

## 基礎論文

# 小型没入球面ディスプレイ「スピンドーム」 における立体視

棚橋新七\*<sup>1</sup> 矢野博明\*<sup>1</sup> 岩田洋夫\*<sup>1</sup>

## Projecting Stereoscopic Image in a Compact Immersive Spherical Display "SpinDome"

Shinhichi Tanahashi\*<sup>1</sup>, Hiroaki Yano\*<sup>1</sup> and Hiroo Iwata\*<sup>1</sup>

**Abstract ---** The "SpinDome" is an image display using wide-angle spherical screen. Sphere is an ideal shape of a screen that covers human visual field. The optical system of the SpinDome employs two mirrors: a flat mirror and a spherical convex mirror. The flat mirror bends the light so that the viewer can see the image from the center of the spherical screen. This optical configuration enables seamless wide-angle image in a very limited space. A rotary mechanical shutter is set in front of the projectors, which provides stereoscopic image. Effectiveness of the display is exemplified by maneuvering a remote vehicle.

**Keywords:** immersive display, tele-existence, stereoscopic-omni-directional image, spherical screen

### 1 はじめに

人間の視野をすべて覆うような映像を与えるディスプレイの一つに空間没入型ディスプレイがある。これは人間を取り囲むようにスクリーンを配置し、プロジェクタで映像を投影するものである。代表的なものにイリノイ大学の CAVE[1]がある。しかし、空間没入型ディスプレイは視野角をすべて覆うことが出来るため臨場感が高いが、スクリーンの設置面積として広い空間を必要とする、設置コストが高額である、といった問題点がある。

そこで本研究では、全方位と可搬性 2 つの長所を兼ね備えた小型没入球面ディスプレイ:スピンドームの開発を行った。スピンドームは凸面鏡を使って映像を拡散[2]し投影しているため、他の空間没入型ディスプレイに比べ広大なバックヤードを必要としない、低コスト、映像の繋ぎ目がないといった利点がある。また、時分割方式により立体視を実現している。

スピンドームの応用方法として移動車両の遠隔操縦を考えている。今回は、そのプロトタイプとして全方位移動車両を用いて遠隔操縦を行い、立体視の効果を確認した。

### 2 スピンドームの設計

#### 2.1 システム構成

概観を図 1、図 2 に、仕様を表 1 にそれぞれ示す。本装置の投影系はプロジェクタ 2 台、平面鏡、凸面鏡、アクロマティックレンズ 2 個、球面スクリーンで構成される。

プロジェクタから投影された映像はアクロマティックレンズを通過し、一度平面鏡で反射され斜め上方に設置された凸面鏡により再反射しスクリーンに投影させる。

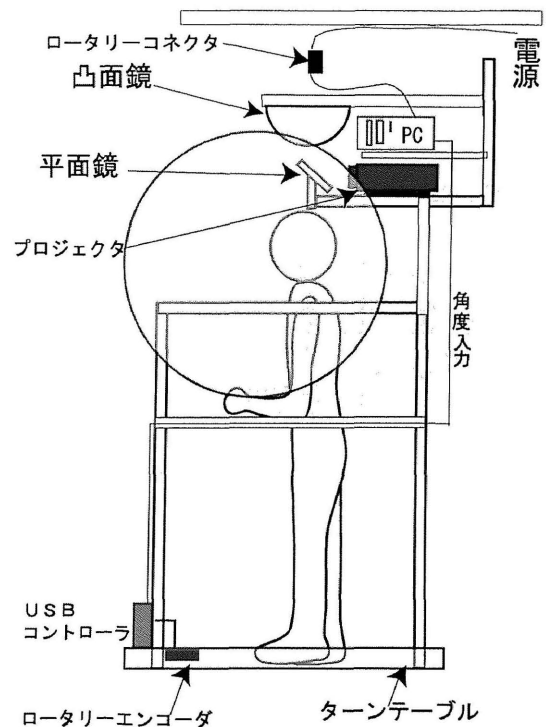


図1 ステレオスピンドーム概観

\*1 筑波大学

\*1 University of Tsukuba

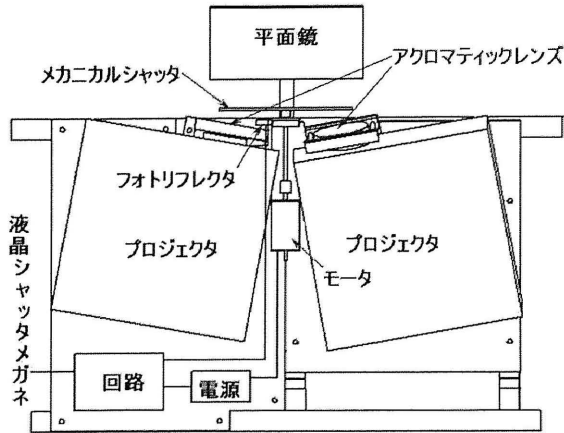


図2 システム概観(シャッタ部分)

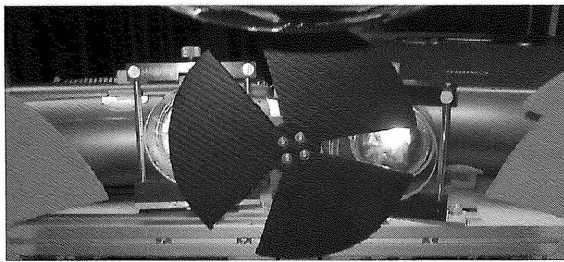


図3 シャッタ部分の写真

表1 スピンドーム仕様

|             |                                  |
|-------------|----------------------------------|
| 球面スクリーン     | 特注:FPR製(内径894[mm])               |
| プロジェクタ      | キャノン社製: SX-50(解像度: SXGA+)        |
| 凸面鏡         | コミー社製: ドームミラーD30(半径 256[mm]球面鏡)  |
| アクロマティックレンズ | 明立精機社製: TS-0378A                 |
| 寸法          | W850mm × D1260mm × H2430mm(突起部含) |
| 水平画角        | 約 220 度                          |
| 仰角          | 約 60 度                           |
| 俯角          | 約 90 度                           |

立体視は時分割方式で行っており、2 台のプロジェクタ、回転式シャッタ、回転検出用フォトリフレクタ、液晶シャッタメガネで映像の分割を行い、視差の付いた画像を投影することで立体視映像を呈示できる。図 3 はシャッタ部分の写真である。なお、回転式シャッタの時分割周波数は約 160[Hz]である。また、クロストーク防止のためシャッタの開口部を小さくしており、これによりクロストークは発生していない。

## 2.2 光学設計

スピンドームの光学設計は光の直進性、スネルの法則からプロジェクタのすべての画素について、どの画素がスクリーン上のどの位置に結像するかをシミュレーションすることにより行う。投影系の設計で決定すべきパラメータはプロジェクタ、平面鏡、凸面鏡の位置・姿勢である。

これらのパラメータをプロジェクタの画角と焦点距離、スクリーン半径、凸面鏡の曲率半径といった拘束条件の下、最終的にスクリーンに結像する画素数と視野角が最も良くなるようシミュレーションにより決定する。図 4 はシミュレーションの様子である。結像画素数と視野角は反比例する為、目的に応じてどちらを優先するかを決める必要がある。

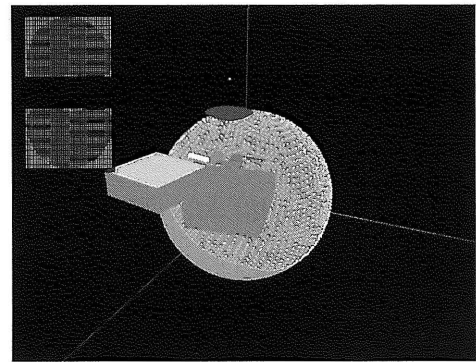


図4 シミュレーションの様子

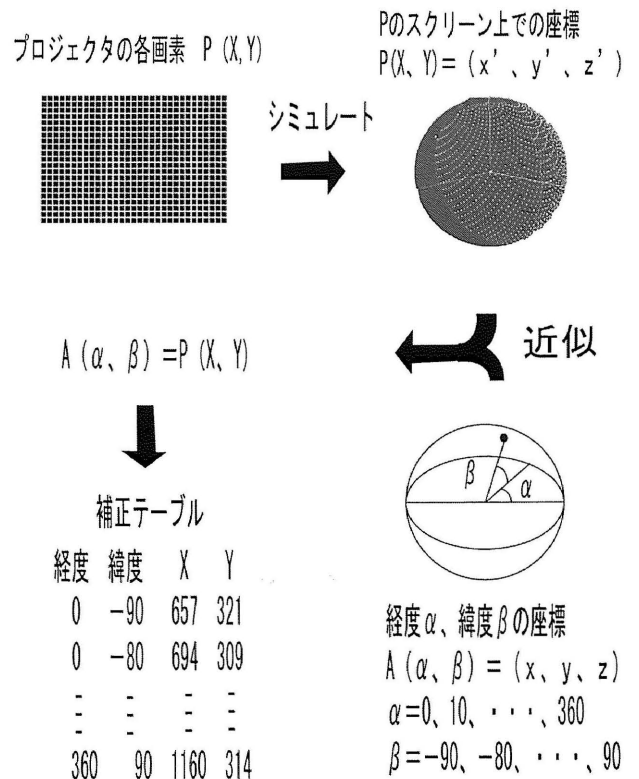


図5 補正テーブル作成法

### 2.3 歪補正

プロジェクタの映像を凸面鏡に反射させて中心からその映像を観察する場合、投影映像は歪んでしまう。この歪みを直すためには、あらかじめ逆に歪ませた映像を投影する歪み補正が必要である。本システムではテクスチャマッピングを用いて映像を歪ませる。具体的には、配置設計が決定した時点であらかじめ幾何計算により、全周映像のどの経度緯度点を、変形後の映像のどの位置に貼り付けるのかを算出し、歪み補正対応テーブルを作成する(図5)。

## 3 スピンドームの性能評価

スピンドームにおいて立体映像の呈示性能について評価を行った。

### 3.1 輻輳性融合立体視限界実験

ディスプレイによる両眼立体視では、自然視と異なり、輻輳は立体映像にあるが焦点調整は像の呈示面に固定されるため、輻輳と焦点調整の不一致が生じる。輻輳運動が発生することによって、左右の映像を単一視し、立体映像として認識することができるが、輻輳と焦点調整の不一致が大きくなると、像を融合して見ることができず、二重に見えてしまう。

ここでは、本ディスプレイの立体視における性能を測る一つの指標として、輻輳性融合立体視限界を調べる実験を行った。

実験は視差のついた陰影のない白色の円(直径50[mm])と、視差のついていない白色の経線と緯線を10度間隔で表示して格子模様を使用し、白色の円の視差を変えていき、円の像が融合せず二重に見えるまでの範囲を上下法を用いて測定した。浮き出す物体、奥にある物体それぞれについて測定を行い、融像範囲を調べた(図6)。尚、前回の刺激の影響を減らすため、毎回2秒間、輝度値0の画面を表示した。被験者は7名で、一人1回測定した。図7と図8は測定結果である。浮き出す物体については、平均233[mm]となった。奥にある物体については平均456[mm]であるが、155~908[mm]と個人差が大きく出ている。これは、物体が遠くなるほど視差情報が小さくなり、立体視が得意な人と苦手な人で大きく差が生じやすいためと考えられる。両眼立体視が苦手な人をステレオアノマリと呼び、その度合いは人によって個人差がある。輻輳性融合立体視限界は両眼視差が交差(スクリーンより前)の場合平均3.34度、非交差(スクリーンより奥)の場合平均3.05度とされている[3]。そこから本ディスプレイにおけるの浮き出し量、奥行き量に換算すると、浮き出し量140[mm]、奥行き量311[mm]で、測定値のほうが大きくなった。

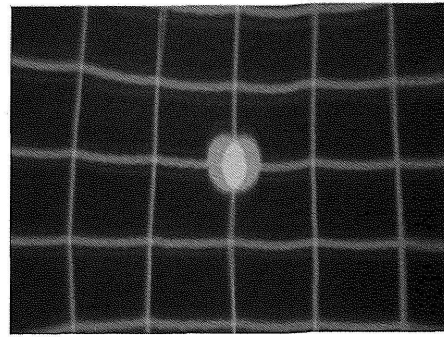


図6 輻輳性融合立体視限界実験

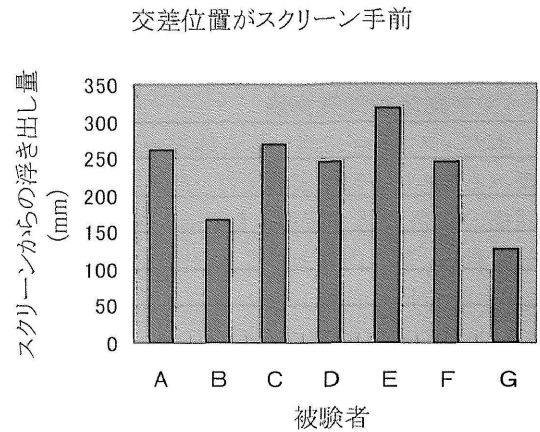


図7 輻輳性融合立体視限界(浮き出す物体)

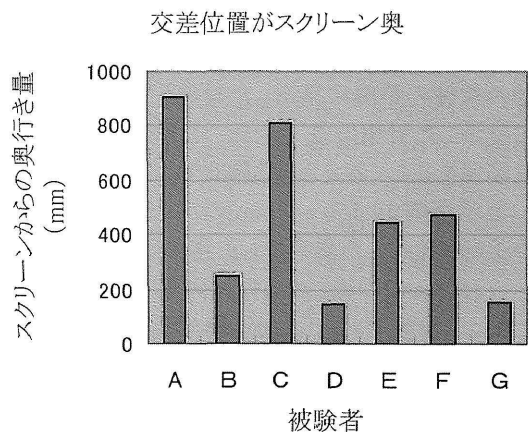


図8 輻輳性融合立体視限界(奥にある物体)

表2 立体視知覚実験正答率

|         | スクリーンから手前 |        |       |      | スクリーンから奥 |         |         |
|---------|-----------|--------|-------|------|----------|---------|---------|
|         | 150 mm    | 100 mm | 50 mm | 0 mm | -50 mm   | -100 mm | -150 mm |
| 150mm   | 67        | 71     | 71    | 86   | 71       | 86      | 86      |
| 100 mm  |           | 57     | 100   | 100  | 71       | 100     | 86      |
| 50 mm   |           |        | 42    | 71   | 86       | 100     | 86      |
| 0 mm    |           |        |       | 71   | 86       | 86      | 57      |
| -50 mm  |           |        |       |      | 57       | 42      | 57      |
| -100 mm |           |        |       |      |          | 42      | 14      |
| -150 mm |           |        |       |      |          |         | 42      |

3.2 立体視知覚実験

本ディスプレイにおいて立体呈示を正しく行えるかを調べるために、知覚実験を行った。実験方法は、前節と同様の白色の格子模様と上下に2つの視差の異なる円を用意し、下の円に対して上の円がどのように見えるかを「手前」「同じ」「奥」の3パターンで答えてもらった。なお、上下の円は被験者の視点に対して対象の位置にあるため、見え方に差はない。呈示距離は前節の融合限界を考慮して、スクリーン面を基準として50[mm]間隔で150～-150[mm]の7パターンを用意し、それぞれを組み合わせて28通りを行った。なお、前回の刺激の影響を減らすため、毎回2秒間、輝度値0の画面を表示し、各対象の距離はランダムで呈示した(図9)。

表2に被験者7名の正答率を示す。正答率とは、横軸の数値の距離に呈示した対象と、縦軸の数値の距離に呈示した対象の2つを比べた時に、2つの対象の位置関係を正しく答えられる確立である。

呈示距離が150～0[mm]の浮き出す物体の場合、どの距離と比較した場合でも正答率は高い。しかし、-50～-150[mm]の奥にある物体同士では正答率が低い。これは、前節でも記したが、物体が速くなるほど視差情報が小さくなるため、平面的に見えてしまうのが原因である。全体的な傾向として、二つの距離の差が大きくなるにつれて正答率が高くなっている。同じ呈示距離で正答率が低いのは、わずかな差異があると感じてしまったため、という被験者の感想があった。また、個人によって正答率が違うようだ(図10)。

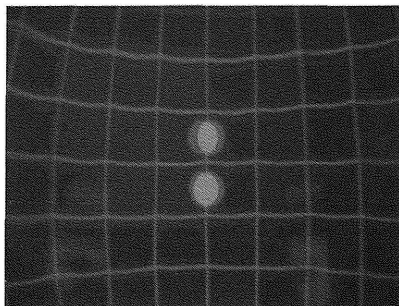


図9 立体視知覚実験

正答率(%)

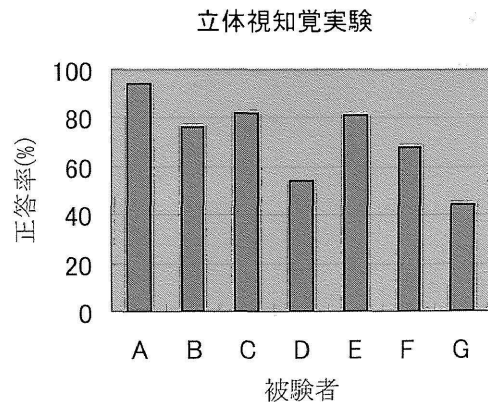


図10 個人別正答率

3.3 考察

以上、二つの実験により本ディスプレイの立体呈示の性能評価を行った。

輻輳性融合立体視限界の実験結果からは、物体が呈示可能である範囲がわかり、今後立体呈示を行っていく上でこの範囲を考慮しながら、立体的な物体を呈示していく必要がある。立体知覚実験からは、スクリーンの手前にある物体に対しては相対距離が知覚できるが、スクリーンより奥にある物体に関しては、距離感がつかみにくいと言える。

本研究では両眼視差と輻輳のみによる立体視実験を行ったため、物体の重なりによる位置関係、物体の大きさや色、明るさによる遠近感、など空間知覚の要素がなく、このような結果になったと考えられる。また、立体ディスプレイにおいて、前述にもあるようにスクリーン面に固定された焦点調節と輻輳の矛盾による違和感は被験者に疲労感を与え、長時間の両眼立体視は難しいという問題もある。これに関しては、自動焦点調節眼鏡[4]が開発されており、これを組み合わせることにより焦点調節と輻輳の矛盾を緩和させ、問題の改善を図ることが考えられる。

#### 4 スピンドームを用いた車両の遠隔操縦

遠隔操縦のシステム概観を図 11 に示す。

##### 4.1 車両・操作系

車両には(有)ライテックス社の Vmax Carrier を使用した。Vmax は円周上に小車輪を等間隔に配置したドラムを裏面に 4 つ有している。各小車輪は自由に回転するが、車軸の向きは常に一定方向に保たれるようになっている。またドラムは床面に対して傾いているので、接地するのは Vmax の4頂点にあたる位置の小車輪のみである。各ドラムを回転させると、接地している小車輪の車軸方向、つまりドラム円周の接線方向にのみ力が働くので、各ドラムの回転を制御することで、Vmax 全体にはそれらを合成した力が働く。これにより、全方向への移動にヨー方向の回転を加えた任意の移動が可能になる。

大きさは約 60cm 四方、厚さ約 9cm である。各モータの回転速度を制御する H8 マイコンボード(Yellowsoft 社 YH2633-1)を搭載しており、制御用計算機から RS232c 経由で各モータの目標速度を受け取る。バッテリー駆動で、最大速度は約 250mm/sec である。また、6mm 程度の段差を踏破できる。Vmax の操縦はキーボードの矢印キーで行った。前後のキー入力を前進・後退対応させ、左右のキー入力をヨー方向の回転に対応させた。また移動速度は前後方向が約 50mm/s、回転方向が約 7deg/s、で一定とした。なお、Vmax の操作遅延は約 0.7 秒である。

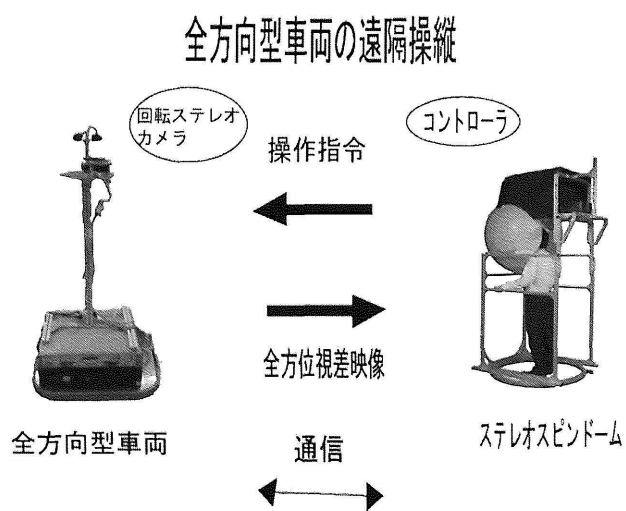


図 11 システム概観

##### 4.2 通信系

本研究は有線 LAN を使用した。これにより、同一

LAN 内では容易に同システムが使用できる。また、遠隔地間での使用についても、VPN 接続環境を構築し、インターネットを介して仮想的な LAN 環境を構成することで可能である。

通信・処理速度向上のため、カメラが得た画像はまず Vmax 側のコンピュータで JPEG 圧縮し、UDP 通信で送信する。一方、ユーザ側ではジョイスティックから入力された値を Vmax への指令値に変換し送信する。映像のフレームレートおよび遅延は圧縮に要する時間や通信回線の容量に依存する。本実験環境下では、JPEG 圧縮した画像は 1 枚あたり約 95KB、フレームレートは約 0.5fps であった。パノラマ画像 1 枚の解像度が 5500×900[pixel]で非常に大きく、さらに立体視をすることでデータ量が倍になるため、フレームレートが 0.5[fps]と小さくなった。

##### 4.3 撮像系

本研究では高解像度全周囲映像を呈示するために、回転式撮映システム(図 12)を用いた。このシステムは、IEEE1394 信号を一度光に変換して光スリプリングを通し、再度 IEEE1394 信号へ変換するという方式を用いた同様のシステム[5]と比べ、システムの複雑さ、コスト共に大幅に軽減することができている。

2 台のカメラは人間の平均眼間距離である 6.5[cm]離して配置され、この 2 台を回転させることで人間が周囲を見渡す動作を模倣する。カメラの画像データを PC に伝送する IEEE1394 ケーブルをスリプリングに接続することで撮影システムの無限回転を実現している。カメラは横に倒して使用し、垂直画角約 60° を確保した。水平方向は 1 台のカメラの 36 度分を使用し、10 枚の画像を繋ぎ合わせることで左右それぞれの全周囲画像が生成され、図 13 の様に 2 パターン(黒い範囲と白い範囲)、20 個の視体積が繋ぎ合わされた全周囲両眼視差画像が生成される。タイミングベルトを使用することによりモータ、スリプリングをカメラの下に配置することを可能にし、カメラに固定用の支柱等が映り込まないようにしている。システムの回転と各視点位置における画像取得の同期は、モータの角度情報ではなく、モータの回転速度に応じて画像取得間隔時間[ms]を決定することで行っている。

本システムは PC1 台で 2 台のカメラから全周囲の視差画像を取り込み、リアルタイムでパノラマ画像やドーナツ型、扇型へ変形することができる。動画撮影のフレームレートを上げるにはカメラのシャッタ速度を上げ、システムの回転速度を上げる必要があるが、シャッタ速度の増加は画質の低下を招くため、動画のフレームレートと画質はトレードオフの関係となる。本システムで動画撮影を行う場合、実用性を考慮すると 0.5~1.0[fps]程度のフレームレートが適切であると考えられる。

図 14 は本システムを用い、1[fps]の速度でリアルタイムに生成したパノラマ画像(上:左眼用画像、下:右眼用画像)である。水平画角 360 度、垂直画角約 60 度、解像度は 5500×900[pixel]程度となっている。近くにあるものほど左右画像間での見え方の違いが大きく、正しく両眼視差が生成されていることがわかる。

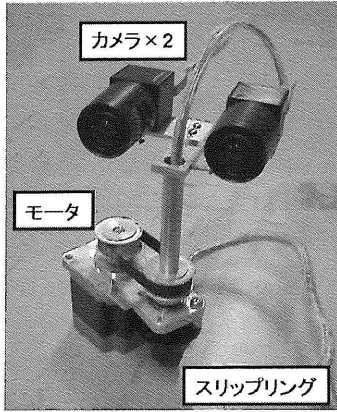


図12 回転式撮像システム

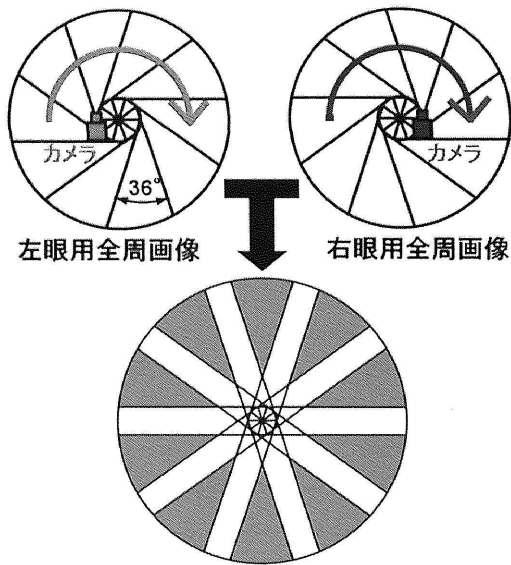


図13 全周両眼視差画像の生成

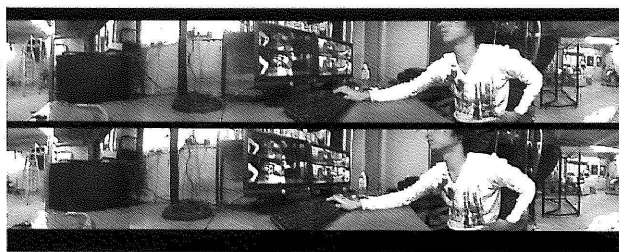


図14 パノラマ画像

#### 4.4 操縦実験

立体視を用いて遠隔操縦をする場合、フレームレートが遅くなる、目が疲れる、映像が暗くなる、立体視が苦手な人は操縦できないといった問題がある。本システムでは立体映像と単眼映像を切り替え可能とし、立体映像はそれが有効な状況下のみで使用する。その状況として予測されるのが細い道を走る、障害物を避けるといったより正確な距離感を必要とする場面である。

そこで本研究では、単眼映像に比べ、立体映像の方が正確に距離感を呈示できるかを検証するために走行実験を行った。実験の概要を図 15 に、手順を以下に示す。

- (1)被験者が慣れたと感じるまで自由に走行させた。
- (2)回転カメラの視点位置とほぼ同じ高さに吊した目標物の手前 30cm(目標地点)に近づくように走行させた。
- (3)被験者に、目視で、目標地点まで歩行させ、被験者が 30cm と感じる距離を測定した。

なお物体の大きさから得られる情報を減らすため、本実験では被験者に目標物、Vmax の初期位置を見せていない。

被験者は 5 名で、それぞれ眼間距離は、58、72、60、69、60[mm]、右目視力は、1.0、1.0、1.0、0.8、2.0、左目視力は、0.7、1.0、1.0、0.8、2.0 である。一人あたり単眼・両眼それぞれ 3 回の計 6 回測定した。なお、単眼と両眼の順序はランダムとした。また、歩行は両眼で一人あたり 3 回行った。図 16 は実験の様子、図 17 は呈示映像、図 18 は測定結果である。

単眼時のフレームレート、画角は両眼時と同様とした。

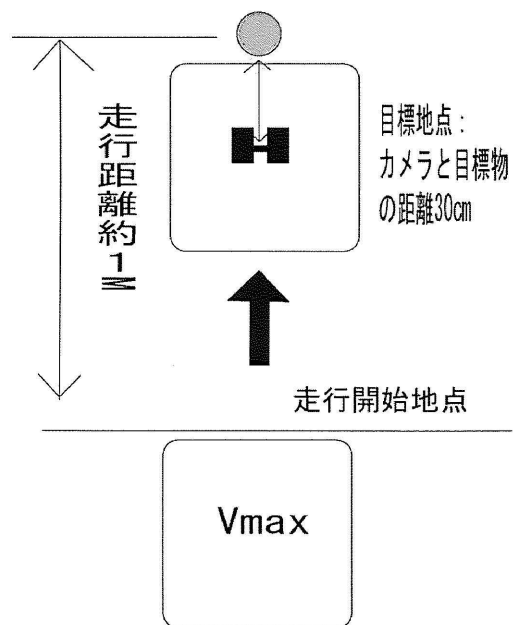


図15 走行実験概観



図16 実験の様子



図17 (上: 単眼映像、下: 立体映像)

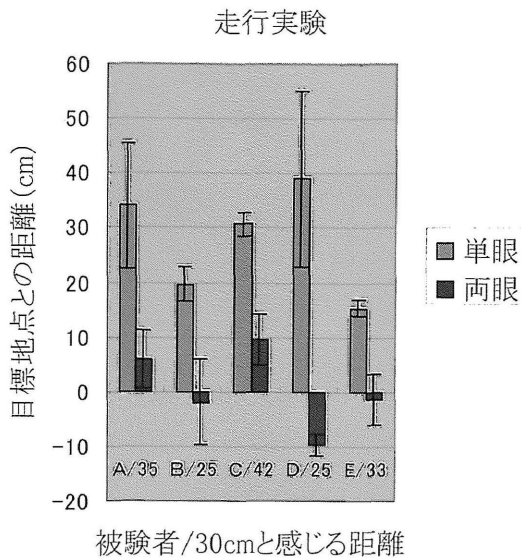


図18 走行実験結果

単眼映像では、目標地点までの距離の被験者全員の平均が 27.7cm、標準偏差が 11.9 となり、立体映像ではそれぞれ 0.5cm、8.3 となった。また対応のない 2 群の

母平均の差の検定を行ったところ水準 1% 以下で有意差有りとなった。このことから、単眼映像に比べ立体映像の方が正しい距離感を呈示できたと言える。

#### 4.5 考察

走行実験より、単眼映像より立体映像の方が正しい距離感を呈示できることがわかった。これは、単眼映像では物体の大きさからのみ距離感を得ているのに対して、立体映像ではそれに加え視差情報により正しい距離感を得やすくなったためだと考えられる。

目標地点までの距離は、立体映像においても個人間ではばらつきが見られた。この理由として、距離感個人の経験によるところが大きく、30cm と感じる距離が個人によって違うことが挙げられる。30cm と感じる距離にも同じ様にばらつきがあり、目標地点までの距離と関連が見られた。

#### 5 まとめと今後の展望

小型没入球面ディスプレイ:スピンドームを開発し、輻輳性融合立体視限界実験、立体知覚実験を用いて、基本性能を確認した。また、本ディスプレイを用いて全方向移動車両の遠隔操縦を行い、立体映像の効果を確認した。

今後は、立体映像が全周に呈示されていることの効果について調べ、遠隔操縦における全周立体映像の利点を確認する予定である。

#### 参考文献

- [1] cruz-Neira,c.et.al.: Surround-Screen Projection – Based VirtualReality, Proc.of ACM SIGGRAPH'93 (1993)
- [2] 橋本渉, 岩田洋夫: 凸面鏡を用いた球面没入型ディスプレイ:Enspared Vision; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.4, No.3, pp.479-486 (1999.9)
- [3] 長田昌次郎: 立体映像の観察時における輻輳性融合立体視限界 VFSL の分布; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.7, No.2, pp239-246 (2002.6)
- [4] 萩原誠, 出澤正徳, 藤田豊己: 自動焦点調節型眼鏡に関する研究; 電気通信大学大学院 IS シンポジウム第7回「Sensing and Perception」, pp.111 – 118 (2000.3)
- [5] 加藤伸明, 赤穂大輔, 川上直樹, 舘暲: 回転カメラを用いた全周囲立体映像提示のための撮影システム; 日本バーチャルリアリティ学会 第 11 回大会論文集, pp223-226 (2006.9)

(2008年3月31日)

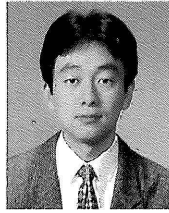
[著者紹介]

棚橋 新七 (非会員)



2007年3月筑波大学工学システム学類卒業。同年4月より、筑波大学大学院システム情報工学研究科博士前期課程に在学中。没入型ディスプレイの研究に従事。

矢野 博明 (正会員)



1997年筑波大学大学院工学研究科修了。同年日本学術振興会特別研究員(PD)、99年同大機能工学系講師、06年同大システム情報工学研究科助教授、07年同准教授、現在に至る。力覚呈示、移動感覚に関する研究に従事。博士(工学)

岩田 洋夫 (正会員)



1981年東京大学工学部機械工学科卒業、86年東京大学大学院工学系研究科修了(工学博士)、同年筑波大学構造工学系助手。現在筑波大学システム情報工学研究科教授。バーチャルリアリティ、特にハプティックインタフェース、ロコモーションインタフェース、没入ディスプレイの研究に従事。日本バーチャルリアリティ学会評議員。博士(工学)