



視覚障害者のためのVR技術の動向

関 喜一

産業技術総合研究所



1. はじめに

近年バーチャルリアリティ（以下VR）技術を様々な分野へ応用する試みが盛んに行われている。本稿では、視覚障害者の行動補助・教育・リハビリテーションへの応用の傾向を概説する。

視覚障害者を対象としたVRが晴眼者を対象としたものと異なっている点は、まず第一に、視覚以外の感覚への情報提示が重要となることである。現在は、視覚以外の残された4感覚のうち、聴覚と触覚への提示技術が研究されている。第二の相違点は、仮想環境の提示に際し、視覚障害者がリハビリ・教育・訓練によって獲得した概念を考慮することが望ましいことである。一般の晴眼者は獲得していない点字読解や障害物知覚（4. で説明）などの能力も考慮に入れた情報提示が、視覚障害者にとってよりリアルな仮想環境を作り出すことになる。

本稿では、現在研究されている視覚障害者を対象としたVRのうち、聴覚に情報を提示する形式について紹介することにする。

2. VRが登場する以前の聴覚提示技術

最初に参考として、VRが登場する以前の聴覚提示技術について述べたい。

1970年代に、電子技術を利用した「歩行補助装置」なるものの研究が盛んに行われた。その基本的なしくみは、超音波センサや光センサなどで探知した周囲の障害物などの情報を、音や振動に変換して視覚障害者に知らせ、もって歩行における環境認知の補助を行うというものである。

実際、数種類が実用化され、日本にも2種類が導入された。

そのうちの1つはソニックガイド（Sonicguide）¹⁾ という眼鏡型の超音波環境探索装置であった。原理は、眼鏡のフレームに取り付けられた超音波トランスデューサから超音波を発生し、物体に反射して帰還した音波を超音波マイクロホンで捕えて可聴音に変換しイヤホンを通して聴覚に提示するものであった。変換の方法は、検出した物体の左右方向を両耳間レベル差（左右耳に提示する音の大きさの差）による頭内の左右音像位置、距離をピッチ（音の高さ）、材質を音色にそれぞれ対応させるものであった。ソニックガイドを使えば聴覚を通して周囲の状況を詳細に知ることができるため、当時は多くの研究者や視覚障害リハビリテーション・教育関係者がその可能性を模索した。

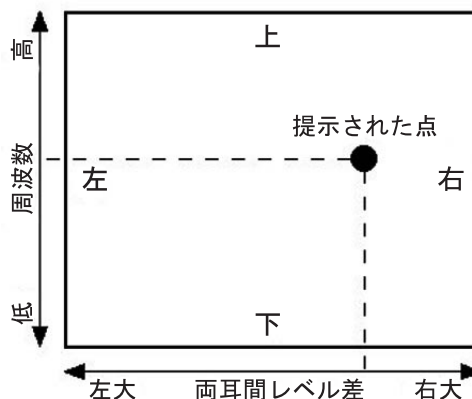


図1 2次元図形提示方式（下村ら²⁾、杉本ら³⁾）。左右を両耳間レベル差、上下を周波数に変換して提示する。技術的に簡単であり、コンピュータのインタフェースなどに適している。

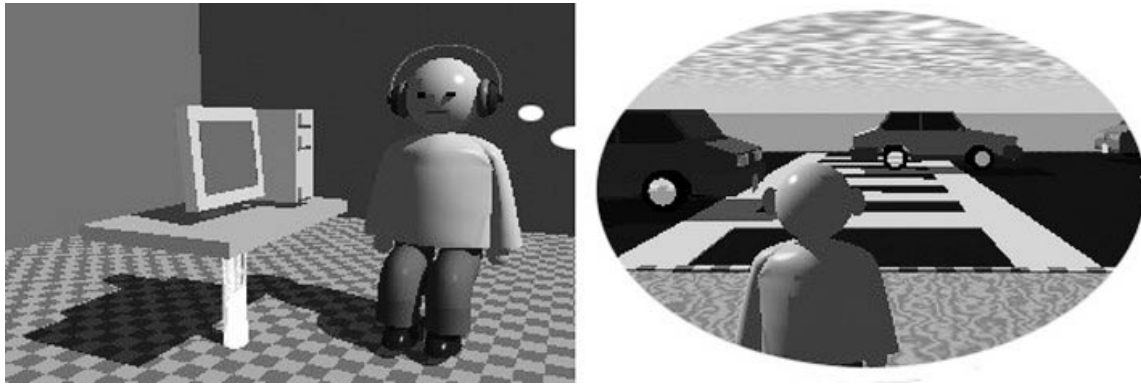


図2 頭部伝達関数を利用したヘッドホンによる頭外音像提示技術。ヘッドホン聴取であるにもかかわらず音像が頭外定位するため、リアルな3次元音響が再現される。

しかし、物体の方向・距離・材質を頭内音像位置・ピッチ・音色に変換するというこの情報提示方式はとても「リアル」と言えるものではなく、この提示情報から物体の存在を実感し、方向・距離・材質を認識できるようになるためにはそれ相応の訓練が必要であった。また、障害物知覚(4. で説明)を獲得した視覚障害者にとってはこの提示情報はかなり違和感があったようだ。本稿の3. や4. で紹介する研究は概して、ソニックガイドなど1970年代に開発された装置が採用していた不自然な変換情報提示方式から離脱し、もっと「リアル」に物体の存在感、位置情報を提示することはできないだろうかという発想からスタートしている。

ちなみに現在でも、下村ら2), 杉本ら3)が、複雑なVR技術に依存せず、左右を両耳間レベル差、上下を周波数に変化して2次元図形を提示する技術についての研究を報告している(図1)。この方式は主にコンピュータのインタフェースとして考案されているもので、不自然さは否めないものの、複雑な畳込み演算などを行う必要がないため、低コストで実現できる利点がある。

3. 頭部伝達関数を利用した音源定位のためのVR

一般用、視覚障害者用を問わず、現在の聴覚によるVRの主流は、頭部伝達関数(説明は後述)を考慮して、ヘッドホン提示により音像を頭外定位させる技術に応用したものである。一般的にこの方式のVRは、音楽用エフェクタとして使用されている他、ゲームや遊園地のアトラクションなどのアミューズメント目的で利用されているケースが多い。一方視覚障害者用としては、主に歩行訓練、日常生活訓練における音源定位能力の向上をめざした訓練・補助システムとしての可能性が追及されている(図2)。

ここで、この技術の原理について概説する。

空間内の音源から発せられた音波は、鼓膜に到達する過程で頭部、耳介、外耳道などの影響を受け、スペクトルが変化する。音源から鼓膜までを1つの伝達系と考えたとき、その伝達関数を一般に「頭部伝達関数(head-related transfer function; HRTF)」と呼ぶ(頭部伝達関数にはもっと厳密な定義や分類がある4)がここでは省略する)。

一般に2chのステレオ信号をそのままヘッドホンで聴取した場合、音像は頭内に生じる。しかし、頭部伝達関数をデジタルフィルタなどで再現し、一旦このフィルタを通過させた信号をヘッドホンで聴取すると、空間内の音源から発せられた音波が頭部などの影響を受けて鼓膜に到達する状態が模擬され、頭外に音像が定位する(図3)。

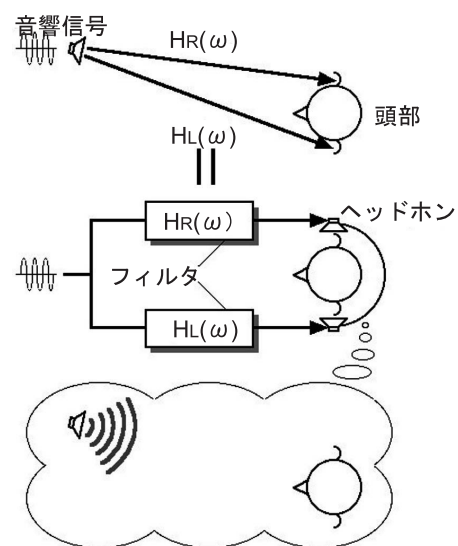


図3 頭部伝達関数を利用したヘッドホンによる頭外音像提示技術の原理。音源から左右耳までの伝達関数 $H_L(\omega), H_R(\omega)$ (図上段) を、デジタルフィルタなどで再現してヘッドホンで提示すると(図中段)、あたかも空間内に実在する音源の音を聴取しているかのように音像が定位する(図下段)。

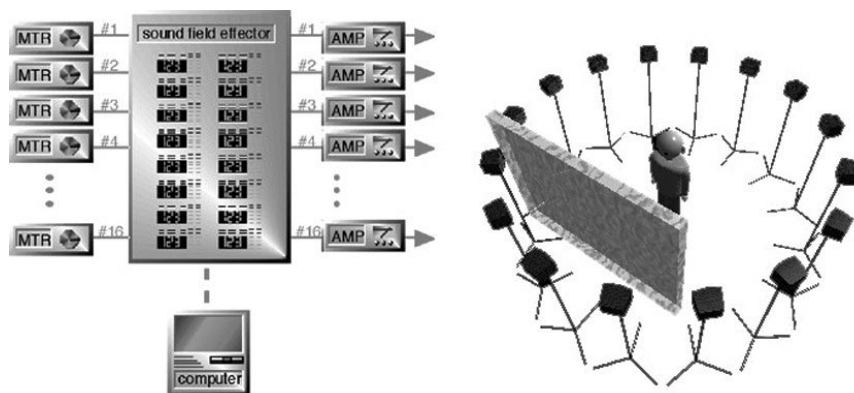


図 4 障害物知覚訓練用音響 VR システム (関 9).
16 個のスピーカーを用いて、仮想的な障害を提示する.

頭部伝達関数は、頭部に対する音源の方向・距離によってそのスペクトルが異なっており、ヒトの頭外定位における音源方向・距離決定の手がかりとなっている。従って、方向・距離と頭部伝達関数の対応関係をあらかじめ把握し、任意の方向・距離の頭部伝達関数を畳み込めるようなフィルタシステムを用いれば、任意の位置に音像を生じさせることができる。3次元音響システムとして知られる Crystal River Engineering 社の Convolutorn や、Roland 社の RSS-10 などはこの原理を利用している。

頭部伝達関数を用いた頭外音像提示技術は、空間内に実際にスピーカを配置せずともヘッドホンにより頭外に音像を提示できるため、場所を選ばず運搬も容易な聴覚 VR システムとして近年急速に関心が高まっている。しかし、頭部伝達関数は頭部の形状などによって決定されるために個人差があり、システムのフィルタに組み込んだ頭部伝達関数との差が大きい人が使用した場合は十分な頭外定位効果が得られないことがある。個人差を如何に克服するかが今後のこの技術普及の鍵を握っている。

次に実際の応用例を紹介する。

棟方ら 5) は、頭部伝達関数を用いた聴覚情報提示システムを使って、視覚障害児の音源定位能力訓練を想定したインタラクティブな学習プログラムを作成し、その有効性を検証した。そのシステムは、キーボードにより仮想音源の位置をコントロールすることができる。訓練生は、二人一組となり、1人が“Chaser”となる仮想音源を操作し、もう1人が“Escaper”という別の仮想音源を操作して、追いかけてこをするようなゲームを行う。ゲームを繰り返して行くうちに、音源定位の訓練が進むことが期待できる。訓練の前後で距離定位能力を比較した結果、有為な向上が見られたと報告している。

Inman ら 6) は、1998 年から 4 年計画で、3次元仮想

音響提示技術を視覚障害児用の歩行訓練へ応用する研究を行うと報告した。計画の 4 年目には、視覚障害児に歩行訓練を行っている学校の少なくとも 5 校に導入したいとしている。1999 年の国際会議における彼らの発表では、想定しているシステムは、例えば車が往来している道路を横断する際、車が途切れるタイミングなどを音で聞き取る訓練を想定したものであった。

小林ら 7) は、双曲面ミラーと CCD カメラを組み合わせた全方位センサを用い、そこから得られた目標物などの位置を 3次元音響に変換して提示する視覚障害者誘導システムを試作した。システムは、使用者の頭頂部に全方位センサを取り付け、センサ内の CCD カメラから得られた情報を画像処理して目標物の方向と高さを検出し、3次元音響生成装置を用いてその座標に音像を生じさせるというものであった。評価実験の結果、室内に吊したカラーパネルを目標物とした場合、視覚障害者がある場所まで正確にたどり着くことができたと報告している。

その他に関連した研究例として、井口 8) は、3次元音響によって予め自動車通過音を聴取する訓練を受けた視覚障害被験者群が、訓練を受けていない視覚障害被験者群に比べて、実環境での歩行訓練時における SPR (Stress Pulse Ratio, 心拍数の増加率に基づいたストレス指標) が有意に低いことを報告した。この結果は、3次元音響のシミュレーションによる仮想環境での事前訓練が、視覚障害者の実環境での歩行訓練における不安感の軽減に効果的であることを示している。

4. 障害物知覚のための VR

障害物知覚 (obstacle perception, obstacle sense) は、「音を発しない物体 (壁や柱など) の存在を聴覚によって知

覚し定位する能力」と定義づけることができる。物体は、たとえ自分では音を発しなくても、環境音のある空間の中に存在すれば、音の伝わり方を変化させる。この変化を聴覚によって捕えることにより物体を検出する能力が障害物知覚である。

障害物知覚は百年ほど前までは空気の流れの変化などを感じる皮膚感覚によるものと考えられていたようだが、現在では物体からの反射音や、物体による音の回折などが重要な手がかりとなっていることが知られている。

障害物知覚は、物体の存在によって起こる音の聞こえ方の変化と物体の存在との対応関係を学習することにより可能となる。この能力は音源定位と同様、視覚障害者の聴覚による環境認知能力の1つとして重要な位置付けにあり、視覚障害リハビリテーション・教育においてもその訓練は重要な課題となる。

関 9) は、物体からの反射や遮音を音響システムを使って人工的に再現することにより仮想物体を作り出し、障害物知覚の学習・訓練を行うシステムを開発した。図 4 に同システムの概要を示す。提示装置は 16 個のスピーカからなる。障壁などの物体が存在する状態を仮想的に提示する場合は、音源からまっすぐ頭部に届く直接音の到来方向、物体からの反射音の到来方向、及び直接音との遅延時間を計算し、16 スピーカシステムを使って音場を生成する。

同システムによって仮想的に作り上げた訓練環境は、実環境では難しかった段階的訓練を可能にする。従来の訓練は、実環境で本物の障壁などに訓練生を接近させて、物体の存在によって起こる音の聞こえ方の変化を経験的に理解させる方法が採られていた。しかし、実際の環境中には物体の存在を知る手がかりとはなりえない無関係な雑音が存在する。また、物体による反射や回折なども理想的な状態で起こるわけではなく、実環境は初心者のための学習教材としては難しい場合があった。その点、このシステムが作る人工的な仮想環境では、無関係な雑音は取り除くことができ、また反射や回折も理想的な状態で再現できるため、初心者にも基礎の学習をさせるための最適な教材が作り出せる。また逆に意図的に無関係な雑音を加えるなど難易度を調整できるので、初学から熟達へ向けて難易度を徐々に高めていく段階的訓練が可能になる。

同システムの原理を説明する。図 5 に、このシステムを用いた音場再生の一例を示す。この図の例は、騒音を用いる障害物知覚において、障壁が頭部側面方向に存在する場合を例にとったものである。図 5(a) は障壁に垂

直に入射する騒音（この場合の騒音は、音源が無限遠方とみなされ、波面は平面波であるとする）のみが存在する場合で、騒音を用いる障害物知覚の修得にとって最も基礎となる音場である。この音場は、図 5(a) 左に示すように、頭部に対し障壁と反対方向（この例では頭部右方向）から到来する直接音 D と、障壁方向（この例では頭部左方向）から到来する反射音 R によって構成される。なお反射音 R は直接音 D に対し遅延時間 $2d/c$ (c は音速) を持たせたものとなる。この音場を再現するためには、図 5(a) 右のように、頭部右方向のスピーカから直接音 $D(t)$ 、頭部左方向のスピーカから反射音 $R(t)=D(t-2d/c)$ を出力すればよい。図 5(b) は、障壁に垂直に入射する騒音に加えて、入射角 θ (ただし便宜上、 θ は隣接するスピーカの見込み角 22.5° に等しいとする) で入射する騒音を付加した場合で、図 5(a) の例よりも少し実

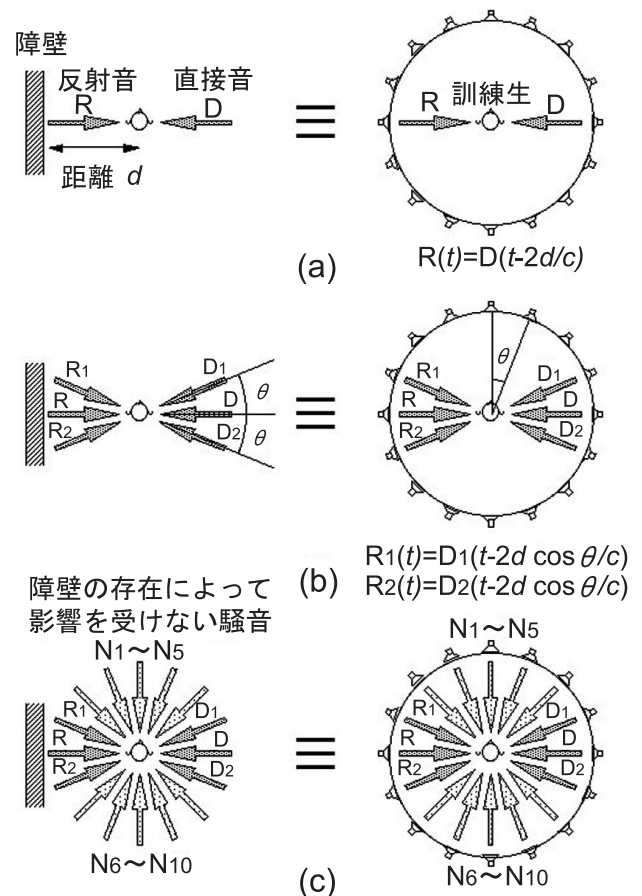


図 5 音響 VR 装置を用いた音場再生の例（騒音を用いる障害物知覚における、障壁が頭部側面方向に存在する場合の例）。
 (a) 障壁に垂直に入射する騒音のみが存在する場合
 (b) 障壁に入射角 θ で入射する騒音を付加した場合 (D, D_1, D_2 は互いに無相関)
 (c) 障壁の存在によって影響を受けない騒音を付加した場合 ($N_1 \sim N_{10}$ は互いに無相関)

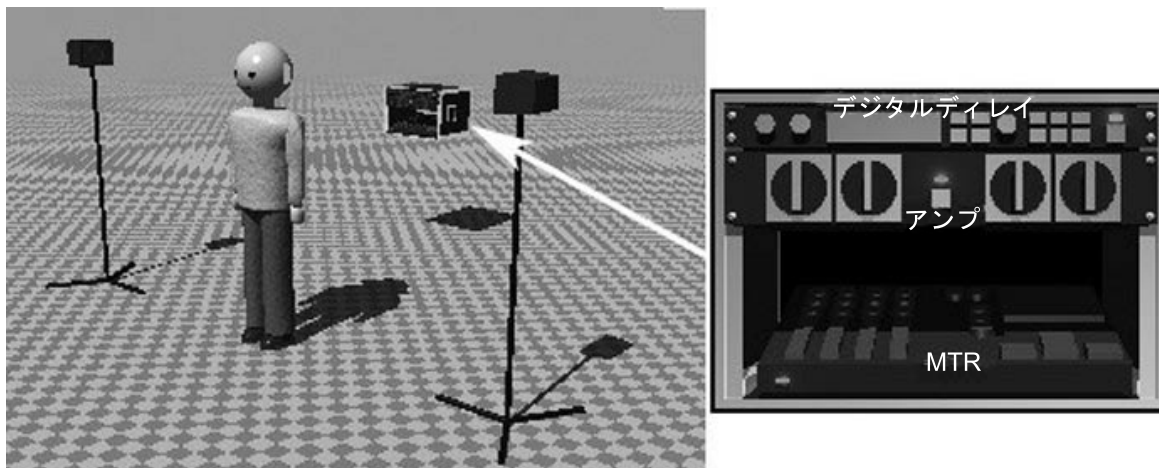


図6 障害物知覚訓練用音響VRシステム簡易版。2～4台のスピーカを用いた小型の障害物知覚訓練システム。視覚障害生活訓練専門職員養成過程で教育用として導入。

環境に近づけた例であり、障害物知覚の訓練としては少し難易度を上げたものである。この音場は、図5(b)左のように、直接音Dと反射音Rに加えて、入射角 θ の直接音 D_1, D_2 と、それに対する反射角 θ の反射音 R_1, R_2 により構成される。なお反射音 R_1, R_2 はそれぞれ直接音 D_1, D_2 に対し遅延時間 $2d \cos\theta / c$ を持たせたものとなる。この音場を再現するためには、図5(a)の例と同様、図5(b)右のようにそれぞれの音の到来方向に相当するスピーカからD, D_1, D_2, R, R_1, R_2 を出力すればよい。図5(c)はさらに、障壁の存在によって影響を受けない騒音が到来する場合で、かなり実環境に近い例であり、障害物知覚の訓練としては難易度が高い。この場合も同様に、それぞれの音の到来方向に相当するスピーカから騒音を出力すればよい。

現在このシステムの簡易版が、視覚障害生活訓練専門職員養成過程の中で、職員候補生の教育用として用いられている(図6)。将来的には彼らの手を経て視覚障害リハビリテーション・教育の現場に導入されることが期待できる。また現在関ら10)は、訓練システムが発生する訓練用音響をオーディオCDに収録して無償で配布している。このCDは、家庭用のオーディオ機器で再生できるため、特殊な機器を新たに購入する必要がなく、視覚障害教育・リハビリテーションの現場で容易に導入できるように配慮されている(図7)。

今後は、スピーカ提示ではなく、3. で述べた頭部伝達関数によるVR技術を用いてヘッドホン提示に移行して行くことにより省スペース・運搬性を高め、在宅訓練、訪問型訓練にも対応して行くであろう。

5. おわりに

視覚障害者のためのVR技術の動向と題してその傾向と幾つかの研究を紹介した。

VR技術の導入により視覚障害者の生活の質の向上が図られるのは誠に好ましいことではあるが、一方で、「何の目的でVR技術を用いるのか」、即ち、「VR技術を用いると、今までの視覚障害者の行動補助・教育・リハビリテーションの方法論における何の問題が解決するのか」を明確にしないまま、「VRという面白いものがあるからとりあえず使ってみよう」という発想で行われる研究が多いように見える。VR技術の幕開けの時代である現在においてそういう研究の立場は否定しないが、しかし目新しさにつられて目的を見失ってはいけないと思う。

本稿が、視覚障害者のためのVR技術の発展と、この技術に対する多くの読者の関心を集めることに寄与すれば幸いである。

参考文献

- 1) 日本ライトハウス：視覚障害者のためのリハビリテーション III. 電子機器を活用した歩行訓練, 日本ライトハウス (1979)
- 2) 下村淳, 小林真, 太田道男：音響的視覚代行装置における提示音の周波数と音像の上下感について, 第22回感覚代行シンポジウム講演論文集, 141-144 (1996)
- 3) 杉本雅彦, 伊東一典, 清水道雄：音の移動感を用いた視覚障害者のためのパターン伝達システム, ヒューマンインタフェースシンポジウム2002論文集, 539-542 (2002)

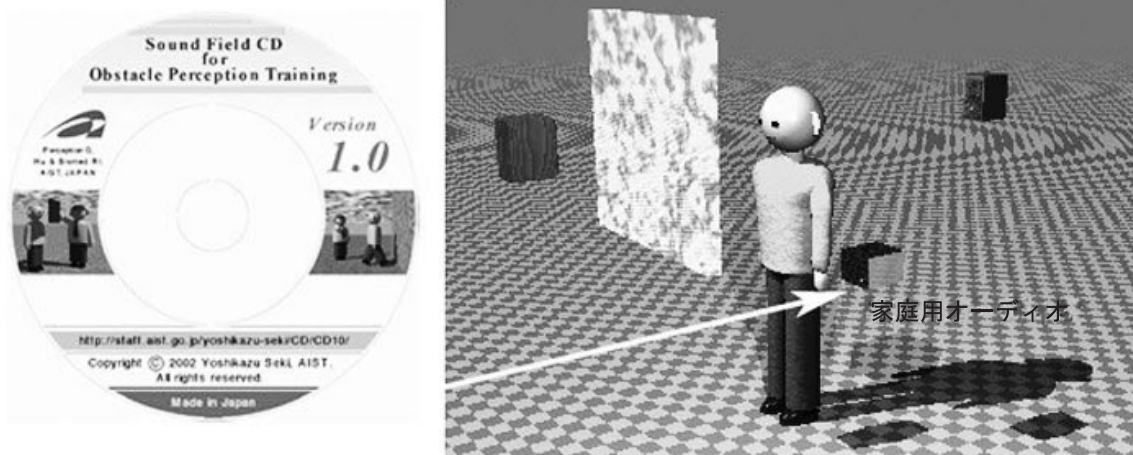


図7 障害物知覚訓練用音響 CD (関ら 10)。障害物知覚訓練用音響 VR システムが発生する訓練用音響を、特殊な機器を用いず一般家庭用オーディオ機器で再生できるようにオーディオ CD に収録したもの。視覚障害教育・リハビリテーションの現場への導入性を考え、視覚障害関係者に無償で配布されている。

4) J. Blauert, 森本政之, 後藤敏幸: Spatial Hearing 空間音響, 18, 鹿島出版会 (1986)

5) 棟方哲弥, 鈴木陽一, 魚住超, 詫間晋平: 頭部伝達関数を用いた聴覚情報提示システムの障害児教育への適用, 日本音響学会聴覚研究会資料, H-98-78 (1998)

6) Inman, D. P., Ken Loge, M. S.: Teaching orientation and mobility skills to blind children using simulated acoustical environments, Proc. of HCI International '99, 2, 1090-1094 (1999)

7) 小林真, 太田道男: 全方位センサと 3 次元音響を利用した視覚障害者用歩行誘導システム, バイオメカニズム学会誌, 24 (2), 123-125 (2000)

8) 井口健司: 3 次元仮想音響を使用した歩行訓練の体系化の試み, 国立身体障害者リハビリテーションセンター学院視覚障害学科平成 14 年度卒業論文 (2003)

9) 関喜一: 音響 VR 技術を用いた視覚障害者の聴覚訓練, 日本 ME 学会雑誌 BME, 12 (8), 38-43 (1998)

10) 関喜一, 伊藤精英: 障害物知覚訓練用音響 CD の作成(その 2), 第 28 回感覚代行シンポジウム講演論文集, 47-52 (2002)

【略歴】

関 喜一 (SEKI Yoshikazu)

独立行政法人産業技術総合研究所

人間福祉医工学研究部門 主任研究員

1989 年北海道大学工学部電子工学科卒。1994 年同大学院工学研究科生体工学専攻博士後期過程修了。工学博士。同年通商産業省工業技術院生命工学工業技術研究所入所。2001 年独立行政法人産業技術総合研究所に改組。視覚障害者の聴覚による環境認知の研究に従事。日本音響学会, 視覚障害リハビリテーション協会, 日本リハビリテーション工学協会各会員。国立身体障害者リハビリテーションセンター学院視覚障害学科非常勤講師。感覚代行研究会事務局幹事。