

仮想環境における聴覚アレーの測定とその数学モデル

大倉 典子<sup>†</sup>      柳田 康幸<sup>††</sup>      前田 太郎<sup>††</sup>      舘 暲<sup>††</sup>

Measurement of Auditory Alley in Virtual Environment and Its Mathematical Model

Michiko OHKURA<sup>†</sup>, Yasuyuki YANAGIDA<sup>††</sup>, Taro MAEDA<sup>††</sup>, and Susumu TACHI<sup>††</sup>

あらかし 聴空間における主観的正中面平行線（平行アレー）および主観的正中面等距離線（等距離アレー）に関する心理物理実験システムを構成することが、仮想環境提示システムを利用することにより、可能となった。構成した実験システムで、聴空間における平行および等距離アレーの測定実験を行った。その結果、仮想環境上の聴空間における平行および等距離アレーが、物理的正中面平行線とは必ずしも一致せず、それらの形状が被験者からの距離に依存すること、更に、平行アレーが等距離アレーよりも正中面よりに存在することを確認した。これは、実環境上の視空間や触空間における平行アレーと等距離アレーの関係と同様の傾向である。更に音の強さと両耳間時間差の2情報を変数として用い、聴空間における平行および等距離アレーを説明する空間位置知覚モデルを定式化した。このモデルを用いたシミュレーションの結果、仮想環境提示システムを利用して行った心理物理実験の結果が、本モデルにより説明できることが確認された。

キーワード 聴覚, 空間知覚, 音源定位, 仮想環境, 神経回路モデル

1. まえがき

空間知覚特性として、両眼視空間においてヘルムホルツのホロプタ、平行および等距離アレー等の心理的直線の存在がよく知られている。ヘルムホルツのホロプタとは、図1に示すように、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（点Lおよび点R）を通る前額平行面との交線を  $y$  軸としたときに、 $y$  軸に平行であると知覚される線（主観的額面平行線）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[1]。このとき知覚される主観的額面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、ある一定の距離では物理的平行線と一致するが、それより遠くでは観察者に対して凹型、近くでは逆に凸型の曲線が主観的平行線となることが知られている。一方主観的に正中面に平行な概念を表すものとして、平行および等距離アレーがある。図2では、 $x$  軸を水平面と正中面との交線、

$y$  軸を同じ水平面と両眼（点Lおよび点R）を通る前額平行面との交線とし、曲線  $p$  が平行アレーを、曲線  $d$  が等距離アレーを示している。平行アレーとは、光点の2系列を、水平面上の正中面と見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2本の視知覚的直線である。両者は物理的には互いに平行な直線になるはずだが、実際には正中面からの距離（ $x$  軸からの距離）に依存する形状をもつ曲線になる。また等距離アレーとは、光点の2系列を水平面上の正中面から見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、これも物理的には互いに平行な直線になるはずのものが、実際には正中面からの距離に依存する形状をもつ曲線になる[2]。この2種類の主観的直線の物理的形状には、図2に示すように、一般に平行アレーが等距離アレーよりも正中面よりになる傾向がある[3]。これら主観的直線の物理的直線との不一致に関しては、触空間においても、上肢運動感覚に基づく同様の現象（主観的額面平行線が被験者に対して凹型の曲線を描くことや、主観的正中面平行線および主観的正中面等距離線が正中面に対して凹型の曲線を描くこと）が発見されている[4],[5]。

筆者らは距離に関する音源定位の基礎実験を行い、両耳聴空間においてもヘルムホルツのホロプタと同様

<sup>†</sup> (株) ダイナックス, 府中市  
DYNAX Corporation, 1-12-7 Fuchu-cho Fuchu-shi, 183-0055 Japan

<sup>††</sup> 東京大学大学院工学系研究科, 東京都  
Faculty of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033 Japan

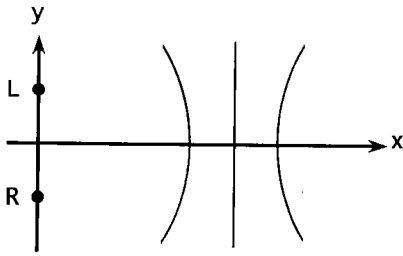


図1 ヘルムホルツのホロプタ  
Fig.1 Helmholtz's horopter.

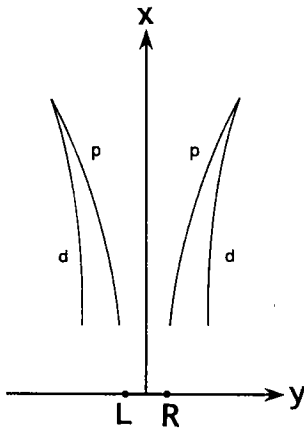


図2 平行および等距離アレー  
Fig.2 Parallel and equi-distance alley.

の現象が生じること、すなわち聴空間上の主観的額面平行線の形状が物理的な額面平行線とは必ずしも一致せず、音源までの距離に依存することを確認した [6]。この実験において音源位置を判断する手掛りとなっていたと考えられる情報に、音の強さと両耳間時間差がある。そこでこの2情報を変数として用いて、聴覚ホロプタを説明する空間位置知覚モデルを定式化し、このモデルについて、シミュレーションによる検討を行った。その結果、このモデルにより聴覚ホロプタの形状の距離依存性が説明できることを確認した [7]。

感覚モダリティの類似性から、またホロプタ現象が存在したことから考えて、聴空間においても視空間や触空間と同様の平行および等距離アレー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、図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時、

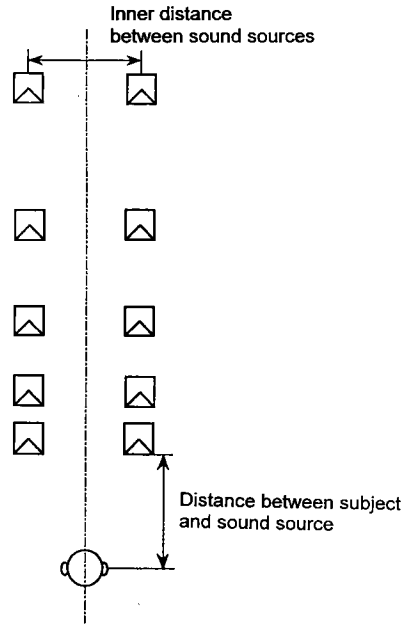


図3 聴覚アレー実験に必要なセットアップ  
Fig.3 Setup for experiments of auditory alley.

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ー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、実現が難しい。そこで筆者らは、音源距離知覚の研究を目的として構成した仮想環境提示システム [8],[9] を用いて、聴空間における平行および等距離アレーを測定する心理物理実験システムを実現してみることにした。本論文では、この実験システムの構成、実験方法および得られた結果について述べる。

更に、聴覚ホロプタの形状を説明する空間位置知覚モデルを構成したのと同様の手法で、聴空間における平行および等距離アレーの形状を説明する数学モデルを定式化した。そしてこのモデルを用いて、仮想環境下で行った実験の結果についてシミュレーションによる検討を行った。この聴空間知覚モデルの定式化およびシミュレーションによる検討結果についても述べる。

## 2. 聴空間における平行および等距離アレーの測定

### 2.1 システム構成

本研究で用いた仮想環境提示システムの構成の概要を図4に示す。このシステムは、仮想環境を利用した

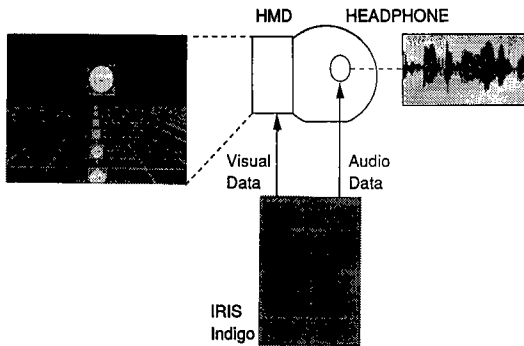


図4 仮想環境提示システムの構成  
Fig.4 Virtual environmental display system.

音源距離定位の手掛りを調べる研究[8],[9]で用いたものと同じである。

仮想環境構成用計算機 (IRIS Indigo) により、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仮想環境モデルに基づいて創製し、これを被験者の装着した HMD (Head Mounted Display) において提示し、被験者に対する視覚信号とした[10]。HMD は、シースルー (See-Through) 型の HMD を校正して用いた。シースルー型の HMD とは、ビームスプリッタ (半透明鏡) の利用により実環境と仮想環境の重ね合わせを可能にした HMD であり、この重ね合わせにより、仮想環境に対する視空間の座標系を実環境に対する視空間の座標系に一致させる校正ができる。今回用いたシースルー型 HMD に対しては、製作時の光学系の誤差に起因する視覚パラメータの設定不良に対する校正[11]に加え、主として眼間距離の個人差により生ずる視点位置のずれに起因する誤差を、距離に関して校正する方法を考案して適用し[12]、視覚的な仮想環境の距離を実環境の距離と一致させることを可能にした。

一方同じ計算機を用いて任意の聴覚信号を合成し、DSP を介して出力し、被験者の両耳にヘッドホン (Senheiser HD25SP) を用いて提示した。出力レートは 48 kHz とした。

## 2.2 実験方法

両アレーの測定には、精神物理学的測定法の一つである恒常法を用いた。恒常法とは、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、被験者に「大きい」・「小さい」、「近い」・「遠い」など2種の反応カテゴリーを用いて回答を求める(「等しい」「わからない」という反応を許さない)2件法の場合、得られた精神測定関数(刺激-反応曲線)において反

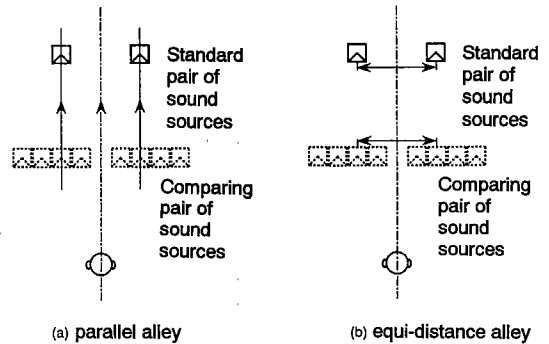


図5 平行および等距離アレーの実験システムの構成  
Fig.5 Experimental system of parallel alley and equi-distance alley.

応の出現率が 50% になる刺激値を、主観的等価点とする方法である[13]。平行アレーと等距離アレーの測定実験システムの概念図を、図5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。仮想音源を、基準音源対および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者に近い距離にあり、種々の音源間間隔をもつことを想定した。

視覚信号として、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。両耳に提示する聴覚信号は擬似ランダムノイズとし、両耳に提示する強さと時間を以下のように制御した。

すなわち図3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強さについて、

$P_l$ : 対象となる音源から左耳に直接到達する音刺激の強さ

$d$ : 対象となる音源の被験者からの距離

$P_0$ : 基準となる音の強さ

$d_0$ : 左耳に直接到達する音刺激の強さが基準となる音の強さと等しくなるような音源の被験者からの距離として、 $P_l$  が距離に反比例することから[14],[15]、

$$P_l = \frac{d_0}{d} P_0 \quad (1)$$

とする。

これに対し、音源から遠い右耳に到達する音刺激は図6に示すように被験者の頭部の周りを回って右耳に到達する。従って音源から右耳までの距離と左耳まで

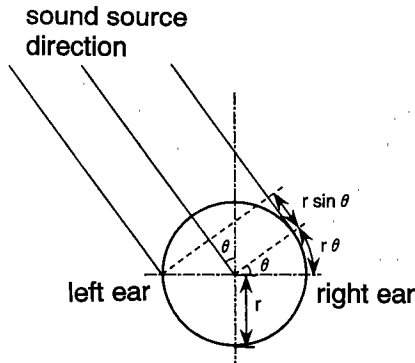


図6 音源から両耳までの距離の差の近似計算  
Fig.6 Approximation of the difference between sound source and both ears.

の距離との差  $\Delta d$  は、被験者の頭部の半径を  $r$  とし、近似式

$$\Delta d = r\theta + r \sin \theta \quad (2)$$

で与えられる [16]. 但し角度  $\theta$  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.

$$\theta = \arctan(x/y) \quad (3)$$

そこで右耳に到達する音刺激の強さ  $P_r$  は、

$$P_r = \frac{d_0}{d_0 + \Delta d} P_l \quad (4)$$

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 cm, 音速  $v$  を 340 m/s とし、

$$\Delta t = \Delta d/v = 257(\theta + \sin \theta) [\mu\text{s}] \quad (5)$$

と計算できる. 種々の音源距離および音源間隔に対する, 両耳に到達する音の強さの比や時間差 (48 kHz におけるデータのシフト数  $48000 \times \Delta t/1000$  で表示) の例を, 表 1 に示す.

音源対の左音源からの音刺激を想定するとき, ヘッドホ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表 1 に示すような音の強さの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, 左右の音の強さの比と時間差を逆にして両耳に与える.

被験者は頭部を“はみ台”で固定し, 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った.

試行の構成は以下のようにした.

- (1) まず基準となる仮想音源対を, 左右対称な物

表 1 種々の音源距離および音源間隔に対する音の強さの比と時間差

Table 1 Sound intensity ratios of sound source and time differences for various distance and inner distance between sound sources.

Distance[m]	4.0				
Inner distance[m]	0.0	0.4	0.8	1.2	1.6
Sound intensity ratio	1.0	0.912	0.832	0.760	0.696
Time difference[# of shift]	0	1	2	4	5
Distance[m]	4√2				
Inner distance[m]	0.0	0.4	0.8	1.2	1.6
Sound intensity ratio	1.0	0.937	0.878	0.823	0.772
Time difference[# of shift]	0	1	2	3	3
Distance[m]	8.0				
Inner distance[m]	0.0	0.4	0.8	1.2	1.6
Sound intensity ratio	1.0	0.955	0.912	0.871	0.832
Time difference[# of shift]	0	1	1	2	2
Distance[m]	8√2				
Inner distance[m]	0.0	0.4	0.8	1.2	1.6
Sound intensity ratio	1.0	0.968	0.937	0.907	0.878
Time difference[# of shift]	0	0	1	1	2

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, 左の順に持続時間 500 ms, 音間隔 500 ms 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マウスを用いて移動させ, 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り, 常に被験者が基準音源対の位置を視認できるようにする.

(2) 次に, 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 500 ms, 音間隔を順に 500 ms, 2500 ms, 500 ms, 2500 ms とし連続的に繰り返し提示し, 被験者に左右のマウスボタンで判断結果を応答させる. 平行アレー実験の場合には, 音刺激の想定音源の順序は図 7 (a) に示すように右基準音源, 右比較音源, 左基準音源, 左比較音源の順とし, 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図 7 (b) のように被験者から遠方に狭くなっているか, 逆に図 7 (c) のように遠方に広がっているかを被験者に判断させる. 一方等距離アレー実験の場合には, 音刺激の想定音源の順序は右基準音源, 左基準音源, 右比較音源, 左比較音源の順とし, 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) の音源間隔よりも図 8 (b) のように広いか, 図 8 (c) のように狭いかを判断させる.

基準音源対の想定距離および音源間隔はそれぞれ  $4\sqrt{2}$  m および 0.4 m, それに対して比較すべき音源対

の想定位置は、距離が  $2\sqrt{2}$  および 4m、音源間間隔が 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8m と設定した。但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。

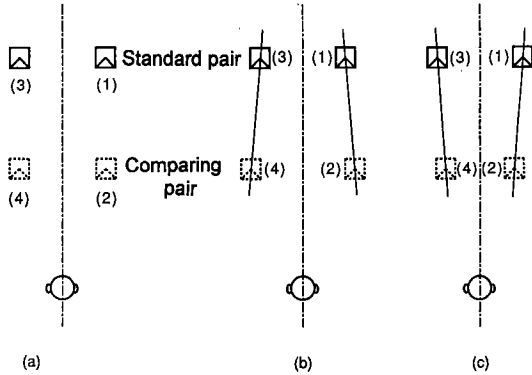


図7 平行アレー測定実験における想定音源の提示順序と知覚される音源位置関係

Fig.7 Order of display and relations between two pairs of virtual sound sources in experiments of parallel alley.

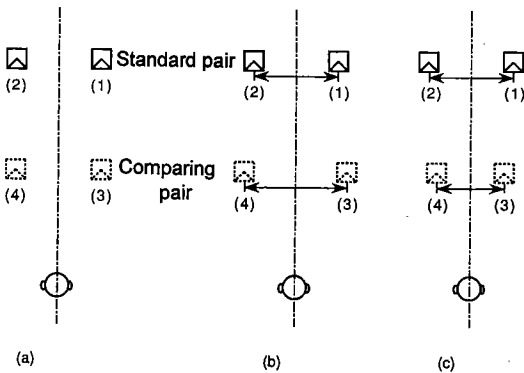


図8 等距離アレー測定実験における想定音源の提示順序と知覚される音源位置関係

Fig.8 Order of display and relations between two pairs of virtual sound sources in experiments of equi-distance alley.

### 2.3 実験結果と解析

アレー測定実験の1回の試行では、比較すべき音源対のある想定距離に対し、5種類の音源間間隔をランダムな順序でそれぞれ4回ずつ想定し、基準音源対との相対位置あるいは音源間間隔の広狭を被験者に判断させた(判断回数20回)。平行および等距離アレーに対し、それぞれ2種類の想定距離について試行を行い、計4試行をもって1セットの実験とした。予備実験で現象を確認した後、詳細なデータ取得を3名の被験者(男性1名、女性2名)について行った。

実験結果として得られた精神測定関数にプロビット法[17]を適用して、比較すべき音源対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間隔の1/2の値を推定した。例を表2に示す。2番目の例を基準音源対の位置と共に図示したのが、図9である。ここで平行アレーの測定結果が白丸、等距離アレーの結果が黒丸で、それぞれ中央部の点が、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、

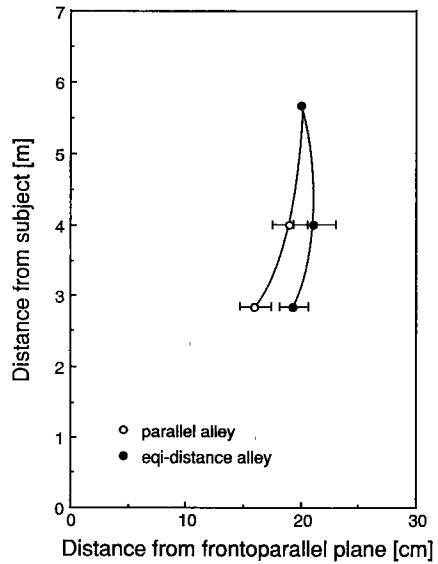


図9 解析結果

Fig.9 Results of analysis.

表2 比較すべき音源対の正中面からの距離の主観的等価点 [cm]

Table 2 Subjective distance from frontoparallel plane. [cm]

Example		1		2		3		
Alley(p:parallel,d:equi-distance)		p	d	p	d	p	d	
distance [m]	4	average	18.1	20.0	19.0	21.1	26.9	32.9
		standard deviation	2.7	2.2	1.6	1.8	3.3	3.9
	$2\sqrt{2}$	average	15.1	18.1	15.9	19.3	18.2	19.0
		standard deviation	2.9	2.7	1.4	1.2	3.1	1.6

左右の線分が標準偏差を示している。

実験結果からは、仮想環境上の聴空間において、平行アレー・等距離アレーがともに物理的正中面平行線とは異なる形状をもつこと、また平行アレーが等距離アレーよりも正中面よりにあることが一般的傾向として得られた。すなわち、仮想環境を利用した本実験において、聴空間における主観的正中面平行線（平行アレー）や主観的正中面等距離線（等距離アレー）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、更に聴空間において平行アレーが等距離アレーよりも正中面より存在することが確認された。これは、実環境上の視空間や聴空間における平行アレーと等距離アレーの関係と同様の傾向である。

### 3. 聴覚アレーを説明する空間知覚モデル

#### 3.1 空間知覚モデルの定式化

筆者らは、生体内情報を変数として「スカラ加算モデル」と呼ぶ神経回路網モデルを構成し、視空間や聴空間におけるホロプタやアレーの形状の距離依存性を、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統一的に説明した[18]。すなわち種々の空間知覚現象において、不変となる知覚量を学習過程における規範関数とする。このとき、生理学的知見による制約を仮定したスカラ学習則をもつ神経回路網モデル（「スカラ加算モデル」）の学習には限界があり、規範関数との間に特有の傾向をもった誤差が残る。この誤差が、知覚空間におけるホロプタやアレーの形状の距離依存性をもたらす。

更に筆者らは、音の強さと両耳間時間差の2情報を用いて構成したスカラ加算モデルにより、聴覚ホロプタの距離依存性が説明できることを確認した[7]。

そこで、同じく音の強さと両耳間時間差の2情報を用いて、平行および等距離アレーを説明するスカラ加算モデルを構成してみることにした。すなわち聴覚アレー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間時間差の2変数を考える。ここで音の強さ  $k$  は、文献[19]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

$$k = I_A \cdot I_B \quad (6)$$

とする。このとき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、ある場所  $(x, y)$  の音の強さ  $k$  は、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[19]。

$$(x^2 + y^2 + a^2)^2 = 4a^2x^2 + \frac{I_S^2}{k} \quad (7)$$

また両耳間時間差  $\Delta t$  については、文献[19]に記載されている位相差の式より、音速を  $v$  として次式が求められる。

$$\Delta t = \frac{\sqrt{(x+a)^2 + y^2} - \sqrt{(x-a)^2 + y^2}}{v} \quad (8)$$

$a = 8[\text{cm}]$  および  $v = 340[\text{m/s}]$  における式(8)のグラフを図10に示す。図10において20と示されている直線は、

$$\Delta t = 20[\mu\text{s}] \quad (9)$$

すなわちこの直線上にある音源からの音が、右耳に到達してから  $20 \mu\text{s}$  後に左耳に到達することを示している。

人間の聴空間知覚信号系において、平行および等距離アレーを知覚する学習の場合、学習対象（正中面に対する平行・等距離面）は物理的には

$$x = x_c \quad (10)$$

と記述される（ここで  $x_c$  は定数）。この学習対象上で、 $\Delta t$ ,  $k$ ,  $x$ ,  $y$  の中で明らかに不変量化の不可能な  $y$  を除く3変数について不変量化した式を、規範関数の候補とする。

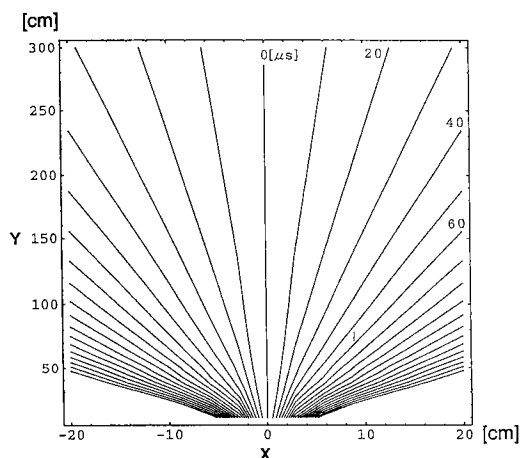


図10 両耳間時間差一定となる音源位置  
Fig.10 Interaural time difference = constant.

聴空間における平行アレーの規範関数としては、ホロプタの場合 [7] の類推から、両耳間時間差 ( $\Delta t$ ) を音の強さ ( $k$ ) の関数で加算補正する (すなわち  $\Delta t$  を不変量化した) 以下の式 (11) を想定する。

$$H_p(k, \Delta t) = \Delta t + H_t(k) \quad (11)$$

そのスカラ加算モデルとして以下の式 (12) を想定する。

$$\hat{H}_p(k, \Delta t) = \Delta t + \hat{H}_t(k) \quad (12)$$

ここで右辺第 1 項  $\Delta t$  は、正中面平行線における  $\Delta t$  を  $k$  で記述したものである。また右辺第 2 項  $\hat{H}_t(k)$  は、正中面平行線知覚機能の獲得過程における学習による収束結果として得られるスカラ関数で、学習領域を  $s$ 、この領域内における学習点の密度分布関数を  $\rho(\Delta t, k)$  として、

$$\hat{H}_t(k) = \frac{\int_s \rho(\Delta t, k) H_p(k, \Delta t) ds}{\int_s \rho(\Delta t, k) ds} \quad (13)$$

と記述される [18]。そこで学習領域を正中面からの距離 ( $x$ ) 方向に  $x_{min}$  から  $x_{max}$ 、学習点の分布を正中面からの距離 ( $x$ ) に関して一様と仮定した場合、式 (13) に式 (11) を代入し、また  $\Delta t$  を  $x$ 、 $k$  の 2 変数で表すように式を変形して次式を得る。

$$\hat{H}_t(k) = \frac{\int_{x_{min}}^{x_{max}} \Delta t(x, k) dx}{x_{max} - x_{min}} \quad (14)$$

一方聴空間における等距離アレーの規範関数  $H_d(k, \Delta t)$  としては、「距離」という知覚量が加法性を満たす必要があることから、 $x$  を不変量化した次式を想定する。

$$H_d(k, \Delta t) = H_u(k) + H_c(\Delta t) = x_c \quad (15)$$

そのスカラ加算モデル  $\hat{H}_d(k, \Delta t)$  としては、次式を想定する。

$$\hat{H}_d(k, \Delta t) = \hat{H}_u(k) + \hat{H}_c(\Delta t) \quad (16)$$

ここで右辺第 1 項  $\hat{H}_u(k)$  および右辺第 2 項  $\hat{H}_c(\Delta t)$  は、正中面からの距離を知覚する機能の獲得過程における学習領域を、両耳を通る前額平行線 ( $x$  軸) からの距離 ( $y$ ) 方向に  $y_{min}$  から  $y_{max}$ 、また学習点の分布を距離 ( $y$ ) に関して一様と仮定した場合、式 (14) と同様にして以下の 2 式を得る。

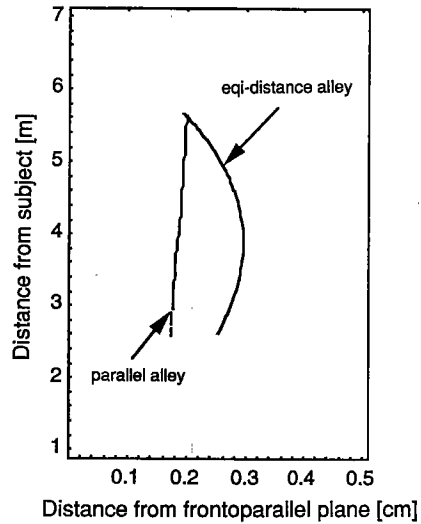


図 11 シミュレーション結果の一例  
Fig. 11 An example of the results of simulation.

$$\hat{H}_u(k) = \frac{\int_{y_{min}}^{y_{max}} x(y, k) dy}{y_{max} - y_{min}} \quad (17)$$

$$\hat{H}_c(\Delta t) = \frac{\int_{y_{min}}^{y_{max}} x(y, \Delta t) dy}{y_{max} - y_{min}} \quad (18)$$

### 3.2 実験結果の検討

種々の学習領域 (積分範囲) について式 (14)、(17)、(18) を求め、式 (12) (平行アレー) および式 (16) (等距離アレー) の両曲線の形状を検討した。このシミュレーションの結果、仮想環境を利用した聴覚アレーに関する心理物理実験の結果と同じ傾向、すなわち平行アレーや等距離アレーの形状が、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、更に平行アレーが等距離アレーよりも正中面より存在することが、学習領域によらない一般的傾向として確認された。

基準音源対の座標を通る両曲線のシミュレーション結果の一例 (平行アレーは  $x_{min} = 0$  [mm],  $x_{max} = 300$  [mm], 等距離アレーは  $y_{min} = 1000$  [mm],  $y_{max} = 18000$  [mm]) を図 11 に示す。

## 4. むすび

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ーに関する心理物理

実験システムの構成を実現した。構成した実験システムで測定実験を行い、

- 聴空間における主観的正中面平行線（平行アレー）や主観的正中面等距離線（等距離アレー）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

- 更に聴空間において平行アレーが等距離アレーよりも正中面より存在すること（被験者数3名）を確認した。これは、実環境上の視空間や触空間における平行アレーと等距離アレーの関係と同様の傾向である。

更に音の強さと両耳間時間差の2情報を用いて、仮想環境上の聴空間における平行および等距離アレーを説明する空間位置知覚モデルを構成した。シミュレーションの結果、仮想環境提示システムを利用して行った心理物理実験の結果を、本モデルで説明できることが確認された。

**謝辞** 本研究の遂行にあたり、はみ台の作成に御協力頂いた櫻井彌壽雄技官、被験者として御協力頂いた和泉聡子事務補佐員、自ら設計・試作したシースルー型HMDを御提供頂いた元修士課程学生（現在東京電力）大石峰士氏をはじめ、熱心に討論し助言を与えて下さった館研究室の皆様へ感謝致します。

また本論文の不十分な点を御指摘下さり、的確な御助言を賜った査読者の方々にも、深く感謝致します。

## 文 献

- [1] H.V. Helmholtz, "Treatise on psychological optics," Optical Society of America, vol.3, pp.482, 1925.
- [2] F. Hillebrand, "Theorie der scheinbaren GröÙe bei binocularen Sehen," Denkschriften der Wiener Akademie, Mathematisch-Naturwissenschaft Klasse, vol.72, pp.255-307, 1902.
- [3] 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.
- [4] E. Rubin, "Haptische untersuchungen," Acta Psychologica, vol.1, pp.285-380, 1936.
- [5] W. Blumenfeld, "The relationship between the optical and haptic construction of space," Acta Psychologica II, vol.2, pp.125-174, 1937.
- [6] 大倉典子, 館 暉, "距離に関する音源定位と聴空間におけるホロプラ," 計測自動制御学会論文集, vol.30, no.11, pp.1287-1292, Nov. 1994.
- [7] 大倉典子, 前田太郎, 館 暉, "聴覚ホロプラを説明する空間位置知覚モデル," 計測自動制御学会論文集, vol.34, no.10, Oct. 1998.
- [8] 大倉典子, 柳田康幸, 館 暉, "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, vol.31, no.9, pp.1318-1323, Sept. 1995.

- [9] M. Ohkura, Y. Yanagida, and S. Tachi, "Sound distance localization using virtual environment," HCI International '95 in Tokyo, Yokohama, Japan, pp.485-490, July 1995.
- [10] 柳田康幸, 館 暉, "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, vol.8, no.3, pp.325-330, 1993.
- [11] 大石峰士, 館 暉, "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, vol.12, no.6, pp.911-918, 1994.
- [12] 大倉典子, 大石峰士, 館 暉, "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, vol.13, no.4, pp.580-582, 1995.
- [13] 藤永保他編, "新版心理学事典," 平凡社, 東京, 1981.
- [14] 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.
- [15] P.D. Coleman, "An analysis of cues to auditory depth perceptin in free space," Psychological Bulletin, vol.60, no.3, pp.302-315, 1963.
- [16] P.H. Lindsay and D.A. Norman, "Human Information Processing—An Introduction to Psychology," Academic Press, 1977. P.H. リンゼイ, D.A. ノーマン著, 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.
- [17] D.J. Finney, "Probit Analysis," Cambridge University Press, London, 1971.
- [18] 前田太郎, 館 暉, "ホロプラ現象における視空間幾何学の機序に関する一考察," 信学論 (D-II), vol.J81-D-II, no.1, pp.162-173, Jan. 1998.
- [19] 館 暉, "バイスペ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, vol.9, no.6, pp.105-114, June 1973.

(平成9年12月10日受付, 10年4月20日再受付)



大倉 典子 (正員)

昭51東大・工・計数卒。昭53同大学院工学系研究科計数工学専門課程修士課程了。(株)日立製作所中央研究所, 日立超LSIエンジニアリング株式会社を経て, 昭62より(株)ダイナックス勤務。平7東大大学院工学系研究科先端学際工学専攻博士課程了, 博士(工学)の学位を取得。CAI, 聴覚情報を利用したヒューマンインタフェースの研究等に従事。計測自動制御学会, 日本バーチャルリアリティ学会等各会員。





柳田 康幸

昭63 東大・工・計数工卒。平2 同大大学院工学系研究科計数工学専攻修士課程了。同年東京大学先端科学技術研究センター助手。平9 東京大学大学院工学系研究科助手。主として人工現実感システムなどの研究に従事。日本音響学会、計測自動制御学会、日本ロボット学会、日本バーチャルリアリティ学会等各会員。平10 日本バーチャルリアリティ学会学術奨励賞受賞。



前田 太郎 (正員)

昭62 東大・工・計数工卒。昭62 通産省工業技術院機械技術研究所に入所。ロボット工学部バイオロボティクス課研究員を経て、平4 東京大学先端科学技術研究センター助手。平6 東京大学大学院工学系研究科助手を経て、平9 同研究科講師。工博(東大)。人間の知覚特性とモデル化、神経回路網モデル、マンマシンインターフェイス、テレイグジスタンスなどの研究に従事。平2 計測自動制御学会論文賞、平9 同学会学術奨励賞、平3 日本ロボット学会技術賞受賞。



館 暲

昭43 東大・工・計数工卒。昭48 同大大学院工学系研究科計数工学専門課程博士課程了。同年東京大学助手。昭50 通産省機械技術研究所研究員。その後主任研究官、遠隔制御課長、バイオロボティクス課長、マサチューセッツ工科大学(MIT) 客員研究員、東京大学先端科学技術研究センター教授を経て、平6 東京大学工学部教授に就任。ロボット工学、計測制御工学、人工現実感などが専門分野。盲導犬ロボット、テレイグジスタンス、人工現実感などの研究を行う。IEEE/EMBS 学会賞、通産産業大臣賞、IMEKO 特別勲功賞などを受賞。国際計測連合(IMEKO) ロボティクス会議議長、重点領域「人工現実感」領域代表、日本バーチャルリアリティ学会会長などを務める。主著に、「メカトロニクスのはなし」(日刊工業新聞社)、「自然とロボット：盲導犬」(桐原書店)、「バーチャル・テック・ラボ」(工業調査会)、「人工現実感」(日刊工業新聞社) などがある。