

# 人間の空間知覚特性 -ホロプタとアレイの知覚-

大倉典子\*<sup>1</sup>, 前田太郎\*<sup>2</sup>, 舘 暲\*<sup>3</sup>

Human Characteristics of Space Perception  
- Perception of Horopter and Alleys -

MICHIKO OHKURA\*<sup>1</sup>, TARO MAEDA\*<sup>2</sup>, and SUSUMU TACHI\*<sup>3</sup>

**Abstract** -- As the human characteristics of space perception, the phenomena of subjectively straight lines such as Helmholtz's horopter, the parallel alley, and the equi-distance alley are well-known in binocular visual space. In this paper, these phenomena and other similar phenomena in tactile space and auditory space are introduced. Mathematical models to explain these phenomena are also introduced, and an example of the application to the virtual system is explained.

**Keywords** : space perception , horopter , parallel alley , equi-distance alley , mathematical model

## 1. はじめに

人間の空間知覚については、心理学の分野において様々な研究がなされている。例えば、人間は暗空間（または空間的な2次的手がかりのない空間）であっても、光点その他の対象の3次元空間中での位置や距離などを両眼視によって知覚することができる。この際に基準となるのが対象点に対する視空間上の主観的直線であり、その特性を示すものとしてホロプタやアレイが、心理学において古くから知られている[1][2]。

最近、バーチャルリアリティや3次元CGの研究や技術開発が盛んに行われるようになってきたのに伴い、工学分野においても人間の空間知覚に対する関心が高まってきた。そこで本論文では、ホロプタやアレイについてのこれまでの研究をまとめて紹介することにした。

本論文では、まず第2章において視空間のみならず触空間や聴空間におけるホロプタやアレイの現象についても紹介する。第3章ではそれらを説明するための数学モデルについて紹介し、さらに第4章ではバーチャルリアリティ研究への応用例を示す。

## 2. ホロプタとアレイ

### 2.1 ホロプタ

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、Helmholtzのホロプタが古くから知られている[1]。Helmholtz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額面平行面との交線を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。暗室で小光点を用いて測定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、図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

\*1 : 芝浦工業大学工学部

\*2 : NTTコミュニケーション科学基礎研究所人間情報研究部

\*3 : 東京大学大学院情報理工学系研究科

\*1 : Faculty of Engineering, Shibaura Institute of Technology

\*2 : NTT Communication Science Laboratories

\*3 : Graduate School, The University of Tokyo

見されている[3][4]. この曲線は, 図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 Helmholtz の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. そこで著者らは, 距離に関する音源定位の基礎実験を無響室で行い, 聴空間においても Helmholtz のホロプタと同様の現象が生じることを確認した[5][6]. 聴空間におけるホロプタの実験結果を図3に示す. 図3の(a)(b)は, 聴空間におけるホロプタがこの2種類に分類されたことを示している. この実験結果から,

「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」

ということが確認され, これは統計的にも検証された. この形状の傾向は, 「主観的額面平行線が物理的な額面平行線と一致する距離がある」という点で視空間におけるホロプタ[1]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触空間におけるホロプタ[2][3]とは傾向が異なっている. しかし, 同一の被験者に対して聴空間におけるホロプタと視空間におけるホロプタとを測定したところ, 主観的額面平行線が物理的な額面平行線と一致する距離が, 聴空間におけるホロプタと視空間におけるホロプタでは異なることがわかった. すなわち, 聴空間におけるホロプタでは 1.5m と 2.5m の間であるのに対し, 視空間におけるホロプタでは 1.5m 付近あるいはそれより被験者側であった. そこで, 視空間, 触空間, 聴空間におけるホロプタの形状は, 同一の個人でもそれぞれ異なっているという結論に達した.

2.2 アレイ

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イがある. 図4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) を通る額面平行面との交線とし, 曲線 p が平行アレイを, 曲線 d が等距離アレイを示している. 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

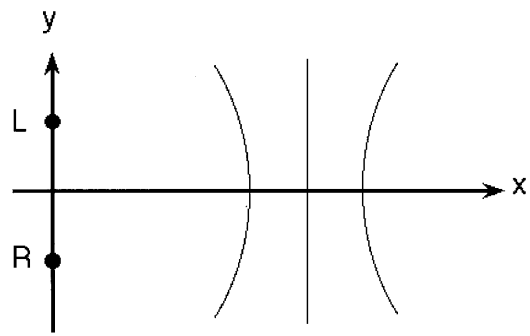


図1 Helmholtz のホロプタ  
Fig.1 Helmholtz's Horopter

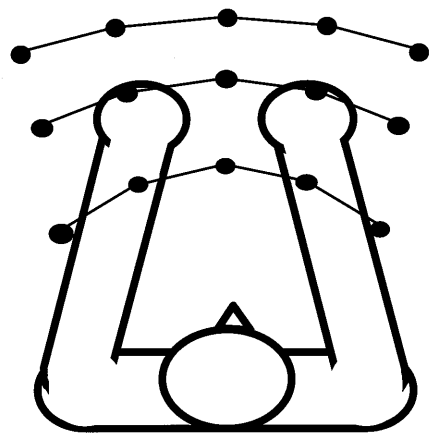


図2 触空間における主観的額面平行線  
Fig.2 Horopter curves in tactile space

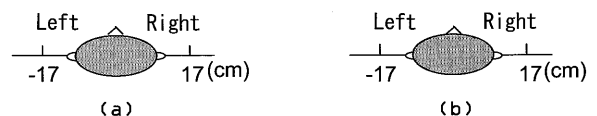
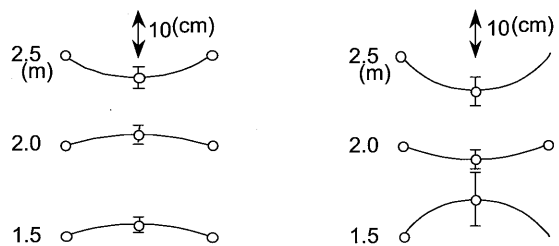


図3 聴空間における主観的額面平行線  
Fig.3 Horopter curves in auditory space

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）に依存する形状を持つ曲線になる。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、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持つ曲線になる[2]。この2種類の主観的直線の物理的形状には、図4に示すように、一般に平行アレイが等距離アレイよりも正中面よりになる傾向がある[7]。

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、図5に示すように、上肢運動感覚に基づく同様の現象（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[8]。

感覚モダリティの類似性から、またホロプラ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イ現象の存在が予測される。聴空間上における主観的正中面平行線の測定には、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とき、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。そこで著者らは、音源距離知覚の研究を目的として構成したバーチャル環境提示システム[9][10]を用いて、聴空間における平行および等距離アレイを測定する心理物理実験システムを実現した。構成した実験システムで測定実験を行った結果、図6に示すように

- ・ 聴空間における平行アレイや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
- ・ 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[11][12][6]。

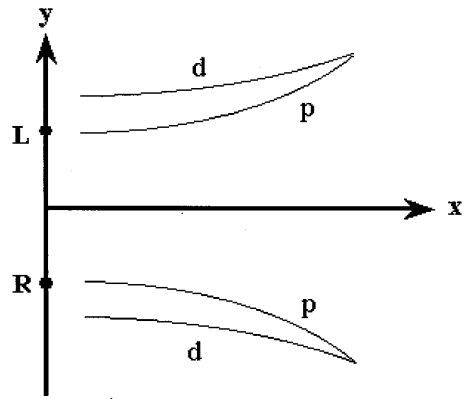


図4 視空間における主観的正中面平行線

Fig.1 Alleys in visual space

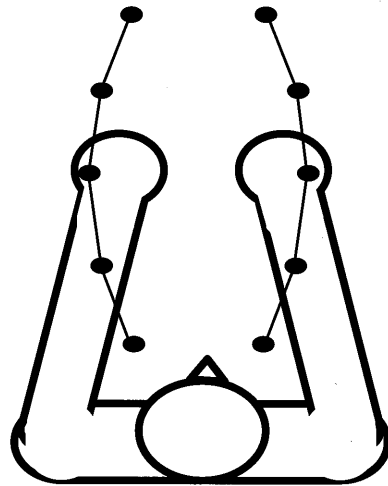


図5 触空間における主観的正中面平行線

Fig.2 Alleys in tactile space

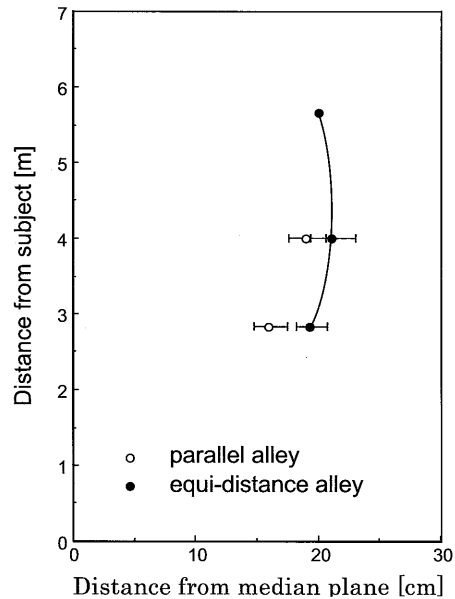


図6 聴空間における主観的正中面平行線

Fig.3 Alleys in auditory space

すなわち、聴覚に関しては人工現実感を利用したバーチャルな環境下ではあるが、実環境の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が得られた。

### 3. ホロプタとアレイを説明する数学モデル

#### 3.1 Luneburg のモデル

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 Luneburg のモデルがよく知られている[13]。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。

すなわち心理的な両眼視空間の座標系を $(\xi, \eta, \zeta)$ として、物理空間の座標系における変数との対応関係に仮定をおくことにより、ホロプタ、平行アレイ、等距離アレイは、それぞれ次式により近似される。

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

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

$$\frac{K}{4}(\xi^2 + \eta^2) + 1 = C\eta \quad (3)$$

ここで  $A, B, C$  は定数である。

Luneburg 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  $\sigma$  (物理空間の座標系における変数を心理空間の座標系における変数に変換する際の、奥行き知覚に関する定数) 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。言い換えれば、このモデルでは、視空間におけるホロプタの形状(図 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、図 4 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。たとえば文献[14]によれば、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は、この空間が双曲幾何学の成立する Lobacevskii-Bolyai の空間であるとすれ

ば説明がつく。

またこのモデルに対しては、その後様々な視点からその妥当性についての議論が行われており、ホロプタに関する研究(例えば[15])や平行アレイと等距離アレイに関する研究(例えば[16])以外に、視覚三角形を用いることにより三角形の性質を利用して両眼視空間の幾何学的性質を検証する研究も数多く存在する(例えば[17][18])。その中には、このモデルの妥当性を示していない結果もある(例えば[19][20])。

#### 3.2 スカラ加算モデル

Luneburg 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、なぜこのモデルでホロプタやアレイの形状の距離依存性を記述できるのか、あるいはこのモデルによって決定される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い。これに対し、ホロプタやアレイの形状の距離依存性を生成する機序を明確にする考え方として、「スカラ学習説」を提案し、人間の知覚系における視覚体験による学習の結果として説明したのが、「スカラ加算モデル」である[21][22]。

「スカラ加算モデル」では、ホロプタやアレイ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ている。この生理学的知見による制約を「スカラ学習則」と呼ぶ。またこの学習則に基づいて学習を行なう以下のモデルを「スカラ加算モデル」と呼び、その構造は図 7 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。

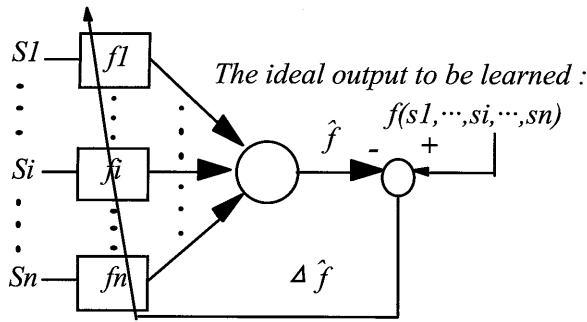


図7 スカラ加算モデル

Fig.7 Independent Scalar Learning Element Summation Model

$$\hat{f}(s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_n) = \sum_{i=1}^n \hat{f}_i(s_i) + C \quad (4)$$

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。

$$\Delta \hat{f}_i = \Delta \hat{f} = f - \hat{f} \quad (5)$$

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（学習領域）における規範関数  $f$  の期待値に収束する。

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、これは図8に示す輻輳角 ( $\gamma$ ) 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

$$\begin{aligned} \hat{H}(\gamma, \phi) &= \gamma + \hat{H}_C(\phi) \\ \hat{H}_C(\phi) &= E_\phi[H(\gamma, \phi)] + C \end{aligned} \quad (6)$$

というモデルがホロプタと同様の特徴を示した。なお、ここで  $E_\phi[H(\gamma, \phi)]$  は規範関数  $H(\gamma, \phi)$  の視線方向角 ( $\phi$ ) に関する期待値である。

このモデルでは、ホロプタは、両眼による注視を行なっている際の輻輳角を視線方向の関数によって加算補正し、その和を不変にする軌跡として表わされる。

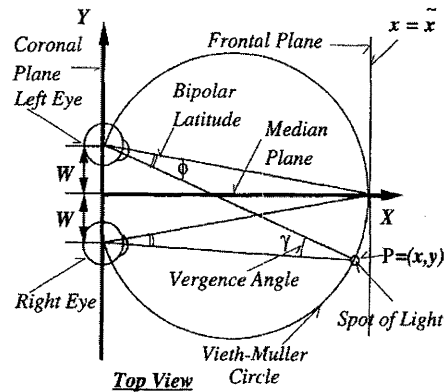


図8 輻輳角と視線方向角

Fig.8 Definitions of the vergence angle and the bipolar latitude

また「スカラ加算モデル」は、上肢の運動感覚に基づく触空間におけるホロプタやアレイの形状の距離依存性の知覚モデルとしても利用されている[23][24]。

以上のように、「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。また、Lunenburgのモデルとも数学的に対応がとれている[22]。

### 3.3 スカラ加算モデルの聴空間への適用

前章の聴空間におけるホロプタやアレイの測定実験の過程において、両耳に到達する音刺激の強さ、両耳強度差、両耳到達時間差などが聴空間を構成する上での手がかりになっていることがわかった。しかし、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く[25][26][27]、聴覚における空間知覚に利用されている生体内情報が何であるかは明らかでない。そこで、聴空間に対しては、音の強さ ( $k$ ) と両耳時間差 ( $\Delta t$ ) を生体内情報の代わりに用いてホロプタやアレイの形状の距離依存性を説明する「スカラ加算モデル」を構成した。x軸、y軸を図1や図4に示したようにとり、聴空間知覚において、両耳を含む額面平行面からの距離の方向の学習領域を  $y_{\min}$  から  $y_{\max}$ 、正中面からの距離の方向の学習領域を  $x_{\min}$  から  $x_{\max}$  とおくと、聴空間のホロプタに対するスカラ加算モデルは

$$\hat{H}(k, \Delta t) = k - \frac{\int_{y_{\min}}^{y_{\max}} k(y, \Delta t) dy}{y_{\max} - y_{\min}} \quad (7),$$

平行アレイに対するスカラ加算モデルは

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

$$\hat{H}_t(k) = -\frac{\int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \Delta t(x, k) dx}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (8),$$

等距離アレイに対するスカラ加算モデルは

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

$$\hat{H}_u(k) = \frac{\int_{y_{\min}}^{y_{\max}} x(y, k) dy}{y_{\max} - y_{\min}} \quad (9)$$

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

となる。これらの式を用いてシミュレーションを行った結果、図3や図6の実験結果を説明できることがわかった[28][11][6]。

#### 4. バーチャルリアリティ研究への応用例

人が直接作業を行うのが危険な環境下でロボットに作業を行わせるような場合、オペレータが直接そのロボットの存在する場所で作業をしているような臨場感を有して現場の状況を把握し作業を行えることが望ましい。そこでロボットからオペレータへの感覚フィードバックを臨場感の高いものとするための研究が盛んに行われており、これらはトレイグジスタンスの研究と呼ばれている(例えば[29][30][31])。

臨場的に視覚情報を提示するシステムにおいて重要なのは、視覚情報提示系を介して見た場合の心理的な視空間が、実空間で直接見た場合の心理的な視空間と一致することである。そこで著者の一人は、トレイグジスタンスにおける視覚情報提示系の臨場感を定量的に調べる一つの方法として、ホロプタを利用した[32]。

すなわち、この研究では、

- ・ 臨場的に視覚情報を提示する新しい方式を提案し
- ・ その設計法を明らかにし
- ・ その設計法に基づいて視覚情報提示装置を研究試作し

- ・ その効果を定量的に評価するために、視覚情報提示系を介した場合と直接視の場合について、心理的な視空間をホロプタを用いて測定し
- ・ そのホロプタの形状を、視覚情報提示系を介した場合と直接視の場合とで比較し
- ・ 臨場的に視覚情報を提示するための設計法の妥当性を検証している。

図9に示したのはその実験結果の一部で、1.5インチのシステムで観測距離(d)が2mの場合である。提案した設計法によれば、提示系の接眼レンズと対物レンズの焦点距離( $f_s, f_m$ )の最適値はそれぞれ13mm, 60mmとなる。図9によれば、両者がこの値をとる場合のホロプタが直接視のホロプタと最も良く一致していることから、提案した設計法の妥当性を示している。

ここで重要なのは、視覚情報提示系を介して見た場合の心理的な視空間を、物理的な実空間との一致ではなく、実空間で直接視した場合の心理的な視空間との一致で検証している点である。

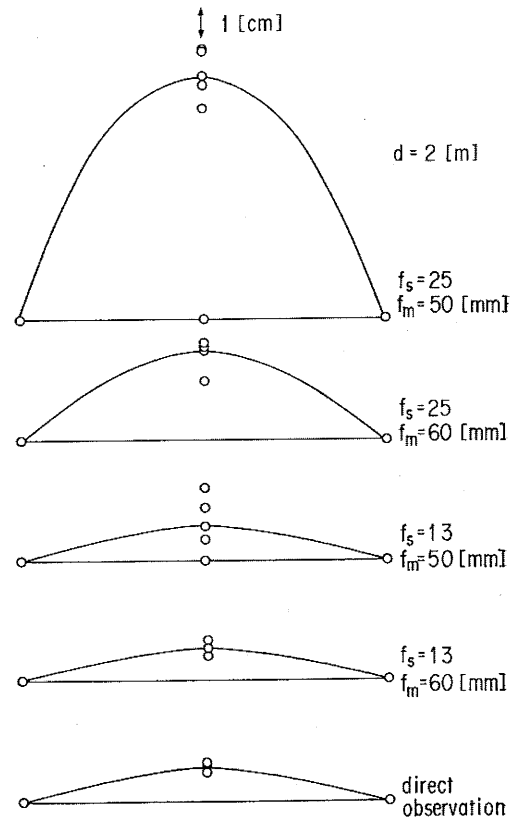


図9 異なる提示パラメータ間の比較

Fig.9 Comparison among different display parameters

本来、バーチャルリアリティとは、「みかけや形は現物そのものではないが、本質的あるいは効果としては現実であり現物であること」[33]であり、従ってバーチャル環境が実環境と同等かどうかは、「バーチャル環境の効果である心理的空間が実環境の効果である心理的空間と同等かどうか」で評価する必要がある。そこで、視覚情報提示系を介した場合のホロプタは、直接視した場合のホロプタと比較すべきである。もしも、視覚情報提示系を介した場合のホロプタを物理的額面平行線（直線）と比較し、両者が一致するように視覚情報提示系の設計パラメータを調整したとすると、それは人間が実空間で直接視するのとは同等でなくなってしまう点に注意したい。

## 5. まとめ

人間の空間知覚について、主観的額面平行線であるホロプタと、主観的正中面平行線である平行アレイ、主観的正中面等距離線である等距離アレイを取り上げ、視空間、触空間、聴空間におけるこれらの形状が、いずれも物理空間では必ずしも直線にならず、距離に依存することを紹介した。

さらにこれらの主観的平行線の形状の距離依存性を説明する数学モデルとして、

- ・ 両眼視空間を非ユークリッドな計量空間で近似した、少数のパラメータで記述するための幾何学モデルである Luneburg のモデル
- ・ 知覚の手がかりとなっている生体内情報を変数として、生理学的知見による制約によってホロプタやアレイの形状の距離依存性が生じたと説明するスカラ加算モデル

を紹介した。

最後に、これらの主観的平行線のバーチャルリアリティ研究への応用例として、視覚情報提示系の臨場感の定量的な測定・検証法としてのホロプタの測定事例を紹介した。

暗室あるいは無響室で測定されるホロプタやアレイの実験結果は、種々の情報が付加されている通常の実環境における空間知覚と必ずしも一致するものではない。しかし、バーチャルな環境を創製する場合、主として計算によって実環境と等価な環境を構成する手法をとることか

ら、一次手がかりである暗室条件を満たすことが、まずは必要であると考えられる。明室条件でのテクスチャ情報や壁や床による反響音などは、暗室条件を満足した後に考慮すべき内容であろう。

バーチャルな環境を創製する場合には、実環境と同等の臨場感を生起させることが重要である。そこでバーチャルな環境の臨場感を評価・検証する場合には、物理的な実環境が再現されているかどうかではなく、その環境から構築される心理空間の構造が、実環境から構築される心理空間の構造と一致しているかどうかを比較する必要がある。心理空間の構造の指標として、主観的平行線であるホロプタやアレイを測定する場合には、それらが心理空間における主観的な平行線であることから、実環境の物理的平行線ではなく、実環境における主観的平行線と比較することになる。従って、実環境と同等の臨場感を有するバーチャルな環境で測定される主観的平行線は、実環境における主観的平行線同様に形状の距離依存性を有し、物理的な平行線とは一致しない。この点を踏まえた上で、今後これらがさらに広く利用されることを期待したい。

## 参考文献

- [1] H.V. Helmholtz: Treatise on Psychological Optics, Optical Society of America, Vol.3, pp.482.A (1925)
- [2] F. Hillebrand: Theorie der scheinbaren Größe bei binocularen Sehen, Denkschriften der Wiener Akademie, Mathematisch-Naturwissenschaft Klasse, Vol.72, pp.255-307 (1902)
- [3] E. Rubin: Haptische Untersuchungen, Acta Psychologica, Vol.1, pp.285-380 (1936)
- [4] G. Siemsen: Experimentelle Untersuchungen über die taktil-motorische Gerade, Psychologische Forschung, Vol.19, pp.61-101 (1934)
- [5] 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タ, 計測自動制御学会論文集, Vol.30, No.11, pp.1287-1292 (1994)
- [6] M. Ohkura, Y. Yanagida, T. Maeda, and S. Tachi: Measurement of Horopter and Alley in Auditory Space, Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Auditory Display, pp.333-341 (2002)
- [7] 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)
- [8] W. Blumenfeld: The relationship between the optical and haptic construction of space, Acta Psychologica II, Vol.2, pp.125-174, (1937)
- [9] 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 (1995)
- [10] M.Ohkura, Y.Yanagida, and S.Tachi: Sound Distance Localization using Virtual Environment, HCI International '95 in Tokyo, Yokohama, pp.485-490 (1995)
- [11] 大倉典子, 柳田康幸, 前田太郎, 舘 暉: 仮想環境における聴覚アレイの測定とその数学モデル, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J81-D-II, No.10, pp.2438-2446 (1998)
- [12] M.Ohkura, Y.Yanagida, Taro Maeda, and S.Tachi: Measurement of Auditory Alleys in a Virtual environment and Their Mathematical Models, Systems and Computers in Japan, Vol.31, No.4, pp.12-21 (2000)
- [13] R.K. Luneburg: The Metric of Binocular Visual Space, Journal of the Optical Society of America, Vol.40, pp.627-642 (1950)
- [14] 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).
- [15] 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, Vol.26, No.3, pp.204-236 (1982)
- [16] T.Indow, E.Inoue, K.Matsushima: An Experiment study of the Luneburg theory of binocular space perception (2): The alley experiments, Japanese Psychological Research, Vol.4, pp.17-24 (1963)
- [17] A.A.Blank: Curvature of binocular visual space, An experiment, Journal of the Optical Society of America, Vol.51, pp.335-339.(1961)
- [18] 渡辺利夫: 視覚三角形による視空間の曲率の推定, 心理学研究, Vol.67, No.4, pp.278-284 (1996)
- [19] J. M. Foley: Visual Space: A test of the constant curvature hypothesis, Psychonomic Science, Vol.1, pp.9-10.(1964)
- [20] A. Higashiyama: Curvature of binocular visual space: A modified method of right triangle, Vision Research, Vol.24, pp.1713-1718 (1984)
- [21] 前田太郎, 舘 暉: ホロプタを生じる空間知覚モデル, 計測自動制御学会論文誌, Vol. 25, No.10, pp.1111-1118 (1989)
- [22] 前田太郎, 舘 暉: ホロプタ現象における視空間幾何学の機序に関する一考察, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J81-D-II, No.1, pp.162-173 (1998)
- [23] 前田太郎, 舘 暉: 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誌, Vol.29, No.2, pp.201-210 (1993)
- [24] 前田太郎, 舘 暉: 体制感覚性注視運動における両眼視と上肢位置感覚の統合, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J76-D-II, No.3, pp.717-728 (1993)
- [25] 谷口郁雄, 福西宏有: 脳の聴覚情報処理, 情報処理, Vol.30, No.2, pp.129-136 (1989)
- [26] 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, Vol.48, No.5, pp.313-319 (1992)
- [27] M.Konishi: Listening with Two Ears, Scientific American, Vol.268, No.4, pp.34-41 (1993) 小西正一(森浩一訳): メンブ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, pp.90-99 (1993)
- [28] 大倉典子, 前田太郎, 舘 暉: 聴覚ホロプタを説明する空間位置知覚モデル, 計測自動制御学会論文誌, Vol.34, No.10, pp.1472-1477 (1998)
- [29] 舘 暉: テレイグジスタンス - 未来の夢と現在の技術 -, 日本ロボット学会, Vol.4, No.3, pp.295-300 (1986)
- [30] 舘 暉, 安田 賢一: テレイグジスタンス・マニピュレーション・システムの設計と評価, 電気学会雑誌, Vol.115-C, No.2, pp.172-181 (1995)
- [31] 柳田 康幸, 舘 暉: HMD型テレイグジスタンスシステムの頭部運動時における視野角不整合の影響, 日本バーチャルリアリティ学会, Vol.7, No.1, pp.69-78 (2002)
- [32] 舘 暉, 荒井裕彦: テレイグ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, Vol.7, No.4, pp.314-326 (1989)
- [33] 舘 暉: バーチャルリアリティ入門, 筑摩書房 (2002)

(2003年12月2日受付)

## [著者紹介]

大倉 典子 (正会員)



1978年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。㈱日立製作所中央研究所, 日立超LSIエンジニアリング㈱, ㈱ダイナックスを経て(この間に1995年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了), 1999年より芝浦工業大学工学部教授。人間の視聴覚特性, 植物の生育制御技術, CAI, 聴覚情報を利用したヒューマンインタフェース, 人にやさしい情報インタフェース, 感性情報処理等の研究に従事。博士(工学)。

前田 太郎 (正会員)



1987年東京大学工学部卒業, 同年通産省工業技術院機械技術研究所に入所, 同所ロボット工学部バイオロボティクス課研究員, 東京大学先端科学技術研究センター助手, 同大学大学院工学系研究科助手, 同大学大学院工学系研究科講師, 同大学大学院情報学環講師を経て, 2002年よりNTTコミュニケーション科学基礎研究所人間情報研究部に勤務。人間の知覚特性とモデル化, 神経回路網モデル, マンマシンインタフェース, テレイグジスタンスなどの研究に従事。1990年計測自動制御学会論文賞, 1997年同学会学術奨励賞, 1991年日本ロボット学会技術賞受賞, 1999年, 2001年, 2002年日本VR学会論文賞受賞。工学博士。



館 暲 (正会員)



1973年東京大学大学院博士課程修了，工学博士，東京大学助手。75年通産省機械技術研究所研究員。その後主任研究官，バイオリボティクス課長。79年から80年マサチューセッツ工科大学客員研究員。89年東京大学先端科学技術研究センター助教授，92年同センター教授，94年工学部教授，現在，情報理工学系研究科教授。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おこなう。IEEE/EMBS学会賞，通商産業大臣賞などを受賞。国際計測連合学会(IMEKO)ロボティクス会議議長，重点領域「人工現実感」領域代表者，CREST「テレイグジスタンス」研究代表者，日本バーチャルリアリティ学会初代会長などを務める。日本ロボット学会フェロー。