

仮想環境を利用した音源距離定位[†]

大倉典子*・柳田康幸*・館 暲*

Sound Distance Localization Using Virtual Environment

Michiko OHKURA*, Yasuyuki YANAGIDA* and Susumu TACHI*

In this paper, attention is focused on the quantitative understanding of the role of sound intensity which is considered to be a very important cue of the sound localization with distance. Experiments were conducted by using virtual environment to clarify the relation between sound intensity and apparent distance from the sound source. The results are the followings:

(1) Replacing the experiments by M. B. Gardner to the virtual environment, the experimental results obtained on virtual environment were equal to those of real world. This fact ensures that the virtual environment can give the same results as those from real environment. The experimental condition of no other cues except sound intensity confirms the conclusion by M.B.Gardner that the sound intensity is a very important cue of apparent distance from the sound source.

(2) The relation between sound intensity and apparent source distance can be expressed as the form of exponential function. Namely, it becomes a straight line in logarithmic graph.

(3) The coefficient of the proportion of the straight line in logarithmic graph is restricted by both of the range of sound source distance and the range of sound intensity. The coefficients without any restriction are larger than the results obtained by M.B.Gardner.

(4) The results obtained from the experiments using method of adjustment was equal to those obtained from the experiments using forced-choice method with ranges wide enough. These results show the coefficients obtained are independent from any experimental conditions.

The obtained results above will be quite useful to design and evaluate the system using acoustic display.

Key Words: sound intensity, sound localization, distance, virtual environment, acoustic display

1. はじめに

従来より、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(人間への入出力)は人間にとって使いやすいと考える傾向があった。しかし人間と機械とのインタフェースとして、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部分を手がかりとしてどう認知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することが必要である。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・模様などの勾配・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、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²⁾。これに対し聴覚については、その利用に際し、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であるにもかかわらず、これまで十分な研究が行われていなかった。それは、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、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。

[†] 第 33 回計測自動制御学会学術講演会で発表(1994・7)

* 東京大学先端科学技術研究センター 東京都目黒区駒場 4-6-1

* Research Center of Advanced Science and Technology (RCAST), The University of Tokyo, Meguro-ku, Tokyo

(Received October 3, 1994)

(Revised February 20, 1995)

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、聴空間の構造に関する知見(聴空間においても視空間や触空間と類似したホロプラ現象が存在すること)を明らかにした^{3),4)}。この実験は距離知覚の実験であったが、その知覚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わけられるが、方向に関しては両耳聴で強度差・時間差・位相差などの左右差という手がかりの存在が明らかになっている。それに対して距離の手がかりに関しては、その研究事例も少なく、また得られている知見もやや不明確である⁵⁾⁻⁹⁾。その原因は、実際上の実験空間の構成や被験者の応答手段の構成のしにくさなどにあると考えられる。すなわち実空間では

1. 両耳に到達する音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てしまい、したがって知覚の手がかりを個別に完全に制御することは不可能である。
2. たとえば長い距離をもち反響のない自由空間の任意の位置に音源を置くなど実験空間の構成が困難である。
3. 被験者の応答手段も構成しにくく、たとえば知覚した音源の位置に指標を置いて示してもらうなどのような設定は困難で、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してもらう、距離を数値で答えてもらうなどの方法をとらざるをえない。

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た^{9),10)}。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HMD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、聴空間を解明することにした。本論文では距離知覚の手がかりを定量的に把握することを試み、まず手がかりとして音の強さをとりあげ、その距離知覚にはたす役割を定量的に解明した。

2. 実験システムの構成

本研究で用いた仮想環境提示システムの構成の概要をFig. 1に示す。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クス画像を創製する¹¹⁾。その画像は、被験者の装着したHMD(Head Mounted Display)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し、DSPを介して

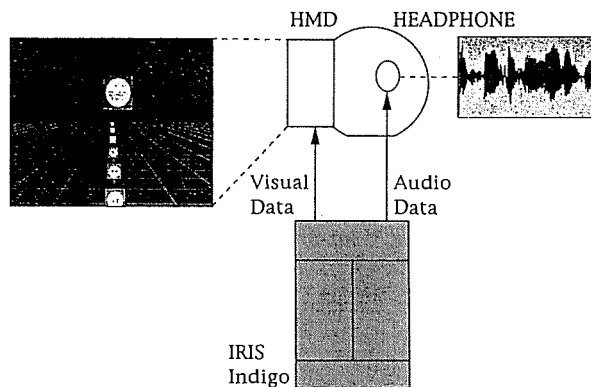


Fig. 1 A schematic diagram of virtual environmental display system

出力し、被験者の両耳にヘッドフォンにより提示する。出力レートは48 kHzとした。

HMDには、仮想環境において知覚される距離を実空間において知覚される距離と一致させるために、シースルー(See-Through)型のHMDを較正して用いた。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合せを可能にしたHMDである。重合せにより、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較正を行うことができる。今回用いたシースルー型HMD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して、較正アルゴリズム¹⁰⁾を用いて、較正パラメータが求められているものである。このHMDに対して、おもに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、距離に関して較正する方法を考案し¹²⁾、視覚的な仮想環境の距離を実環境の距離と一致させた上で、音の強さと音源距離との対応実験をおこなった。

またヘッドフォンは、Senheiser社製のHD 25 SPを用いた。

3. 実験方法

実験方法は、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13)第III章)に基づいて設定した。

M.B.Gardnerの音源距離に関する実験とは、Fig. 2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(3-9 m, 1.5 mごと)に配置し、外耳道に到達する音を種々の強さで被験者に聞かせたところ、実際の音源となったスピーカが一番手前か一番奥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決定されたという実験である。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

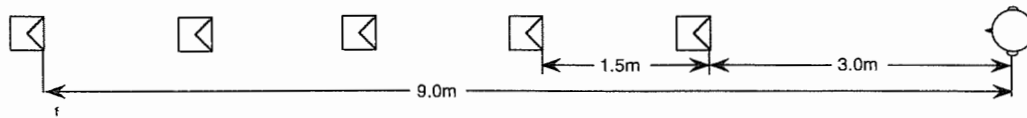


Fig. 2 Setup of experiment conducted by M. B. Gardner

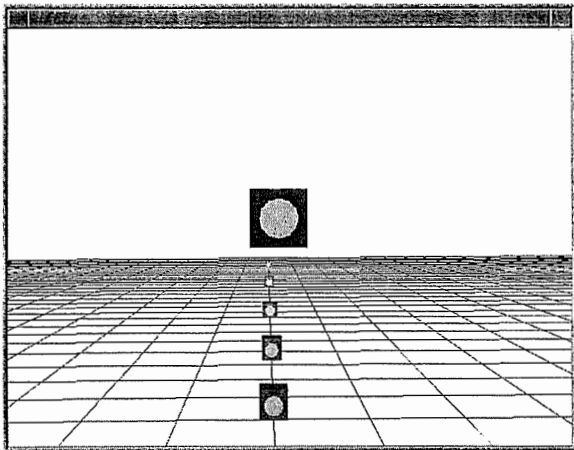


Fig. 3 An example of visual display (loudspeakers)

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ある。

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. 3 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(英文)の第一文を話す音声をDSPにより録音し,強さを制御して再生した。ある特定の強さの音を持続時間4sec.,音間間隔1sec.で提示し,同じ強さの音をもう一度繰り返したのち,つぎの強さの音の提示に移った。提示する音の強さの順序は,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,それらが,表示されているどのスピーカからの音だと思いかを2度聞いたあとで答えてほしい」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,仮想環境の距離が実環境と一致する

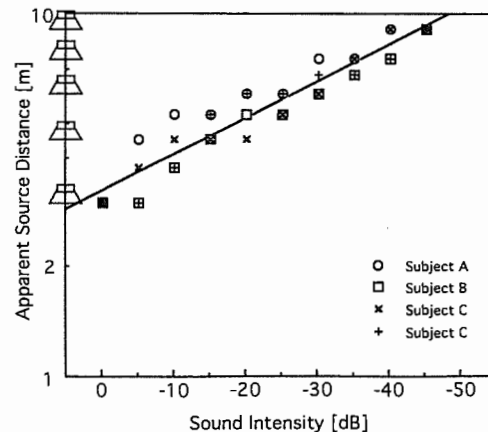


Fig. 4 Experimental results (1)

ようにHMDの視覚パラメータの較正をおこない,以後実験中,被験者の頭部は“はみ台”(被験者ごとに歯形をとり,それを固定して被験者が噛む装置)を用いて固定した。

4. 実験結果

4.1 M. B. Gardner 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った。スピーカ画像の位置は5カ所,音の強さは5dBごとで10段階とし,それぞれ5回ずつ現れるようにした。音刺激は,音声と疑似ランダムノイズを用いた。

Fig. 4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(最も強い場合を基準値0とする),縦軸をみかけの音源距離(被験者が音源と判断したスピーカの位置の平均値)の対数値にとってプロットしたものである。従来より横軸の音の強さについては対数軸で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。すなわち音の強さ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(音圧レベル)の減衰を $\Delta I[\text{dB}](>0)$ として、 x を

$$x = \frac{1}{6} \Delta I$$

みかけの音源距離を y としたときの回帰式

$$\log_{10} y = \log_{10} a + bx$$

における b を指す。Table 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. 5 は、M. B. Gardner の実験結果を、縦軸を見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、実線は文献 13) Fig. 1 の実験結果を示しており、その回帰直線の比例係数は 0.06 である。仮想環境における実験結果から得られる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とがわかる。

この結果から、M. B. Gardner の実験結果が仮想環境において検証されたといえる。すなわち、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、また「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おり、その役割はそのほかの手がかりよりも支配的である」ということが、仮想環境の利用で実現した、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の下で検証された。

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

M. B. Gardner の実験では、音の強さが 45 dB 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 ときわめて小さくなっている。そこで、この実験で得られた音の強さ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. 5 の点線は M. B. Gardner の別の実験(スピーカ位置を 1.5 m-9 m の間に広げた実験)の結果(文献 13) Fig. 3) 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 6 dB 減衰する」という実験結果¹⁴⁾を考慮し、音源距離の範囲を 8 倍、音の強さを 12 dB の範囲に設定した実験を行った。音源位置は、2 m-16 m の中を等差系列的に配置した場合(2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 m)と、等比系列的にした場合(2, $2\sqrt{2}$, 4, $4\sqrt{2}$, 8, $8\sqrt{2}$, 16 m)とを設定した。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, -6 dB, -12 dB)とした。

実験結果を Table 2 に示す。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、これらの値は Table 1 に示した M. B. Gardner の検証実験において得られた値より大きくなっている。

5. 調整法による音源定位実験

5.1 実験方法

第 3 章、第 4 章で述べた実験において、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験を行い、第 4 章の結果と比較することにした。

この実験では、HMD を装着した被験者に Fig. 6 の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、両耳の外耳道を通る水平面と正中面との交線上を、被験者のマウス制御により移動することのできる音源画像である。音源画像は、被験者のマウス操作により前後に移動する。

Table 1 Coefficients of the proportion (1)

subject	A		B		C	
	s	n	s	n	s	n
speech/noise						
coef.	0.06	0.06	0.06	0.07	0.06	0.06

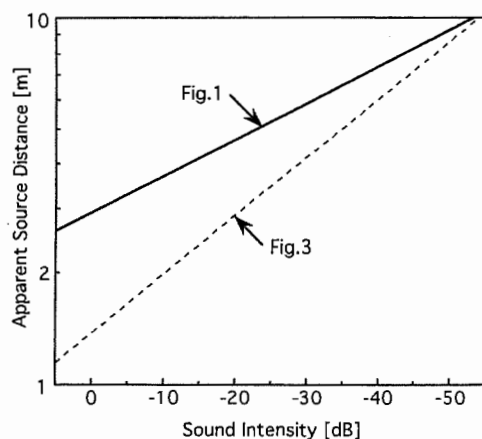


Fig. 5 Replotted results of experiments conducted by M. B. Gardner

Table 2 Coefficients of the proportion (2)

subject	A		B		D	
	prop.	exp.	prop.	exp.	prop.	exp.
coef.	0.09	0.21	0.23	0.24	0.23	0.20

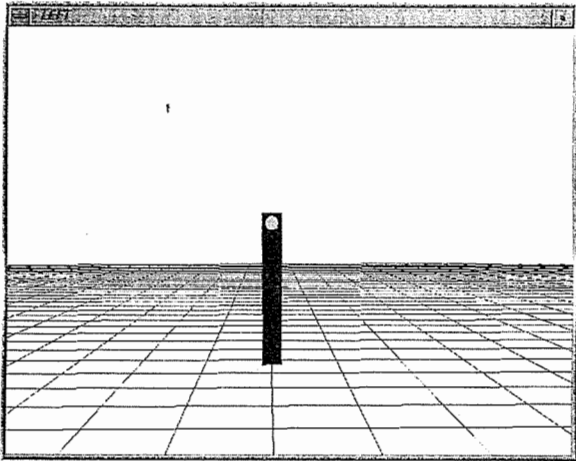


Fig. 6 An example of visual display (sound source)

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を持続時間 4 sec., 音間隔 1 sec. で提示し、同じ強さの音を、被験者が音源位置を確定するまで繰り返した後、つぎの強さの音の提示に移った。提示する音の強さの順序は、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れるようにした。強さは 4.2 節と同じように 3 種類(基準値, -6 dB, -12 dB), マウスによる音源位置の可動範囲は、被験者からの距離が 1.35 m~25.55 m とした。

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ふ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。そうするとつぎ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。

5.2 実験結果と考察

Fig. 7 に、被験者 D の実験結果を 4.2 節の実験結果と共に示す。Table 3 に実験結果から求めた回帰直線の比例係数を示す。これらの結果は、4.2 節の結果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、音源位置の範囲を十分広くして提示した場合の結果と一致した。

この結果から、Table 2, Table 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。この比例係数から、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を計算すると、約 7.5~9.0 dB となる。この値は、物理的な減衰比 6 dB¹⁴⁾ よりも大きい。しかし、「みかけの距離の増大が実際の距離の増大よりも小さくなる」という G. von Békésy の実験結果¹⁵⁾ (物理的な減衰比に基づいて計算した

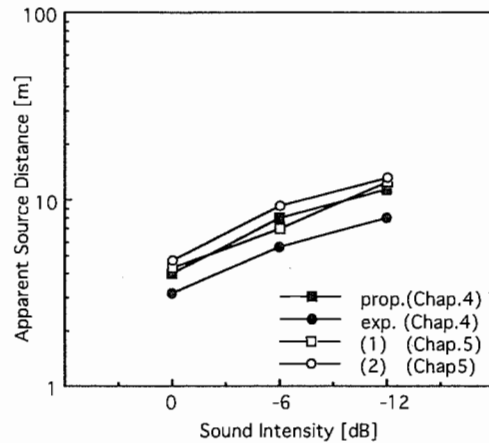


Fig. 7 Experimental results (2)

Table 3 Coefficients of the proportion (3)

subject	B	D	
coef.	0.23	0.23	0.22

比例係数は約 0.2, みかけの音源を 2 倍にする減衰比は約 9 dB となる)とはおおむね一致している。また「『半分の距離』という知覚に対応する音の強さの増加は 6 dB よりむしろ 9 dB である」という D. R. Begault の実験結果¹⁶⁾ともよく一致している。

6. おわりに

使いやすいインタフェースの設計・検討には、人間のその情報に対する認知特性の把握が不可欠である。しかし聴覚情報の利用に際しては、聴覚的空間位置知覚の手がかりや聴空間の構造などに関するこれまでの研究が十分とはいえない状況にあった。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、聴空間の構造が物理的な構造とは異なることを明らかにした。さらに、距離知覚の手がかりの影響を定量的に解明するために、仮想環境を利用して実験を行うことにした。

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と考えられる音の強さについて、その役割の定量的把握を目的とし、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った。その結果は、以下のとおりである。

(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とにより、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、また音の強さが音源距離定位においても非常に重要な手がかりであることが、実環境よりも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

関係が直線で表わ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。制約されない条件での比例係数(0.20~0.24)は、制約のある M. B. Gardner の実験結果(0.06)よりも大きくなる。

(4) 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も、表示された音源から選択する実験において得られたのと同じ結果が得られた。

(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。

以上の結果は、空間内の位置情報の聴覚的な提示をインタフェースとして用いる際に、提示法の設計・評価指針として有用な知見となると考えられる。

最後に、文献16)をご紹介いただいた NASA Ames Research Center の E. M. Wenzel 博士、音刺激の提示法についてご助言いただいた NTT 基礎研究所の柏野牧夫氏に厚くお礼申し上げます。また被験者の一人としてご協力いただいた東京大学文学部心理学科4年の渡辺克巳氏、および実験装置の構成や実験の進め方について熱心にご討論・ご助言いただき、被験者としてもご協力いただいた前田太郎助手・櫻井彌壽雄技官・和泉聡子事務補佐員をはじめとする館研究室の方々にも深く感謝する。

参考文献

- 1) 館, 廣瀬編: パーチャル・テック・ラボ, 52/72, 工業調査会 (1992)
- 2) R. K. Luneberg: The Metric of Binocular Visual Space, *Opt. Soc. Am.*, **40**, 627/642 (1950)
- 3) 大倉, 館: 距離に関する音源定位に基づく聴覚ホログラムの検討—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年度春季研究発表会講演論文集, 387/388 (1994)
- 4) 大倉, 館: 距離に関する音源定位と聴空間におけるホログラム, 計測自動制御学会論文集, **33-11**, 1287/1292 (1994)
- 5) B. C. J. Moore: An Introduction to the Psychology of Hearing, Academic Press (1989)
- 6) イェンスブラウエルト: 空間音響, 鹿島出版会 (1986)
- 7) 難波精一郎編: 聴覚ハンドブック, ナカニシヤ出版 (1984)
- 8) 境, 中山: 聴覚と音響心理, コロナ社 (1978)
- 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) 大石, 館: 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)
- 11) 柳田, 館: 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)
- 12) 大倉, 大石, 館: 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, **13-4**, 580/582 (1995)
- 13) M. B. Gardner: Distance Estimation of 0° or Apparent 0° -Oriented Speech Signals in Anechoic Space, *J. Acoust. Soc. Am.*, **45-1**, 47/53 (1969)
- 14) P. D. Coleman: An Analysis of Cues to Auditory Depth Perceptin in Free Space, *Psychological Bulletin*, **60-3**, 302/315 (1963)
- 15) G. von Bekesy: The Moon Illusion and Similar Auditory Phenomena, *Am. J. Psychol.* **62**, 540/552 (1949)
- 16) D. R. Begault: Preferred Sound Intensity for Sensation of Half Diatnce, *Perceptual and Motor Skills*, **72**, 1019/1029 (1991)
- 17) E. M. Wenzel: Localization in Virtual Acoustic Displays, *PRESENCE*, **1-1**, 80/107 (1992)

[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)ダイナミックス勤務。94年東京大学工学系研究科博士課程修了。聴覚情報を利用した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, 日本音響学会などの会員(工学博士)。

柳田康幸 (正会員)



1988年, 東京大学工学部計数工学科卒業, 90年同大学大学院工学系研究科計数工学専攻修士課程修了。同年同大学先端科学技術研究センター助手, 現在に至る。主として人工現実感システムの研究に従事。日本音響学会, 日本ロボット学会などの会員。

館 暉 (正会員)

(Vol. 31, No. 3 参照)