

虚像距離制御式 HMD における奥行き知覚

大西 志保・川村 彰・松井 健・芦崎 浩二

HMD (head mounted display) の特徴として、小型ディスプレイとレンズの間隔によって、虚像としての映像平面の提示距離が決定されることがあげられる。従来の HMD において映像平面の距離は、一定に固定されたものがほとんどであった。これらの HMD における立体表示は、図 1 に示すように、両眼視差および輻輳の変化を利用しているが、目のピント調節と輻輳（像をみつめたときの寄り目の程度）の距離情報に不一致が生じる。そのため、左右眼での画像の分離が生じたり、視機能に影響を与えることが知られている。この問題は、二眼式立体表示の課題として国内外で研究されている¹⁻⁴⁾。

今回、筆者らは虚像の距離を表示画像に同期させて変化させることができる HMD の試作およびその評価を行い、虚像距離の変化に対する奥行き知覚について最新の結果を得た。本稿はその報告を中心に HMD における立体表示について考察する。なお、虚像の距離を前後に変化させることを取り入れた立体表示システムの研究報告例は少なく、通信会議に用いる HMD などが提案されている⁵⁾。

1. 虚像距離制御式 HMD

HMD の像を光学的に結像させる距離は、レンズと小型ディスプレイの間隔を変えることで、簡単に変化させることができる。これを利用して、図 2 のように映像平面を好きな距離に移動できるディスプレイをつくること

が可能である。筆者らは、左右の光学的な虚像を空間上で一致させたまま、その距離を 0.3 m~∞まで連続的に変化させられる機構をもった HMD を開発した⁶⁾。また、この HMD を用いて小さな丸を 1 つ提示し、被験者にそれを見つめさせながら虚像の距離を動かしたときの眼球運動を測定したところ、輻輳角が距離に応じて理想的に変化していることがわかった⁷⁾。今回さらに虚像距離の調節部分にモーターを組み込んで、コンピューターで制御することにより、画像に合わせて虚像距離を連続的に制御できる HMD も開発した。

2. 虚像距離制御によるステレオ立体表示システム

このシステムは、虚像に対する距離知覚の評価の目的で開発されたものである。図 3 に示すように、表示物体の奥行き方向の運動を、実際に虚像の距離を変化させることで表現する。この立体表示をみているとき、虚像距離に応じて輻輳とともに目の調節も変化することが期待される。よって、調節と輻輳のアンバランスがなくなった自然な状態で立体画像をみるのが可能になる。

システムは大きく虚像距離制御部と画像生成部の 2 つに分けられる (図 4)。虚像距離制御装置は、設定された虚像距離信号をモーター制御装置に送る。モーター制御装置はインターフェースボードを介し、HMD に取り付けられたモーターに制御信号を送る。そしてモーターの回転によって、虚像が設定された距離に移される。

同時に、左右眼用の 2 台の画像生成装置は、画像同期信号により同期を保ちながら、レンダリングの際に目の位置を視点とし、虚像位置を視線方向とした透視変換により画像を生成し、その画像信号を HMD の左右の表示パネルへ送る。

Depth perception with 3D head-mounted display (1995 年 8 月 31 日受理)

Shiho ONISHI, Akira KAWAMURA, Takeshi MATSUI, Koji ASHIZAKI ソニー(株)中央研究所 (〒141 東京都品川区北品川 6-7-35)

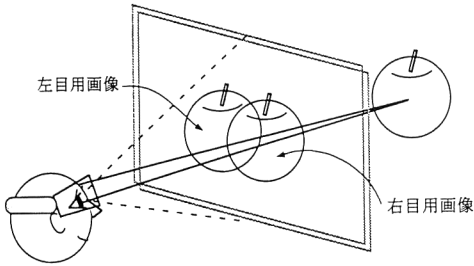


図1 輻輳の変化を用いて画像の奥行きを表現する。

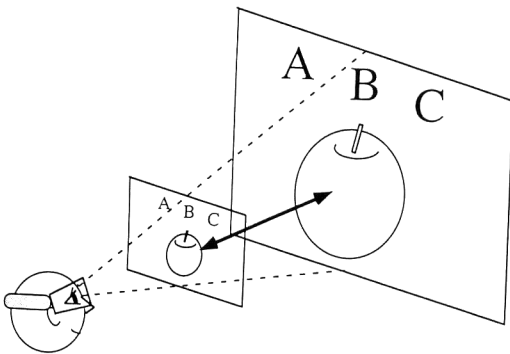


図2 好きな距離に映像をもっていくことができるディスプレイ。

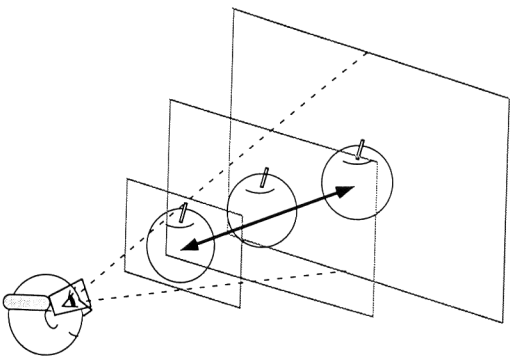


図3 虚像距離制御式 HMD を用いて画像の奥行き方向の運動を表現する。

3. 虚像距離変化とそのみえ方

人は虚像距離の変化を実像の場合と同じように知覚できるのだろうか？ これは条件によって異なるようで、筆者らが観察した印象を報告する。たとえば、液晶シャッターによって周囲の環境をみえない状態にして、図2に示すように表示の視野角は一定で虚像の距離を変化させた場合、距離の変化はほとんど感じられなかった。こ

のことから、目の調節そのものから距離を判断することは難しいと予想される。一方、虚像と外界とが両方みられる状態（シースルー状態）にした場合には、実際に虚像の距離が変化しているように感じられた。これは、虚像と見比べて、外界の物体の像ぼけや視差量などを手掛りとしていたようだ。

そこでシースルー状態において、虚像距離制御式 HMD による立体表示がどのくらいリアルな奥行き感を表現できるかを調べる目的で以下の実験を行った。

4. 実験方法

4.1 指標と表示方法

指標は奥行きのない白い正方形で、1m先での1辺の視野角が8°である。図5に示すようなA~Dの4種類の距離の間を指標が正弦波状に前後運動した場合と同じになるように指標の視野角が変化し、それは10秒で1往復の速度で、3往復する。本HMDはLCD (liquid crystal display) パネルの表示をハーフミラーで反射させて外界と重ね合わせてみる形式になっており、指標以外のパネルの周辺、および外枠などの部分はハーフミラーで反射されない。よって表示の外枠はみえず、外界の中に白い指標が浮かんでいるように見える。第2節で述べた虚像距離制御式ステレオ立体表示システムを用い、設定を変えることで以下の3つの表示方法を設けた。

第1の表示方法では、視野角の変化にともない、実際に虚像の距離が正弦波状に変化する（図2参照）。左右の画像が光学的に一致した状態でその距離を前後に変化させるので、被験者からみて、指標までの距離、指標の視野角、および指標の網膜上の水平位置が変化する。この表示方法を「距離制御式」と呼ぶ。

第2の表示方法では、虚像の距離は指標の往復距離の中央に固定し、指標の視野角と指標の網膜上の水平位置を変化させる（図1参照）。網膜上の水平位置の変化量は、瞳孔間距離を65mmに設定して計算した。これを「輻輳式」と呼ぶ。

第3の表示方法では、指標の視野角のみを変化させ、虚像距離および指標の網膜上の水平位置は、指標の往復距離の中央に固定されている。これを「視野角式」と呼ぶ。

4.2 実験状況

HMDを装着した被験者の前方1mから5mまで、1m間隔で距離の目安となる棒を立てた。今回の実験では、HMDは常にシースルーにして用いたので、被験者は目安となる棒と周囲環境および指標を同時にみること

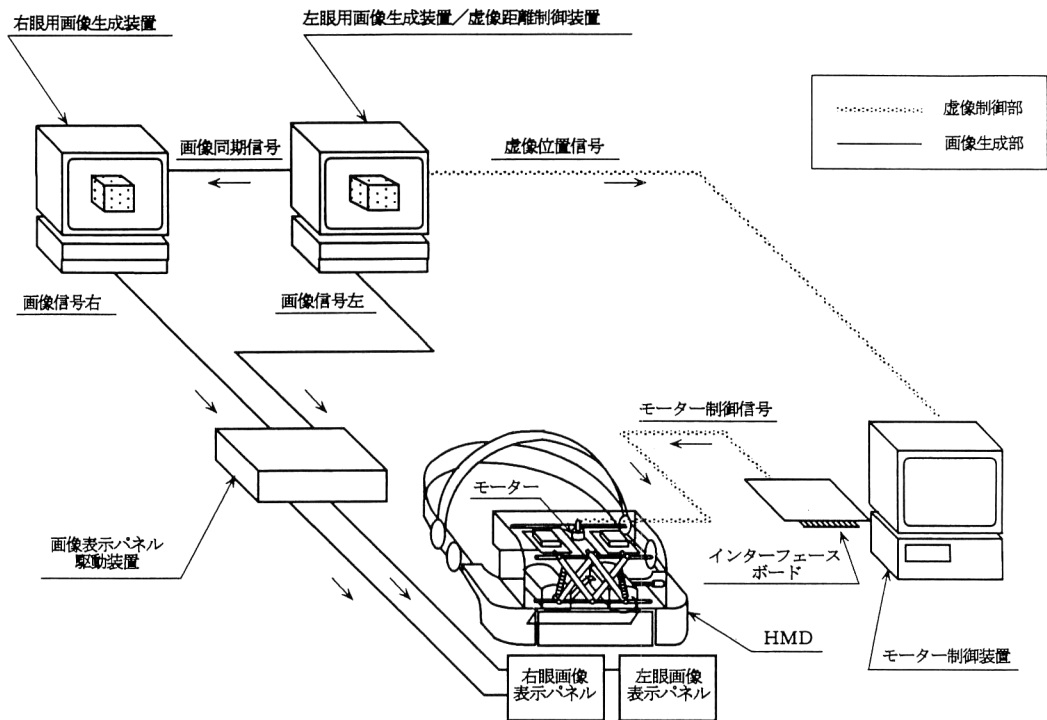


図4 虚像距離制御式 HMD によるステレオ立体表示システム。

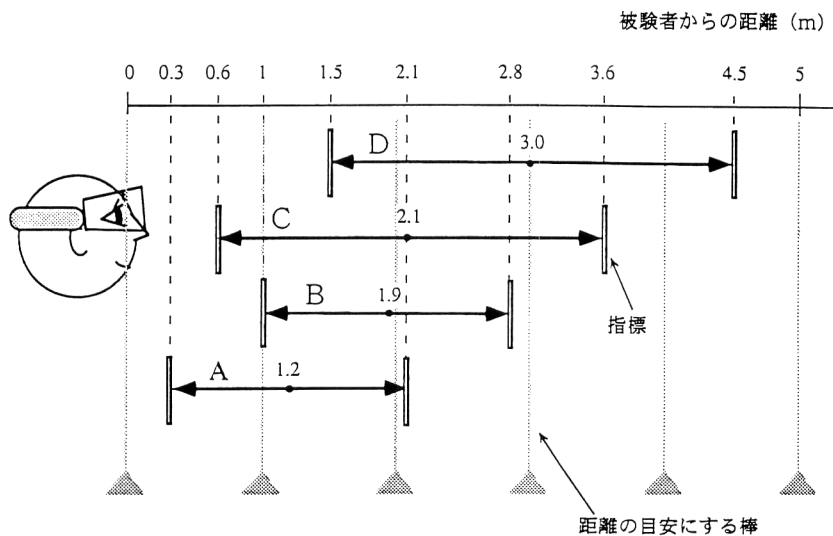


図5 指標の往復距離の種類。

ができる。実験が行われた環境は、前方6 mに壁があり、周辺には机やその他のものが見える。被験者は正常な視覚を有した男性8名、女性2名である。

4.3 手順

被験者は、指標が前後に移動する中で「最も近いと感

じるとき」と「最も遠いと感じるとき」の2つの場合において、目安に立てられた棒と比較して、指標の距離の見積りを行った。見積り値は、棒間隔の1/10である0.1 mの精度で、口頭で答えてもらうようにした。

実験は、3種類の表示方法と4種類の往復距離をすべ

て組み合わせた12回の試行を4つのセッションにランダムに分けて行った。各セッション間で約1分の休憩を挟んだ。

また、左右画像の融像について、1つにみえたか、または分離してみえたかを答えてもらうようにした。

5. 結 果

5.1 距離の見積り実験

A~Dの4種類の往復距離について、それぞれ遠・近の距離の見積り値の平均値と標準偏差を表示方法ごとに1つのグラフにまとめて、図6~8に示す。横軸は指標位置を表し、縦軸は被験者による見積り値を表す。これ

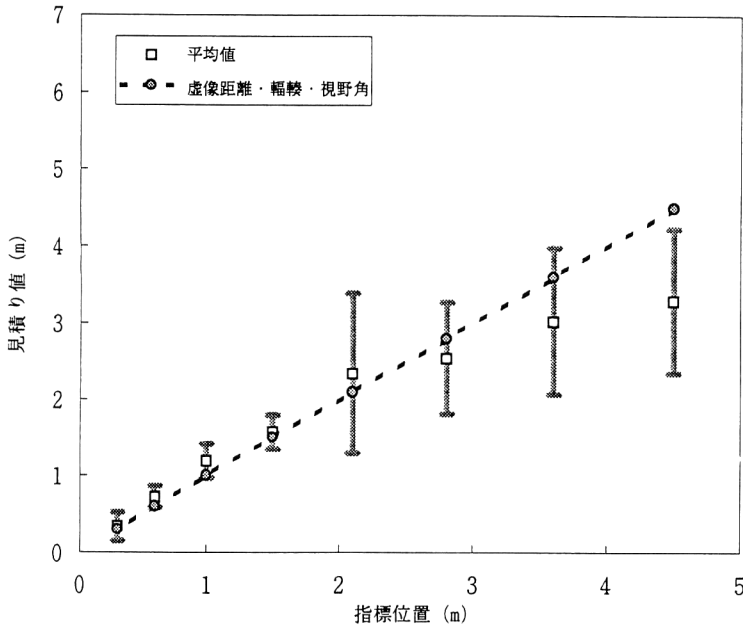


図6 「距離制御式」におけるA~Dの振幅の遠近計8つの見積り値の平均値と標準偏差を、指標位置が小さい順に並べた。斜めの点線は、虚像距離、輻輳および指標の視野角が表す指標位置である。

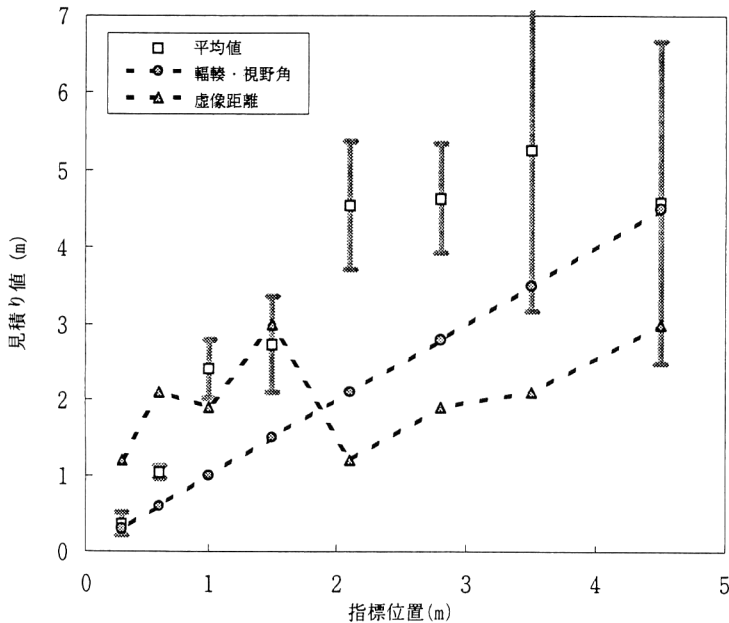


図7 図6と同じように「輻輳式」の結果をまとめた。斜めの点線は輻輳および指標の視野角が表す指標位置であり、もう一方の折れ線は虚像距離が表す指標位置である。

らの結果から3種の表示方法について以下の特徴が見出された。

距離制御式：2m未満で、見積り値は指標位置によく対応しており標準偏差も非常に小さかった。2m以上において、指標位置に対して手前に見積る傾向がみられ、標準偏差もやや大きくなった。

輻輳式：2m以上において、見積り値は指標位置よりも非常に遠くなり、かつ4~5mで頭打ちであった。標準偏差は、指標位置が遠くなるにつれて非常に大きくなった。

視野角式：指標の視野角の変化のみで、見積り値は変化した。また、見積り値は指標位置が近いほど、固定された虚像距離と輻輳から大きく影響を受けた。

5.2 融像評価

左右画像の融像具合に関する主観評価の結果を表1にまとめた。この表からわかるように、「距離制御式」と「視野角式」では、被験者全員が常に融像を保たれた。「輻輳式」では、ほとんどの被験者で左右画像の分離が生じた。

6. 考 察

実験結果から、映像平面の位置が指標位置に合わせて変化すると、距離感の精度が大きく増すことが明らかになった。逆に、映像平面の距離が固定されて、指標の網膜上の水平位置が変化する表示方法では、正確な距離感

は得られないということができる。また、「距離制御式」において像が分離してみえなかったのは、左右画像の指標が光学的に一致した状態で提示されていたためと考えられる。

「輻輳式」において見積り値にばらつきが大きかった原因として、画像生成時の瞳孔間距離の設定を一定にしていたために、被験者個人の瞳孔間距離とずれていたことが考えられる。なお、「輻輳式」においては、瞳孔間距離のずれが奥行き知覚に影響を与えることが報告されている⁸⁾。

「視野角式」の結果から、被験者は指標の視野角変化のみで、距離の変化を感じたことがわかった。しかし、そのみえ方は不安定であり、たとえば、初めは指標が前後運動をしているようにみえたが、ある時点からほぼ静止して、大きさが変化するようにみえる被験者がいた。これは、距離知覚において、指標の視野角の変化よりも、指標をみつめたときの輻輳量と虚像距離が固定されていたことが大きく影響した結果である。また、この傾向は指標の視野角が大きいほど強く、小さいほど弱ま

表1 A~Dは振幅の種類である。数値は像が分離してみえた被験者の人数を表す(被験者10名)。

	A	B	C	D
距離制御式	0	0	0	0
輻輳式	1	9	8	9
視野角式	0	0	0	0

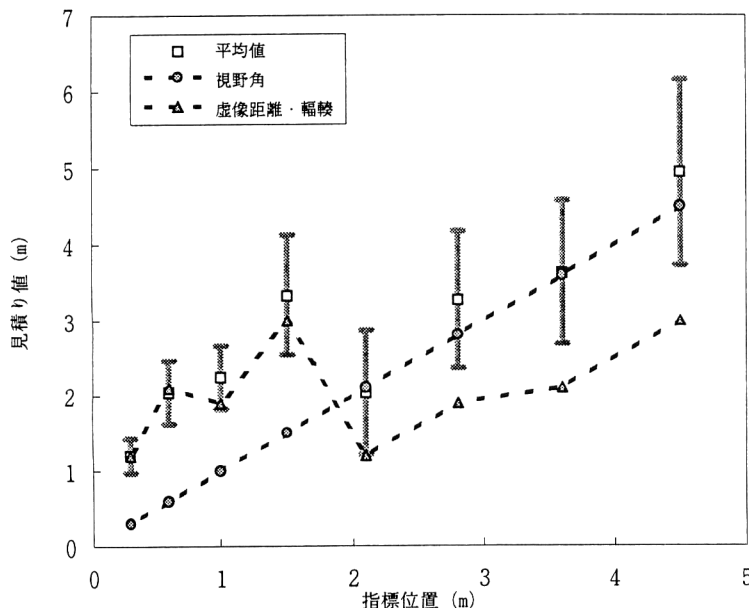


図8 図6と同じように「視野角式」の結果をまとめた。斜めの点線は、指標の視野角が表す指標位置であり、もう一方の折れ線は虚像距離および輻輳が表す指標位置である。

る。3種の表示方法における全体の傾向としても、指標の視野角が大きい方が、見積り値は実際の虚像距離に対して正確になり、ばらつきも少ない。

また、このことから指標位置が2 m以上の時の見積り値にばらつきが大きい原因のひとつとして、指標の視野角が小さかったことが考えられる。

HMDにおける立体表示の中でも、主に驚かせる効果を得らう場合には、「輻輳式」によっても十分な効果が得られるといえる。しかし、正確な距離判断を必要としたり、長時間使用する場合には「距離制御式」が有効になるだろう。一例として、遠隔操作や視能訓練などで使われるHMDに、この機能が十分活かされると思われる。

しかし、虚像距離制御式HMDでの表示画像はあくまで平面であるので、表示物体に奥行きをもたせたい場合は、視差を利用することになる。たとえば、表示物体の奥行き方向の動きは虚像距離制御を用いて表現し、その厚みに関しては視差で表現するというような工夫が必要となる。また、表示物体が複数になる場合は、どの物体の距離に虚像距離を合わせるかを判断するために、視線検出などによって観賞者がどの物体をみているか検知することが必要になる。今回は、虚像距離制御によって

リアルな距離感が得られるようになったことを報告したが、今後は具体的アプリケーションにおいて、この機能を利用した表示システムについて考える。

文 献

- 1) 井上哲理, 野呂影勇, 岩崎常人, 大頭 仁: “視覚機能から見た立体映像の呈示条件”, *テレビジョン学会誌*, **48** (1994) 1301-1305.
- 2) 比留間伸行, 橋本桂三, 武田常広: “立体テレビ番組観視中の調節応答の測定”, *テレビジョン学会誌*, **48** (1994) 1293-1300.
- 3) M. Mon-Williams, S. Rushton and J. P. Wann: “Binocular vision in stereoscopic virtual-reality systems,” *Society for Information Display International Symposium 1995 Digest* (1995) pp. 361-363.
- 4) S. E. Morse, J. C. Kotulak and R. W. Wiley: “Oculomotor and visual performance with night-vision displays,” *Society for Information Display International Symposium 1994 Digest* (1994) pp. 299-302.
- 5) 志和新一, 岸野文郎: “通信会議における立体表示”, 3次元画像コンファレンス '95 講演論文集 (1995) pp. 60-63.
- 6) 川村 彰, 芦崎浩二, 原 信行, 山田二郎: “ヘッドマウンテッドディスプレイ (HMD) の開発”, 3次元画像コンファレンス '94 講演論文集 (1994) pp. 239-244.
- 7) 大西志保, 川村 彰, 芦崎浩二: “ヘッド・マウント・ディスプレイにおける自然視の追求”, *光技術コンタクト*, **33** (1995) 30-34.
- 8) 内海 章, ポール・ミルグラム, 竹村治雄, 岸野文郎: “仮想空間表示における奥行き知覚誤差の要因について”, *電子情報通信学会技術研究報告*, HC 94-10 (1994) 63-70.