テレイグジスタンス用広視野視覚系の研究*

河田 哲典^{*1}, 齊藤 春雄^{*2}

Study on Visual System with Wide Field of View for use in Tele-existence

Akinori KAWATA and Haruo SAITO

In order to manually operate a robot under an extreme environment or make a remote medical diagnosis from a distant place freely, tele-existence technology of a high order is desired. In particular, the visual system plays an important role. However, in head-mounted displays (HMD) up to the present, ones that are superior in quality of display have only a narrow field of view, while ones having a wide field of view are inferior in quality of display, and no sufficient HMD satisfying both requirements has yet been developed. In this study, we intended to extend the field of view of HMD without sacrificing good quality of display by setting a pair of monocular fields of view on both sides of a central binocular field of view in consideration of the information acceptance properties of the human visual system. As a result of observation by an experimental HMD of our own making, sufficient HMD properties were confirmed. This experimental HMD has a wide horizontal field of view of about 80° in contrast to about 30° for the existing HMD, as well as sufficient display quality, showing it to be a superior tele-existence visual system with good sense of actual attendance.

Key Words: Mechanism, Measurement, Human Engineering, Robotics, Visual System, Head-Mounted Display, Wide Field of View, Tele-existence

1. ま え が き

極限環境での作業や遠隔からの医療診断などで、遠隔から人間の思うように自由にロボットを操作できるようにするため、より高度なテレイグジスタンス技術の進展が望まれる。中でも特に視覚系は重要な役割を果たすものと思われる。しかし、現在までの Head Mounted Display (HMD) は画質を優先したものは視野が狭く、視野を優先したものは画質が悪く、両者を満たす満足な HMD はまだない。本研究では、画質をそこなうことなく視野を拡げることを意図し、人間の視覚系の情報受容形態を考慮して、両眼共通視野の左右両側に単眼視野を設けた HMD を設計し試作した結果満足なものが得られた。これにより、従来の HMD の水平視野約 30° に対して試作した HMD は約 80° の広角となり、画質も十分で、より臨場感のあるテレイグジスタンス用視覚系が得られた。

2. 従来の HMD と問題点

人間の視野の大きさは図 1 のように考えられてお

り⁽¹⁾、上下は両眼共通視野と同じ 60° でほぼ限定されているが左右は単眼視野が 120° と後方まで伸び、左右視野の広さと重要性を示している。一方、最も一般的な従来の HMD の基本的光学系は図 2 の立体視鏡形で、2 台のカメラで得た 2 枚の画像を人間の左右の眼にモニター表示することにより三次元認識ができるが、画質を考慮した現在の HMD の視野は上下左右 15° 程度と極めて狭く、狭い領域での緻密な作業にはよいが広い領域での大きい動きの作業には臨場感が薄くテレイグジスタンス用として十分ではない。また、広視野をねらって広角レンズを用いると視野がゆがみ作業性に大きく影響し、現在までの所、テレイグジ

図 1 視野の大きさ

* 原稿受付 平成 4 年 6 月 29 日。

^{*1} 信州大学大学院。

^{*2} 正員, 信州大学工学部 (〒380 長野市若里 500)。

タンス用に適する高画質、広視野 HMD 開発の試みはまだない。狭視野での臨場感を増すため、マスタシステムの動きを実時間計測してスレーブシステムを実時間制御する方式が実施され有効性が示されているが⁽²⁾、広い領域での大きい動きの作業ではこの方式に加えてさらに広視野が望まれる。

3. 高画質、広視野 HMD の提案

図 1 の視野が示すように人間の作業にとって水平方向の広がりには特に重要と思われることと事柄を余り複雑にしないためこの研究では水平方向の広視野化のみを考える。図 1 の水平断面はほぼ図 3 となり、人間の単眼視野はほぼ 180° と広く、左右視野の重複する左右 60° が両眼共通視野となっている。このように広角で高画質の基本光学系を得ることは将来の目標になり得るが本研究では現在得られている図 2 のものを基本とする。すると両眼共通視野は左右 15° 、合計 30° 以上にはできず、また単眼独立視野も 30° 以上にはできない。したがって、広視野化のためには図 4 のように両眼共通視野の両側に単眼視野 I, II, III を加えるのが唯一の方法と思われる。また、このような構成は光学系を立体的に配置すれば可能と思われる。一方、臨場感効果に関する研究⁽³⁾ から全視野角 80° 以上では効果は飽和状態になることが示されている。したがって、本研究ではこのことと費用対効果の面から単眼視野 I のみを両眼共通視野の両側に加えた広視野 HMD を提案する。ただ、この案は中央部分は従来の立体視鏡形であるが外側はそうでない。このような異質画面を単につなげたもので人間の眼が見るのと同等の立体的知

覚が得られるかどうか、また、境界付近での特性段差の不自然さが大きな疲労につながらないかなどの疑問がある。しかし、図 3 のように人間の眼も視野の広さは異なるが構成は同じであるのにこのような問題が起っていないことから大きな問題にならない可能性もある。

人間の眼の総合的な働き方についてはまだ不明な点が多いが種々研究されている。それによると人間の視覚はカメラによる映像に相当する網膜像そのものだけで認識しているのではなく、虹彩の伸縮、水晶体の焦点調節（調節）、両眼視線の交差角調節をする輻輳運動（輻輳）など多くの眼球機構の動きやその連係動作によっても認識しており、また心理学習の要素によっても影響されている。特に、立体視にとって最も重要な輻輳は調節と密接な関連動作を行っており、例えば片眼だけで視標を見ている状態の時に視標を遠近方向に動かして調節作用を起こさせるような刺激を与えると、視標を見えていないほうの眼にも調節作用と輻輳運動とが生ずる。ただし、その輻輳角の変化量は両眼視の場合の $1/2$ 以下であるから片眼だけで完全な立体視が得られるわけではない⁽⁴⁾。しかし、このような関連動作のあることや映像についての遠近画法的、経験的要因などを考えれば単眼視野の領域でも完全に正確ではないにしても、かなり正確に近い立体視感覚が得られるのではないかと予想される。すなわち、図 5 のように両眼視可能なスクリーン S_{LR} と左、右片眼視のみ可能なスクリーン S_L, S_R を連続して配置した時、物体 P は両スクリーンの境界に相当する P_i を境に P_k は両眼視野中の点として正確に立体視できるが、 P_i は左眼

図 2 従来の HMD 基本光学系

図 4 視覚系の広視野化

図 3 裸眼時水平視野

図 5 提案する HMD

のみによる片眼視野中の点であり異質視野になるのであるが、上述の視覚系の特性により点線で示した P_i - P_{ir} - R の右眼視線に似た動作が生じかなり正確に近い立体視感覚が期待され、したがって、境界付近での特性段差による疲労も緩和されることが期待される。本研究は実際に試作してこの点を確認めることを目的とした。

4. 光学系の設計

一般にカメラ映像を人間の眼に提示するモニタは小さいため通常は仮想平面に虚像を作る方法をとる。この虚像の網膜像の大きさ、調節、輻輳が直接視の場合と等しくなるように制御するのが理想であるが、人の視覚特性⁽⁵⁾ から仮想平面の位置、すなわち水晶体の調節を 1 m に固定しても輻輳範囲は 20 cm から無限遠にまで対応でき臨場感は失われないので、ここではこの簡略法をとることとする⁽²⁾。また一般に映像の水平、垂直方向の比は 4 : 3 に規格化されており、かつ、本研究では水平方向の広視野化を考えているのでマスクおよびスレーブシステムのパラメータは次となる (図 6, 7)。

- d_{obj} : カメラレンズから被写体までの距離
- l_{obj} : 視野の水平幅
- f_{cam} : カメラレンズの焦点距離
- l_{cam} : 撮像素子の水平サイズ
- d_{vir} : 水晶体から仮想平面までの距離
- l_{vir} : 仮想平面の水平幅
- d_{mon} : 水晶体からモニターまでの距離
- l_{mon} : モニターの水平サイズ
- f_{ope} : 水晶体から網膜までの距離
- l_{ope} : 網膜上の水平画像サイズ

そして、これらのパラメータは図 6, 7 に示すように次

式を満たすように設定しなければならない。

$$\begin{aligned}
 d_{obj} : l_{obj} &= f_{cam} : l_{cam} = d_{vir} : l_{vir} \\
 &= d_{mon} : l_{mon} = f_{ope} : l_{ope}
 \end{aligned}$$

また仮想平面を作るには次式を満たす焦点距離 f_{eye} の凸レンズを接眼レンズとして用いる。

$$f_{eye} = \frac{d_{mon} \times d_{vir}}{d_{vir} - d_{mon}}$$

実際の計画には市販品の利用が必要であり、次の 1~3 を選定した。

(1) $l_{cam} \equiv CH = 6.4$ mm, 水平画素数 $\equiv CGH = 768$, SONY DXC-107 CCD カラーカメラおよび TAMRON 47 HDE カメラレンズ使用

(2) $l_{cam} \equiv DH = 81$ mm, 水平画素数 $\equiv DGH = 480$, SONY FDL-X 40 LCD カラーモニタ使用

(3) $f_{eye} \equiv MF = 200$ mm, 外径 30 mm, 明立精機 20-148 使用

モニターおよびカメラの画質の評価には換算視力を導入する。

(4) モニタの換算視力 $\equiv DX = (1 \text{ 画素当りの視野角 } [\text{min}])^{-1} = DGH/60HA$ 。この DX は実用面から 0.3 以上なければならない⁽⁶⁾。

(5) カメラの換算視力 $\equiv CX = CGH/60HA$

(6) 単眼水平視野 $\equiv HA[^\circ] = 2 \tan^{-1}(CH/2ZF) = CGH/60CX$

(7) カメラレンズの焦点距離 $\equiv ZF = f_{cam} = CH/2 \tan(HA/2)$

(8) モニタ位置 $\equiv MD = d_{mon} = DH \cdot ZF/CH$

(9) 仮想平面の位置 $\equiv VD = d_{vir} = MF \cdot MD/(MF - MD)$

(5) の CX を横軸変数とし、ほかの (4) ~ (9) を縦軸にプロットしたグラフから最適パラメータとして次のように選定した。 $DX = 0.3$, $CX = 0.48$, $HA = 26.6^\circ$, $ZF = 13.5$ mm, $MD = 170.9$ mm, $VD = 1173.8$ mm。

5. 試作機の構成

図 8, 9 にスレーブおよびマスクシステムの光学系

図 6 スレーブシステムのパラメータ

図 7 マスクシステムのパラメータ

図 8 スレーブシステムの光学系

図9 マスタシステムの光学系

を示す。図8の紙面内の上方が入力像が入ってくる前方、紙面垂直上方が鉛直上方でカメラは4台共上を向いている。カメラLO, ROへの入力像は左右のミラーMO2により90°外側へ曲げられた後、左右のミラーMO1により90°下方へ曲がってカメラへ入る。カメラLI, RIへの入力像は各々ミラーMI1によって下方に曲げられただけでカメラに入る。この結果、画像はLO, ROは正立像だが、LI, RIは左右反転像である。マスタシステムでは内側の映像を映し出すモニターLI, RIは外側に設置し、ミラーで光軸を90°曲げて所定の方向に見えるようにした。モニターLO, ROは直接観察する。これらはすべて接眼レンズを通して見る。これにより、画像はLO, ROはカメラ、モニターとも正立で正立像、LI, RIはカメラ、モニターとも反転で正立像になる。眼間距離はスレーブ、マスタとも64mmとしているが多少調節でき、スレーブの焦点調節は被写体に合わせて手動調節する。また、接眼レンズの光軸は2枚の画面を収差なく観察できるようにRIとROおよびLIとLOの境界線に向けた。

6. 結果と考察

試作機は画質を低下させずに画角を広げるという所期の目的を満し、本手法がテレグジスタンス用として有効なことが示された。主な結果と問題点は次のとおり。

(1) 見え方：従来の約30°の視野に対し約3倍

(26.6°×3)の画角となり実際にそこで見ているような立体視的臨場感が得られた。LO, ROは両眼視ではないが不自然さや疲労感は感じられない。ガラス製ミラーMO2の鋭角縁は工作上3mm厚のため縦の白い境界線となり目につくが特に気にならない。

(2) カメラの色調：各画像の色調や明るさは完全にはうまく合わなかった。

(3) 眼球のずれ：マスタシステムでLO, ROは直接見ているが、LI, RIはミラーを通して見ているため、眼の位置が変わると像の見え方が変わったり、境界線が大きくなったりして画像のつながりが悪くなる。光学系に対する目の位置を正確に合せ、観察中に眼の位置がずれないように工夫が望まれる。

(4) 接眼レンズ：試作機は片側水平視野53.2°で市販の両凸レンズを用い特に問題はなかった。しかし、さらに視野の拡大を図る時は収差対策など接眼レンズの改良が必要と思われる。また、接眼レンズに眼を近づけると曇りやすいので眼を少し離れた設計にし、また、レンズに空気を吹きつける⁽⁷⁾などの工夫も望まれる。

7. むすび

6章で述べたように改善が望まれる細かい点はいくつかあるが、所期の目論見どおり広角で立体視的臨場感のある、また境界での特性段差による不自然さや疲労感もなく、かつ高画質で、広い領域でのテレグジスタンス作業に適する視覚系が得られた。LCDは今後さらに小型、高解像度が期待できるので接眼レンズをうまく工夫すれば今後さらに高画質、広画角のHMDが期待できると思われる。

文 献

- (1) 畑田・坂田, テレビジョン, 31-4 (1977), 245.
- (2) 館・荒井, 日本ロボット学会誌, 7-4 (1989), 314.
- (3) 畑田・坂田・日下, テレビジョン学会誌, 33-5 (1979), 407.
- (4) 渡部, テレビジョン, 23-10 (1969), 747.
- (5) 畑田, 応用物理, 40-3 (1971), 291.
- (6) 前田・館, 第27回SICE学術講演会, (1988), 251.
- (7) 前田・館, 第8回日本ロボット学会学術講演会, (1990), 253.