

# 合成音像による位置表示が GUI における オブジェクト探索に及ぼす効果

小澤 賢司<sup>†</sup> 降矢 龍浩<sup>††</sup>

ディスプレイ上のオブジェクトの位置を、ディスプレイの4隅に配置したスピーカからの合成音像によって表示するシステムを構築し、GUI環境における有用性を検証した。まず、ディスプレイ上の所望の位置をユーザに定位させる合成音像を生成するために必要な、4スピーカ間の音圧レベル差を定めた。続いて、大型ディスプレイ上で注視領域外にあるオブジェクトの変化を、合成音像によって報知し、視覚により探索させる実験を行った。その結果、スピーカ間に音圧レベル差をつけない従来の方法と比べて、チャンネル間にレベル差をつけて探索すべきオブジェクトの位置を知らせることにより有意に速く探索できることが示された。

## Effects of Positioning with Synthetic Sound Images on Exploration of Objects in GUI

KENJI OZAWA<sup>†</sup> and TATSUHIRO FURUYA<sup>††</sup>

A user interface system that positions GUI-objects on a computer display was constructed by using synthetic sound images with four loudspeakers located at the corners of the display. First, level differences among the loudspeakers were determined to position any point on the display. Then, experiments were conducted to evaluate the validity of the system. In the experiments, a user was informed about the change of an object existing out of his close observation area with sounds, then seek time for exploring the changed object was measured. As a result, the seek time with the proposed system was significantly shorter than that with the conventional system in which there were no level differences among the loudspeakers.

### 1. はじめに

ディスプレイの大型化と高精細化にともない、複数のウィンドウを開き、多くのアイコンを表示しながら作業を行う GUI (Graphical User Interface) 環境が一般化している。今後さらにディスプレイは大型化するものと予想されるが、それによって注視領域の外側にウィンドウやアイコンなどのオブジェクトが存在する場合が多くなる。このような場合、注視領域外にあるウィンドウにおけるジョブの終了といったオブジェクトの視覚的な変化に気付かない状況が考えられる。これは、注視点付近の詳細な情報を収集するのに適している視覚という感覚の持つ弱点でもある。さらには、バーチャルデスクトップといった、実際のディスプレ

イの外側に仮想的にオブジェクトが配置されている環境では、もはや視覚ではオブジェクトの変化を検知することはできない。

このような視覚の弱点を補うためには、オブジェクトの変化時にスピーカから音響信号を発することによって、その変化をユーザに報知することが有効である。つまり、聴覚という、つねに全方向からの情報を収集している感覚を利用するのである。しかし、たとえば、2チャンネルのステレオスピーカから同じ音を発したのでは、はたしてどの位置にあるオブジェクトが変化したのかを的確に知らせることは困難である。それゆえ、音の到来方向をユーザに知らせるための音の提示方法を考えることが重要であり、これまでも音の到来方向を制御する以下に述べるようなシステムが提案されてきた。

音源から外耳に至るまでのすべての空間情報を含む頭部音響伝達関数を原音にかけることにより、任意の方向から音が聞こえる状況を模擬することが可能である<sup>1)~3)</sup>。これを利用した音の方向表示システムとして、頭部伝達関数をかけた音をヘッドホンにより提示

<sup>†</sup> 山梨大学工学部コンピュータ・メディア工学科  
Department of Computer Science and Media Engineering,  
Faculty of Engineering, Yamanashi University

<sup>††</sup> 山梨大学大学院工学研究科電子情報工学専攻  
Graduate School of Electrical Engineering, Yamanashi  
University

するシステムが考えられてきた<sup>4)~6)</sup>。このシステムは、視覚障害者を対象としたインタフェースとしてはきわめて有効である。しかし、頭の位置の変化や回転とともに映像も移動してしまうので、GUI環境においてディスプレイ上の位置を表示するシステムとしては不適である。また、頭部伝達関数をかけた音をスピーカにより提示することにより、同様な効果を図ったシステムもある<sup>7),8)</sup>。ただし、このシステムでは、ユーザの頭部が所定の位置からずれた場合に音の到来方向の制御精度が大きく劣化するという性質がある。そのために、ユーザの位置に対して厳しい制約があり、やはり一般のGUI環境における音によるオブジェクトの位置表示システムとしては不適である。

ところで、広く普及することが期待されるシステムとしては、構成が簡単であること、ユーザの位置に対する制約がないこと、また長時間の装着・使用に違和感なく耐えうることなどが必須の特性であると考えられる。さらには、ネットワークを介した遠隔協調作業にも利用できるように、同時に複数のユーザが作業に参加できるシステムであることが望まれる。

以上をふまえ、本研究ではユーザの頭の回転や位置ずれに対して比較的頑健であるチャンネル間の音圧レベル差を利用した合成映像によって、ディスプレイ上のオブジェクトの位置を表示することを提案する。合成映像とは、音が複数の音源から同時に放射されている場合に、映像に融合が生じた結果として、音源以外の方向に定位する映像である<sup>9)</sup>。この意味では、上述の頭部伝達関数を利用したシステム<sup>4)~8)</sup>においてユーザが知覚するのは合成映像である。ただし、合成映像の左右方向の定位位置の制御は、精密な頭部伝達関数をつける必要はなく、基本的には左右チャンネル間の音圧レベル差あるいは時間差(位相差)を制御することにより可能である。これは、頭部伝達関数における両耳間の強度差と時間差(位相差)を制御していることに相当する。本研究では、頭部の位置ずれに対して比較的影響が小さいと考えられる音圧レベル差を用いて合成映像を生じさせることとした。また、上下方向についても上下チャンネルの音圧レベル差によって、合成映像の定位位置を制御することが可能であることが知られている<sup>10),11)</sup>。そこで、本研究では、ディスプレイの4隅にスピーカを配置することにより、ディスプレイ全面を位置表示の対象とするシステムを構築することとした。このシステムは、現在でも一般に普及しつつあるサラウンド音響系の4チャンネルを転用することで簡単に実現できるうえに、上記のシステムとしての望ましい特性をすべて有している。

以下では、まず、ディスプレイ上の所望の位置に定位する合成映像を作成するために必要なチャンネル間の音圧レベル差について述べる。続いて、合成映像を利用した画面上の位置表示の有用性について、オブジェクト探索を課題とする実験を通じて検証した結果について述べる。

## 2. 構築したシステムにおけるチャンネル間の音圧レベル差と合成映像の定位位置の関係

### 2.1 システムの概要および実験手続き

この章では、本論文で構築したシステムの概要を述べた後に、ディスプレイ上の所望の点に定位する合成映像を作るのに必要な、複数スピーカ間の音圧レベル差を得ることを目的とする。手順としては、まず横方向の位置を定めるための左右チャンネル間のレベル差を調べ、次に縦方向についても同様な手順で調べる。

システムの概要を図1に示す。被験者は、50インチディスプレイ(Sony, KL-X9200J)の前に座り、ディスプレイの4隅に設置したスピーカ(Yamaha, NS-3MX)から提示された合成音を聴取する。50インチのディスプレイを用いたのは、以下の理由による。1つは、将来的に個人ユーザでもこの程度の大きさのディスプレイを占有する可能性が十分にあることである。また、実際にはこれほど大きなディスプレイではない場合でも、パーチャルデスクトップとしてこの程度の広さを想定すれば十分であると考えたからである。さらには、テレビ会議をはじめとする遠隔協調作業には、この程度の大きさのディスプレイはごく普通であるからである。

合成映像を生じさせるための提示音としては、継続時間1sの白色雑音を用いた。音源は、TDT(Tucker-Davis Tecnologies)社の心理音響学用総合システムの

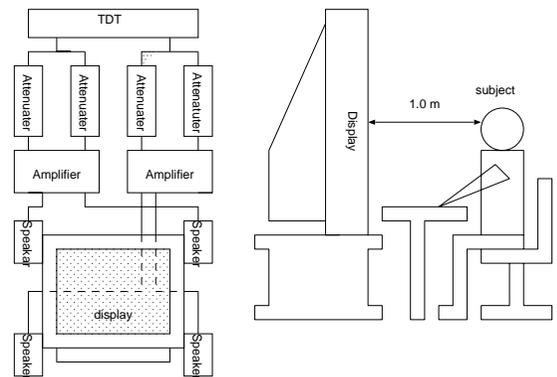


図1 構築したシステムの概要

Fig. 1 Schematic diagram of the system.

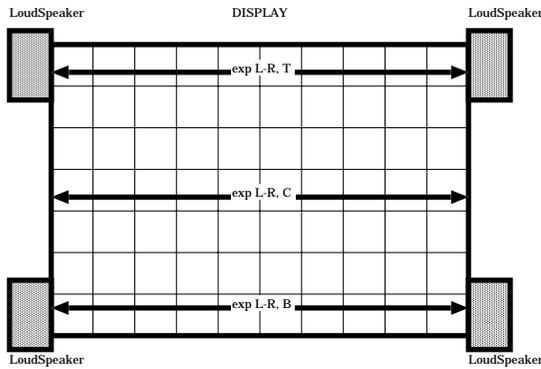


図 2 実験 [L-R] の 3 条件 ( T, C, B ) において合成音像が定位される位置

Fig. 2 Localization points of synthetic sound images in Experiments [L-R] with the conditions of T, C or B.

DA 変換器 DD1 ( サンプリング周波数 44.1 kHz, 量子化精度 16 bit ) である。これを 4 チャンネルに分岐し, 同システムのプログラマブルアッテネータ PA4 ( 最大減衰量 99.9 dB, ステップ幅 0.1 dB ) を通じてスピーカから提示した。

チャンネル間にレベル差をつけて提示された音に対し, 被験者は音がディスプレイのどの位置から聞こえたかを, 左右に 10 等分, 上下に 7 等分した四角いマス単位で, マウスにより回答した。ディスプレイから被験者までの距離は 1.0 m に設定した。被験者は成人男性 6 名である。

## 2.2 左右方向についての合成音像の定位位置

### 2.2.1 実験方法

以下に示す順で 3 種類の実験を行った。各実験には, “実験 [変数, 条件]” という名前を付けた。たとえば実験 [L-R, T] は, L ( Left ) と R ( Right ) のスピーカのレベル差を変化させ, 音像は T ( Top ) にあることを意味している。同様に B は Bottom を, C は Center を表す。具体的には, 以下ようになる。

- 実験 [L-R, T] : ディスプレイ上方の左右に定位 ( 上側の 2 チャンネルのスピーカだけを用いた )
- 実験 [L-R, C] : ディスプレイ中央の左右に定位 ( 4 チャンネルのスピーカを用いたが, 上下のスピーカの音圧レベルを等しくした )
- 実験 [L-R, B] : ディスプレイ下方の左右に定位 ( 下側の 2 チャンネルのスピーカだけを用いた )

各実験において合成音像が定位されるディスプレイ上の位置を図 2 に示す。

基準音圧レベルを 70 dB として, 片側のスピーカからは基準レベルで出力し, もう片側のスピーカからは 3, 6, 9, 12, 15 dB のいずれかだけレベルを減衰させ

た音を出力した。減衰させる側を交換することによって, 合計 10 通りの音圧レベル差についての試行を行った。各レベル差について 3 回の繰返し判断を行ったので, 1 つの実験は 30 試行からなる。提示順序はランダムとした。被験者には, ディスプレイ全体の位置を回答として許したが, これらの実験においては左右方向の位置のみをデータとして採用した。また, 3 回の繰返し評価の中央値を被験者ごとの評定値として採用した。

### 2.2.2 実験結果

実験結果を図 3 に示す。横軸は, 左スピーカに対するレベル差を表す。縦軸は, ディスプレイの横方向の中央を原点に, 左端のマスを  $-5$  を, また右端のマスを  $5$  に割り当てた場合の被験者の評定結果を表す。評価値の被験者間平均をプロットし, 誤差棒は評定値についての標準偏差から算出した 95% 信頼区間を示している。この図から分かるように, 左右チャンネルのレベル差によって, 合成音像の左右方向の定位位置をディスプレイの左端から右端まで制御可能である。

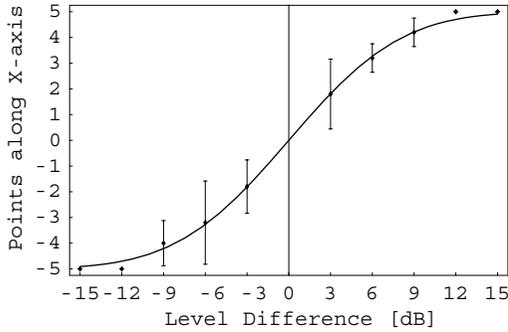
所望の位置に対応するレベル差を得るための校正曲線として利用することを目的として, 実験結果を近似する曲線をあてはめることとした。実験結果を近似するものであれば, どのような関数を用いても不都合はないので, ここでは正規分布の累積曲線 ( 分布関数 ) を非線形最小二乗法によりあてはめた。なお, そのあてはめには数式処理ソフト Mathematica を用いた。あてはめられた 3 つのグラフは, ほぼ同じ曲線を描いていることから, 左右の定位に対してディスプレイ上の上下の位置の違いは大きく影響しないといえる。よって, 以下では実験 [L-R, T] の結果をもって, ディスプレイの左右方向の位置表示を行うための合成音像の作成に用いる音圧レベル差とする。なお, 実験 [L-R, C] についてはややあてはまりが悪いが, これは他の 2 条件 T, B では左右のスピーカという実音源間で合成音像を生じさせているのに対して, 条件 C では上下のスピーカにより合成された合成音像の間で左右の合成音像を生じさせているために音像が広がる傾向があったことが原因として考えられる。

## 2.3 上下方向についての合成音像の定位位置

### 2.3.1 実験方法

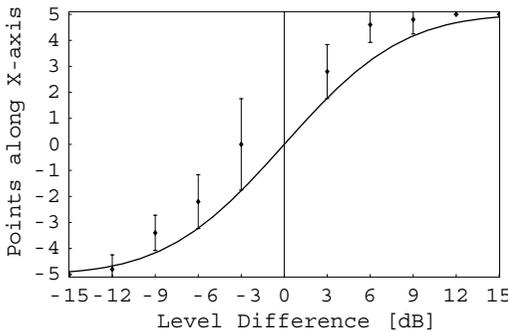
前節と同様に, 本節では上下方向の定位に関する実験を行った。前述の実験結果に基づき左右チャンネルの音圧レベル差を決めて左右方向の制御を行ったうえで, 上下方向の定位について以下の 3 種類の実験を行った。

- 実験 [T-B, L] : ディスプレイ左方の上下に定位 ( 右チャンネルの音圧レベルを左チャンネルに対して



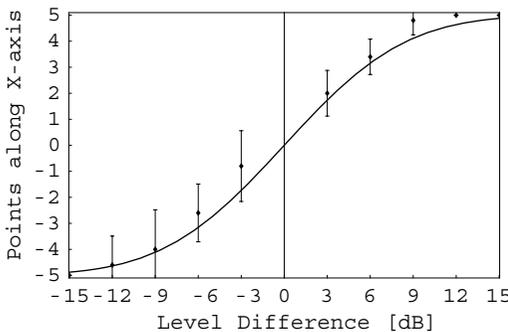
(a) 実験 [L-R, T] の結果

(a) Results of Experiment [L-R, T]



(b) 実験 [L-R, C] の結果

(b) Results of Experiment [L-R, C]



(c) 実験 [L-R, B] の結果

(c) Results of Experiment [L-R, B]

図 3 左右チャンネルのレベル差と合成音像の定位位置

Fig. 3 Level difference between L-R channels and localization points of synthetic sound images.

13 dB 減衰させた)

- 実験 [T-B, CL]: ディスプレイ中央と左方の間の上下に定位 (右チャンネルの音圧レベルを左チャンネルに対して 5 dB 減衰させた)
- 実験 [T-B, C]: ディスプレイ中央付近の上下に定位 (右チャンネルの音圧レベルを左チャンネルに対して 2 dB 減衰させた)

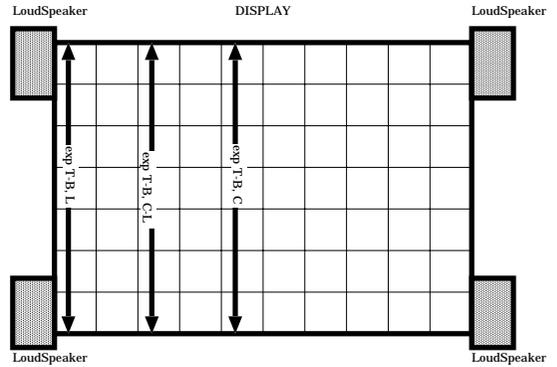


図 4 実験 [T-B] の 3 条件 (L, CL, C) において合成音像が定位される位置

Fig. 4 Localization points of synthetic sound images in Experiments [T-B] with the conditions of L, CL or C.

各実験において音像が定位する位置を図 4 に示す。

これら実験では、上下のスピーカについて、片方のスピーカは基準音圧レベルを出力し、もう片方のスピーカには 0, 5, 10, 15, 20, 30 dB の減衰を与えた場合の合計 11 通りの音圧レベル差について試行を行った。他の条件については前節の実験と同じである。

2.3.2 実験結果

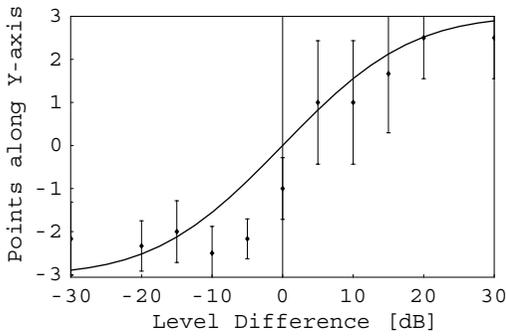
実験結果を図 5 に示す。縦軸は、画面の縦方向の中央のマスを 0 とし、各マスに -3 (下) から 3 (上) までを割り振った。誤差棒は被験者ごとの評価値における標準偏差から算出した 95% 信頼区間である。この信頼区間が大きいことから、左右方向に比べて被験者間の回答にばらつきが大きいことが分かる。これは、上述の実験 [L-R, C] の場合と同様に、左右スピーカからの合成音像を用いて上下方向の合成音像を生じさせているために生じた音像の広がり原因と考えられる。

実験結果に対して、図 3 と同様にして正規分布の累積曲線にあてはめた。各実験結果を比べると、大きな違いは見られないことから、上下方向の定位にディスプレイの左右の位置の違いの影響は小さいものとする。よって、以下では実験 [T-B, L] の結果をもって、ディスプレイの上下方向の位置表示を行うための合成音像の作成に用いる音圧レベル差とする。

2.4 考察

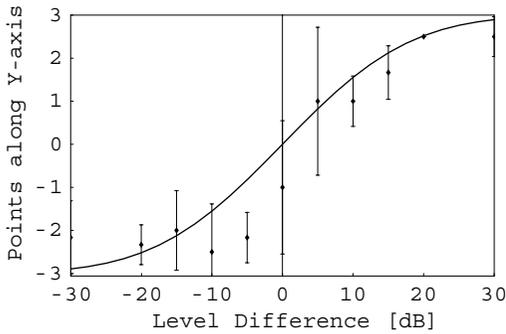
本章で行った実験により、4 チャンネル間のレベル差を制御することによって、ディスプレイ上の所望の位置を合成音像により表示できることが示された。ただし、上述のように、必ずしも精密な位置の表示ができない場合があったのも事実である。この節では、その原因について考察する。

まず、図 3 において、4 チャンネルを用いた実験 [L-R,



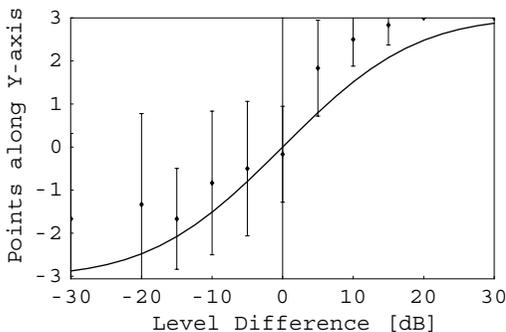
(a) 実験 [T-B, L] の結果

(a) Results of Experiment [T-B, L]



(b) 実験 [T-B, CL] の結果

(b) Results of Experiment [T-B, CL]



(c) 実験 [T-B, C] の結果

(c) Results of Experiment [T-B, C]

図5 上下チャンネルのレベル差と合成音像の定位位置

Fig. 5 Level difference between T-B channels and localization points of synthetic sound images.

C] では曲線のあてはまりが悪く、左右 2 チャンネルだけを用了実験 [L-R, T] と実験 [L-R, B] と完全に一致する結果であるとはいいい難い。また、4 チャンネルを用いて実験を行った結果である図 5 においては、全体的に被験者間の回答にばらつきが大きかった。本研究では、縦・横の音像は独立に制御が可能であることを仮定した実験を行った。しかし、これらの実験結果

は、4 チャンネルを利用して合成音像を生成した場合には、縦あるいは横の 2 チャンネルのみよる場合とは異なり、縦・横の合成音像に干渉があった可能性を示唆している。これまでも、左右の 2 チャンネルにより合成音像を生成した場合に、スピーカを結ぶ線よりも上に音像が定位する場合があることが知られている<sup>12),13)</sup>。つまり、この場合も合成音像の位置の知覚は、本来 2 次元的なものであるとしてとらえていく必要があることを示唆している。本実験では、縦・横の 2 次元の干渉について定量的に議論できるだけのデータを収集していないので、これは今後の課題である。

ところで、合成音像が定位する位置を精密に制御するためには、従来のシステム<sup>4)~8)</sup>と同様に、頭部伝達関数を利用することが原理的には必要とされる。一方、本論文におけるシステムにおいて、左右チャンネル間のレベル差を利用して音像位置を制御することは、頭部音響伝達関数の両耳間強度差のみを制御することに相当することを 1 章で述べた。また、上下チャンネル間のレベル差を利用して音像位置を制御することは、合成された音のスペクトルの特徴を、定位が期待される位置から耳までの伝達関数の特徴を近似したものにすることと考えられる。つまり、本論文で採用した手法は、頭部伝達関数を利用する手法<sup>4)~8)</sup>を制御条件を緩める形で近似したものであると考える。この近似により、ユーザの頭部の回転や移動に対して音像定位が頑健であるという利点が期待できるが、その反面、音像定位位置の精度が悪くなる、あるいは 2.2.2 項や 2.3.2 項で述べたような音像が広がるといった影響が生じることになる。このことをふまえ、次章では画面の分割数を横 4、縦 3 にとどめ、探索すべきオブジェクトのディスプレイ上のおおまかな位置を音により表示することとし、その探索に及ぼす影響を論じることとする。

### 3. 提案方法の評価実験

#### 3.1 実験方法

本研究で提案した音による位置表示方法が、大型ディスプレイ上のオブジェクトの変化をユーザに察知させるのに有効であるかを検証する実験を行った。比較の対象として、現在用いられている PC の警告音を考え、モノラル音を想定した。ところで、ユーザをディスプレイ前の 1 カ所に固定することは現実的ではないので、ディスプレイとユーザの位置の変化にも頑健であるのが望ましい。そこで、ユーザの頭の位置を変えた場合についても検討した。

実験で評価対象とする音の提示方法は、以下の 3 種

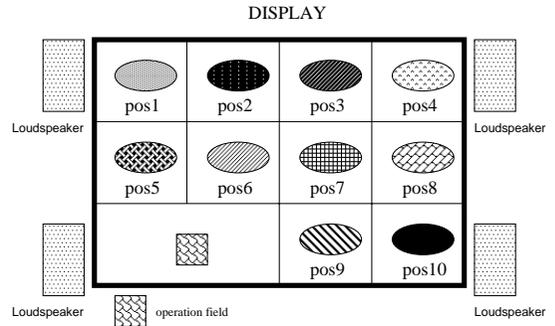
類である．

- 提示方法 [従来法]：現在の Windows 環境において、音アイコンとして一般的に用いられている、チャンネル間に音圧レベル差のない音を提示する．この場合、合成音像はディスプレイの中央付近に知覚される．
- 提示方法 [ステレオ]：左右チャンネルのみ音圧レベル差を制御することにより、合成音像を提示する（本研究で提案する方法 1）．
- 提示方法 [4チャンネル]：上下左右の 4 チャンネルの音圧レベル差を制御することにより、合成音像を提示する（本研究で提案する方法 2）．

以上の 3 種類の場合について、注視領域の外側にあるオブジェクトの変化に対する反応の速さに有意差が見られるかを検証した．実験系は、図 1 と同じである．実験の設定としては、ユーザがディスプレイ上のあるウィンドウ内での作業に集中している際に、他のオブジェクトが変化する場面を想定した．オブジェクトの変化を気付かせるために、その変化と同時に評価対象となる 3 種の方法のいずれかで継続時間 1s の白色雑音を 4 つのスピーカから提示した．評価値として、音が提示されてから、被験者がマウスを手にして、変化したオブジェクトをクリックするまでの時間を 0.1s 単位で記録した．以降では、この時間のことを「シーク時間」と呼ぶことにする．なお、シーク時間の計測開始時は、音の終了時点とした．オブジェクトとしては、アイコンを想定したビットマップ画像を 10 種類用意し、それを図 6 に示すような pos1 ~ pos10 の位置に配置した、2 種の場合について実験を行った．すべてのビットマップ画像を異なるものとしたのは、同じ画像の並びの中で 1 つだけ異なるものはポップアウトといわれる視覚現象により容易に探索できることが知られており<sup>14),15)</sup>、これを避けるためである．

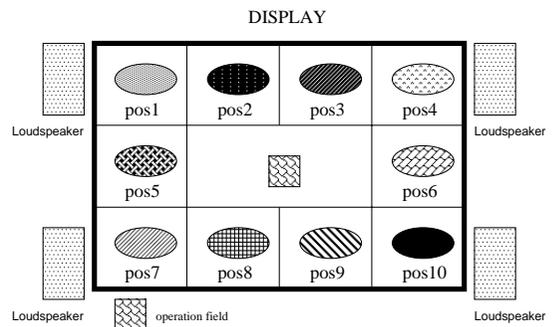
被験者は、上述の実験にも参加した成人男性 6 名である．被験者には、図中に operation field として示した作業領域ウィンドウ（縦：約 7cm、横：約 7cm）の中に出現する 5 桁の数字列（文字の高さ：約 1cm）のとおり数字をキーボード上部の数字キーによって打ち込ませる作業を課した．被験者によって数字列が正しく打ち込まれた場合には次の数字列が出現し、間違った場合には最初の数字から打ち直さなければならない．このようにして、被験者の注意をつねに作業領域に向けさせた．なお、作業領域の両側に余白を設けたのは、被験者の注視領域内にオブジェクトが配置されるのを避けるためである．

実験は音の提示方法ごとに独立に行った．実験の 1



(a) 作業領域がディスプレイ上の左下の場合

(a) Location of the operation field: lower left of the display



(b) 作業領域がディスプレイ上の中央の場合

(b) Location of the operation field: center of the display

図 6 オブジェクト領域のディスプレイ上の割り振り

Fig. 6 Mapping of ten objects on the display.

セットは、10 回の試行から構成された．つまり、図 6 の 10 種の位置のいずれかのオブジェクトを変化するオブジェクトとした．これを 4 セット行い、その平均値を被験者ごとのデータとした．評価対象となる 3 種の方法については、評価の順序は  ${}_3P_3 = 6$  通り存在する．そこで、6 名の被験者をそれぞれ異なる評価順序に割り当てた．1 回の試行の終了後に次のオブジェクトが変化するまでの時間は 5 ~ 15s の間でランダムに、また、変化するオブジェクトの順番もランダムとした．実験に先立ち、被験者には、変化前と後のビットマップ画像の違いに習熟できるまで十分に練習をさせた．

以上の実験を、被験者の頭の位置がディスプレイの中央にある場合と、図 6 (a) の作業領域が正面にくる場合の 2 種類の状況で行った．なお、被験者には、自然な作業が実現できるよう、視線および顔の向きについては何ら制約を与えなかった．

表 1 分散分析表(作業領域:左下,頭部:中央)

Table 1 Result of ANOVA (operation field: lower left, user: center).

	平方和	df	MSe	分散比
個人差	7.32	5	1.46	
主効果 [提示方法]	10.94	2	5.47	49.73**
提示方法に関する誤差	1.11	10	0.56	
主効果 [位置]	3.92	9	0.44	2.58**
位置に関する誤差	7.66	45	0.17	
交互作用	10.38	18	0.58	3.63**
交互作用に関する誤差	14.44	90	0.16	
合計	55.78	179		

df: 自由度, MSe: 平均平方, \*\*:  $p < 0.01$

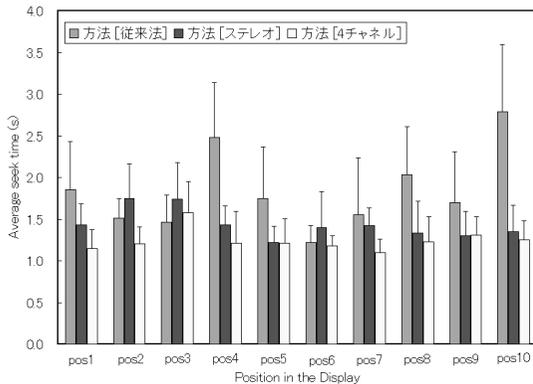


図 7 各位置における平均シーク時間と標準偏差(作業領域:左下,頭部:中央)

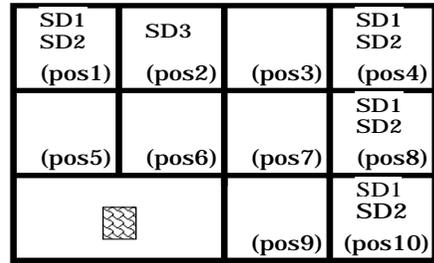
Fig. 7 Average seek time and standard deviation at each position (operation field: lower left, user: center).

### 3.2 作業領域がディスプレイ上の左下の場合の実験結果および考察

#### 3.2.1 頭部がディスプレイの中央の場合

実験結果であるシーク時間を「音の提示方法(3水準)」、「変化したオブジェクトの位置(10水準)」およびそれらの交互作用を因子とする分散分析により分析した。分散分析のモデルとしては被験者内計画<sup>16)</sup>を用いた。分散分析表を表1に示す。これを見ると、主効果[提示方法]に有意差が見られるが、交互作用にも有意差が見られる。そのため、この結果だけから提示方法の有効性を論ずることはできず、交互作用について解析をする必要がある。そこで、各位置ごとに単純主効果[提示方法]を比較するために、まず各位置ごとに平均シーク時間を求めた。その結果を図7に示すが、図中の誤差棒は被験者間のばらつきを表す標準偏差である。各位置ごとに提示方法による差異の有意性を調べるために、LSD(Least Significant Difference)検定を行うこととした。具体的には、1平均あたりのデータ数6と検証すべき単純主効果に関する誤差の平

DISPLAY



operation field

図 8 有意差の見られたディスプレイ上の位置(作業領域:左下,頭部:中央)

Fig. 8 Positions where significant differences were observed (operation field: lower left, user: center).

表 2 有意差 SD1~SD3の意味

Table 2 Meaning of significant differences of SD1 to SD3.

有意差の略称	シーク時間の大小関係
SD1	提示方法 [ステレオ] < 提示方法 [従来法]
SD2	提示方法 [4チャンネル] < 提示方法 [従来法]
SD3	提示方法 [4チャンネル] < 提示方法 [ステレオ]

均平方MSe(Mean Square error), および MSe の自由度に対応する  $t$  値を調べて、次式に代入し、LSD を求めた。

$$LSD = t \text{ 値} \times \sqrt{\frac{MSe \times 2}{1 \text{ 平均あたりのデータ数}}} \quad (1)$$

単純主効果のうち、LSD より大きな差がある水準では有意差があるといえる。

図8に、LSD検定によりシーク時間に有意差が見られたディスプレイ上の位置を示した。図中のSD1~SD3は有意差の種類を表しており、その意味を表2に示した。この図から、SD1とSD2という有意差、すなわち提示方法[ステレオ]と提示方法[4チャンネル]という本研究の両提案法が、提示方法[従来法]に比べ有意にシーク時間が短いという有意差が見られる場合があることが分かる。またSD3は、提示方法[4チャンネル]の方が、提示方法[ステレオ]と比べてシーク時間が短いことを意味している。SD3が見られたのは1カ所だけにとどまった。よって左右のスピーカに音圧レベル差をつけるだけで、オブジェクトの変化位置を気付かせるのに十分であるといえる。ただし、図7から、pos3を除くすべての位置で提示方法[4チャンネル]のシーク時間が最短になっていることが分かる。このことから、ここで用いたディスプレイは横長であるために、上下方向の位置まで表示する提示方法[4チャンネル]に有意差までは現れていないものの有効性が示

表 3 分散分析表(作業領域:左下,頭部:左側)

Table 3 Result of ANOVA (operation field: lower left, user: left).

	平方和	df	MSe	分散比
個人差	62.14	5	12.43	
主効果 [提示方法]	29.51	2	14.76	15.06**
提示方法に関する誤差	9.77	10	0.98	
主効果 [位置]	7.06	9	0.78	1.69
位置に関する誤差	20.88	45	0.46	
交互作用	10.46	18	0.58	1.18
交互作用に関する誤差	44.47	90	0.49	
合計	184.31	179		

df: 自由度, MSe: 平均平方, \*\*:  $p < 0.01$ 

表 4 各提示方法ごとの平均シーク時間と標準偏差(作業領域:左下,頭部:左側)

Table 4 Average seek time and standard deviation (operation field: lower left, user: left).

提示方法	平均シーク時間	標準偏差
提示方法 [従来法]	1.61 s	0.67 s
提示方法 [ステレオ]	1.22 s	0.31 s
提示方法 [4チャンネル]	1.16 s	0.31 s

唆される。

次に有意差の見られた位置について検討する。作業領域から離れた位置 pos1, pos4, pos8, pos10 において、従来法に対する有意な差が見られた。このことから、ユーザの視覚が及ばない位置が存在して、それを音によって気づかせることが有効であったといえる。逆に、作業領域から近い位置に関しては有意差が見られなかった。その理由として、作業領域から近い位置は、従来法により合成音像が生じるディスプレイ中央付近であると同時に、顔の正面に近い位置であることから、オブジェクトの変化が視覚的に分かりやすかったことが考えられる。

### 3.2.2 頭部の位置がディスプレイの左側の場合

この場合の結果について、表 3 に分散分析表を示す。この表より、主効果 [提示方法] にのみ有意差が見られていることが分かる。そこで、主効果 [提示方法] について、LSD 法を用いて水準ごとの有意差を検定することとした。表 4 に各提示方法における平均シーク時間を示す。LSD を算出したところ 0.20 s であったので、従来法と 2 種の提案法との間に有意差があるといえる。つまり、頭部がディスプレイ中央からずれている場合でも、従来法よりも本研究で提案する 2 種の方法が効果的であることが示された。ただし、2 種の提案法の間には有意差は見られなかった。

なお、上述の頭部がディスプレイ中央にある場合と異なり、この実験結果では変化したオブジェクトの位置によらず主効果 [提示方法] が有意であった。これは、

表 5 分散分析表(作業領域:中央,頭部:中央)

Table 5 Result of ANOVA (operation field: center, user: center).

	平方和	df	MSe	分散比
個人差	8.90	5	1.78	
主効果 [提示方法]	27.73	2	13.86	51.33**
提示方法に関する誤差	2.72	10	0.27	
主効果 [位置]	11.56	9	1.28	1.33
位置に関する誤差	43.40	45	0.96	
交互作用	15.71	18	0.87	2.41*
交互作用に関する誤差	32.34	90	0.36	
合計	142.36	179		

df: 自由度, MSe: 平均平方, \*:  $p < 0.05$ , \*\*:  $p < 0.01$ 

作業領域が顔の正面にあったために、ディスプレイ中央のオブジェクトが変化した場合でも首を振るといった積極的な視覚的探索が必要であり、つねにディスプレイ中央に音像が定位する従来法では聴覚から与えられる位置の情報がその探索に寄与できなかったことを意味している。

### 3.3 作業領域がディスプレイ中央の場合の実験および考察

#### 3.3.1 頭部の位置がディスプレイの中央の場合

前節の実験では、作業領域はディスプレイの左下端であった。頭部がディスプレイの中央にある場合の実験結果においては、作業領域に隣接しているような位置や、ディスプレイの中央付近では有意差が見られなかった。この節の実験は、先の実験で有意差の見られなかったディスプレイ上の中心位置を作業領域にした場合に、有意差が見られるかを検証することを目的として行った。

表 5 に分散分析表を示すように、主効果 [提示方法] に有意差が見られる。しかし、交互作用にも有意差が見られるため、その交互作用について解析を行う必要がある。そこで、各位置ごとに単純主効果としての音の提示方法によるシーク時間を図 9 に比較して示した。各位置ごとに、上述の実験と同様に、LSD 法を用いて各水準ごとに有意差の検定を行った。図 10 は有意差が認められたディスプレイ上の位置を示している。図中の SD1 ~ SD3 の意味は、表 2 と同じである。これを見ると、左右の側に SD1 と SD2 が多く見られ、提示方法 [4チャンネル] と提示方法 [ステレオ] の両提案法が、提示方法 [従来法] に比べてこのような位置ではシーク時間が有意に短いことが分かる。

両提案法においては SD3、すなわち提示方法 [4チャンネル] が提示方法 [ステレオ] より有意にシーク時間が短い位置が 1 カ所のみで見られるにとどまった。ただし、図 9 を見ると、pos2 を除くディスプレイの上側、およびディスプレイ下側のすべての位置において、

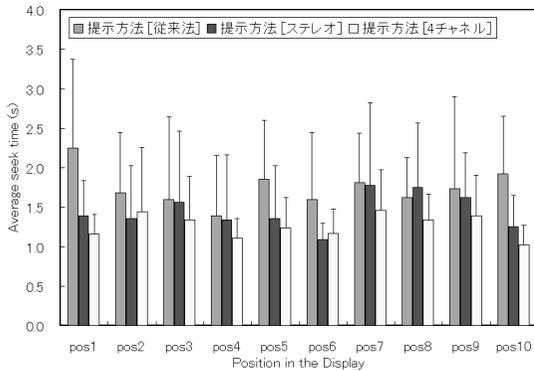


図 9 各位置における平均シーク時間と標準偏差 (作業領域: 中央, 頭部: 中央)

Fig. 9 Average seek time and standard deviation at each positon (operation field: center, user: center).

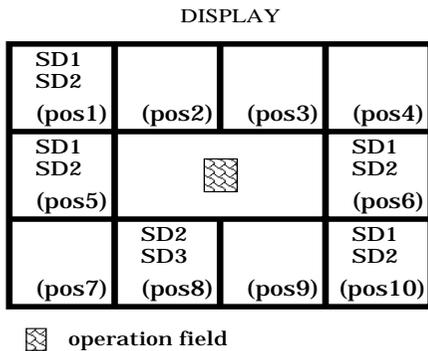


図 10 有意差の見られたディスプレイ上の位置 (作業領域: 中央, 頭部: 中央)

Fig. 10 Positions where significant differences were observed (operation field: center, user: center).

提示方法 [4 チャンネル] は提示方法 [ステレオ] に比べて平均シーク時間が短い傾向が見られる。このことから、上下の位置情報も与えることが有効であることが示唆される。さらには、ここではディスプレイが横長であったが、縦方向により大きなディスプレイを想定すれば、提示方法 [4 チャンネル] の方が提示方法 [ステレオ] よりも効果的であると考えられる。

3.3.2 頭部の位置がディスプレイの左側にある場合  
分散分析表を表 6 に示す。これを見ると、主効果 [提示方法] に有意差が見られるが、交互作用についても有意差が見られるため、交互作用について分析を行うこととした。そのために、各位置ごとに、単純主効果である音の提示方法ごとのシーク時間を図 11 に比較して示した。図 11 から、ここでも提示方法 [4 チャンネル] は、提示方法 [ステレオ] と比べて全体的にシー

表 6 分散分析表 (作業領域: 中央, 頭部: 左側)

Table 6 Result of ANOVA (operation field: center, user: left).

	平方和	df	MSe	分散比
個人差	10.49	5	2.09	
主効果 [提示方法]	25.75	2	12.88	85.86**
提示方法に関する誤差	1.57	10	0.15	
主効果 [位置]	5.28	9	0.59	0.59
位置に関する誤差	17.31	45	0.38	
交互作用	10.90	18	0.61	1.96*
交互作用に関する誤差	28.41	90	0.31	
合計	99.71	179		

df: 自由度, MSe: 平均平方, \*:  $p < 0.05$ , \*\*:  $p < 0.01$

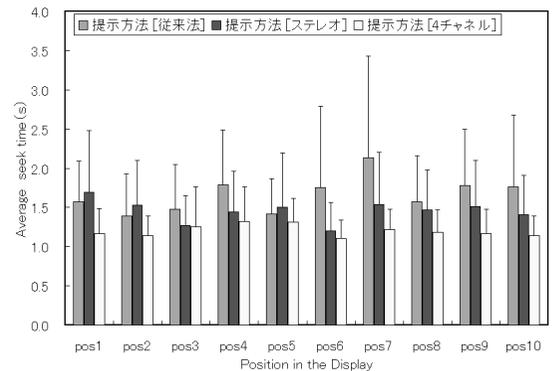


図 11 各位置における平均シーク時間と標準偏差 (作業領域: 中央, 頭部: 左側)

Fig. 11 Average seek time and standard deviation at each positon (operation field: center, user: left).

ク時間が短くなっていることが分かる。各位置ごとに、上述の実験と同様に LSD 法を用いて各水準ごとに有意差の検定を行った。

図 12 は、有意差の見られたディスプレイ上の位置を示している。これを見ると、SD1 と SD2 が多く見られることから、両提案法は従来法よりも有意にシーク時間が短い位置が多く存在していることが分かる。特に、頭部から遠い側であるディスプレイ右端でこの傾向は顕著であり、本研究の両提案法が頭部の位置が正面からずれた場合でもおおいに効果があることを示している。さらに、SD3 がディスプレイの上部と下部に見られることから、上下方向の位置まで表示する提示方法 [4 チャンネル] の有用性が示される。

### 3.4 総合的考察

本章において行った実験の結果として、変化したオブジェクトの位置を合成音像により被験者に表示することにより、そのオブジェクトの視覚的探索に要するシーク時間に統計的に有意な影響があることが示された。ただし、左右チャンネルにレベル差をつけた提示方

DISPLAY

(pos1)	SD3 (pos2)	(pos3)	SD1 SD2 (pos4)
(pos5)			SD1 SD2 (pos6)
SD1 SD2 (pos7)	(pos8)	SD2 SD3 (pos9)	SD2 SD1 SD3 (pos10)

 operation field

図 12 有意差の見られたディスプレイ上の位置 (作業領域: 中央, 頭部: 左)

Fig. 12 Positions where significant differences were observed (operation field: center, user: left).

法 [2 チャンネル] に比べ, 上下方向の情報を与える提示方法 [4 チャンネル] のシーク時間が有意に短いという有意差 SD3 が見られた場合は少数にとどまった。これは, 本実験では被験者が探索したオブジェクトをマウスでクリックするという実験手続き上の制約のため, 横長のディスプレイにあわせた回答空間しか設けられなかったことによると考える。たとえば表 4 に示されているように, 有意差が見られない場合でも, 提示方法 [4 チャンネル] の方がシーク時間が短くなる傾向が見られたことから, パーチャルデスクトップ空間のように上下により大きな空間を想定すれば, 上下方向の情報を与える提示方法 [4 チャンネル] の有効性が有意に現れることが期待されると考えている。

ところで, 前章における実験では, 視覚的な情報を与えない条件下で音像定位位置を定めるための 4 チャンネル間のレベル差を求めていた。それに対して, 本章の実験では, 被験者が作業領域を注視しているという条件下で音が提示されていた。先行研究<sup>17)~20)</sup>では, 同時提示される映像と音に対応がある場合, 映像による音像の引き込みが起こり, その程度は視覚的な注目度に依存することが示されている。本研究で同時提示されていた視覚情報 (数字列) と聴覚情報 (白色雑音) には対応関係がないので, 音像の引き込みの程度は小さいものと考えられるが, 被験者が作業領域を注視していたことにより音像の引き込みが生じていた可能性はある。そこで, 音像定位位置を定めるためのレベル差を求める段階で, 視覚の注目度の影響を考慮することが今後の課題である。

最後に, 合成音像を用いた位置表示によって GUI 環境を支援することの意義を改めて考える。たとえばオブジェクトの視覚探索という課題に限れば, アイコ

ンをリンクさせたりハイライト表示することによる支援が可能である。ただし, この場合でも, 音によってあらかじめ探索対象の位置をおおまかに示しておくことは, ユーザが視覚探索を自然に行うことができるという意味でインタフェースのユーザビリティの向上が期待できるので重要であると考えられる。また, 1 章で述べたとおり, パーチャルデスクトップ空間のように現実のディスプレイの外側にオブジェクトが配置されている場合には, 音による位置の報知こそが有効である。さらに, 視覚障害者を対象とした GUI 環境の支援として, 音による位置表示が果たす役割は大きいものと考えられる。

なお, 被験者の視線および顔の向きについては何も制約を与えなかった結果として, 被験者は数値列打ち込みの作業中は作業領域が正面になるように顔を向けて作業していた。このように, レベル差のみを利用した合成音像を用いることにより, 頭部の位置だけでなく回転についてもユーザに制約を与えない利点があることを重ねて強調する。

#### 4. ま と め

本研究では, 大型ディスプレイの 4 隅に配置したスピーカを用いて合成音像を生じさせることにより, ディスプレイ上の位置を表示し GUI 環境を支援するシステムを構築した。このシステムによってオブジェクトの位置を音で表示することの有用性を検証するために, ディスプレイ上のオブジェクトの変化を音により察知させ, 視覚により探索させる評価試験を行った。その結果, 左右チャンネル間にレベル差をつけて左右方向の位置を表示するだけでも, 従来のモノラル音に比べて有意に良好な結果を得た。さらに, 4 チャンネル間にレベル差をつけて, 上下方向の位置まで表示することにより, 作業領域を隔てて上下に配置されているようなオブジェクトの変化を察知するのに有効であることが示された。これらの効果は, ユーザの頭部がディスプレイ中央にない場合も同様であったことから, 頭部の位置ずれに対する頑健性が示され, 提案した手法が実用的なものであることが示された。

今後の課題としては, 表示音の種類を, オブジェクトごとにそれを連想させるような音を割り当てるなど, いわゆる音アイコン<sup>21)~23)</sup>に関する考察も必要であると考えられる。これにより, マルチモーダルユーザインタフェースのさらなる発展が期待される。また, 本研究で示した, ディスプレイ上の位置を表示する音の提示方法は, ユーザの位置ずれにも頑健であるので, 複数人が参加するテレビ会議といった遠隔協調作業の効

率向上にも応用できるものと考える。

謝辞 本研究の一部は、通信・放送機構による創造的情報通信技術研究開発推進制度「マルチモーダルインタフェースを備えた高次コミュニケーション空間の構築」の助成のもとに行った。

### 参 考 文 献

- 1) Schröder, M.R. and Atal, B.S.: Computer simulation of sound transmission in rooms, *IEEE Intr. Conv. Rec.*, Part 7, pp.150–155 (1963).
- 2) 安藤四一, 設楽貞樹, 前川純一, 城戸健一: 電子計算機による室内音響設計法に関する二, 三の基礎的考察, *日本音響学会誌*, Vol.29, pp.151–159 (1973).
- 3) Blauert, J.: *Spatial Hearing—The Psychophysics of Human Sound Localization* (Revised edition), pp.372–392, MIT Press, London (1995).
- 4) Begault, D.R. and Erbe, T.: Multichannel Spatial Auditory Display for Speech Communications, *J. Audio Eng. Soc.*, Vol.42, No.10, pp.819–826 (1994).
- 5) Crispian, K. and Ehrenburg, T.: Evaluation of the “Cocktail-Party Effect” for Multiple Speech Stimuli within a Spatial Auditory Display, *J. Audio Eng. Soc.*, Vol.43, No.11, pp.932–941 (1995).
- 6) 小澤賢司, 金澤永治, 鈴木陽一: ヘッドホンを用いたバイノーラル再生における個人性補正の効果, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol.5, No.3, pp.949–956 (2000).
- 7) 浜田晴夫: 基準的収音・再生を目的とする Orthostereophonic System の構成, *日本音響学会誌*, Vol.39, pp.337–348 (1981).
- 8) 畑岡信夫, 在塚俊之: 視覚障害者の GUI アクセスを助ける音響技術, *日本音響学会誌*, Vol.54, No.2, pp.393–398 (1998).
- 9) 鈴木陽一(著), 大山 正, 今井省吾, 和気典二(編): 感覚・知覚ハンドブック, 誠信書房, pp.1060–1063 (1994).
- 10) 黒住幸一: 垂直面内に配置した 2 つのスピーカによる合成音像の定位, 平元秋季日本音響学会講演論文集, pp.437–438 (1989).
- 11) Harima, T., Takane, S. and Suzuki, Y.: Localization of Virtual Sound Image Generated by Two Sources Located on the Median Plane, *Memoirs of the Tohoku Institute of Technology*, No.17, pp.175–179 (1997).
- 12) 辻本 廉, 中林克己, 二階堂誠也: ステレオ再生における音像の正中面内方向定位について, 昭 54 春季日本音響学会講演論文集, pp.241–242 (1979).
- 13) 榎谷 薫, 藤木五郎, 丸山文央: ステレオフォニックにおける正面虚音像の定位上昇について, 昭 56 春季日本音響学会講演論文集, pp.615–616 (1981).
- 14) Treisman, A. and Souther, J.: Search asymmetry: a diagnostic for preattentive processing of separable feature, *J. Exp. Psycho.*, Vol.114, pp.285–310 (1985).
- 15) Treisman, A. and Gormican, S.: Feature analysis in early vision: evidence from search asymmetry, *Psycho. Rev.*, Vol.95, pp.15–48 (1988).
- 16) 田中 敏, 山際勇一朗: 教育・心理統計と実験計画法, pp.120–127, 教育出版 (1999).
- 17) 中林克己, 辻本 廉, 二階堂誠也: ステレオ音像とテレビ映像の相互作用に関する基礎実験, 昭 54 春季日本音響学会講演論文集, pp.245–246 (1979).
- 18) 中林克己, 辻本 廉, 二階堂誠也: ステレオ音像とテレビ映像の相互作用に関する基礎実験(2), 昭 54 秋季日本音響学会講演論文集, pp.293–294 (1979).
- 19) 中林克己, 辻本 廉, 二階堂誠也: ステレオ音像とテレビ映像の相互作用に関する基礎実験(3)—注目度の定量化について, 昭 55 春季日本音響学会講演論文集, pp.113–114 (1980).
- 20) 小宮山撰, 中林克己, 辻本 廉, 二階堂誠也: 大画面テレビ映像とステレオ音像の相互作用に関する基礎実験—垂直方向の音像定位について, 昭 56 春季日本音響学会講演論文集, pp.613–614 (1981).
- 21) Gaver, W.W.: The Sonic Finder: An Interface that Uses Auditory Icons, *Human-Computer Interaction*, Vol.4, pp.67–94 (1989).
- 22) Blattner, M.M., Sumikawa, D.A. and Greenberg, R.M.: Earcons and Icons: Their Structure and Common Design Principles, *Human-Computer Interaction*, Vol.4, pp.11–44 (1989).
- 23) Mynatt, E.D. and Weber, G.: Nonvisual Presentation of Graphical User Interfaces, Contrasting Two Approaches, *CHI '94*, pp.166–172 (1994).

(平成 12 年 10 月 31 日受付)

(平成 13 年 4 月 6 日採録)



小澤 賢司(正会員)

1963年生。1988年東北大学大学院工学研究科修士課程修了。同大学電気通信研究所助手・助教授を経て1998年より山梨大学工学部助教授・博士(工学)。聴覚科学,メディア感性工学等の研究に従事。日本音響学会,電子情報通信学会,日本感性工学会等の正会員。

性工学等の研究に従事。日本音響学会,電子情報通信学会,日本感性工学会等の正会員。



降矢 龍浩

1976年生。2000年山梨大学工学部電子情報工学科卒業。現在同大学大学院工学研究科博士前期課程在学中。合成音像による音像定位の研究に従事。日本音響学会学生会員。