

空間認知に影響を与える因子について

横山 賢介・廣瀬 通孝・及川 道雄・一丸 丈巖 (東京大学・工学部)

Abstract :

Artificial Reality is a technology which provides a spacial interface between man and computer. In order for the virtual environment to be user-friendly, the system must be capable of allowing the user to easily recognize the immediate surroundings. Thus, when designing and constructing a virtual environment, a proper balance is necessary between functionality and calculation performance.

In this paper, vision with respect to view angle and view distance is discussed. Moreover, the effect of audial input as a spacial cue is presented. Combinations of visual and audio input that were beneficial to performance in a virtual environment were analyzed and an experimental prototype constructed to achieve better spacial perception.

Keywords : Artificial Reality; Virtual Environment; Spacial Perception; Stereo Phonic Sound Field; Directional Localization of Sound;

1 仮想環境における空間認知

人工現実感のシステムは、基本的にはコンピュータと人間との間に空間型のインタフェースを実現するものであり、その空間が現実の空間と同様、人間にとってわかりやすいものである必要があるからである。空間型インタフェースがなぜ使いやすいかといえば、人間の空間認知能力を十分に活用することができるからである。そのためには、人間の空間認知能力を活用するうえでどのような因子が支配的であって、計算機的能力をどの部分に重点的に配分しなければならないかを見きわめる必要がある。

本研究は2つの部分から成る。第1の部分は、視覚による空間認識において、つまり、いわゆる視界の広さの役割について調べたものである。視界が狭くなるにつれて、空間の全体を一度に見渡すことが不可能になるため、

空間の把握が非常に難しくなる。これまでに、見回し動作における視界提示の時間遅れの効果が調べられている[1][2]が、本報においては、物理的な視界の広がりと同様に調べられる。第2の部分では視覚以外の空間キューとして、聴覚情報を併用することの効果が調べられている。視覚は、指向性の極めて高い感覚であり、その意味においては、先述のような視界の問題も生じるというわけである。それに対し、聴覚は全方位的な感覚である。視覚と聴覚の両者をうまく組み合わせることによって、空間認識能力をより高めることが可能であり、その効果が具体的に調べられる。

2 視界が空間認知に対して持つ影響力

「視界」とは、目に見えている範囲の空間の大きさで

A Study on the Factors Influencing Spacial Perception
YOKOYAMA Kensuke, HIROSE Michitaka, OIKAWA
Michio, ICHIMARU Takemine(Faculty of Engineering,
the University of Tokyo)

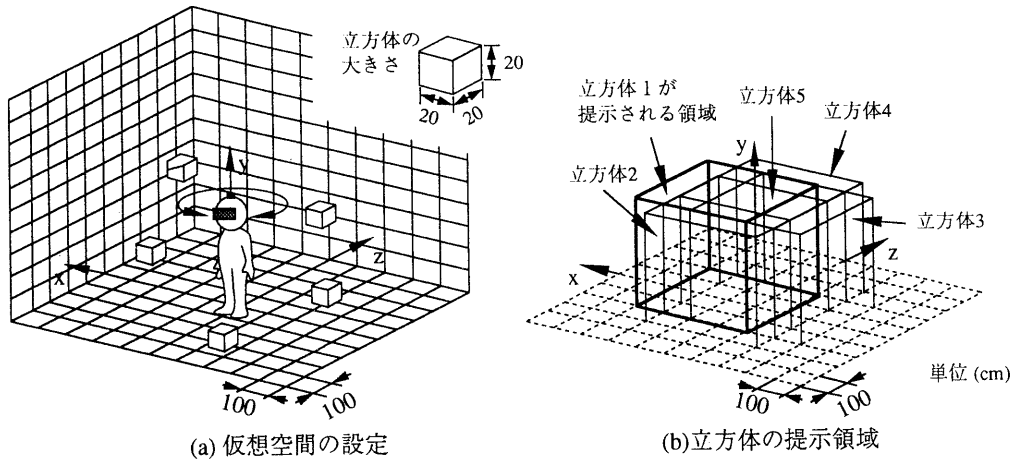


図1 空間認知実験の設定

あり、視野角と視認可能距離(狭義の視界)によって決まる。視界が大きいほど、一度に目にはいる情報量は大きいわけで、空間認知がより容易になることは言うまでもない。そこでまず、視野角について調べてみる。

2.1 視野角の影響

視野角の大きさは、臨場感の生成にも大きく関与するパラメータであり、空間の見回しによる認知に大きな影響を及ぼすことが予想される。

視野角が空間認知に与える影響を調べるために仮想空間内で以下の実験を行なった(図1)。被験者は、頭部搭載型ディスプレイ(HMD)と3次元位置センサを装着する。本実験では、HMDとしてVPL社のアイフォン(片眼の視野角:垂直 58° 、水平 83°)を使用した。仮想空間内には一辺20cmの立方体が5つ配置されており、被験者は定位置に立ち、立方体を探し、全ての位置を記憶する。立方体の高さは床から0、100、200cmの3種類とし、出現位置は、対称性を考慮して、それぞれが図1(b)に示した5つの立方体内である。なお、仮想空間内での自分の位置の把握を容易にするために、床と四方の壁面には $100\text{cm} \times 100\text{cm}$ の格子が描いてある。被験者は研究室の学生2名である。視野角は使用したHMDのものを最大とした6通りを、1名につき3回ずつ行なった。評価方法は探索に要した時間を用いて行なった。

図2がその結果である。横軸は水平方向の視野角である。 27° を境にして課題を達成するために要した時間が大きくなるのがわかる。

畑田らによれば[3]、臨場感の生成にとっての必要条件は視野角 20° である。ここで求められた数字との一致が偶然かどうかについてはより本格的な研究を待たなければならないが、臨場感のような感性レベルの問題とこ

こで述べたようなタスクレベルの問題とが実は深い関連を有することを示唆しているとも考えられる。

2.2 視認可能距離の影響

次に視認可能距離の影響を調べる。このパラメータは、仮想空間の中を自由に移動できる様な場合について支配的である。ここでは計測用として、図3に示すようなトレッドミル(歩行器)を使用した。

このシステムの動作原理は以下の通りである。室内歩行機の回転軸よりロータリーエンコーダを用いて回転量(移動量)を計測し、それをもとに移動量を計算する。また、移動時に左右の方向転換を行なうことができる用に2つのスイッチを用いてこれを行なう。右スイッチを押すことにより、視点は右へ回転する。左についても同様である。Graphics Workstation上では、この情報をもとに仮想空間を描画する。この画像は、液晶プロジェクタを用いて、スクリーンに投影される。今回の実験では視差による立体視は用いていない。

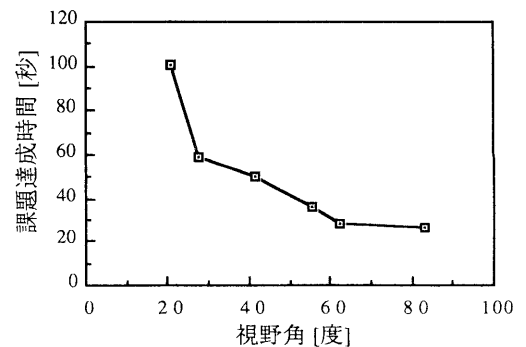


図2 HMDの視野角が空間認知に及ぼす影響

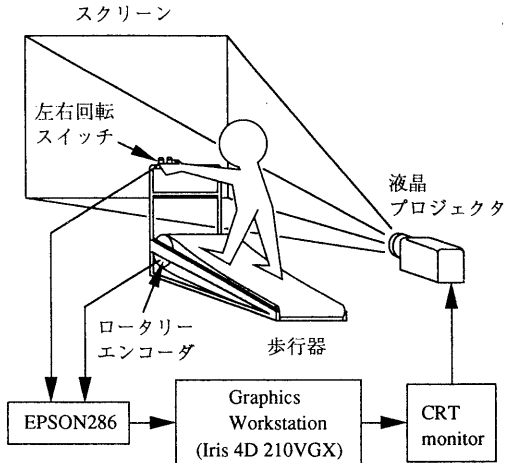


図3 仮想空間歩行システム

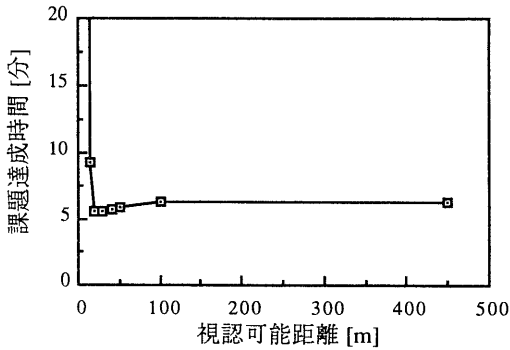


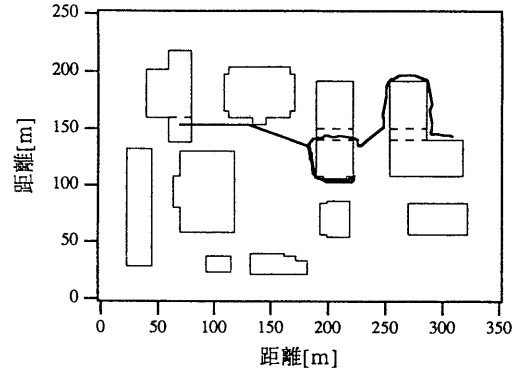
図4 視認可能距離が空間認知に及ぼす影響

視認可能距離、すなわちファー・クリッピングポイントを変化させて、目的地点までの所要時間、並びに移動経路がどの程度変化するかを測定した。仮想空間としては東大本郷キャンパスのデータを用い、この地理に詳しい本研究室の学生3名を被験者とした。

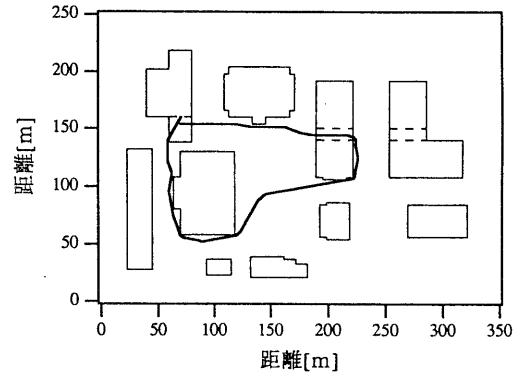
実験の結果、所要時間は視認可能距離20mまでは、ほとんど変化がなかった(図4)。グラフの減少は習熟によるものと考えられる。しかし、これが10mでは、被験者は目的地までたどり着くことができなかった(図5(a))。また、視認可能距離が悪くなるほどかなり急な方向修正が行なわれる回数が増える傾向が見られた(図5(b)、(c))。

3 聴覚による空間認知能力の向上

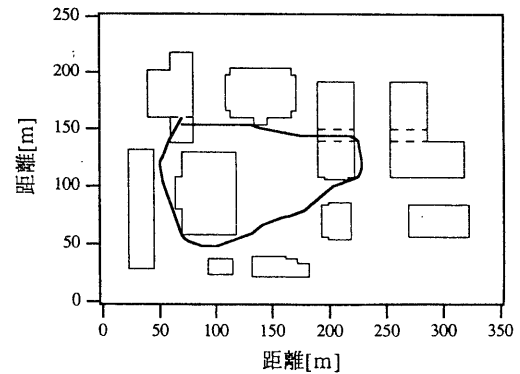
以上述べたような要因は計算機のグラフィックス処理能力と密接な関連を持つ。すなわち、視界が狭ければ狭いほど、計算機のグラフィックスの負荷は小さくなる。ごく



(a) 視認可能距離10m



(b) 視認可能距離30m



(c) 視認可能距離100m

図5 移動経路

狭い範囲だけの描画を行えば良いからである。しかしながら、視界の縮小に従い、空間認知の容易性が次第に低下することも事実である。そこで、冒頭に述べたように、他の感覚を援用することによって、空間認知を容易ならしめる可能性を検討する必要がある。ここでは、聴覚の活用によりこれを実現する可能性を調べる。

3.1 システム構成

3次元の音像定位システムとしては、コンボロボトロン[4]のようなヘッドフォンを用いたシステムも考えられるが、ここでは図6に示すようなスピーカーを用いたシステムを使用した。

音像定位のためには「人の合成音像の方向知覚は、複数のスピーカーからの合成波面の到来方向から判断している」という、いわゆるステレオ理論を用いた。この理論は収音音場で2つのマイクロホンを用いて実音源を收音し、それを2つのスピーカーによって聴取者に出力するという手順で導かれるものである[5]。

具体的には、この理論に従い、スピーカー間の音量レベルを制御することにより音像を定位させている。音量レベルは電圧によって制御し、音源としてはMIDIに対応するシンセサイザーを用いることによりコンピュータによる音源の制御を行なっている。聴取者の位置と音像の位置の双方が与えられればスピーカー間の出力比が求まり、8つのスピーカーの各出力レベルを決定することができる。スピーカーへの出力ボリュームは、この出力レベルになるようにPC-98から制御した。

3.2 システムの評価

通常音像定位の実験は反響音やその他の雑音などの影響がないように無響音室で行なわれる。しかし、今回の

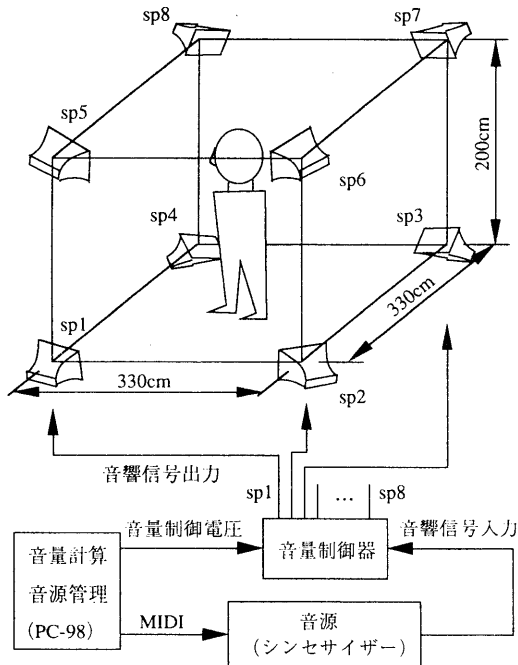


図6 3次元音像定位システム

システムは我々の研究室内に作られたものであり、壁・窓などからの反響音や、コンピュータのファンなどの雑音の存在により音響実験をするに適した環境とは言い難い。そのため、このシステムの音像提示能力がどの程度のものであるかを実験的に簡単に見積もった。

実験は、実際のスピーカーがある場所に位置させた場合(実音源)、システムによって仮想音源を定位させた場合(合成音像)の2つについて行なった。被験者は目を閉じた状態で音源の位置を指示する。スピーカーは常に被験者の耳の方向に向け、被験者には頭を動かさないように指示をした。これは頭を動かすことにより音の方向知覚の能力が向上することを防止するためである。音源はシンセサイザーのドラム音(広帯域にわたる周波数成分を含むパルス列)を用いた。これは、周波数が広帯域にわたり高周波数成分を含むほうが、上下方向や、前後方向の判断がしやすいためであり、同時に、定位精度に周波数の影響が出ることを避けるためである。

音像がうまく定位しているように見えるかどうかを確認するためには、音像位置を被験者に指示してもらう必要があるが、ここでは直交座標と棒を用いた指示法の2つを採用した。

直交座標による指示法は音像の位置をx、y、zの座標値を用いて指示する方法である。座標系は、両耳の中間点を原点、右方向をX軸、正面方向をY軸、上方向をZ軸の正方向とし、8つのスピーカーを頂点とした直方体の各平面までの距離をそれぞれ10、つまり各軸ともに-10～10の範囲の座標として表した。棒を用いた指示法は、棒の先端に三次元空間位置磁気センサ(ポヒマスセンサ)を取り付け、これを用いて音像の方向を指示するものである。

実験結果を図7、8、9、表10、11に示す。直交座標を用いて実音源の位置を指示した結果が図7であり、直交座標、棒を用いて合成音像を指示した結果がそれぞれ図8、9である。図中、横軸は音源の方向、縦軸は知覚された方向である。傾き1の直線上の点は、提示された音像の方向と知覚された方向が一致したものであり、傾き-1の直線上の点は、上下または前後を両耳を含む水平面またはそれに垂直な面に対して対象に間違えたことを示している。これは人間の耳の構造上よくみられる現象であり[6]、本質的には方向判断は正しいとして、今後誤差について述べるときには、前後、上下の対称な間違いは誤りとしなすことにする。

実音源に関しては、方位角は実際より後方に知覚する傾向がある(図7(a))。仰角は、ばらつきはあるがある程度一致しており、また上下を対称に間違えて判定しているものがある(図7(b))。

合成音像に関しては、方位角は指示方法によらず、提示された音像の方向と知覚された音像の方向がほぼ一致している(図8(a)、9(a))。仰角は、直交座標指示の結果をみるとばらつきが大きくなるように見えるが、これは上下を対称に間違えたものが多くあるためとも考えられ、そ

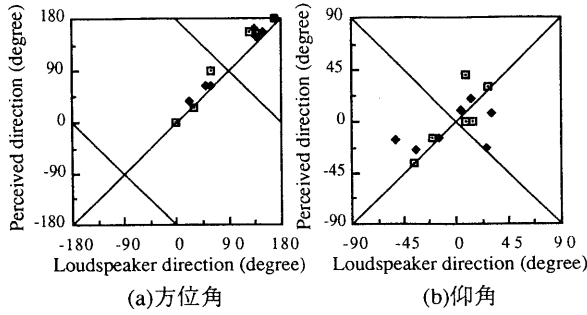


図7 実音源知覚 (直交座標指示)

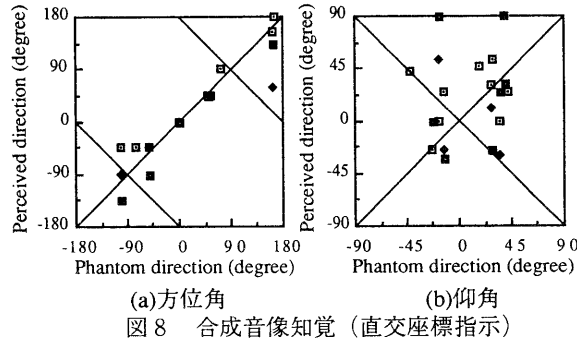


図8 合成音源知覚 (直交座標指示)

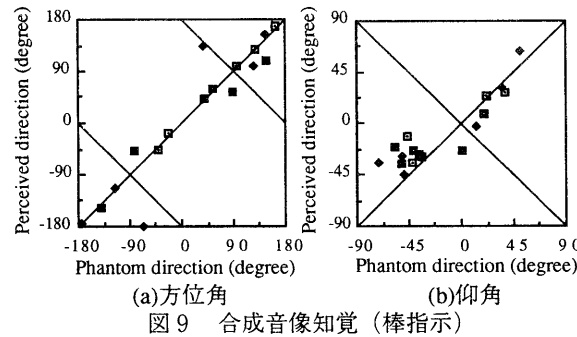


図9 合成音源知覚 (棒指示)

れを誤差としなければ提示されたものと、知覚されたものはかなり一致していると見ることができる(図8(b))。棒を用いた指示の結果、仰角は右上がりの直線上ににそって分布していることから、この考え方を妥当としてもよいであろう(図9(b))。

次に合成音源の知覚の精度について考察を行なう(表10、11)。指示誤差とは、直交座標指示、棒指示の指示動作自体が有している誤差のことである。つまり、これ以下の精度を論ずることは無意味である。

実験の結果から合成音源の水平方向に関する知覚の誤差は、およそ15°であるということが分かる。仰角については、直交座標を用いた時には誤差が大きく出ているが、棒を用いた時にはそれより良い結果が出ており、直交座標の方の誤差は指示法の影響を多く含んだ誤差では

	方位角			仰角		
	平均	最大	最小	平均	最大	最小
指示誤差	3.8	12	0	5.8	13	0
実音源指示誤差	14.2	31	0	14.6	49	0
合成音源指示誤差	13.3	40	0	20.7	71	0

単位(度)

表10 システムの精度(直交座標指示)

	方位角			仰角		
	平均	最大	最小	平均	最大	最小
指示誤差	2.5	5.6	0.1	4.0	6.6	0.2
合成音源指示誤差	15.8	64.0	2.0	15.5	38.0	1.0

単位(度)

表11 システムの精度(棒指示)

ないかと考えられる。従って、合成音源知覚の上下方向の誤差もまた、およそ15°程度と見なすことができる。

この結果を実音源の場合と比較すると、方位角については同程度の誤差である(逆に合成音源のほうが実音源の定位よりいい)。仰角については3割程度誤差が増えている。しかし仰角については、この方法では誤差の値は高めに定めているため、実音源の場合と同程度の誤差と見することもできる。

被験者により指示された音源の位置は、実音源、合成音源ともに、ある程度の大きさをもった音源の中心と思われる部分の位置であり、特に合成音源においては音源がぼやけるために、この音源の大きさによる誤差も含まれていると考えられる。

このことを考慮した場合、方位角の誤差15°、仰角の誤差15°という、このシステムにおける音源の定位精度は、実験をした環境において十分なものであるといえ、仮想作業空間における聴覚情報の提示の際にも十分効果的に利用できるといえる。

3.3 聴覚情報による空間認知能力の向上

以上の準備をもとに、聴覚情報を付与することによって、空間認知能力がどれほど向上するかについての実験を行なった。実験の内容は、図1に記したものと良く似たものである。

被験者は3次元音源定位システムの中央の椅子に座りHMDを装着する。被験者はHMDを通じて図1(a)の仮想空間の中央に位置することになる。この空間内に一辺20cmの立方体を提示し、被験者はその立方体を捜し出す。被験者には立方体を視界にとらえたら、そのことを示すように指示し、被験者が立方体を発見したらただちに次の立方体を提示する。立方体は1つずつ提示され、1回の実験で5つの立方体を探してもらい、探し終えるまでの時間を計測する。その際に、その立方体のある位置から音がす

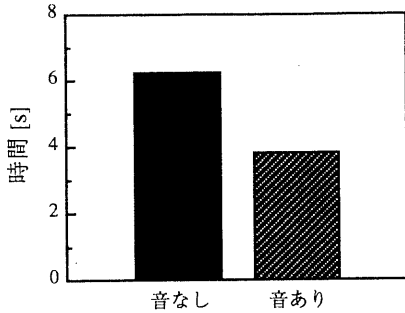


図 1 2 音の提示と立方体探索時間

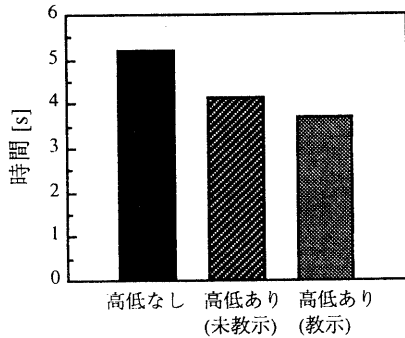


図 1 3 音の高低と立方体探索時間

るときと、しないときで探索時間に及ぼす効果を調べた。その結果が図 12 である。縦軸は立方体 1 個あたりを発見するのに要した時間である。音がある場合には所要時間が 3 分の 2 程度に短縮されており、作業効率の向上が明らかである。

次に、同様の実験を情報量を増やして行なってみた。新たに付加した情報は音の高さであり、立方体の上下方向に対応している。音の高さは 3 段階とし、それぞれ空間内の上中下の位置を示す。中心の音の高さは中央音のド (約 260Hz を主周波数とする) とし、上下はこれを 1 度 (約 30Hz) ずつずらした高さとした。音源としては音に高低をつけるという観点から、エレクトーンの音 (主周波数を中心とする倍音成分などを含む音) を使用した。初めは、被験者に音の高さの変化や音の高さと立方体の位置の関係について教示せずに実験し、続いてこのことを教示して実験を行なった。

その結果が図 13 である。音の高低差の効果、さらにそれを教示した時の効果が明白である。ただし、音の 3 段階の絶対的な高さを認識している被験者は少なく、前の音と比較して高低を判断しているため、例えば一番低い音から一番高い音へ変わったような場合に、高くなったことは分かるが真中の音と間違える場合も見られた。

4 まとめ

本研究では、第 1 に、仮想空間での視野角・視認可能距離を変化させた場合に、空間認知能力に支障をきたし、作業の効率が極端に悪化する臨界点が存在することを確認した。その値は、視野角は片眼で水平方向に 27°、視認可能距離は 10m である。これらの値は、仮想空間を描画する際に計算機のもつ一定のグラフィックス処理能力をどのように割り振るべきか考える指標として重要である。

第 2 にスピーカーを用いた安価な 3 次元音像定位システムを用いて、これを視覚情報と併用することが可能であることを示した。今回用いたシステムによる音像定位精度は、実験環境において十分なものであるといえ、仮想作業空間における聴覚情報提示の際に、十分効果的に利用できるといえる。さらに、音像の位置情報のほかに、音の高さによる情報提示に成功し、音自体の持つ情報も作業を支援する上で重要な要素となることを示した。

参考文献

- [1] 木島 竜吾、廣瀬 通孝：空間生成精度の Virtual Science — 仮想空間が持つ時間遅れの影響を中心として —, Human Interface News and Report. 6-2. 140/145 (1991)
- [2] M.Hirose, K.Hirota, R.Kijima, M.Kanno, K.Hayakawa, K.Yokoyama: A Study on Synthetic Visual Sensation through Artificial Reality. Proceedings of the Seventh Symposium on Human Interface English Section. 675/682 (1991)
- [3] 畑田 豊彦：広視野動画像による臨場感の客観的測定、テレビジョン学会技術報告、VVI47-3. 55/60 (1981)
- [4] E.M.Wenzel et al: The Convolvotron: Real-time Synthesis of Out-of-Head Localization. Joint Meeting of the Acoustic Soc. of America and Japan (1988)
- [5] Y.Makita: On the Directional Localisation of Sound in the Stereophonic Sound Field, E.B.U.Review Part A (73) 102/108 (1962)
- [6] 中林 克巳：水平面内における方向定位、日本音響学会誌、30-3. 151/160 (1974)
- [7] 日本音響学会編：聴覚と音響心理、コロナ社 (1978)