

距離に関する音源定位と聴空間におけるホロプタ[†]

大倉典子*・館 暲*

Sound Localization in Distance,
and Horopter in Auditory Space

Michiko OHKURA* 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. This phenomenon is known as Helmholtz's horopter. A similar phenomenon is also known for tactile space. Since sensory modalities are often analogous, it has been speculated that a similar phenomenon exists for auditory space, although evidence has not yet been provided of its existence. This may be due to the small number of studies on sound localization with distance which are necessary to measure the horopter for auditory space. We performed fundamental experiments on sound localization with distance and confirmed the existence of horopter phenomenon for perceived binaural auditory space. Namely:

- (1) Horizontal lines which appear straight on a subjective frontoparallel plane in auditory space are not always physically straight, and their form depends on the distance between the subject and the sound sources.
- (2) The dependency of the form is more similar to that for visual horopter than for tactile horopter.
- (3) Although the structure of auditory space is similar to that of visual space, there exist some differences. First, the metric for auditory space and that for visual space of the same subject are not the same. Second, auditory space has more allowance than visual space for the synthesis of the information of the subjective position.

Key Words : horopter, auditory space, sound localization

1. はじめに

視覚において、視空間上の主観的額面平行線¹⁾の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¹⁾。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. 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同様の現象が発見されている^{2),3)}。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われていなかった。

聴空間上における主観的額面平行線(聴覚ホロプタ)の

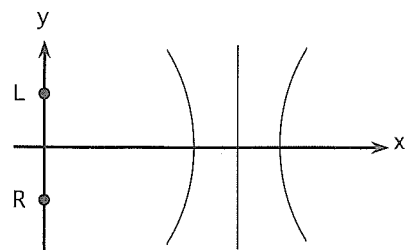


Fig. 1 Helmholtz's horopter

[†] 第 32 回計測自動制御学会学術講演会で発表(1993・8)

* 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 for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo, Meguro-ku, Tokyo

(Received September 13, 1993)

(Revised February 14, 1994)

測定には、距離に関する音源定位の測定が必要である。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われておらず^{4)~8)}、したがって聴空間におけるホロプタの概念に至らなかったと推察される。

このたび距離に関する音源定位の基礎実験を行い、聴空間においてホロプタの現象が生じることを確認したので、報告する。

2. システム構成

本研究で用いた音源定位実験システムの概念図を、Fig. 2 に示す。

暗い無響室内には 3 台のスピーカが音源として置かれている。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にあり、スピーカ 1, 3 の位置は被験者の正中面に対して対称(正中面からそれぞれ 17 cm)に固定されている(注 1)。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。また実験中には、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(聴覚情報)を出力させる。

3. 実験方法

上述した実験装置において、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するのが、今回の音源定位実験である。

3.1 音源定位の測定法

音源定位の測定法には、精神物理学的測定法の一つで

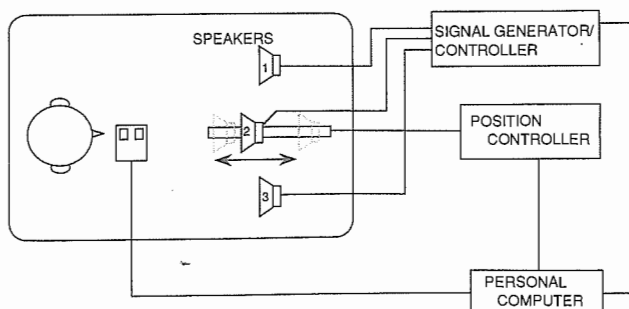


Fig. 2 Experimental system of sound localization

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、「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(刺激-反応曲線)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方法である⁹⁾。本実験では、スピーカ 2 を前後に移動させて種々のランダムな位置におき、3 台のスピーカから音を出して、スピーカ 2 の位置がスピーカ 1, 3 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より、スピーカ 1, 3 に対するスピーカ 2 の相対的な音源定位を行う実験を行った。

3.2 音の提示方法

試験音としては、バンドパスフィルタを通したホワイトノイズを用いた。視覚ホロプタの測定では、通常複数の小光点を同時に表示する。しかし聴覚ホロプタの測定では、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は、順次断続的に提示することにした。その場合の音の持続時間や音間隔は、仮現運動を起こさず、しかも音の相互比較が可能な値を選定する必要がある。これらは、予備実験の結果から、持続時間 200 msec.、音間隔 300 msec. とした。また一連の音(スピーカ 1, 2, 3)を出して 1 sec. の休止時間を入れ、つぎに逆の一連の音(スピーカ 3, 2, 1)を出してまた 1 sec. 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(Fig. 3)。

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

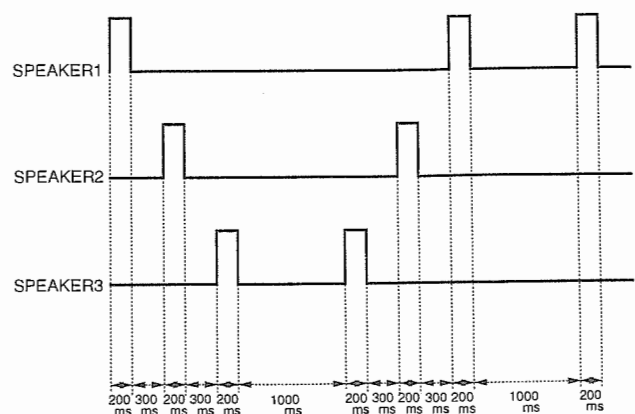


Fig. 3 Time sequence of output of speakers

(注 1) 予備実験により、見込み角一定になるようにスピーカ 1, 3 を設置した場合も同様の形状のホロプタが得られたが、ここでは視覚ホロプタ¹³⁾と比較を行うことを前提として、スピーカ間隔を固定して実験を行った。

3.3 音の提示位置

スピーカ 2 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、基本位置(被験者の正中面と、スピーカ 1, 3 を結んだ直線との交点)の前後 30 cm とした。移動可能位置は 10 cm 刻みの 7 箇所(基本位置の手前 30 cm, 20 cm, 10 cm, 基本位置, 基本位置の奥 10 cm, 20 cm, 30 cm)とし、コンピュータの制御により、ランダムな順序で移動するようにした。

スピーカ 2 の基本位置と、被験者の両外耳道の上縁を結ぶ線分の midpoint との距離は、1.5 m, 2.0 m, 2.5 m のいずれかとした。

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、音の系列を聞いて、スピーカ 2 からの音が手前にあるか奥にあるかの判断がついた時点で、利き手の人指し指または中指で 2 個の押しボタンのいずれか一つを押すように指示した。

1 回の実験では、

- (1) スピーカ 2 をランダムな位置へ移動する。
- (2) 音の系列を出力し、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 箇所的位置のうち両端の 2 箇所が 2 回ずつとほかの位置が 5 回ずつである。スピーカ 2 の移動時間と移動距離は、途中で移動方向を反転させることにより、常に一定とし、被験者に位置移動量に関する手がかりを与えないようにした。実験に要する時間は、個人の判断に必要な時間にもよるがおおむね 30 分程度であり、これを被験者とスピーカ 2 との距離を変えて繰り返した。

予備実験は 8 名(男性 6 名女性 2 名, 年齢 22~41 才)に対して行い、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

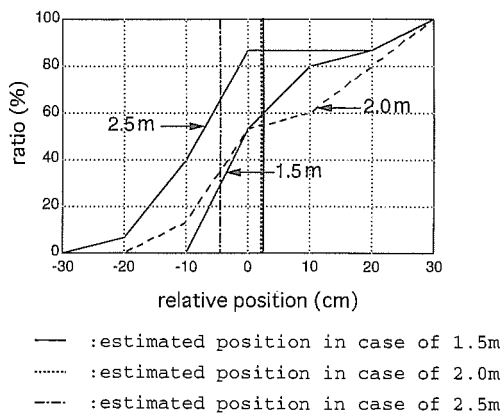


Fig. 4 Results of experiment

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、実験を繰り返して数量的な解析に必要な詳細なデータを取得した。

4. 実験結果と解析

4.1 実験結果

Fig. 4 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。ここで横軸はスピーカ 2 の基本位置からの相対位置(手前が負, 奥が正), 縦軸はスピーカ 2 の位置を「奥」と判定した確率である。

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⁵⁾。しかしこの例にも示されているように、相対比較の場合には、1.5 m~2.5 m の距離において ±30 cm 以上で音源の前後関係が 100% 正しく知覚できることが、今回の実験により確認された。

4.2 結果の解析

聴空間上のスピーカ 2 の位置の推定(すなわち「奥」と判定する確率が 50% になる主観的等価点の推定)には、プロビット法¹⁰⁾を用いた。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。Fig. 4 には、それぞれの精神測定関数について、プロビット法によりスピーカ 2 の位置を推定した結果を示している。さらにこれをスピーカ 1, 3 の位置とともに図示したのが、Fig. 5 (a) である。ここで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している。ただし位置の平均値と標準偏差は横軸と同一の縮尺で表示し、スピーカ 2 の基本位置と被験者との距離の縮尺は、表示の都合上大きくとってある。さらに Fig. 5 (b) は、Fig. 4 および Fig. 5 (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。

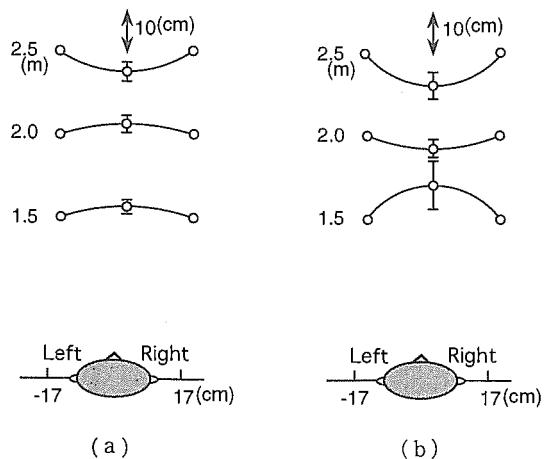


Fig. 5 Results of analysis

距離が 1.5 m の場合について、主観的位置の推定値が基本位置より奥にあることを統計的に検証するために、各被験者について、推定された主観的相対位置が 0 より大きいという対立仮説に対して、片側検定を行った¹¹⁾。すなわち帰無仮説を

$$x < 0$$

ただし x : スピーカ 2 の主観的相対位置の推定値とし、

$$T = \frac{\sqrt{n} \cdot x}{s}$$

ただし n : プロビット法における試行数の荷重和

s : スピーカ 2 の主観的相対位置の推定誤差

を検定統計量として、検定を行った。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 (Table 1)。また距離が 2.5 m の場合についても、主観的位置の推定値が基本位置より手前であることを、同様の仮説検定により検証した (Table 1)。

これらの解析結果から、スピーカ 2 の音源位置は、距離が 1.5 m の場合には実際 (物理的位置) よりも被験者の奥側に知覚され、距離が 2.5 m の場合には実際よりも被験者の手前側に知覚されていることがわかった。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た。これは視空間におけるホロプタ^{12),13)}と同様の傾向であり、常に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。

すなわち、本実験により聴覚ホロプタ現象が存在すること、さらにその形状が視覚型であり触覚型とは異なることが確認された。

Table 1 Test of subjective positions of speaker2

distance [m]	1.5			2.5		
	A	B	C	A	B	C
subject						
estimated subjective 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
degree 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***

***significant at 0.5% level

5. 視覚ホロプタとの比較

5.1 視覚ホロプタ実験

聴覚ホロプタを測定した被験者に対し、その傾向をさらに詳細に比較する目的で視覚ホロプタの測定実験を行った。

実験装置は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、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、聴覚の場合と同様の恒常法によった。

3 個の LED は同時に表示した。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) の手前 8 cm から後ろ 4 cm とした。移動可能位置は 2 cm 刻みの 7 個所 (基本位置の手前 8 cm, 6 cm, 4 cm, 2 cm, 基本位置, 基本位置の奥 2 cm, 4 cm) 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、1.0 m, 1.5 m, 2.0 m, 2.5 m のいずれかとした。

5.2 実験結果の比較

視覚ホロプ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で解析した。推定された主観的相対位置や信頼区間を与える閾値^{10),14)}について、聴覚表示の場合と共にまとめた表を、Table 2 に示す。

まず主観的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 1.5 m と 2.5 m の間にあり、視空間では被験者から 1.5 m 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 1.8 m, 視覚表示で 0.2 m, 被験者 B に関して聴覚表示で 2.0 m, 視覚表示で 1.5 m となる。したがってつぎの結論を得た。

(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

Table 2 Results of probit analysis

subject	A				B			
	auditory		visual		auditory		visual	
display								
distance [m]	1.5	2.5	1.5	2.5	1.5	2.5	1.5	2.5
subjective position [cm]	2.5	-4.8	-1.9	-3.4	8.1	-6.8	-0.2	-4.7
threshold (fiducial probability) [cm]	6.8	8.1	1.5	3.2	12.7	4.7	0.4	2.3

び75%を与える点までの刺激値(ここでは相対位置)の幅のことであり、その比較からつぎの結果が得られた。

(2) 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、片側検定を行った¹¹⁾。検定にはつぎの検定統計量を用いた。

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

ただし

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

ここで T の自由度 ν は次式で与えられる。

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

Table 3 に、それぞれの距離および被験者について検定を行った結果を示す。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。

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)ことがわかった。

従来より、同一の物理量に対して視覚と聴覚の間で食い違いの生ずることが知られていたが^{15),16)}、今回の実験により、視覚と聴覚とに関してもこの食い違いの存在が示唆された。

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¹⁷⁾、上記予測の傍証とみなすことができる。

6. おわりに

距離に関する音源定位の基礎実験を行い、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、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った。その結果と上記の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が、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や、聴空間のほうが主観的位置知覚の統合に対して許容度が大きいことを示した。

最後に、実験装置の構成に際しご助力をいただいた東京大学工学部山崎弘郎教授((現)横河電機(株))、同高橋弘太助手((現)電気通信大学)、東レ滋賀事業場河村明德氏に厚くお礼申し上げます。プロビット法に関してご教示いただいた東京大学教養学部下條信輔助教にも心よりお礼申し上げます。また制約時間の長い実験に快くご協力いただいた被験者の方々、および熱心にご討論・ご助言・ご助力いただいた柳田康幸助手、前田太郎助手、櫻井彌壽雄技官をはじめとする館研究室の方々に深く感謝致します。

Table 3 Test of difference between thresholds of subjective positions in auditory and visual display

distance [m]	1.5		2.5	
	A	B	A	B
subject				
display	audi. vis.	audi. vis.	audi. vis.	audi. vis.
estimated threshold [cm]	6.8 1.5	12.7 0.4	8.1 3.2	4.7 2.3
standard error of threshold [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*

***significant at 0.5% level

*significant at 5% level

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, Psychologische Foerschung, **19**, 61/101(1934)
- 4) 秋重義治編: 知覚的世界の恒常性 認識心理学III, 理想社(1970)
- 5) 境, 中山: 聴覚と音響心理, コロナ社(1978)
- 6) イェンス ブラウエルト: 空間音響, 鹿島出版会(1986)
- 7) B. C. J. Moore: An Introduction to the Psychology of Hearing, Academic Press(1989)
- 8) N. Durlach: Auditory Localization in Teleoperator and Virtual Environment Systems: Ideas, Issues, and Problems, Perception, **20**, 543/554(1991)
- 9) 藤永保他編: 新版心理学事典, 平凡社(1981)
- 10) D. J. Finney: Probit Analysis, Cambridge University Press(1971)
- 11) 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)
- 12) R. K. Luneberg: The Metric of Binocular Visual Space, Journal of Optical Society of America, **40**-10, 627/642(1950)
- 13) 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)
- 14) S. P. Mckee et al.: Statistical Properties of Forced-choice Psychometric Functions: Implications of Probit Analysis, Perception & Psychophysics, **37**-4, 286/298(1985)
- 15) C. Prablanc et al.: Optimal Response of Eye and Hand Motor System in Pointing at a Visual Target, Biol. Cybern., **35**, 113/124(1979)
- 16) 前田, 館: 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)
- 17) 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)

[著者紹介]

大倉典子(学生会員)



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)ダイナックス勤務, 92年より東京大学工学系研究科博士課程に在学中。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。

館 暲(正会員)



1973年, 東京大学工学系研究科博士課程修了。同大学助手, 機械技術研究所主任研究官, 研究課長, 東京大学助教授を経て, 92年東京大学先端科学技術研究センター教授。パースペクトルを用いる信号処理, 盲導犬ロボット, テレイグジスタンスなどの研究を行う。SICEフェロー(工学博士)。