固定スクリーンによる運動視差の呈示*

伊藤 祐一^{*1}, 吉本 堅一^{*2}

Presentation of Movement Parallax on a Fixed Display

Yuichi ITO and Ken'ichi YOSHIMOTO

Three-dimensional (3D) visualization is a key component in the human interface for teleoperation. A 3D visualization system usually implies a system which uses convergence and binocular parallax. It has been found, however, that spatial sensitivity using these techniques is highly inconsistent among individuals. In this paper, we discuss the presentation of the movement parallax (MP), which is another aspect of 3D visualization. In order to present MP, the display device must follow the movements of the human's head. A natural choice here is to use a head-mounted display (HMD). For practical teleoperation, however, a HMD is found to be too stressful for the operator. In this paper, we propose a technique to present MP on a large fixed screen. A prototype is developed, and experiments show that the MP is very effective in improving the operator's ability to recognize the teleoperation environment.

Key Words: Human Interface, Recognition, Seeing and Hearing Mechanism, Virtual Reality, Teleoperation, Tele-existence, 3D Vision, Movement Parallax, Active Vision

1. はじめに

テレグジスタンスがマン・マシンインターフェースの設計思想として有効であると認識されるようになって、これを実用化する研究が活発化している。従来からの自動車や航空機等のシミュレータに加えて、建設機械の遠隔操作(図1)や微細外科手術等の実世界へのテレグジスタンスにも応用が試みられている。特に微細な手動制御を要する遠隔操作では、三次元立体視覚の伝達が作業精度及び作業効率を左右する重要な要素となるが、現在の立体視技術は遠隔操作の視覚フィードバックとして実用化するにはまだまだ未熟なもので、試験的に立体視が用いられた雲仙普賢岳の災害復旧工事では、比較的単純な作業にも関わらず、作業効率はかなり低く、直接操作の30%~50%というデータが発表されている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。

従来、立体視技術とは輻輳(convergence)と両眼視差(binocular parallax)の実現を意味するものであった。

Fig. 1 Teleoperation System

しかし、実験を通じて、左右2枚の映像を重ね合わせて一つの立体を知覚する融像の能力には非常に大きな個人差があることが分かった。この事実は、人間が視覚情報から空間を知覚する際の手がかりとして、輻輳と両眼視差が絶対的なものではないことを意味する。そこで、心理学者 J.J.Gibson が動物は身体を動かし周囲に働きかけることによって、初めて自分を取りまく空間を認識できると主張したように視点の移動に伴って

* 原稿受付 1996 年 11 月 26 日。

^{*1} 学生員, 東京大学大学院 (〒113 東京都文京区本郷 7-3-1)。^{*2} 正員, 東京大学大学院工学系研究科。

Fig. 2 Binocular Parallax and Movement Parallax

発生する視差, すなわち運動視差 (Movement Parallax)こそ立体感呈示技術の本質ではないかと考えた⁽⁴⁾⁽⁵⁾.

本研究では, 立体視要因として従来の輻輳と両眼視差に加えて, 運動視差を導入することによって, オペレータの三次元空間認識能力を向上させることについて議論する。

2. 固定スクリーンによる運動視差の呈示

走行する自動車に CCD カメラを設置すると, 簡単に運動視差が得られる。しかし, この場合, 視点の移動は自動車の運転によって受動的に生じたものである。緻密な遠隔操作に運動視差を利用するには, 能動的に人間の視点移動にカメラが追従するものでなければならない。つまり, オペレータの頭部の動きと遠隔地のカメラ位置の変化との間に高度なインタラクティブ性が要求される。この場合, オペレータに正しい映像を呈示するためには, 図3のようにカメラのみならずディスプレイ機器も同様に人間の視点移動に追従させる必要が生じる⁽⁶⁾。したがって, HMD(Head Mounted Display)を用いるのが通例であるが, HMD は装着による疲労感が強く長時間の遠隔操作には適当ではない。

HMD を用いずに, テレグジスタンスに重要な広い視野を確保するには大型のスクリーンが必要となる。しかし, 大規模なディスプレイ機器を図3のようにインタラクティブに動かすことは現実的ではない。

そこで, 視点移動の自由度を制限することによって, 固定された大型スクリーンを用いて運動視差を呈示する方法を考案した。

座席に座ったオペレータがスクリーンに正対している状態を基準にして, 左右に頭部を移動させる動きのみを運動視差発現の対象とする。この時, テレオペレーションにおいて特に注目すべき物体 (パワーショベルのバケット, ロボットハンド, 探査機のプローブ等) が画面中央に位置するようにカメラを設置することによ

Fig. 3 Follow of Display Device

Fig. 4 MP on a Fixed Screen

り, 画面中央付近に顔を向けようとする首の回転が伴う⁽⁷⁾⁽⁸⁾。オペレータの動きと表示すべき画像は図4のようになる。

この場合, カメラの動きは図3のようになるが, 固定スクリーンでは図5のようにカメラ側の光軸とスクリーン面の法線とがずれることになるので, オペレータの目にする映像に歪が現れる。

この歪を解消するには, 図6のように CCD カメラをオペレータ頭部に追従させると同時にアオリ (シフト) を用いればよい。すなわち, カメラを並進移動させ, スクリーン中央・レンズの主点・CCD 画面面の中心が一直線上にくるように, レンズまたは CCD 画素

Fig. 5 Only Cameras follow Operator's Head

$$= -f \frac{\overrightarrow{OE}}{|\overrightarrow{OE}|} + k\overrightarrow{XH} \quad (5)$$

と表し、この $\overrightarrow{CI}$ を

$$\overrightarrow{CI} \cdot \overrightarrow{OE} = 0 \quad (6)$$

を用いて解く。

さらに $\overrightarrow{CI}$ の $\vec{p}, \vec{q}$ 方向成分に CCD 結像面からスクリーンへの投影倍率 l/f を乗じたものが、それぞれ実際のスクリーン上の表示位置 D の x 成分 D_x , y 成分 D_y となる。

$$D_x = \frac{l}{f} \overrightarrow{CI} \cdot \vec{p} \quad (7)$$

$$D_y = \frac{l}{f} \overrightarrow{CI} \cdot \vec{q} \quad (8)$$

ここで、 $\vec{p} \cdot \overrightarrow{OE} = 0$ から

$$\vec{p} = \left(-\frac{l}{\sqrt{E_x^2 + l^2}}, 0, -\frac{E_x}{\sqrt{E_x^2 + l^2}} \right) \quad (9)$$

$$\vec{q} = (0, -1, 0) \quad (10)$$

と分かるので、結局

$$D_x = \frac{lx + E_x z}{z - \frac{E_x}{l}x + \sqrt{E_x^2 + l^2}} \quad (11)$$

$$D_y = \frac{\sqrt{E_x^2 + l^2} y}{z - \frac{E_x}{l}x + \sqrt{E_x^2 + l^2}} \quad (12)$$

式 (2) と式 (11) の差が x 方向の歪で、式 (3) と式 (12) の差が y 方向の歪である。

このように表される歪や視野の拡大の効果を視覚的に確認するために、CG を用いてシミュレーションを行なった。図 10 が歪のない理想的な投影画像 (図 9 の S)、図 11 が円弧状の軌跡でカメラを移動させた際の歪のある画像 (図 9 の D) である。どちらもオペレータが右に 360mm 視点を移動した状態で、 $f=4\text{mm}$, $l=1404\text{mm}$ に設定している。

4. 知覚空間のスケールと視点の移動量

トレイグジスタンスの特徴のひとつに、現実空間と認識空間とのスケールが同じである必要はなく、目的によって任意にスケールを選べるという柔軟性がある。つまり、光学系 (レンズ, CCD 素子, 画像転送経路) の制約さえ解決できれば、ネズミの視界でもゾウの視界でも自由に体験できる。スケールを決定する物理的パラメータは 2 台の CCD カメラの間隔とオペレータの眼球間隔の比である。カメラの間隔を眼球間隔より大きくすると、オペレータは空間を実際よりも小さく知覚することになる。遠隔操作に運動視差を導入する場

Fig. 10 Ideal View

Fig. 11 Distortion View

合、オペレータの視点移動量に対して注目する対象物が小さいほど、運動視差の効果が大きいので、現実空間と認識空間のスケール比は大きいほうが望ましい。

5. 実験

従来の偏光方式による両眼視差呈示の光学系に加えて、同時に運動視差も呈示できる実験システムを製作した。オペレータの左右方向の視点移動を超音波センサで計測し、それに追従して2台のCCDカメラが円弧状のレール上を移動する(図12, 図13)。

5.1 相似図形による評価実験 この実験システムを用いて、遠隔地からの転送画像に運動視差を与えることによって、オペレータの空間認識能力がどの程度向上するか調べるための実験を行った。観察者からの距離に比例した大きさを持つ相似物体は、全て同じ視角 (visual angle) を持つので、観察者には同じ大きさに見える(図14)。さらに、パースや陰影、重なり、物体表面のテクスチャーなどの情報を排することができれば、遠近を判断する心理的な手がかりが全くなく

Fig. 12 Experiment System

Fig. 13 CCD Cameras and Guide Rail

なり、このシステムが提供する輻輳、両眼視差、運動視差のみが遠近を判断する情報となる。したがって、このようにいくつかの相似物体を画面に表示して、その遠近が正しく知覚できれば、このシステムが効果的に機能していることが分かる。

この相似物体は、CGで描くと実験が容易になるが、実世界へのテレイグジスタンスではCCDカメラの画像歪やノイズ等も考慮する必要がある。さらに、画像のコントラストや彩度は機器によって大きく変化する。したがって、今回の実験では光学系全体の評価をするために、CCDカメラで現実の物体を撮影しながら行なった。この場合、相似物体を数多く製作する手間を省き、大きさの無視できる点光源を用いることも考えられるが、CCD素子のハレーションによって十分小さな点にすることは困難である。

CCDカメラからの距離に比例して寸法の大きくなる相似な三角柱を作り、その中から3個選び、平面上に一つの側面をカメラに向けて、お互いに重ならないように相似比から決まる特定の距離に置く。この平面は図14から分かるように2台のCCDカメラの光軸を含むように設置しなければならない。画面上には、同じ大きさで表示される3個の長方形が並ぶことになる。被験者には、自分に近いと感じられる方から順に1・2・3の番号を用紙に書いてもらう。この時、例えば図15のように700mm、800mm、900mmの距離にある3個の長方形で順番を正しく答えることができれば、800mmの位置で、被験者の空間認識能力は、奥行き方向に100mm以下の分解能をもつと判断できる。

Fig. 14 Visual Angle and Similar Objects

Fig. 15 Resolution of Depth

Fig. 16 Camera Movement and Screen Image

5.2 実験結果 分解能 100mm と 40mm について輻輳と両眼視差のみの場合と、それに運動視差が伴う場合の調査をした。調査距離は 600mm から 1600mm までの 200mm きざみで、各距離 3 回ずつ出題し、正解に応じて得点をつけた。満点は 9 点である。

図 17～20 に示した実験結果から、運動視差の存在が空間認識能力を大きく向上させることが分かる。特に、ここに結果を示した被験者 T.K は比較的、両眼視差による立体視を不得意とする人であるが、運動視差があると、得意な人に劣らない程の良い結果がでる。したがって、融像を苦手とする斜視弱視の人や、両眼の視力に大きな差がある人でも、心理的要因にたよらずに奥行きを知覚することが期待できる。

図 18 および図 20 において、1400mm の位置での正解率の落ち込みが目立つが、ここは CCD カメラの回転運動の中心であり、運動視差による画像の変化が最も小さくなる距離である。

5.3 針金による 3 次元曲線再現実験 CCD カメラから 600mm の距離に、任意に折り曲げた針金を置き、被験者に直線状の針金を与えて、スクリーンの画像を見ながらその曲線を再現してもらう。この時、奥行き方向の距離感の正確さが、この針金を側面から見た時の曲線の正しさとなって現れる。この実験も、輻輳と両眼視差のみの場合と、それに運動視差が伴う場合の 2 回ずつ行ない、比較してみた。

図 22、図 23 は、ある被験者の結果を、曲線を側面から撮影した写真で示したもので、左がスクリーンに映し出したオリジナル、右が被験者の手によって再現され

Fig. 17 Subject K.K, Resolution 100mm

Fig. 18 Subject K.K, Resolution 40mm

Fig. 19 Subject T.K, Resolution 100mm

Fig. 20 Subject T.K, Resolution 40mm

Fig. 21 Reproduction of a 3-D curve

Fig. 22 without MP

Fig. 23 with MP

た曲線である。運動視差によって、奥行き方向の形状認識力が向上していることが分かる。

6. おわりに

運動視差の評価実験の結果は、簡単な実験装置であったにも関わらず、期待した以上に明確に運動視差の有用性を示している。特に、両眼視差による立体視を不得意とする人でも運動視差によって、得意とする人に劣らないほどの空間認識能力を発揮した。さらに、両眼視

差が静止画の情報であるのに対して、運動視差は動画情報であるため、ディスプレイ機器の解像度の影響を受けにくいというメリットも大きい。また、実験を通して被験者から画像の歪を指摘されることは一度もなかった。この遠近感を強調する歪がどのようにオペレータの空間認識に影響を及ぼすか判断するには、今後さらなる実験が必要であるが、少なくともこの歪が、遠隔臨場感を大きく損なうものではないと言える。固定スクリーンによる運動視差の呈示が、建設機械等の遠隔操作に限らずテレグジスタンスの一要素技術として認識され、大勢の人に体験して頂くことを期待する。

なお本研究は、平成6,7年度 文部省科学研究費補助金(試験研究(B) 課題番号 06555065)「臨場感を伴う油圧ショベルの遠隔操作システムに関する研究」の援助を受けた研究の一部である。また、これら一連の研究に対して、日立建機株式会社技術研究所より研究費の一部を援助していただいております。深心より謝意を表します。

文 献

- (1) 特集: 人工現実感, 日本ロボット学会誌, **10-7**, (1992), 845-926.
- (2) 特集: テレロボティクスの理論, 日本ロボット学会誌, **11-6**, (1993), 769-836.
- (3) 特集: 雲仙普賢岳における無人化施工を終えて, 建設の機械化, No.534, (1994), 3-29.
- (4) 佐々木正人, アフォーダンス-新しい認知の理論, (1994), 岩波科学ライブラリー.
- (5) 加藤孝義, 空間のエコロジー - 空間の認知とイメージ, (1986), 新曜社.
- (6) 館岡・荒井裕彦, テレグジスタンスにおける視覚情報提示系の設計と評価, 日本ロボット学会誌, **7-4**, (1989), 314-326.
- (7) 八木透・浅野展久・牧田真治・川嘉樹, 生体の注視機構を応用したアクティブビジョンシステム, 機論, **61-591, C** (1995), 4402-4409.
- (8) 末松良一・山田宏尚, 中心窩を有する新しい視覚センサの開発, 計測自動制御学会論文集, **31-10**, (1995), 1556-1563.