

聴覚ホロプタを説明する空間位置知覚モデル†

大倉典子*・前田太郎**・館 暲**

Mathematical Model for Space Perception to Explain Auditory Horopter Curves

Michiko OHKURA*, Taro MAEDA** and Susumu TACHI**

For binocular visual space, it is well-known that horizontal lines which appear straight on a subjective frontoparallel plane are not always straight in the physical sense, and that the form of the lines depends on the distance from the observer. A similar phenomenon is also known for tactile space. Then, we conducted fundamental experiments on sound localization with distance, and confirmed the similar phenomenon for perceived binaural auditory space. On the other hand, we proposed a mathematical model for space perception to explain visual and tactile horopter curves by using biological information and constraints. This model, named ISLES (Independent Scalar Learning Element Summation) model, succeeded to explain the dependency on the distance of the horopter curves uniformly. From the results of other experiments we conducted, sound intensity and interaural time differences seem to be quite important cues for sound localization with distance. In this paper, these cues are employed instead of biological information to construct ISLES model to explain auditory horopter curves. The constructed model for space perception is examined by simulation. As the results of the simulation, the followings are obtained.

- By using sound intensity and interaural time differences as parameters, the constructed model can explain the dependency of auditory horopter curves on distance.
- The differences of the curves between subjects are explained by the differences of individual learning areas for space perception.
- Relatively near part of the learning area of ISLES model for visual horopter is not included in the learning area of ISLES model for auditory horopter.

That is, this model successfully explains the results of fundamental experiments on sound localization with distance.

Key Words: mathematical model, space perception, auditory horopter, sound intensity, interaural time differences

1. はじめに

両眼視空間において、主観的額面平行面上で直線に見える水平線（主観的額面平行線）が必ずしも物理的な直線とは一致せず、その形状が被験者からの距離に依存するという現象は、ヘルムホルツのホロプタとしてよく知られている¹⁾。また触覚においても、上肢運動感覚に基づく同様の現象が発見されている^{2),3)}。そこで著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同様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⁴⁾。

また一方で著者らは、「スカラ加算モデル」と呼ぶ神経回路網モデルを提案し、視空間や触空間におけるホロプタの距離依存性を、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、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した^{5),6)}。

距離に関する音源定位実験において、音源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に、音圧と両耳間時間差がある。そこで本論文では、この2情報を変数として用い、聴覚ホロプタを説明するスカラ加算モデルを定式化した。さらに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。

以下第2章において、距離に関する音源定位の基礎実験の結果の概略を述べ、また第3章第1節においてスカラ加算モデルについて概説する。以上の既発表の事項を前提として、それ以降において聴覚ホロプタを説明するスカラ加算モデルを定式化し、さらにシミュレーションによる検討結果について説明する。

† 第35回計測自動制御学会学術講演会で発表(1996・7)

* (株)ダイナックス 府中市府中町 1-12-7

** 東京大学工学部 東京都文京区本郷 7-3-1

* DYNAX Co., Fuchu

** Faculty of Engineering, The University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo

(Received April 9, 1997)

(Revised June 2, 1998)

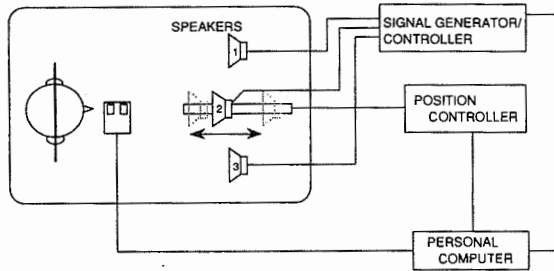


Fig. 1 Experimental system of sound localization

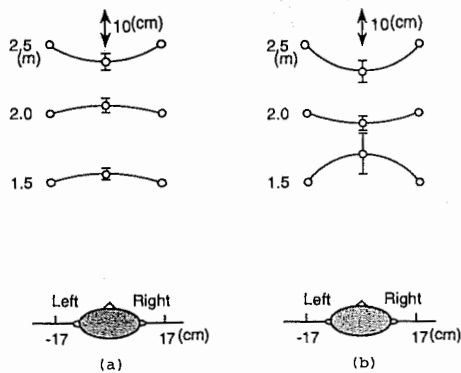


Fig. 2 Experimental results

2. 距離に関する音源定位の基礎実験

本章の内容は文献⁴⁾による。

2.1 実験システムおよび実験方法

本実験で用いた音源定位実験システムの概念図を、Fig. 1に示す。暗い無響室内に、3台のスピーカを音源として置いた。各スピーカは、被験者の両外耳道の上縁を結ぶ線分を含む水平面上とし、スピーカ1, 3の位置はこの線分の中点から等距離に固定した。またスピーカ2の位置は、被験者の水平面と正中面の交線上で、コンピュータが前後に移動させることができるようにした。

この実験システムにおいて、スピーカ2のスピーカ1, 3に対する主観的な相対位置を測定した。音源定位の測定法には、精神物理学的測定法の一つである恒常法⁷⁾を用いた。

試験音としては、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。

2.2 実験結果と解析

聴空間上のスピーカ2の位置の推定には、プロビット法⁸⁾を用いた。推定した結果をスピーカ1, 3の位置と共に図示したのが、Fig. 2(a),(b)である。それぞれ中央部の点がスピーカ2の位置の推定された平均値、上下の線分が標準偏差を示す。両図は、2種類の相異なる形状の代表例である。

これらの解析結果から得られた知見は以下の通りである。

- 聴空間における主観的額面平行線（聴覚ホロプタ）が物理的な額面平行線とは必ずしも一致せず、その形状が音源までの距離に依存することを確認した。

- その形状は、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を検証した。これは視空間におけるホロプタ^{1),9)}と同様の傾向であり、常に手前に凹型の曲線となる聴空間におけるホロプタ^{2),3)}とは傾向が異なっている。

さらに本実験で用いたシステムにおいて、スピーカ上部に加工したLEDを取り付けることにより、聴覚ホロプタを測定した同一被験者に対して視覚ホロプタの測定実験を行った。その結果と上記の実験結果とを比較し、以下の知見を得た。

- 同一被験者の視空間と聴空間は構造が類似しているが、聴空間の変曲点の方が遠方にあり座標系は同一でない。

3. 聴覚ホロプタの形状を説明する空間知覚モデル

3.1 スカラ加算モデル

本項の内容は文献^{5),6)}による。著者らは視覚ホロプタや聴空間のひずみの現象に対し、以下のような考察を行った。

ホロプタ現象は主観的直線および平行という後天的に獲得したと考えられる直交座標系上の知覚概念に基づくものであり、その感覚量は各感覚器からの生得的な信号に基づいて後天的な学習によって生成されるようになったものと考えられる。本来、物理空間と知覚空間の対応付けを行う空間知覚過程は数学的に見れば十分に計算可能な学習課題であり、その信号処理系が二つの空間の間の座標変換を数学的に完全に学習できるならば、二つの空間は完全な整合性をもって対応付けられることになる。しかし実際の人間の空間知覚過程は、その対応付けを適応的に学習できるにもかかわらず、物理空間との間に定常的なずれを残す。このことから、このずれの原因は後天的な要素ではなく、生体の信号処理系の学習メカニズムにおける先天的な生理的制約からくるものであるという仮説が成立する。

ここで著者らは生理学的知見に基づき、「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搬することはない」という制約を想定し、教師付き学習に対してこうした制約を与えた学習規則を「スカラ学習則」と名付けた。さらにこの生理学的知見による制約を仮定したスカラ学習則に基づいてスカラ量の学習を行うモデルとして「スカラ加算モデル」を提案し、これを用いて、視空間や聴空間におけるホロプタや、同じく知覚的直線として知られている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統一的に説明した。

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、スカラ学習則を持つ神経回路網モデル（「スカラ加算モデル」）の学習には、この制約に起因する限界があり、規範関数との間に特有の傾向を持った誤差が残る。この誤差が、知覚空間におけるホロプタやアレイの形状の距離依存性をもたらす。

このモデルでは、その知覚の手がかりとなっている生体内情報を変数として用いている。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 (γ) および視線方向角 (ϕ) を空間知覚に用いる生体内情報として、この2変数を用いて説明している。すなわちこのときのホロプタを知覚する学習過程における規範関数を $H(\gamma, \phi)$ 、これを学習するスカラ加算モデルを $\hat{H}(\gamma, \phi)$ とすると、視空間におけるホロプタを説明するスカラ加算モデルは次式で表すことができる。

$$\hat{H}(\gamma, \phi) = \gamma + \hat{H}_C(\phi) \quad (1)$$

ここで学習による収束結果として得られるスカラ関数 $\hat{H}_C(\phi)$ は、学習領域内における学習点の密度分布関数を $\rho(\gamma, \phi)$ として、

$$\hat{H}_C(\phi) = \frac{\int_{\gamma_{\min}}^{\gamma_{\max}} \rho(\gamma, \phi) H(\gamma, \phi) d\gamma}{\int_{\gamma_{\min}}^{\gamma_{\max}} \rho(\gamma, \phi) d\gamma} \quad (2)$$

と記述される。式(1)によれば、 $\hat{H}(\gamma, \phi)$ の値がこれを代表する定数 $\hat{\gamma}_C$ をとるとき、ホロプタは次式が示す軌跡としてその形を描く。

$$\gamma + \hat{H}_C(\phi) = \hat{\gamma}_C \quad (3)$$

3.2 聴覚ホロプタを説明するスカラ加算モデルの変数

第2章で概説したように、距離に関する音源定位実験において、聴覚ホロプタの形状の距離依存性を確認した⁴⁾。この実験は距離定位に関するものではなかったが、その定位の要因まで明らかにするものではなかった。音源定位は方向定位と距離定位とに分けられ、そのうち方向定位に関しては、両耳聴における音圧差・時間差などの左右差、あるいはスペクトラル・キューなどの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^{10)~13)}。それに対し距離定位の手がかりに関しては、複数の手がかりの状況依存的な相互作用が非常に複雑なため、得られている知見にも議論が多い^{10)~12)}。そこで著者らは、各手がかりを分離独立して制御するための仮想環境提示システムを構成し、これを利用して文献¹⁴⁾の追試等の音源距離定位の実験を行い、音圧が距離定位の重要な手がかりとなっていることを定量的に確認した¹⁵⁾。一方、同じ仮想環境提示装置を用いて行った、仮想環境下における平行および等距離アレイの測定実験においても、両耳に到達する音刺激の音圧と両耳音圧差および両耳到達時間差のみを制御して、これらを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¹⁶⁾。

現在音源定位の神経生理的解明は研究途上にあり、音源方向定位が話題の中心となっており距離定位はあまり考慮の対象となっていないものの、定位の手がかりが脳内でどのように処理されているのかが次第に明らかにされつつある^{17)~19)}。これらの研究によると、聴覚情報処理において生体が空間知覚に用いている情報は、視・触覚の眼球あるいは上肢におけるような運動感覚に基づく生体内情報ではなく、生体内で前処理や細分化を施された物理情報である。そして音圧および両耳間時間差については、特定の値域のみに特徴的に反応する細胞群の存在が確認されている。そこで距離に関する音源

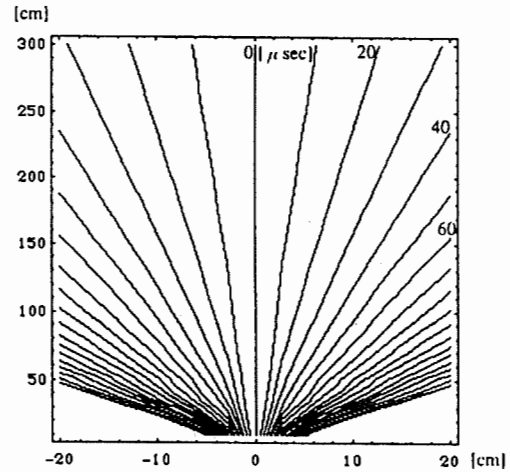


Fig. 3 Interaural time difference = constant

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、音圧と両耳間時間差を取り上げ、この2情報を用いて、聴覚ホロプタを説明するスカラ加算モデルについて検討することにした。

3.3 変数の定式表現

すなわち聴覚ホロプ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、音圧および両耳間時間差の2変数を考える。ここで音圧 k は、文献²⁰⁾に基づいて定式化する。すなわち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、音源の強度を単位距離離れた単位面積当たりのエネルギーで表すとして I_S 、原点から両耳までの各距離を a とする。左耳に到達する音の強度 I_A と右耳に到達する音の強度 I_B との積

$$k = I_A \cdot I_B \quad (4)$$

を観測したとすれば、これは次式で表現される²⁰⁾。

$$(x^2 + y^2 + a^2)^2 = 4a^2x^2 + \frac{I_S^2}{k} \quad (5)$$

また両耳間時間差 Δt については、文献²⁰⁾に記載されている両耳位置で観測される信号の位相差 θ の式

$$\theta = \frac{(\sqrt{(x+a)^2 + y^2} - \sqrt{(x-a)^2 + y^2}) \cdot 2\pi f_0}{v} \quad (6)$$

(ここで音速を v 、音の基本周波数を f_0 とする。)

より、次式が求められる。

$$\Delta t = \frac{\sqrt{(x+a)^2 + y^2} - \sqrt{(x-a)^2 + y^2}}{v} \quad (7)$$

$a = 8[\text{cm}]$ および $v = 340[\text{m/sec}]$ における式(7)のグラフを Fig. 3 に示す。

3.4 聴覚ホロプタを説明するモデルの定式化

視空間において、ホロプタを知覚するときのスカラ加算モデル(式(1))が、輻輳角 (γ) 一定の曲線 Vieth-Müller Circle を視線方向角 (ϕ) の関数で加算補正する形となっていたことから、音圧 (k) と両耳間時間差 (Δt) の関数との和

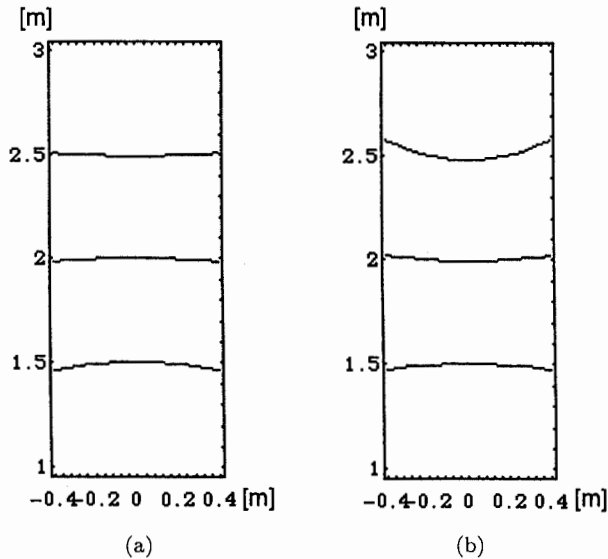


Fig. 4 Horopter Curves Obtained by Simulation
(a) Learning Area 1 ~ 10m, (b) 1 ~ 4m

$$\hat{H}(k, \Delta t) = k + \hat{H}_c(\Delta t) \quad (8)$$

として、聴覚ホロプタを知覚するときのスカラ加算モデルを想定する。

ここで式(8)の右辺第一項 k は、式(5)および式(7)を用いて、前額平行線 ($y = \text{一定}$) における k を y および Δt で記述する。また右辺第二項 $\hat{H}_c(\Delta t)$ は、空間位置知覚機能の獲得過程における規範関数 $H(k, \Delta t)$ の学習の範囲を 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すると、式(2)を視覚ホロプタ²¹⁾と同様の過程で計算して次式を得る。

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

以上の式を用いると、聴覚ホロプタを説明する式は次のように表現される。

$$\hat{H}(k, \Delta t) = k(y, \Delta t(x, y)) + \hat{H}_c(\Delta t(x, y)) = \text{一定} \quad (10)$$

4. 聴覚ホロプタを説明するモデルの検討

種々の学習領域 (積分範囲) について式(9)を求め、式(10)の曲線をプロットしてみたところ、 $y_{min} = 1[\text{m}]$ 、 $y_{max} = 10[\text{m}]$ で Fig. 4(a)、 $y_{min} = 1[\text{m}]$ 、 $y_{max} = 4[\text{m}]$ で Fig. 4(b) に示す形状を得た。(Fig. 4では、 $x = \pm 17[\text{cm}]$ 、 $y = 1.5, 2.0, 2.5[\text{m}]$ の各点を通る曲線、すなわち距離に関する音源定位実験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、距離に関する音源定位実験で得られた2種類の聴覚ホロプタの形状 (Fig. 2(a),(b)) と、それぞれの3種類の距離において得られた曲線の曲率の符号が一致しており、定性的に一致していると言える。したがってこの結果は、規範関数の学習領域における学習点の分布が距離に

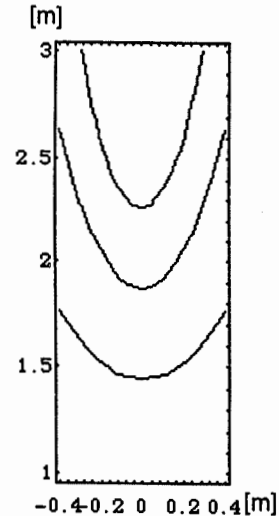


Fig. 5 Horopter Curves Obtained by Simulation
(Learning Area 0.2 ~ 20m)

関して一様と仮定した場合、音圧と両耳間時間差との2変数で聴覚ホロプタの形状の距離依存性が説明できることを示すと共に、この2種類のホロプタの形状の違いが、被験者の規範関数の学習領域の違いに起因し、Fig. 4(b) のようなホロプタの被験者よりも Fig. 4(a) のようなホロプタの被験者の方がより速くの情報まで利用して距離定位を行なっているという説明が可能であることを示していると考えられる。

また式(8)の曲線を視覚ホロプタの学習領域 (0.2 ~ 20m)⁶⁾ について求めてみた結果を、Fig. 5 に示す。この形状は実験結果 (Fig. 2(a),(b)) やこれを模擬したシミュレーション結果 (Fig. 4(a),(b)) とは曲線の曲率の符号が異なっており、その原因は学習領域に近距離 (0.2 ~ 1m) を含めた点にあることが、種々の学習領域についてのシミュレーションにより確認された。この結果は、聴覚ホロプタを測定した被験者に対する視覚ホロプタの測定結果をよく説明するものとなっている。

さらに式(8)の右辺第二項 $\hat{H}_c(\Delta t)$ において、空間位置知覚機能の獲得過程における規範関数 $H(k, \Delta t)$ の学習点の分布を距離 (y) に反比例すると仮定する、すなわち学習点の分布を $\log y$ に関して均一としてシミュレーションを行った。その結果を Fig. 6(a),(b) に示す。この結果は、Fig. 4(a),(b) と学習領域の広さに違いがあるものの、各曲線の曲率の符号という定性的な傾向には違いがなかったことを示している。

5. まとめ

著者らは距離に関する音源定位の基礎実験を行い、聴覚ホロプタの形状の距離依存性を確認した。また一方で著者らは、視空間や触空間におけるホロプタの距離依存性を、「スカラ加算モデル」と呼ぶ神経回路網モデルを用いて統一的に説明している。そこで本論文では、音圧と両耳間時間差を変数として用いて、聴覚ホロプタを説明するスカラ加算モデルを定式化した。さらにこのモデルを用い、種々の学習領域についてシミュレーションを行うことにより、以下の結果を得た。

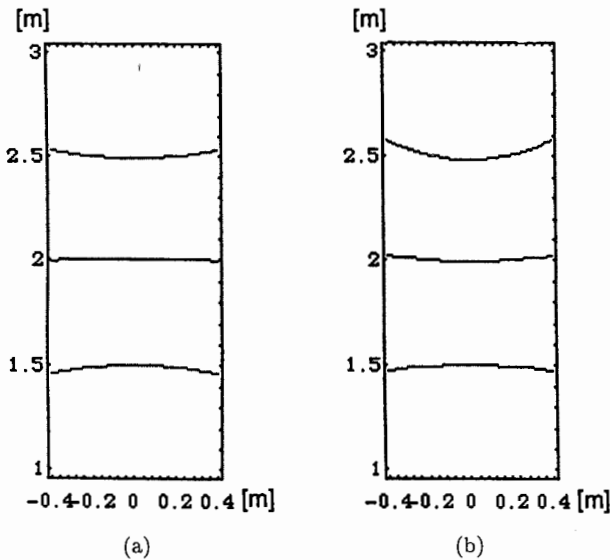


Fig. 6 Horopter Curves Obtained by Another Simulation
((a) Learning Area 1 ~ 60m, (b) 1 ~ 10m)

●音圧と両耳間時間差を変数とするスカラ加算モデルを用いて、聴覚ホロプタの距離依存性を説明できることが確認された。

●被験者による聴覚ホロプタの形状の違いは、空間位置知覚の学習領域の個人差で説明できることが示された。

●聴覚ホロプタを説明するスカラ加算モデルの学習領域は、視覚ホロプタを説明するスカラ加算モデルの学習領域ほど近距離を含まないことが示された。

すなわち本モデルは、距離に関する音源定位の基礎実験の結果をよく説明するものとなっている。

最後に、本研究内容に関して熱心にご討論・ご助言いただいた柳田康幸助手をはじめとする館研究室の方々に深く感謝する。また、本論文に関して丁寧に助言いただいた査読者の方々に深く感謝する。

参考文献

- 1) H.V.Helmholtz : Treatise on Psychological Optics, Optical Society of America, **3**, 482(1925)
- 2) E.Rubin : Haptische Untersuchungen, Acta Psychologica, **1**, 285/380 (1936)
- 3) G.Siemsen : Experimentelle Untersuchungen über die taktil-motorische Gerade, **19**, 61/101 (1934)
- 4) 大倉, 館 : 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, **30**-11, 1287/1292(1994)
- 5) 前田, 館 : 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集, **25**-10, 1111/1118 (1989)
- 6) 前田, 館 : 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, **D-II**-1, 162/173 (1998)
- 7) 藤永保他編 : 新版心理学事典, 平凡社 (1981)
- 8) D.J.Finney : Probit Analysis, Cambridge University Press(1971)
- 9) 館, 荒井 : 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, **7**-4, 314/326(1989)
- 10) 秋重義治編 : 知覚的世界の恒常性 認識心理学 III, 理想社 (1970)
- 11) 難波精一郎編 : 聴覚ハンドブック, ナカニシヤ出版 (1984)

- 12) B. C. J. Moore : An Introduction to the Psychology of Hearing, Academic Press (1989)
- 13) E.M.Wenzel : Localization in Virtual Acoustic Displays, PRESENCE, **1**-1, 80/107 (1992)
- 14) M.B.Gardner : Distance Estimation of 0° or Apparent 0° -Oriented Speech Signals in Anechoic Space, Journal of the Acoustical Society of America, **45**-1, 47/53 (1969).
- 15) 大倉, 柳田, 館 : 仮想環境を利用した音源距離定位, 計測自動制御学会論文集, **31**-9, 1318/1323 (1995)
- 16) 大倉, 柳田, 館 : 仮想環境を利用した聴空間における平行および距離アレイの測定-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4報) -日本音響学会平成7年春季研究発表会講演論文集, 459/460 (1995)
- 17) M.Konishi : Listening with Two Ears, Scientific American, **268**, 66/73 (1993)
- 18) A.N.Popper and R.R.Fay : The Mammalian Auditory Pathway: Neurophysiology, Springer-Verlag(1992)
- 19) T.C.T.Yin and J.C.K.Chan : Neural Mechanisms Underlying Interaural Time Sensitivity to Tones and Noise, in G.Edelman W.Gall and W.Cowan Eds. Auditory Function: Neurobiological bases of hearing, 385/430 Wiley(1988)
- 20) 館 : 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)
- 21) 前田, 館, 大山 : スカラ加算モデルによるホロプタ現象の数理的解明, 信学技報, **NC92**-161, 255/262(1993)

[著者紹介]

大倉典子 (正会員)



1978年東京大学工学系研究科修士課程修了。(株)日立製作所中央研究所, 日立超 LSI エンジニアリング(株)を経て, 87年より(株)ダイナックスに勤務。94年東京大学工学系研究科博士課程修了。ヒューマンインタフェースの研究に従事。電子情報通信学会, 日本バーチャルリアリティ学会などの会員(工学博士)。

前田太郎 (正会員)



1987年東京大学工学部計数工学科卒業。87年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, 92年東京大学先端科学技術研究センター助手, 94年東京大学大学院工学系研究科助手を経て, 97年同研究科講師。工博(東大)。人間の知覚特性とモデル化, 神経回路網モデル, マンマシンインタフェース, テレイグジスタンスなどの研究に従事。平2年計測自動制御学会論文賞, 平9同学会学術奨励賞, 平3年日本ロボット学会技術賞受賞。

館

樟 (正会員)



1973年同大学院工学系研究科博士課程修了,同年東京大学助手. 75年通産省機械技術研究所研究員. その後主任研究官, 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, 94年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おこなう. IEEE/EMBS学会賞, 通商産業大臣賞, 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.
