

視覚障害者のための音による空間認知の訓練技術

— リハビリテーション現場での実用化に向けて —

関 喜一

視覚障害者が歩行するためには、音を手がかりに周囲の様子を把握する技能を習得する訓練が必要である。そのために著者は、“安全な仮想空間の中で訓練を実現する技術を開発してリハビリテーションの現場に導入する”ことを目指し、訓練システムの開発を行った。この訓練システムの実現のために、①音による空間認知のメカニズム、②メカニズムを再現する3次元音響技術、③3次元音響演算用ハード/ソフトウェア、④頭部位置方向計測技術、⑤訓練カリキュラム等の基盤研究および要素技術の開発を行った。構築した訓練システムの有効性を検証した結果、このシステムがこれまでの実環境訓練よりも有効であることを確認した。2010年9月より、訓練システム簡易版が視覚障害関係者に配布され、指導員養成課程等で活用されている。

キーワード: 視覚障害、聴覚空間認知、リハビリテーション、3次元音響、測位技術

Training technology of auditory orientation for people with visual impairments

– Toward practical use in rehabilitation facilities –

Yoshikazu SEKI

People with visual impairments require training to perceive their surroundings from ambient sounds. The author developed a system, introduced to rehabilitation facilities, that allows training to be conducted in a safe virtual environment. To realize this system, the author carried out fundamental research on the mechanism of auditory orientation; developed basic technologies to simulate 3-D sound; and designed hardware and software to calculate 3-D sound, as well as head position and direction. A training curriculum was also developed. The effectiveness of the training system was evaluated, and certified as being more effective than the existing real-environmental training system. However, some problems with calculating head position and direction must be addressed before this system can be completely introduced to rehabilitation facilities. While we are currently working to resolve this problem, the training system in its present state is being distributed as a simplified version to the people concerned since September, 2010, and is being actively used.

Keywords: Visual impairment, auditory orientation, rehabilitation, 3-D sound, position and direction measurement

1 これまでの訓練

傷病等により失明した視覚障害者にとって、光ではなく音によって周囲の状況を認知する技能（この技能を以後“聴覚空間認知 (auditory orientation)”と呼ぶ）を獲得することは歩行・生活能力を獲得する上で不可欠である。視覚障害者に必要な聴覚空間認知には、自動車のように音を発している物体を知覚する“音源定位 (sound localization)”のみならず、壁や柱のように音を発していない物体を反射音等により知覚する“障害物知覚^{用語1} (obstacle perception)”と呼ばれる技能も含まれる。

現在、視覚障害教育・リハビリテーションの現場における聴覚空間認知の訓練の現状は、現実の生活環境・歩行環境において実際に被訓練者が歩行し、ひたすら周囲の音情報を聞き取って周囲の状況を認知する聴取経験を積

み重ねていくことに依存している^[1]。しかし、訓練を開始したばかりの“初心者”の視覚障害者には、実際に自動車が往来する実環境での訓練は危険を伴う場合があり、またさまざまな音響が混在する実環境から、聴覚空間認知に必要な音の手がかりを選択的に聴取することが困難を極める場合がある。訓練の安全性を向上させ、また訓練の効率化、さらには社会復帰までの期間短縮化を図るためには、実環境でやみくもに聴取経験を蓄積する訓練を行うだけでなく、安全かつ体系的な聴覚空間認知訓練を行うことが効果的である。

このようなことを踏まえ、国内外には聴覚空間認知訓練を体系的に行う訓練システムの開発の試みが数例存在した^[2]。それらの訓練システムは主に音響技術を駆使したバーチャリアリティにより訓練用の音環境を仮想的に再現す

産業技術総合研究所 ヒューマンライフテクノロジー研究部門 〒305-8566 つくば市東 1-1-1 中央第 6
Human Technology Research Institute, AIST Tsukuba Central 6, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8566, Japan E-mail: yoshikazu-seki@aist.go.jp

Original manuscript received March 28, 2012, Revisions received September 11, 2012, Accepted December 4, 2012

るものであった。しかし、それらの訓練システムは音源定位の訓練のみが考慮されているだけで、障害物知覚の訓練は考慮されておらず、実用に供した研究成果はない。

一方、著者らは1998年から2002年までの期間に、障害物知覚の基礎訓練のみを想定した訓練方法を開発して実用化した^[3]。この訓練方法は、障害物知覚の手がかりが初心者に分かりにくく学習しづらいという問題を解決するため、その手がかりに音響技術を使用して人工的に分かりやすく再現し、初心者への学習の支援を行うものであった。しかしこれは逆に音源定位の訓練を想定していなかった。結果として、聴覚空間認知訓練を行う訓練システムは存在していないのが現状である。

このような背景から、著者は、音源定位と障害物知覚を統合した聴覚空間認知訓練システムの開発とその実用化を目的とした研究に着手した。この論文では、聴覚空間認知訓練システム開発のための一連の研究について述べる。

2 訓練システム開発に必要な構成学的シナリオ

前章で述べたとおり、安全かつ体系的な聴覚空間認知訓練を行う方法は存在せず、現状では訓練生は実環境で聴取経験を蓄積する訓練を行うしかない。安全な訓練のためには、安全な仮想環境で学習できることが理想である。また体系的な訓練のためには、教材の難易度を自由に設定できなければならない。そのためには聴覚空間認知訓練で学習すべき音の要因を仮想的に再現するバーチャルリアリティ技術を使うことが一番現実的である。しかしこの訓練方法を実現するには、聴覚空間認知の音響学的メカニズムの知識が必要であり、またバーチャルリアリティ技術の実現のためには3次元的に音を再生する技術や訓練生の頭の動きを計測する技術が必要となる。

この訓練システムの開発のためには、前述のような異分野の研究要素を構成学的に融合したシナリオが必要である。著者はまず目的実現のために、聴覚空間認知のメカニズムを解明し、このメカニズムに基づき人工的に設計された訓練環境を安全な仮想空間の中で再現して訓練を行う方法を開発し、最終的に低コスト化等の検討を行って視覚障害リハビリテーションおよび教育の現場に導入するというシナリオを考えた。

このシナリオを構成する要素技術は以下のとおりである。

- ① 視覚障害者の歩行における聴覚空間認知のメカニズムの知識（音響心理学）
- ② 上記メカニズムを人工的に再現する3次元音響技術（音響技術）
- ③ 3次元音響の演算をリアルタイムで行うハード/ソフトウ

エア（信号処理技術）

④ 3次元音響技術による仮想現実に必要な頭部位置方向計測技術（センサー技術）

⑤ 実現した訓練システムを用いた訓練カリキュラム（リハビリテーション学）

訓練システムの原理は図1のとおりである。視覚障害者の訓練を実施する指導員は、最初に訓練内容について訓練カリキュラムを考案し、その中で使用する訓練環境を設計する。例えば、“自動車が道路の上を通過する音を聞いてこの道路が敷設されている位置と方向を認識する技能を訓練生に習得させる”というカリキュラムを実施する場合は、“道路の上を自動車が走行している環境”を訓練環境として設計する。

次に、指導員によって設計された訓練環境を、訓練システムは3次元音響技術およびハード/ソフトウェアによって立体音響的に再現して訓練生に提示する。提示の際、メカニズムに相当する音情報は、初心者にも聞き取りやすく理解しやすいように強調して提示する。これにより訓練生は、実際に自分が訓練環境の中にいるかのような感覚で、周囲の音情報を実環境よりも明確に聴取でき、聴覚空間認知のメカニズムを分かりやすく学習できる。

さらに頭部位置方向計測技術によって、実環境で訓練生が頭部を回転したり移動した場合、その位置方向変化を検出して3次元音響システムに伝え、これに合わせて音像位置を変化させる。これにより、あたかも訓練環境中で自分の頭部が同様の動きをしたかのような音の変化を体験することができる。

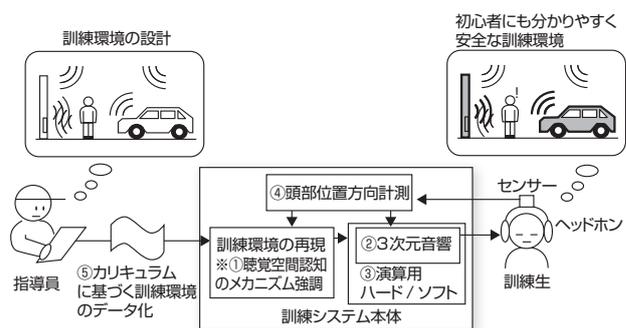


図1 聴覚空間認知訓練システムの概念図

指導員は、最初に訓練カリキュラムを考案し、その中で使用する訓練環境を設計する。次に、訓練システムは訓練環境を3次元音響技術によって立体音響的に再現して訓練生に提示する。メカニズムに相当する音情報は強調して提示する。さらに頭部位置方向計測技術によって、実環境で訓練生が頭部を回転したり移動した場合、これに合わせて音像位置を変化させる。これにより、あたかも訓練環境中で自分の頭部が同様の動きをしたかのような音の変化を体験することができる。

3 訓練システム開発のための課題解決

3.1 試作訓練システム開発

視覚障害者の歩行における聴覚空間認知のメカニズムについて解明し、得られた知見に基づき、試作訓練システムを開発した^[8] (図2)。この研究開発は、厚生労働科研究費の補助を受け、国立障害者リハビリテーションセンター学院視覚障害学科と共同で行った。

3.1.1 障害物知覚に基づく訓練方法の開発

著者は、1990年代から2000年代前半にかけて、“聴覚空間認知”の中でもメカニズムが不明だった“障害物知覚”について、音響心理学的な被験者実験によりメカニズム解明のための研究に従事した^{[3]-[7]}。研究を遂行する過程で、障害物知覚のメカニズムが不明であるがゆえに、リハビリテーションや教育の現場が経験的訓練方法に依存せざるを得ない実態が明らかとなり、解明したメカニズムに基づいた訓練方法の必要性を知ることになった。著者の研究結果より、障害物知覚の“手がかり”となる音響現象が、物体からの反射音と直接音による音像^{[4][5]}や音色^[6]の変化、および遮音や回折による音の減衰^[7]であることが分かった。また、これらの“手がかり”を音響技術で再現すると、障害物知覚の習得者に(実際には物体が存在しないのに)あたかもそこに物体が存在するかのような感覚を生じさせることができた^[3]。図3に障害物知覚訓練の検証の例を示す。この検証例は、壁が存在する場合の環境音の直接音と反射音を、それぞれ被験者の後方と前方からスピーカで提示することによって作り出された仮想的な壁を被験者に接近させた場合の、被験者の身体動揺である。障害物知覚獲得者において、壁の接近に同期して不随意的回避動作が確認できることから、スピーカーを使った直接音と反射音

の再現によって、障害物知覚の要因を再現できることが確認できる。この成果は、この訓練システムにおいて障害物知覚の訓練を実現する基礎となった。この訓練システムでは、初心者に分かりやすいように、障害物知覚の要因を強調することができるようにした。例えば、反射音は完全反射(反射による音圧レベルの低下がない)、障害物による遮音は完全遮音、直接音は障害物反射面に垂直に入射、および直接音と反射音以外の雑音は存在しない等である。

3.1.2 3次元音響提示技術

3次元音響技術については、ヒトの聴覚が音を3次元的にとらえるメカニズムを応用して、ヘッドホン聴取で音を自由に3次元的に再生する技術^[9]を導入した。この技術は、ヒトの頭部・耳介・外耳道の音響伝達特性である“頭部伝達関数(head-related transfer function; HRTF)”を原音信号に畳込積分することにより、音像を3次元の任意の位置に定位させる技術である。この技術により、通常のステレオヘッドホンを通して、人工的に作成した音環境を聴取者に3次元的に提示することができる。ただしこの技術には、頭部伝達関数の個人差によって、聴取者ごとに3次元の音像再生位置の正確さに差が生ずるという欠点がある。したがってこの技術は、個人ごとの校正を行わない限り正確に音空間を再現することには使用できない。今回のシナリオの訓練システムでは、“初心者”に聴覚空間認知の基礎を分かりやすく教える教材という位置づけで使用することとし、厳密な訓練には使用しないものとした。

ハード/ソフトウェアについては、上記の3次元音響を実現する上で頭部伝達関数と原音信号をリアルタイムで畳込積分できる高速の演算が必要となるため、2000年代前半では専用のデジタル信号処理用集積回路(以下 DSP)

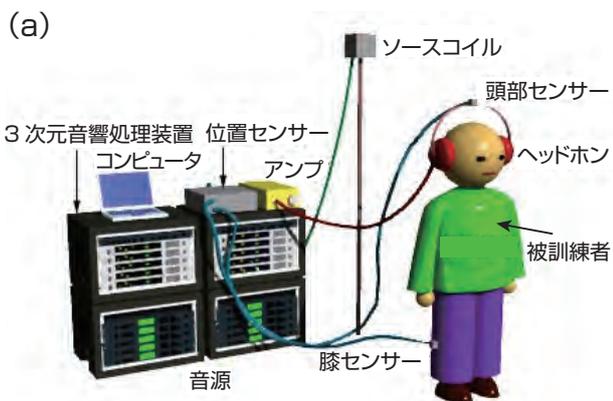


図2 試作訓練システム

(a) 全体の構成

(b) 画面に表示された訓練環境

画面左部分の仮想環境表示部には、被訓練者(円の中心位置)、音源(自動車、トラック、店舗等)、壁、道路、ランドマークの配置が表示される。画面中央部分の条件操作パネルは、仮想環境の条件設定(騒音の有無等)や、仮想環境の表示方法(拡大縮小等)の操作を行う。画面右部分の再生操作パネルは、仮想環境のファイル操作や、仮想環境の再生・停止等の操作を行う。

を用いた音響エフェクタを用いることが一般的であった。試作訓練システムでも、専用 DSP を実装した市販の 3 次元音響エフェクタ (Roland 社 RSS-10) を 10 台並列で作動させて、10 音源分の 3 次元音響を実現した。

3.1.3 位置・方向検出技術

頭部位置方向計測技術として、試作訓練システム開発では、市販の磁気位置方向センサー (Polhemus 社 3SPACE Fastrak) を導入した。この磁気位置方向センサーは、ソースコイルから磁場を発生させ、位置方向検出対象物にセンサーコイルを設置すると、センサーコイルが磁場を検出してその位置と方向を高精度で計測することができる。価格は 100 万円を超えるが、位置 1 mm、方向 1 deg の精度で計測が可能であり、研究用として使用される。位置方向検出範囲は、ソースコイルからの磁場が届く約 1 m 以内の範囲に限られているため、訓練生は実際に実環境で歩行することはできなかった。そのため、訓練環境内で移動するためには、実際に歩行するのではなく、その場で“足踏み”することで歩行の代用とした。足踏み検出のために、訓練生の頭部に加えて、膝にもセンサーコイルを装着した。膝センサーが膝の上下の動きを検出すると訓練生が足踏みをしているものと判断し、上下動の速さや大きさに応じて歩行速度も変化するものとした。

3.1.4 訓練カリキュラム

訓練カリキュラムについては、訓練環境の構成要素として、(1) 音源、(2) 壁、(3) 道、および (4) 目印 (ランドマーク) の 4 つの要素を配置する方法を考案した。(1) “音源” は、点音源であり、自動車や店等訓練環境中で音を発する物体を表現するための要素である。これにより“音源”は、音源定位の訓練に使用することができる。またその他に、訓練環境内の東西南北に相当する 4 方向から環境音を発

することができるものとし、訓練環境が本物の屋外の実環境のように音に包まれた印象を作り出すことができるものとした。(2) “壁” は、それ自身は音を発しないが、前述の音源から発せられた音を反射および遮音するものとした。これにより“壁”は、障害物知覚の訓練に使用することができる。(3) “道” と (4) “目印” は、音響的な機能を持たない要素であるが、指導員が訓練環境を設計する際に“町並み”をイメージする手助けとなるように要素として加えた。以上 4 つの要素を用いて、国立障害者リハビリテーションセンター学院視覚障害学科の指導員に、歩行訓練で習得すべき代表的な訓練環境の作成を依頼した。試作訓練システムには、指導員が訓練環境を自由に編集することができる編集用インタフェースを実装し、指導員はこれを使用して訓練環境を編集した。

3.2 訓練システムの有効性

訓練システムの有効性を検証するため、試作訓練システムが完成した 2005 年に、国立障害者リハビリテーションセンターにおいて検証実験を行った^[10]。

被験者は、リハビリテーションをまだ受けていない初心者 of 視覚障害者を模擬するため、あえて視覚障害者を被験者として使用せず、聴覚空間認知について何の経験もない盲人者 30 名に目隠しをして実験に参加させた。被験者は 10 名ずつ 3 群に分けた。最所の群には何も訓練を施さず (第 1 群)、2 番目の群には訓練システムによる訓練を実施し (第 2 群)、3 番目の群には訓練システムで実施した訓練環境を実環境で再現してこれまでのように実環境中で訓練を行った (第 3 群)。訓練は、熟練した歩行訓練士が担当し、1 日 40 分の訓練を連続 5 日間行った。訓練効果の評価項目は、客観評価として (a) 歩行時の偏軌^{脚註 2} (まっすぐ歩いているつもりが曲がって歩いてしまう現象) の軽減効果、

(b) 歩行時におけるストレス (視覚がない状態で歩行することによる心理的負担) の軽減効果の二つを計測した。また被験者の主観評価として、(c) 技能評定^{脚註 3} (歩行の技能に関する 50 項目の自己採点) (d) 不安評定^{脚註 3} (歩行時の不安に関する 50 項目の自己採点) の二つを実施した。(d) は国立障害者リハビリテーションセンターで考案された、歩行に関する技能と、歩行時に感じる不安についての 50 項目の質問用紙を用いて評価した。

その結果、(b) (c) (d) については、試作訓練システムによる訓練を実施した群 (第 2 群) の訓練効果は、これまでの実環境での訓練効果 (第 3 群) と統計的に有意な差

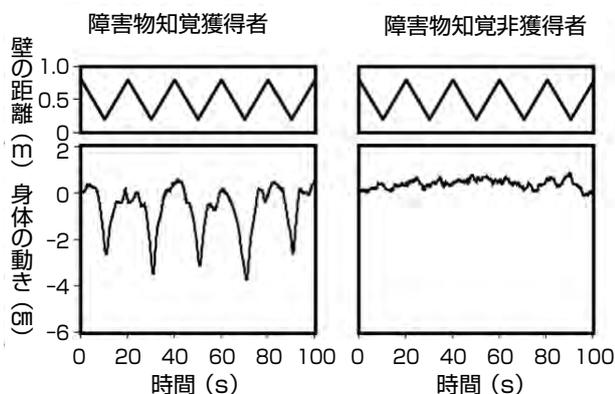


図 3 障害物知覚訓練の検証の例

反射音によって作り出された仮想的な壁を被験者に接近させた場合の、被験者の身体動揺 (左: 障害物知覚獲得者、右: 非獲得者)。左右の上図は壁の動きを表す。障害物知覚獲得者では、壁の接近に同期して不随意的な回避動作が確認できる。

がなく、また訓練をしていない群(第1群)より有意に高かった(図4(b)(c)(d))。このことは、安全な仮想空間内で訓練環境を構築して訓練を行った場合の訓練効果が、危険を伴う実環境中での訓練効果と遜色がないことを意味している。またさらに(a)については、訓練システムを使用した群の訓練効果が、他の2群より有意に高いことが示され、音を手がかりにする歩行訓練においては仮想環境訓練のほうがこれまでの実環境訓練より有効であることも示された(図4(a))。これらの検証実験の結果は、著者の訓練システムの有効性を支持するものであった。

なおこの訓練システムは2010年に国内特許登録済である^[11]。

3.3 訓練システムの実用化を阻む問題点(死の谷)

試作訓練システムを開発し、その有効性を証明したが、シナリオの最後にある“視覚障害者リハビリテーションの現場への導入”のためにはいくつかの課題が残されていた。

最初の課題は価格である。3次元音響を再現するための専用DSPを実装したエフェクタは当時1台約30万円と高価なもので、試作訓練システムではこれを10音源分の10台使用していたため、これだけで約300万円となってしまっ

た。さらに頭部位置方向計測のために使用した磁気センサーも100万円を超えており、その他に原音を録音するレコーダや制御用コンピュータ等を合わせると、約500万円の価格となってしまった。視覚障害者リハビリテーション等“福祉”の現場は、“医療”の現場とは異なり、高価なシステムを導入する経済力を持っていない。現場導入のためにはコストダウンが必須の課題であった。

また、システム本体も大型で持ち運びすることはできない。視覚障害者のリハビリテーションには、訓練生が訓練施設で訓練を受ける“通所・入所型訓練”の他に、指導員が訓練生の自宅に訪問して訓練を実施する“訪問型訓練”も盛んに行われている。本体が持ち運びできなければ、訪問型訓練に対応できない。小型化も急務であった。

さらに、前述の通り試作訓練システムで使用している磁気位置方向センサーは、計測範囲が約1mしかなく実際に歩行することができないため、その場で足踏みを行って歩行の代用とする不自然な方式を採用している。この場合、訓練生は、歩行することによって生じるはずの加速度フィードバックを体感できないことになる。計測範囲の制限をなくすることにより、実際に訓練生が歩行動作を行えるよ

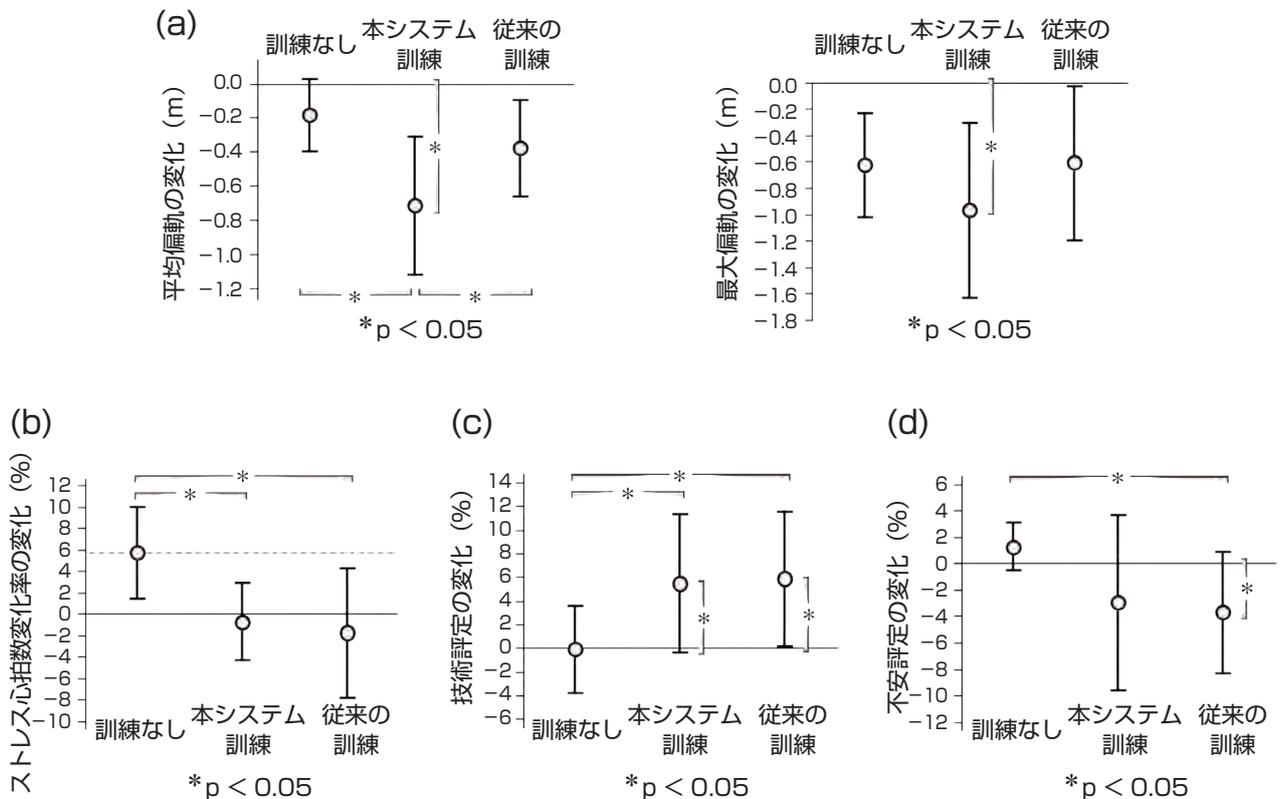


図4 訓練システムの評価実験結果 (Seki et al., 2011^[10])

- (a) 訓練による歩行時の偏軌(左:平均値、右:最大値)の変化。縦軸の値が負の値で小さいほど、訓練による偏軌軽減効果が高いことを示す。
- (b) 訓練による歩行時のストレスの変化。縦軸の値が負の値で小さいほど、訓練によるストレス軽減効果が高いことを示す。
- (c) 訓練による技能評定の変化。縦軸の値が正の値で大きいほど、訓練による技能向上効果が高いことを示す。
- (d) 訓練による不安評定の変化。縦軸の値が負の値で小さいほど、訓練による不安軽減効果が高いことを示す。

うにすることが望ましい。

以上のことから、これらの“死の谷”を超え、実用化するための新たな取り組みを行うこととした。

3.4 訓練システムの実用化へ向け再検討

シナリオ中のいくつかの要素について、再検討を行い、実用訓練システムの開発を2006年より開始した。この研究開発は、東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究および財団法人大川情報通信基金研究助成の補助を受け、東北大学電気通信研究所、東北福祉大学等いくつかの研究機関と共同で行った。

ハード/ソフトウェアについて、試作訓練システムを開発した2000年代前半は専用DSPを使うのが主流であったが、その後、コンピュータ技術の進化に伴い、汎用のパーソナルコンピュータ（以下PC）の中央処理装置（以下CPU）でも頭部伝達関数の畳積演算がリアルタイムで行えるようになった^[12]。汎用PCは視覚障害者の情報アクセシビリティを確保するツールとしてすでに視覚障害者リハビリテーションの現場にも普及していたため、もし汎用PCを演算装置として利用できれば、現場は新たな機器を購入する必要がない。また、ノートPCを使用すればシステム本体が小型化できるため、持運びの問題も解決する。実用訓練システムでは、東北大学電気通信研究所の研究グループが開発した汎用PCによる3次元音響ソフトウェア SiFASo (Simulative environment for 3-D Acoustic Software)^[13]を導入することとした。SiFASoによる再現可能な音源数はCPUの処理速度に依存するが、Pentium IV 2 GHzクラスの性能があれば8音を同時に再生可能であり、現在主流となっているCore 2 Duo 2 GHzクラスのCPUではそれ以上の複数音源の再生が期待でき、試作訓練システムと同等の性能を確保できる。

頭部位置方向計測技術については、高価・高精度・狭計測範囲の磁気センサーの代わりに、量産品として一般に市販されているGPSやMEMSジャイロ・加速度センサー

等の技術を実用訓練システムに導入することとした。これらは数千円～数万円と低価格であり、現場の経済的負担を軽減できる。また計測範囲に制限がないので、試作訓練システムのように“足踏み”で代用する必要はなく、実環境内で訓練生が実際に歩くことが可能となる。これにより、例えば盲学校のグラウンド等のように広くて構造物のない敷地を用いて、その中で訓練生を実際に歩かせながら安全な訓練を実施でき、訓練生は、歩行することによって生じる加速度フィードバックを体感しながら訓練を受けることができる。しかし、量産されている低価格・広計測範囲のセンサー類は、一般に精度が悪く、ノイズや大きな誤差を含んでいる。訓練システムに導入するためには、精度を向上させる技術を新たに導入する必要がある。現在、ノイズ誤差除去の可能性について検討している^[14]。その結果、カルマンフィルター等のアルゴリズムがノイズ誤差除去に有効であることが分かってきており、低価格・広計測範囲のセンサー類をこのシステムに使用できる可能性が見えてきた。

4 訓練システム簡易版

上記の再検討に基づき、実用訓練システムの開発を実施した(図5)。

実用訓練システムは、ノートPC、ヘッドホン（とサウンドアダプタ）、および位置方向センサーで構成されている。このシステム本体は小型軽量（大きさはノートパソコンとヘッドホンを合わせたサイズ。重さはおよそ3 kg前後）であるため、訓練生はこれを装着した状態で実際に歩くことが可能である。

現在、頭部位置方向計測技術のセンサーの精度向上の課題を未解決のままの実用訓練システム簡易版が使用可能な状態となっている。簡易版はGPSやジャイロ・加速度センサーの代わりに、PCのマウスを用いてPCの画面に表示される訓練環境内の“訓練生”を操作することにより、訓練環境内を移動することが可能としたシステムで

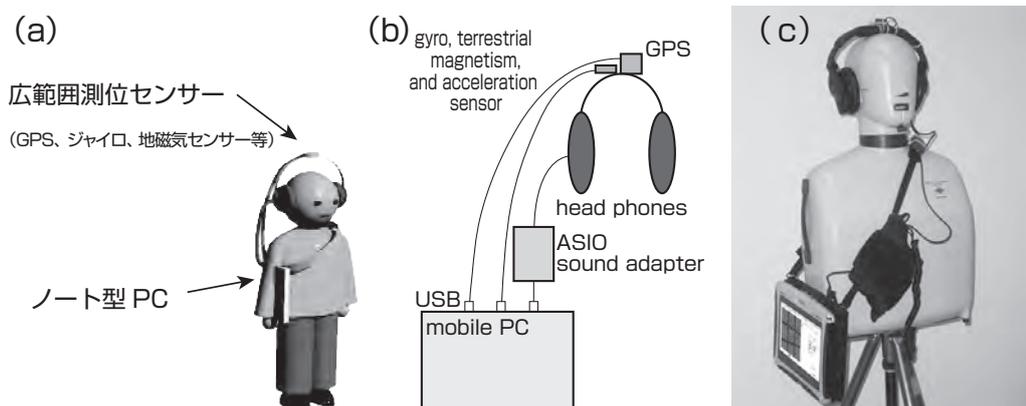


図5 実用訓練システム
(a) 全体の構成
(b) 各構成要素のブロック図
(c) 装着した状態の写真

ある（図6）。実環境で訓練生が実際に歩くことはできない点においては試作訓練システムの問題点と同じく未解決のままであるが、低価格化および小型化は実現しており、リハビリテーション現場での導入は容易である。表に、試作訓練システム、実用訓練システムおよびその簡易版の比較表を示す。2010年9月より視覚障害関係者を対象として国内外に簡易版のソフトウェア（産総研知的財産管理番号 H22PRO1182）を無償配布中であり、次の改良のためのフィードバックを求めている。このソフトウェアは、中核となる3次元音響技術の他に、頭部位置方向計測、訓練環境の読込・再生、および訓練士用ユーザーインターフェースの制御のためのソフトウェア等によって構成される。また国立障害者リハビリテーションセンター学院視覚障害学科では、2010年より指導員養成課程において教育用に導入している。指導員養成課程における訓練システムの導入により、教室に居ながらにしてさまざまな歩行環境を疑似体験できるため、指導が効率よく行えるようになった。

5 まとめと今後の展開

この論文では、聴覚空間認知訓練システムの開発とその実用化を目的とした研究について述べた。

この訓練システムの開発のためには、①音による空間認知のメカニズム、②メカニズムを再現する3次元音響技術、③3次元音響演算用ハード/ソフトウェア、④頭部位置方向計測技術、⑤訓練カリキュラムという異分野の研究要素を構成学的に融合することが必要であった。このため、聴覚空間認知のメカニズムを解明し、このメカニズムに基づき人工的に設計された訓練環境を安全な仮想空間の中で再現して訓練を行う方法を開発し、最終的に低コスト化等の検討を行って視覚障害者リハビリテーションおよび教育の現場に導入するというシナリオを想定し研究開発を行った。

1990年代より人間の障害物知覚に関するメカニズムの解明に取り組み、2003年より3次元音響技術、これを再現

表 試作訓練システム、実用訓練システムおよびその簡易版の比較

	試作訓練システム	実用訓練システム	実用訓練システム簡易版
価格（PC除く）	500万円	数万円	同左
寸法	大型 (H0.6 m×W0.6 m× D0.6 mのラック4台分)	小型 (ノートPC+ ヘッドホン)	同左
可搬性	据置式	携帯可能	
頭部位置 方向計測	高精度 (方向 1 deg、 距離 1 mm) 狭範囲 (半径約 1 mの領域内) 高価格 (百万円以上)	低精度 (方向 10 deg、 距離数十 cm~数 m) 広範囲 (無制限) 低価格 (数千円~数万円)	マウスで 代用

するためのハード/ソフトウェア、訓練生の頭部の動きを計る頭部位置方向計測技術および訓練の手順を示す訓練カリキュラムの導入を検討し、2005年に試作訓練システムを開発した。評価実験により、訓練システムの妥当性を確認したものの、実用化のためには超えなければならない課題があった。3次元音響を再現するためのハード/ソフトウェアおよび頭部位置方向計測技術を再検討した結果、実用訓練システムを構築することができた。現在、早期の実用場面での実証を目指し、広範囲測位技術をマウスで代替して仮想環境内の頭部位置方向を指定できる機能を実装した簡易版のソフトウェアを2010年より視覚障害関係者に配布し、また指導員養成課程で実践している。

今後、頭部位置方向計測技術の課題を解決して改良版のリリースを目指す。低コスト性と測位性能のバランスを検討した結果、量産されている家庭用ゲーム機のコントローラを頭部位置方向計測センサーに流用することが最もコストと性能のバランスの面で有利であるため、このセンサーの誤差を軽減するアルゴリズムを実装して、改良版をリリースする予定である。また、訓練システムの普及を軌道に乗せる活動も行う。産総研 Web サイトを通して訓練システムソフトウェアの無償配布を実施し、視覚障害関連学術団体を通じて訓練システム配布の周知を行う。また指導員養成課程においては訓練システムを使用した訓練方法の指導を行う予定である。同時に、新たに訓練成果の評価システムの開発にも着手する予定である。

謝辞

この研究を遂行するにあたり、国立障害者リハビリテー



図6 実用訓練システム簡易版のユーザーインターフェース
頭部位置方向センサーの代わりにPCマウスで訓練環境内を移動可能。

ションセンター学院視覚障害学科、東北大学電気通信研究所、東北福祉大学、および2011年度産総研イノベーションスクール生の三浦貴大氏の協力を得た。またこの研究の一部は、厚生労働科研費（2003～2005年度）、東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究（2007～2012（予定）年度）、および財団法人大川情報通信基金研究助成（2008年度）の助成を受けた。ここに感謝の意を表す。

用語の説明

用語1：障害物知覚：壁や柱のように音を発していない物体を、物体からの反射音や物体による遮音等、音の変化を手がかりに聴覚で知覚する能力。視覚障害者の重要な環境認知能力の一つである。

用語2：偏軌：視覚障害者の歩行において、本来の歩行経路からはずれて歩行する現象。ベアリング(veering)ともいう。

用語3：(歩行時の) 技能評定・不安評定：国立障害者リハビリテーションセンターで考案された50項目によるアンケート調査による評価。技能評定の質問項目の例としては、「大体曲がらずに歩行することができる」「壁や建物を伝い歩くことができる」「車と平行に歩くことができる」等である。不安評定の質問項目の例としては、「走行中の車との接触(が不安である)」「未知の場所での歩行(が不安である)」「看板との接触(が不安である)」等である。

参考文献

- [1] 芝田裕一編著: 視覚障害者の社会適応訓練, 日本ライトハウス, 大阪 (1990).
- [2] 関喜一: 視覚障害者のためのVR技術, バイオメカニズム学会誌, 25 (2), 71-74 (2001).
- [3] 関喜一: 聴覚による障害物知覚とその訓練, 日本音響学会誌, 60 (6), 325-329 (2004).
- [4] 関喜一, 伊福部達, 田中良広: 盲人の障害物知覚と反射音定位の関係, 日本音響学会誌, 50 (4), 289-295 (1994).
- [5] Y. Seki: On a cause of detection sensitivity difference depending on direction of object in obstacle sense, *IEEE Trans. Rehabil. Eng.*, 5 (4), 403-405 (1997).
- [6] Y. Seki and K. Ito: Coloration perception depending on sound direction, *IEEE Trans Speech Audi. P.*, 11 (6), 817-825 (2003).
- [7] 関喜一, 伊福部達, 田中良広: 盲人の障害物知覚における障害物の遮音効果の影響, 日本音響学会誌, 50 (5), 382-385 (1994).
- [8] 関喜一, 佐藤哲司: 3Dサウンドを用いた視覚障害者用聴覚空間認知訓練システム(第2報), 第31回感覚代行シンポジウム予稿集, 1-4 (2005).
- [9] J. Blauert: *Spatial Hearing*, MIT Press, Cambridge (1997).
- [10] Y. Seki and T. Sato: A training system of orientation and mobility for blind people using acoustic virtual reality, *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, 19 (1), 95-104 (2011).
- [11] 関喜一, 佐藤哲司: 視覚障害者のための歩行訓練環境生成システム, 日本国特許, 登録番号4534014 (2010).
- [12] 矢入聡, 岩谷幸雄, 鈴木陽一: 頭部運動感応型ソフトウェア聴覚ディスプレイの開発～DSPを用いない高臨場感音空間合成システム～, 日本工業出版 画像ラボ, 18 (2), 35-39 (2007).

- [13] 大内誠, 岩谷幸雄, 鈴木陽一, 棟方哲弥: 汎用聴覚ディスプレイ用ソフトウェアエンジンの開発と音空間知覚訓練システムへの応用, 日本音響学会誌, 62 (3), 224-232 (2006).
- [14] 三浦貴大, 関喜一, 岩谷幸雄, 大内誠: 広範囲電子的測位による3次元音響を用いた視覚障害者の聴覚空間認知訓練の可能性(第5報)-利用可能なセンサに関する調査-, 第37回感覚代行シンポジウム予稿集, 89-92 (2011).

執筆者略歴

関 喜一(せき よしかず)

1994年北海道大学大学院工学研究科生体工学専攻博士後期課程修了。博士(工学)。同年工業技術院生命工学工業技術研究所入所。現在産業技術総合研究所ヒューマンライフテクノロジー研究部門主任研究員。視覚障害者の聴覚による空間認知のメカニズムの解明、およびその習得訓練技術の開発に従事。また、国立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として、研究成果に基づき視覚障害者生活訓練専門職員の養成に従事。



査読者との議論

議論1 全体構成

コメント(多屋 秀人: 産業技術総合研究所広報部)

著者が長年研究を展開してきた聴覚による空間認知のメカニズムに関する知見をベースに、3次元音響提示技術、信号処理技術、センサー技術および訓練カリキュラムの要素技術から聴覚空間認知訓練システムを構成した研究で、本誌に適した内容構成になっている。

コメント(久保 泰: 産業技術総合研究所評価部)

取り扱っている内容は本格研究として優れており、またSynthesiologyの趣旨に沿った論文と判断する。

議論2 障害物知覚

質問(多屋 秀人)

障害物知覚の基礎訓練方法開発において解決した課題に言及し、その成果が今回の訓練システムの中でどのように活用されたかについて紹介してください。

また、視覚障害者を対象とした「障害物知覚」訓練等の検証結果について言及してはどうでしょうか？

回答(関 喜一)

“障害物知覚の基礎訓練方法開発において解決した課題”については、すでにこの論文に“これらの「手がかり」を音響技術で再現すると、障害物知覚の習得者に(実際には物体が存在しないのに)あたかもそこに物体が存在するような感覚を生じさせる”と説明しています。また、“その成果が今回の訓練システムの中でどのように活用されたか”については、すでにこの論文に“障害物知覚の要因を強調することができるようにした。例えば、反射音は完全反射(反射による音圧レベルの低下がない)”とした。”と説明しています。

“視覚障害者を対象とした「障害物知覚」訓練等の検証結果”については、実際に音による壁を提示した場合の視覚障害者の回避動作を記録したデータを図3として追加しました。

議論3 検証実験

質問(久保 泰)

「3.2 訓練システムの有効性」の検証実験は、このシステムの有効性を示す非常に重要な部分であり、実データを示す方がよいのではないのでしょうか。

また、訓練の回数にも依存するところがあるように思われますの

で、回数を明記する必要があるのではないのでしょうか。

回答（関 喜一）

ご指摘のとおりです。実験データを文献 10 から引用して、図 4 (a) ~ (d) として掲載しました。また、以下のとおり訓練の回数に関する情報を 3.2 第 2 段落に追加しました。

追加質問（久保 泰）

図 4 が加わるにより、開発したシステムの評価について、より客観性が加わりました。一方、(a) ~ (d) の縦軸ラベルの意味について、専門外からは難解です。各説明文で、上あるいは下方向の数値がどのような傾向を示唆するものか、補助的な記述をすることは可能でしょうか。

回答（関 喜一）

図の説明の、図 4 (a) ~ (d) で、値の正負や大小の意味について説明を追加しました。

質問（多屋 秀人）

検証実験では、視覚障害者を被験者とせず、晴眼者を被験者とされています。

- ・晴眼者を被験者としたことで、検証の限界はあるのでしょうか？
- ・視覚障害者を対象とした有効性の確認は行っているのでしょうか？

回答（関 喜一）

晴眼者を被験者としたことで、検証の限界は無いと考えています（というよりむしろ厳しい評価が行われたと言えます）。もしこのシステム

が、視覚障害者としての生活術を習得した視覚障害者が使用することを想定したシステムなら、目隠しをした晴眼者を被験者とした評価では不十分です。しかしこのシステムは、まだ何も習得していない“初心者”の視覚障害者の訓練のために使用するシステムですので、むしろ何らかの経験のある視覚障害者を被験者とした評価結果では逆に不十分となります。

なお、このシステムの使用対象である“本物の初心者の視覚障害者”を対象とした有効性の確認はまだ行っていません。“本物の初心者”（つまり失明して間もない）視覚障害者”を被験者として、開発途上のシステムの検証実験を行うことは倫理的に難しいです。

以上のことは、参考文献 [10] で説明済みです。

議論4 今後の課題

質問（多屋 秀人）

「今後の普及」のために行うべき課題として、技術開発、普及活動の両面があると思います。それぞれの面について述べてください。特に、普及のため活動策は？

回答（関 喜一）

技術開発の課題については、低コスト性と測位性能のバランスを検討した結果について追記しました。また、普及活動については、産総研 Web サイトを通して訓練システムソフトウェアの無償配布、および視覚障害関連学術団体を通じて訓練システム配布の周知を行います。また指導員養成課程においては訓練システムを使用した訓練方法の指導を行う予定です。実際に、今回の訓練システムの 10 年ほど前に開発した“障害物知覚訓練音響 CD”という訓練教材は、この方法で 300 件以上普及させました。