音響伝達による盲人用視覚補助装置の開発*

田 中 豊^{*1}, 武 田 英 敏^{*2}
中 山 直 之^{*3}, 藤 原 忠 男^{*4}Development of Sensory Aids for Blind People
through Audible Signal TransmissionYutaka TANAKA, Hidetoshi TAKEDA,
Naoyuki NAKAYAMA and Tadao FUJIWARA

A sensory substitute for blind people on the basis of acoustic transmission has been developed and practical tests have been carried out. The characteristic of the method is that the apparatus uses stereoscopic audible signal transmission so that blind people can detect scenery images more clearly. Wide-scope distances are detected with use of a camera and a slit-type laser under the principle of triangulation. Distance signals in eight directions are transformed into variable frequency signals corresponding to the actual distances and are simultaneously transmitted to a person through a headphone set as stereoscopic audible signals. This function made it possible for a user to recognize the simple scene of objects which lie in front of him and to walk between the obstacles. As a result of the practical test, it became evident that the percentage of valid answers in recognizing the object shape was high and the walking stability was improved with training. It is confirmed that the apparatus can be used as a vision substitute.

Key Words: Mechatronics and Robotics, Medical Engineering, Sensory Perception, Triangulation, Obstacle Detection, Electronic Circuit, Audible Signal

1. 緒 言

視覚障害者の補助装置が多くの研究機関で開発されつつある^{(1)~(5)}。聴覚を利用して障害物までの距離感覚を伝える方法は有効であり、すでに実用化されている例もある。その中には超音波を利用した方式⁽¹⁾⁽³⁾やFM超音波による反響定位を利用した方式⁽²⁾がある。前者は前方の障害物の有無だけを知らせ、後者は幾つかの障害物の方向を知らせるが、距離を感覚的に得るだけであり形状の認識を可能とさせるまでには至っていない。

本論文の目的は、歩行者の前方にある障害物の形状を把握しながら、必要なときはそれを避けて歩くことを可能とさせる視覚代替器の開発にある。この装置は前方の広い範囲における距離情報を取得し、その中で

複数の距離と方向を同時にヘッドホンを利用してステレオ音響として歩行者に感知せしめることを特徴としている。ここでは、この装置の構成とそれを装着して行った歩行試験結果について述べる。

2. 視覚代替器の構成

2.1 距離情報の取得 図1は視覚代替器の構成を示す。装置は大きく分けると距離取得装置とステレオ音響回路から成り立つ。距離取得装置ではCCDカメラと扇状に照射されるスリット状レーザが用いられ、三角測量の原理を使って距離信号を得ている⁽⁶⁾。画像に写ったレーザ信号と背景の情景信号の分離を容易にするために、近赤外波長(830 nm)の半導体レーザを用い、カメラのレンズにはその波長付近を通過するバンドパスフィルタを取り付けた。なお、バンドパスフィルタの使用によっても太陽光にさらされるような明るい場所ではレーザ光の識別が困難であり、強いレーザ光の照射は付近を通る人の眼に悪影響を及ぼす。この限界と安全性の問題を乗り越えるため、現在開発中の3次元距離を得る装置⁽⁷⁾の利用を検討している。

* 平成4年11月14日 中国・四国支部松山地方講演会において講演、原稿受付 平成5年6月22日。

*¹ 正員、岡山大学工学部 (〒700 岡山市津島中3-1-1)。

*² 日本電気ホームエレクトロニクス (〒108 東京都港区芝5-33)。

*³ 学生員、岡山大学大学院。

*⁴ 正員、川崎医療福祉大学医療技術学部 (〒701-01 倉敷市松島288)。

これは同期駆動された2台のCCDカメラからの映像信号の入手と同時に信号中の対応する複数の特徴点と特徴点間の時間差（視差であり距離に逆比例）を回路により検出し、映像信号として出力する装置である。

ビデオ信号から取り出した輝度信号(Y.S.)はしきい値設定により2値化される。輝度信号をカウンタ回路に通して距離信号を算出するとともに、モニタ用回路(M.out)を経てモニタTVに映し出させる。モニタTVはレーザの輝線だけを撮り込むための調整に用いる。

図2は段付箱と後方の壁を対象として前方0点からレーザ光を照射し、0点にカメラのレンズを配置した装置の使用状況を(a)平面図、(b)正面図と(c)側面図を用いて示す。側面図においてレーザ光は0点からS点に向かって水平やや下向きに（中心線で示すカメラのレンズの方向に対し角度 α をなすよう）照射される（後の図7参照）。カメラ(CCD素子)への像の投影範囲を破線で示す。平面図ではレーザ光とカメラの視野の扇形状の広がりそれぞれ実線と破線で示す。正面図の破線の枠は壁を捉えたときのCCDに写る範囲を示すが、壁と段付箱上のレーザ照射部(0から9点とS点)の輝線をあわせて示してある。箱上のS点の像がx点である。CCD素子は破線枠の左下隅から始まり、上方に向かって走査し、最後に右下隅から右上隅に走査する。スリットレーザの扇形開き角度は 25° である。使用者はレーザ光源とカメラを取り付けた板を片手に持ち、距離取得、ステレオ音響と電源回路を格納したケース(45×30×15 cm³)を載せたキャリーを引いて歩行する。

CCD素子上の輝線位置を電子的に検出し、同時に三角測量の原理に基づいて、アナログ演算によりレンズから前方水平方向にある物体までのカメラ光軸方向の距離 d に対応した電圧信号 d_R を得る。このとき、

カメラ光軸に対してなすレーザ光照射の角度 α とカメラの受像角との関係により最大認識距離 d_{max} と最小認識距離 d_{min} が定まる。図2の幾何学的条件より距離 d は次のようになる。

$$d = \frac{F \cdot D}{x - x_c + F \tan \alpha} \dots\dots\dots(1)$$

F はレンズ中心とCCD素子との距離、 D はレンズとレーザ中心間の距離、 x_c はCCD素子上の光軸中心位置であり、これらは実験を通して変化しない定数とされる。距離 d は素子上の輝線位置 x と式(1)の関係にあるから、最大認識距離 d_{max} にあたる輝線位置を x_{min} 、その時の回路の出力電圧をAボルトに設定すると、輝線位置が x のときの距離信号電圧 d_R は

$$d_R = \frac{A (x_{min} - x_c + F \tan \alpha)}{x - x_c + F \tan \alpha} \dots\dots\dots(2)$$

2.2 サンプルホールドと周波数変換 使用したカメラは2:1インタレース方式であり、1垂直同期期間中に262.5本の水平同期信号(H.sync)と情景を表示する走査線が存在する。つまり、1/60秒間に262点の式(2)による距離情報 d_R が得られることになる。これらを同時に人間が聞き分けることは困難であるから、今回はその中から任意に8サンプリング点を選択し、垂直同期期間内のあらかじめ定められたサンプルホールド時点の距離信号を得た（実際に使うのは13～253本目のうちの8点）。つまり、扇状のレーザ光が前方の情景上に照射されて生じる点列までの距離のうち8時点の（図1中のサンプルアンドホールド信号S&Hに対応する）距離信号を利用する。この8時点は観測者から見れば8方向の物体までの距離を意味する。

図3は説明をわかりやすくするために4時点のサン

図1 視覚代替器のブロック線図

ブルホールドされた距離信号 z と垂直同期信号(V. sync)との関係を示す。この距離信号 z は最小距離のとき最大電圧が得られ、最大認識距離のとき零以上となり、かつ、周波数変換回路の条件(2m に対し500Hz)を満たす定数を用いて、距離信号 d_k が反転およびシフト($z = -d_k + \text{定数}$)されたものである。

短い距離に対しては強い音を、遠い距離に対しては小さい音を与えるような装置により、常時強い音波を与えることは耳に悪影響を及ぼすであろう。この悪影響を抑えるためと人間の聴覚は強さの変化よりも周波数変化を感じやすいことを考慮して、得られたアナログ距離信号は電圧/周波数変換器(VFC)を通して周波数に変換される。この論文の方式の特徴は距離が近いほど高い周波数を、遠いほど低い周波数の音を与えて使用者の耳にかかる負担を軽減させることにもある。

図1で示したように、8時点の距離信号 z はそれぞれのVFCに送られ、周波数変換された8chの交流信号とされる。前述のように8chの信号は8方向の距離(ベクトル)信号を意味している。これらの信号はヘッドホンを装着した使用者にとってあたかも8方向から聞こえてくるように調整するための左右の音量バランス回路(BalancerまたはPan)に通される。バランス回路を通された信号は左耳と右耳用それぞれの交流信号に分けられ、ミキシングアンプでACカップリングされた後、パワーアンプを経てステレオ音響としてイヤホンに伝達される。

距離と周波数の関係は逆比例関係で調整可能としてあるが、老人の耳にも聞き分けやすいことと測定可能距離範囲を考慮して、通常の設定では20cmに対し2kHz、2mに対し500Hzとしてある。こうすることにより、8chの距離音をあたかも8方向から同時に聞こえるような感じでとらえ、音の周波数と聞こえる方向から障害物の位置と方向を認識できる。使用者が壁の正面に立ったとき8つの音はほとんど同じに聞こえるが、斜めに向かって立つと、たとえば左のchからは高い音が、右のchになるにつれて徐々に低い音が聞こえ、壁と自分

の相対的位置関係を明瞭に認識できることになる。

CCDカメラは1/30s間に蓄えた光量に応じた電荷を次の1/30s間に奇フィールドと偶フィールドの信号として出力する。また、VFCは使用周波数範囲の周波数特性が保証されていて、その他の回路の周波数特性はDCから10 kHzまで平坦な特性を持っている。したがって、この視覚代替器の距離認識からステレオ音響発生までの総合周波数特性はCCDカメラの特性に依存する。

2.3 音の時分割回路 この装置を利用し前方の情景をよりよく把握するために視覚装置を左右に振って確かめることを行っている。しかしながら、8chの音を同時に耳に入れるため音の干渉作用が生じる恐れがあり、複雑な形状の物体を認識することが困難になると予想された。この干渉作用を除くため、Balancer回路の後で音の時分割回路に通し各chの右から左に音を順次少しずつずらせて出力させることを試みた。この回路によりそれぞれのchの音の聞こえる時間を1/4から1/200sまで変えることが可能である。

3. 実用化試験

実用化にあたって行わねばならない試験はこの代替器を利用して、

(1) 前方の物体たとえば壁面までの距離感がつかめ

図2 カメラとレーザの配置

るかどうか、

(2) 距離感がつかめればさらに物体の形状認識が可能かどうか、

(3) 最終的に目隠しをした歩行者が装置を着けて障害物を避けながら安全に歩行できるかどうかを確認しなければならない。

形状認識実験は音の時分割回路を利用したときと利用しないときの両方を行い、その他の実験は時分割回路は利用せずに行った。ここでは主に健常者を対象としたが、可能なものについては視覚障害者を被験者として実験した。

3.1 距離感 この装置は距離を周波数感覚として認識させることが特徴であるため、壁に近寄ったり壁から遠ざかったりする感覚は容易にわかる。そこで、補助装置を使ってどの程度正確に距離感がつかめるかを調べた。被験者は40cmから120cmの範囲で距離を変えて目隠しをした状態で白壁の前方に立ち、音の周波数の相違から自分と壁の間の距離を判断する。実験前に被験者はまず2時間の訓練を受け、その後、壁からの距離を指示される。被験者は壁から2m以上離れた地点から壁に向かって進み、指示された距離と感じた地点で停止したときの距離を距離感として測定した。また、比較のために同じ被験者による目視感覚を測定した。この実験では視野内に存在する模様は距離感に対し何らかの影響を与えるから、壁、床、天井などが無

図3 距離信号 z とサンプリング方法

図4 距離感の測定（視覚装置の使用）

地無彩色の部屋で測定を行った。

図4は装置を使って目隠し状態で測定した結果であり、図5は目視感覚による結果を示す。いずれも指定した距離を横軸に、距離感を縦軸にとって表しており、被験者6人の距離感の平均値、6人の距離感の最小、最大値をプロットしてある。これら2つの図を見ると目視による距離寸法感人は人間が幼い頃から経験を積んでいるにもかかわらず、模様のない環境下において感じる距離感は理想直線から大きくはずれ、最大20%もの誤差を伴うことが知られた。これに対し、距離音を認識手段とすると誤差5%以内の正確さで距離の把握が可能である。この結果は音の周波数感覚を利用する方法が距離認識手段としてきわめて有効であることを意味する。

3.2 方向感覚 この装置はステレオ音響を利用しているため、前方の大きな障害物のある方向はほとんど訓練なしに感知することができる。また、人間の歩行速度で動き回る物体に対して使用者は装置を静止

図5 距離感の測定（目測）

図6 方向感覚の測定

していても物体の方向を容易に把握できる。しかし、距離検出が8方向に限定されているため、8方向の直線上に位置しないような微小な物体の存在を確かめるためには視覚装置を左右か上下に振らせることが必要であり、したがって、方向の検出は対象物が静止していた場合の方がより困難と言ってよい。そこで、被験者の前方1.2mの円内に直径30cm、高さ50cmの円筒を置いたとき、どの程度正確に円筒の中心軸のある方向を指示できるかを調べた。図6は円筒を1個置いた場合と2個置いた場合、6Hzの時分割回路を使用した場合と時分割回路を使用しない場合についての結果を整理してある。

この図を見ると対象物が1個の場合の指示方向の誤差はほとんどないが、2個の対象物を同時に指示させると最大10°の誤差が生じている。この結果は複数の対象物に対しては、物体の存在が把握できにくくなることを意味する。しかし、時分割回路を使用しても被験者が指示した方位角度の正確さは返って低下する傾向にある。このことは8方向の距離音を順次聞いて方向を判定する能力よりも同時に8方向の距離音を判定

Six types of Object
図7 形状認識実験

図8 形状認識実験の正答率

する能力の方が人間にはより大きいことを意味する。

3.3 形状認識実験 立方体、直方体、円筒、半円筒、円錐、および四角錐の6種類の模型を対象物とした。図7は形状認識実験の方法と対象物の種類を示す。これらを被験者の前方50~80cmの位置にある回転台上に設置し、被験者に物体の全貌が把握できるように他の人が物体を回転させた。被験者はヘッドホンを通して聞こえるチャンネルごとの音の周波数の相対的な違いから提示された物が6種類の物体のうちいずれであるかを言い当てる。

図8は被験者6人それぞれについて異なる物体をランダムに呈示して30回の試験を行い、物体毎に整理した平均正答率を示す。1回の認識に要する時間は物体を回転させる必要性からほぼ1分であるが、健常者が肉眼で瞬間的に形状把握することと比較すればかなり長時間を要している。

形状Aの正答率が55%、形状Cの正答率が69%と低いが、他の形状の正答率は70%以上であり、この装置を使用して形状の把握が可能であると判断できる。とくに形状Aの正答率が低いのは1辺の長さを形状Bのものとして判断し誤ったことが大きくひびいている。被験者は物体の大まかな輪郭を認識でき、さらにその表面が平面であるか曲面であるかを区別することができた。試験毎に正答率が上昇し、解答までの時間が短くなることからこの装置の実用性は大であると判断される。なお、周波数6Hzの時分割回路を使用すると正答率は低下する傾向にある。この低下割合は使用する人により異なり、同じ訓練時間では最大10%の低下が認められたが、逆に上昇する人もあった。この時分割回路の利点は装置を大きく左右に振る必要がない点にあると

図9 歩行テスト（2個の障害物の間を通り抜ける試み）

言えよう。

3.4 歩行用補助装置としての実験 この実験において被験者は音を聞き、障害物までの距離と方向を確認しながらそれを避けて歩くことを試みた。部屋の中に複数の障害物と目標物を置いて歩行テストを行った。

図9は被験者が2個の角柱の障害物の間を通り抜けて前方の壁まで到達するときの足跡を示している。また、図10は1個の障害物を避けて前方の円柱まで歩行した時のテスト結果を示す。●印は視覚障害者の足跡であり、他のプロットは健常者の足跡を示す。これらの結果を見ると被験者は障害物のほぼ1m前方にて障害物の有無を知り、スムーズな回避行動を取っているのがわかる。この歩行に要する時間は健常者でほぼ1分、視覚障害者で40秒であった。以上の結果からこの視覚装置が歩行時の補助手段として有効に利用し得ると結論される。

健常者にとってこの装置の使用は最初とまどいはあるものも、音の周波数と距離の感覚について数回の訓練を積むと、単純な障害物を避けて歩くことはそれほど困難ではない。視覚障害者はまったく練習なしで物体認識と歩行が可能であった。しかし、障害物の形状の認識を行いながら歩行するには時間がかかりすぎることから、組み込み型マイクロコンピュータと最近の推論手法を用いて形状認識を行い、その結果を使用者に伝えられるような改良を予定している。

4. 結 言

前方の障害物までの複数の距離と方向を同時にヘッドホンを通してステレオ音響として認識させることが可能な視覚障害者のための視覚代替器を開発し、実用化試験を行った。この装置の使用で簡単な形状を認識し、障害物を避けて歩くことが可能となった。

この装置の開発と実用試験から得られた結論を要約すると以下のようにまとめられる。

1. 8chのステレオ音響発生回路を使用するとき、距離信号のミキシング効果に基づいて、同時に任意の8方向の距離を知ることが可能である。1chだけのものよりも障害物の方向の認識が速くできること、相対的な距離感をつかめることがこの装置の特徴である。

2. 距離を周波数の変化として伝え、かつ方向をステレオ音響により認識させる本法は視覚補助にきわめて有効であり、目視による距離感以上の感覚を使用者に伝えることが可能である。また、本法は対象物が比較的簡単な形状であれば形状認識にも有効である。

図10 歩行テスト(1個の障害物を避けて前方の目標物に到達するときの足跡)

3. 前方の情景を左側から右側に時分割して耳に伝える方法も試みたが、時分割回路の使用は形状認識率の向上に必ずしも有効ではなく、その利点は視覚装置を大きく振る必要がない点にある。

今後の展開として、別途開発中のステレオカメラ法による高速距離認識装置とマイクロコンピュータ採用による形状認識補助と装置の小型化などを予定している。

本研究の一部は文部省科学研究費(試験研究B)のもとに行われたことを付記する。

文 献

- (1) J.A.Braby, Ph.D. Smith-Kettlewell Institute of Visual Sciences San Francisco, California, *Artificial vision: A Review of sensory aids for the blind* IEEE Eng. Med. Biol. Soc. Annu. Conf., 2, (1980), 98-104.
- (2) 移福部ほか2名, コーモリの反響定位をモデルとするポータブル盲人用歩行補助器, 第13回感覚代行シンポジウム, 13, (1987), 95-99.
- (3) 佐々木, 超音波を利用した盲人用歩行補助器, 日本音響学会誌, 43-5(昭62), 344-348.
- (4) 末田, 盲人のための振動感覚による画像情報の伝達, 日本音響学会誌, 43-4(昭62), 329-335.
- (5) 田中ほか2名, 刺激子を利用した盲人用視覚補助装置の開発, 日本機械学会松山地方講演会講演集, No.925-2(平4-11), 175-177.
- (6) Y. Tanaka, et al, High-speed Processing for Obtaining Three-dimensional Distance Image and its Application, *Proc. IEEE/RSJ Internat. Workshop on Intelligent Robots and Systems IROS'91*, 1, (1991), 365-370.
- (7) 田中ほか2名, ステレオカメラを用いた高速距離取得装置の開発, 日本機械学会第71期全国大会講演論文集, No.930-63, F, (平5-10), 1-3.