b$



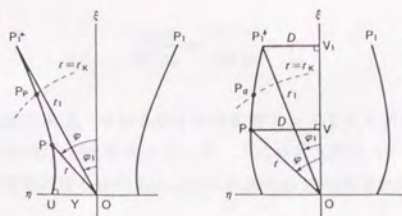


Fig. B.2 平行アレイと等距離アレイの理論曲線 (文献 [59] より引用)

双曲幾何学では

$$\sin \varphi_1 = \tanh Y / \tanh \gamma_1 \quad (\text{B.8})$$

$$\sin \varphi_p = \tanh Y / \tanh \gamma_k \quad (\text{B.9})$$

が成立する.

一方, 等距離アレイを Fig.B.2 右図において  $\xi$  軸から一定のみかけの距離  $D$  をもつ曲線であるとすると, 点  $P_1^+$  および等距離アレイ上で原点  $O$  からみかけの距離

$$\gamma = \gamma_k \quad (\text{B.10})$$

にある点  $P_d(\gamma_k, \varphi_d)$  のそれぞれを含みみかけの直角三角形  $P_1^+OV_1$  および  $P_dOV$  に対して, 双曲幾何学では

$$\sin \varphi_1 = \sinh D / \sinh \gamma_1 \quad (\text{B.11})$$

$$\sin \varphi_d = \sinh D / \sinh \gamma_k \quad (\text{B.12})$$

が成立する.

式 (B.8), (B.9), (B.11), (B.12) から

$$\sin \varphi_1 = \frac{\tanh \gamma_k \cdot \sin \varphi_p}{\tanh \gamma_1} = \frac{\sinh \gamma_k \cdot \sin \varphi_d}{\sinh \gamma_1} \quad (\text{B.13})$$

が成り立ち, したがって

$$\frac{\sin \varphi_p}{\sin \varphi_d} = \frac{\cosh \gamma_k}{\cosh \gamma_1} < 1 \quad (\text{B.14})$$

となる.

同様にユークリッド幾何学では

$$\sin \varphi_p = \sin \varphi_d \quad (\text{B.15})$$

また楕円幾何学では

$$\frac{\sin \varphi_p}{\sin \varphi_d} = \frac{\cos \gamma_k}{\cos \gamma_l} > 1 \quad (\text{B.16})$$

となる。

視空間における実験結果は、平行レイが等距離レイよりも正中面よりになっており、式 (B.14) ( $K < 0$  と同値) が成り立っている。これは、この非ユークリッド空間が楕円幾何学ではなく双曲幾何学の成り立つ Lobačevskii-Bolyai の空間であるとすれば説明がつく。

## スカラー加算モデル

スカラー加算モデルは、

視空間における実験結果は、平行レイが等距離レイよりも正中面よりになっており、式 (B.14) ( $K < 0$  と同値) が成り立っている。これは、この非ユークリッド空間が楕円幾何学ではなく双曲幾何学の成り立つ Lobačevskii-Bolyai の空間であるとすれば説明がつく。

スカラー加算モデルは、

視空間における実験結果は、平行レイが等距離レイよりも正中面よりになっており、式 (B.14) ( $K < 0$  と同値) が成り立っている。これは、この非ユークリッド空間が楕円幾何学ではなく双曲幾何学の成り立つ Lobačevskii-Bolyai の空間であるとすれば説明がつく。

スカラー加算モデルは、

視空間における実験結果は、平行レイが等距離レイよりも正中面よりになっており、式 (B.14) ( $K < 0$  と同値) が成り立っている。これは、この非ユークリッド空間が楕円幾何学ではなく双曲幾何学の成り立つ Lobačevskii-Bolyai の空間であるとすれば説明がつく。

スカラー加算モデルは、

視空間における実験結果は、平行レイが等距離レイよりも正中面よりになっており、式 (B.14) ( $K < 0$  と同値) が成り立っている。これは、この非ユークリッド空間が楕円幾何学ではなく双曲幾何学の成り立つ Lobačevskii-Bolyai の空間であるとすれば説明がつく。

スカラー加算モデルは、

視空間における実験結果は、平行レイが等距離レイよりも正中面よりになっており、式 (B.14) ( $K < 0$  と同値) が成り立っている。これは、この非ユークリッド空間が楕円幾何学ではなく双曲幾何学の成り立つ Lobačevskii-Bolyai の空間であるとすれば説明がつく。

## 付録 C

### スカラ加算モデル

以下は、文献 [37, 60, 61] による。

前田らは、ホロプラタやアレイの距離依存性を、後天的な空間位置知覚機能の獲得過程における学習上の制約によって生じたずれと考え、

「単一のスカラ出力から得られた誤差情報はそのスカラ信号を出力した神経細胞の入力荷重のみを変化させ他に伝播することはない。」

という学習上の制約を持つ神経回路網モデルを提案した。この生理学的知見による制約は「スカラ学習則」と呼ばれる。またこの学習則に基づいて学習を行なう以下のモデルは「スカラ加算モデル」と呼ばれ、その構造は Fig.C.1 に示す通りである。

すなわち、このモデルに与えられた信号処理上の制約とは、 $n$  個の独立なスカラ信号  $s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_n$  を統合処理して特定の別なスカラ信号  $f(s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_n)$  を得る必要があるとき、これを学習によって獲得する際に用いることのできる信号処理の構造は、各単一のスカラ信号によって決定される関数の線形和の形に限定されるというものである。

$$\hat{f}(s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_n) = \sum_{i=1}^n \hat{f}_i(s_i) + C \quad (\text{C.1})$$

ここで、 $\hat{f}_i$  は学習によって獲得される  $s_i$  の非線形連続スカラ関数であり、入力 of 各スカラ信号ごとに独立である。このとき  $\hat{f}_i$  を学習するための誤差情報  $\Delta \hat{f}_i$  は、スカラ学習則により、 $f - \hat{f}$  に等しい。

$$\Delta \hat{f}_i = \Delta \hat{f} \equiv f - \hat{f} \quad (\text{C.2})$$

またこのとき、神経回路モデルにおける学習の結果、各スカラ関数  $\hat{f}_i(x)$  の出力値は、全学習領域中において  $s_i = x$  となる部分領域における規範関数  $f$  の期待値に収束する。ここで学習領域全体を  $S$ 、 $s_i = x$  となる部分領域を  $S_i$ 、学習領域内における学習点の密度分布



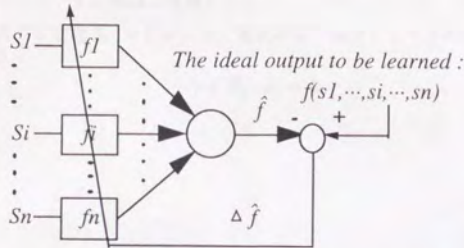


Fig. C.1 スカラ加算モデル (文献 [37] より引用)

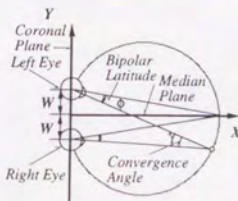


Fig. C.2 幅輻角および視線方向角 (文献 [37] より引用)

関数を  $\delta(s)$  とすると、この期待値は次式のように記述することができる。

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \hat{f}_i(x) &= E_{s_i=x} (f(s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_n)) \\ &= \frac{\int_{S_i} \delta(s) f(s) ds}{\int_{S_i} \delta(s) ds} \end{aligned} \quad (C.3)$$

このスカラ加算モデルを用いて、ホロプタを知覚する人間の視空間知覚信号系を記述する。視空間におけるホロプタの測定実験条件下における実際の感覚信号は、視標を注視した際の両眼球の向きであり、これは Fig. C.2 に示す幅輻角 ( $\gamma$ ) および視線方向角 ( $\phi$ ) によって表わされる。

このときの規範関数を  $H(\gamma, \phi)$ 、これを学習するスカラ加算モデルを  $\hat{H}(\gamma, \phi)$  とすると、シミュレーションの結果

$$\hat{H}(\gamma, \phi) = \gamma + \hat{H}_C(\phi) \quad (C.4)$$

というモデルがホロブタと同様の特徴を示した。この式によれば、ホロブタは  $\dot{H}(\gamma, \phi)$  の値がこれを代表する定数  $\hat{\gamma}_C$  をとるとき、次式が示す軌跡としてその形を描く。

$$\gamma + \dot{H}_C(\phi) = \hat{\gamma}_C \quad (\text{C.5})$$

## 付録 D

# 音源定位の神経生理学的解明の現状

## D.1 人間の聴覚情報伝達経路

本節では、人間の聴覚情報伝達経路について、

「人間は、聴覚情報を受信し、それを処理して、聴覚・運動反応を引き起こす」というモデルを、聴覚情報伝達経路の概略として示す。聴覚情報伝達経路は、人間の聴覚・運動反応を引き起こすための重要な役割を果たしている。聴覚情報は、人間の聴覚器官によって受信され、聴覚神経を通じて聴覚中枢に伝達される。聴覚中枢は、聴覚情報を処理し、聴覚・運動反応を引き起こす。聴覚・運動反応は、人間の聴覚・運動反応を引き起こすための重要な役割を果たしている。

聴覚情報は、人間の聴覚器官によって受信され、聴覚神経を通じて聴覚中枢に伝達される。聴覚中枢は、聴覚情報を処理し、聴覚・運動反応を引き起こす。聴覚・運動反応は、人間の聴覚・運動反応を引き起こすための重要な役割を果たしている。聴覚情報は、人間の聴覚器官によって受信され、聴覚神経を通じて聴覚中枢に伝達される。聴覚中枢は、聴覚情報を処理し、聴覚・運動反応を引き起こす。聴覚・運動反応は、人間の聴覚・運動反応を引き起こすための重要な役割を果たしている。

## D.2 聴覚・運動反応の神経生理学的解明

本節では、聴覚・運動反応の神経生理学的解明について、

## 付録 D

# 音源定位の神経生理学的解明の現状

### D.1 人間の聴覚情報伝達経路

本節は文献 [62] および文献 [63] による。

人間の聴覚系の仕組みを理解するために、生理・心理両面からの研究が行われており、末梢および聴覚情報伝達経路における機能はかなり理解されるようになってきた。人間の耳の構造は Fig.D.1 のようになっており、鼓膜の振動として知覚される音のエネルギーは、中耳内の力学的なエネルギー変換の働きによって内耳における蝸牛に伝えられ、この内側に位置する基底膜を振動させる。基底膜は先端部が低周波、基部が高周波の振動に応答し、基底膜上に分布する受容細胞である有毛細胞を支配する求心性神経線維にスパイク放電を発生させる。

聴覚情報伝達経路の概念図を Fig.D.2 に示す。聴覚情報伝達経路の特徴は両側の内耳にある蝸牛から出た求心性神経線維が、多くのシナプスと蝸牛神経核、上オリブ、下丘、内側膝状体などのいろいろなレベルでの交叉を経て大脳皮質に達することである。すなわち聴覚情報伝達経路が内耳から大脳皮質聴覚野に達するまでには数多くのレベルで何度もシナプス結合し、しかもいろいろなレベルで横にも連絡している。これは他の感覚系との神経解剖学的な大きな違いである。たとえば視覚系の場合、網膜を出た視神経は外側膝状体で一度ニューロンを変えるだけで皮質に到達する。このような他の感覚系に比して複雑な神経機構が、時系列としての音信号の情報処理と音源定位を可能にしていると同時に、その情報処理機構の解明が進まなかった理由ともなっていると考えられる。

### D.2 聴ニューロンの周波数特異性

本節は文献 [62] による。



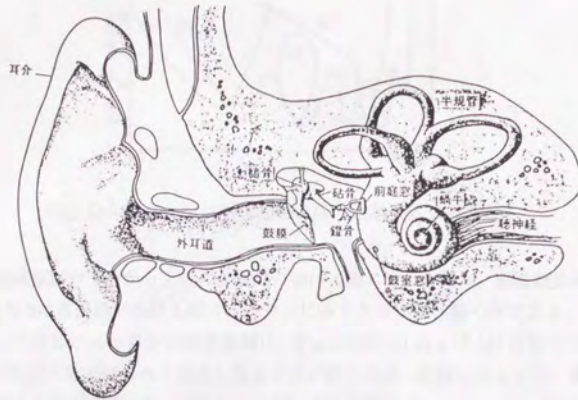


Fig. D.1 人間の聴覚器官の構成 (文献 [40] より引用)

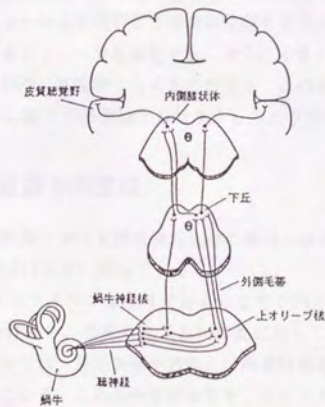


Fig. D.2 人間の聴覚情報伝達経路概念図 (文献 [63] より引用)

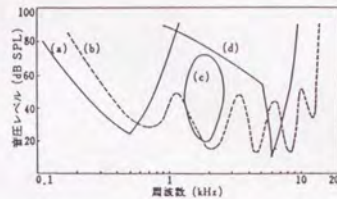


Fig. D.3 聴ニューロンの同調曲線（文献 [62] より引用）

聴覚情報伝達経路の下位から上位の各段階における聴ニューロンは、周波数特異性を持っている。Fig.D.3は各段階における聴ニューロンにみられる同調曲線の例である。

蝸牛からの一次聴ニューロンの同調曲線は、Fig.D.3の (a) および (d) の形となる。上オリープは、両耳の入力がはじめて収束し両耳干渉が起こる第一段階であるから、音源定位の最下位の中枢とみなされている。音源定位に関与する両耳性ニューロンには、同側の音刺激で興奮 (E) し、対側の音刺激で抑制 (I) される EI ニューロン、その逆の IE ニューロン、さらに EE ニューロンなどがあり、上オリープから大脳皮質に至るまでのいろいろな上位中枢で見つかっている。

大脳皮質聴覚野には周波数局在の認められるいくつかの聴領が存在する。一次聴領の多くのニューロンは一次聴ニューロンと同じような同調曲線をもつが、Fig.D.3の (b) のように複数の周波数に鋭く同調するニューロンも存在する。さらに皮質ニューロンの中には、Fig.D.3の (c) のように同調曲線が閉じて輪状になるものがある。このようなニューロンは、音の周波数のほかに音圧レベルに関する特徴抽出も行なうものと予想される。

### D.3 フクロウの音源方向定位

人間をはじめとする哺乳類における聴覚情報処理の解明の状況に比べ、フクロウの音源方向定位の神経機構の解明ははるかに進んでいる。

文献 [64] によると、メンフクロウは左耳が目より上で下向き、右耳が目より下で上向きという左右の耳の非対称性から、音源の上下方向移動に対して左右の耳の音圧差が変化する。したがってメンフクロウは、音源を水平方向には両耳時間差、垂直方向には両耳音圧差を手がかりとして定位している。これらの手がかりを、メンフクロウの脳は以下のように処理している。すなわちメンフクロウは Fig.D.4 および Fig.D.5 に図示するように、耳に到達した聴覚信号をまず周波数帯に分離し、各周波数帯ごとの時間情報と音圧情報とを別々に処

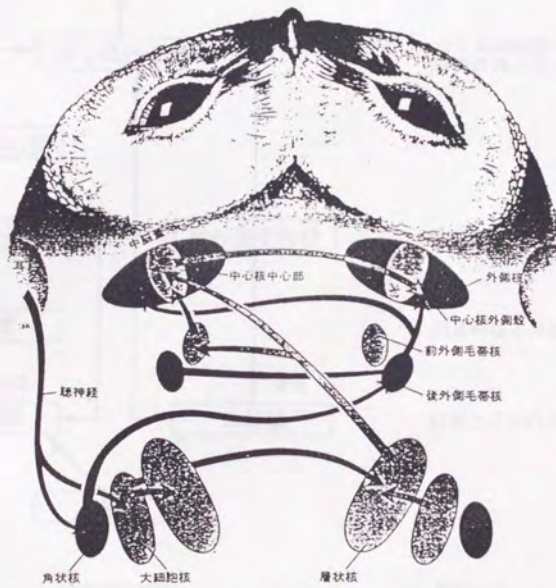


Fig. D.4 メンフクロウの脳内聴覚回路 (1) (文献 [64] より引用)



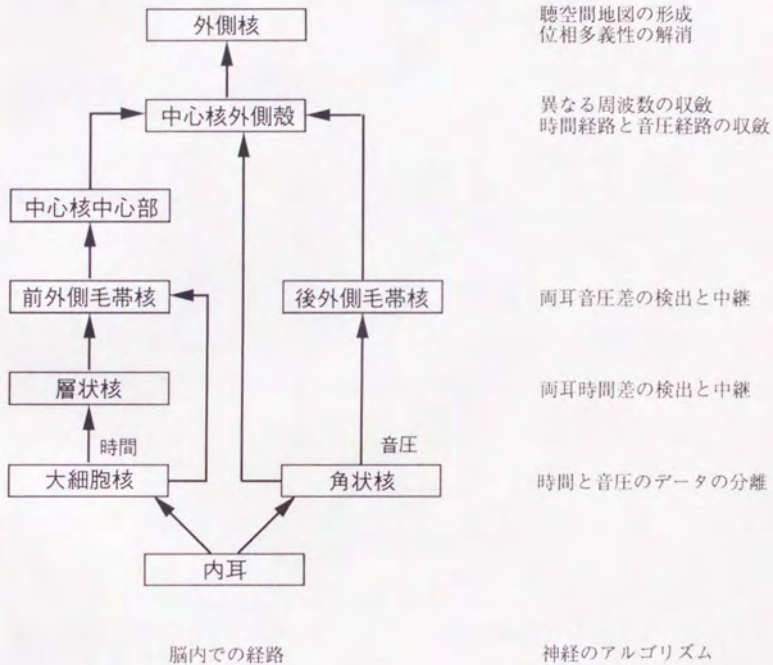


Fig. D.5 メンフクロウの脳内聴覚回路 (2) (文献 [64] より作成)

理し、それぞれの左右差を検出後、時間差と音圧差を統合し、周波数帯についても統合して音源定位のための信号処理を終える。距離をどのように計算するのかは、その手がかりにについても方向ほどはっきりわかっていない。

## 付録 E

## 参考図および表

図 E.1 音源定位のための音圧差と時間差の関係



図 E.2 音源定位のための音圧差と時間差の関係 (2)

## 付録 E

### 参考図および表

以下に，参考文献から引用した図および表を掲げる．

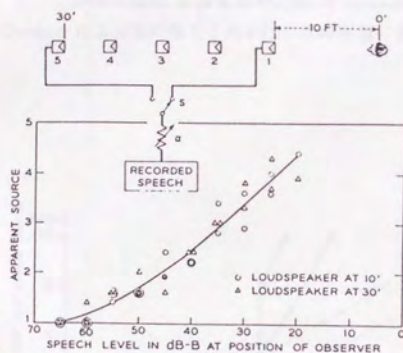


Fig. E.1 M.B.Gardner による音の強さとみかけの音源距離に関する実験 (文献 [45] より引用)



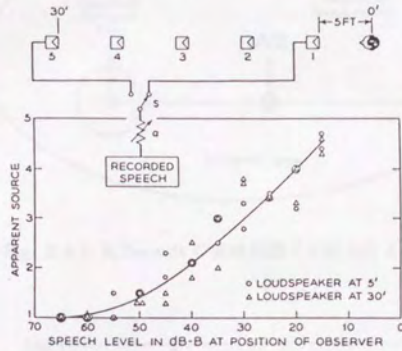


Fig. E.2 M.B.Gardner による音の強さとみかけの音源距離に関する別の実験 (文献 [45] より引用)

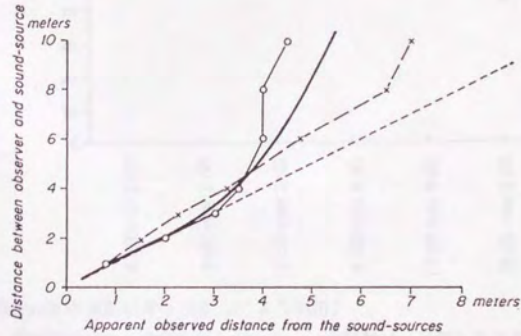


Fig. E.3 G.von Békésy の実験結果 (文献 [47] より引用)

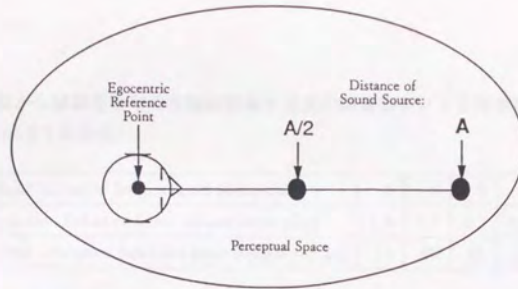


Fig. E.4 D.R.Begault の実験課題 (文献 [48] より引用)

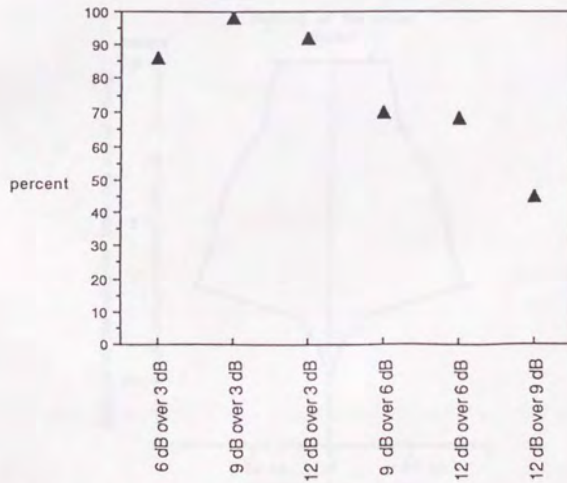


Fig. E.5 D.R.Begault の実験結果 (文献 [48] より引用)

ここで横軸は、音刺激のペアの種類を示している。一方縦軸は、対象となる音刺激と比較して「半分の距離」にあると知覚される音刺激として、ペアの中の大きい方が選択された割合を示している。

Table E.1 音源から被験者までの客観的距離と現象的距離および 2 音刺激間の現象的間隔  
(文献 [47] TABLE I を改変)

Real distance from sound-source[m]	3	4	6	8	10
Apparent distance from sound-source[m]	1.3	2.0	3.2	4.2	4.5
Apparent distance between sound-sources[cm]	73	65	95	78	70

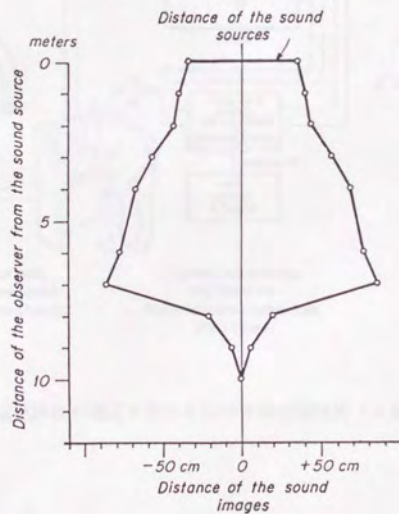


Fig. E.6 2 音源間の現象的間隔 (文献 [47] より引用)



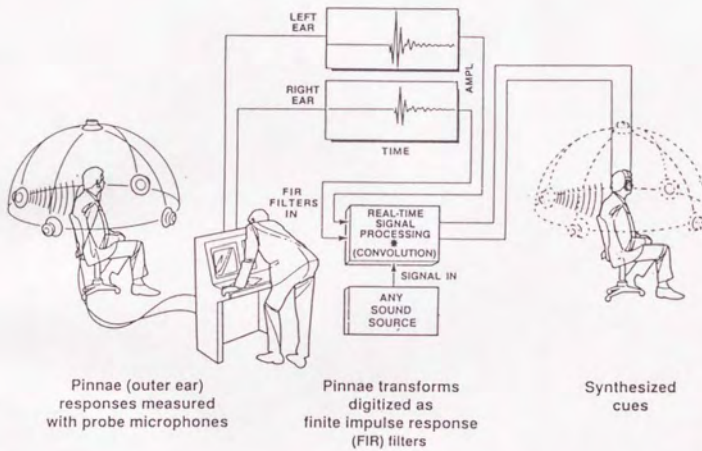


Fig. E.7 頭部伝達関数の測定を用いる仮想音源創製技術 (文献 [17] より引用)

