

LEDの小型化と光信号の利用による没入型裸眼立体ディスプレイの高品位化

A High Quality Immersive Autostereoscopic Display by Using Small LEDs and Optical Transfer

林 淳哉^{†*}, 圓道知博^{††}, 川上直樹^{†††}, 正会員 館 暲^{†††}

Junya Hayashi^{†*}, Tomohiro Yendo^{††}, Naoki Kawakami^{†††} and Susumu Tachi^{†††}

Abstract We created an immersive auto-stereoscopic display, the Telexistence Wide-angle Immersive STEReoscope (TWISTER), and the previous version of TWISTER, TWISTER III can display full color immersive stereo images. But the resolution and refresh rate of TWISTER III is lower than those of ordinary displays, and some users felt fatigue or could not see stereo images. The main reason for the low resolution is the size of LEDs and a degradation of signals through a slipping. We introduce the design and development of the new TWISTER, which has smaller LEDs and optical data transfer using fiber optic rotary joints (FORJs).

キーワード：TWISTER, 没入型裸眼立体ディスプレイ, 光信号, 光ロータリージョイント, 相互テレグジスタンス

1. ま え が き

利用者の全周に映像を提示する没入型ディスプレイであり、かつ利用者が特殊なデバイスを顔面に装着することなく立体映像を観察することのできる裸眼立体ディスプレイとして、我々はTWISTER (Telexistence Wide-angle Immersive STEReoscope) の開発を進めてきた。没入型かつ裸眼立体ディスプレイというTWISTERの特徴は、遠隔地にいる人同士があたかも目の前にいるかのようにコミュニケーションを行う相互テレグジスタンス¹⁾ (図1)の実現にとって、必要な要件である。

試作3号機TWISTER III²⁾では、試作2号機TWISTER IIでのフルカラー静止立体画像の提示成功を踏まえ、利用者の全周にフルカラー立体映像を提示し

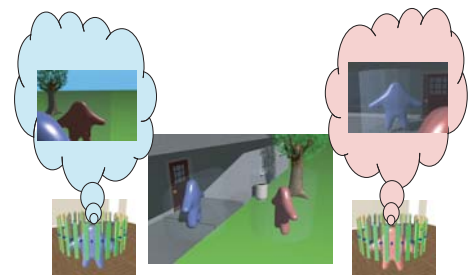


図1 相互テレグジスタンス
Mutual Telexistence.

た。しかし、TWISTER IIIは視野角の向上と動画提示、機構としての安定性の面において、TWISTER IIを大きく上回る性能を示した一方で、いくつかの問題点を残している。(TWISTER IIIのスペックについては付録A節参照)

- 回転接続部のスリップリングにおいて、映像信号にノイズがのりやすい。
- ノイズに対する耐性を確保するため、入力信号フォーマットをアナログのNTSCとしたが、入力として8チャンネルのNTSCが必要であるため、映像生成の手間が大きい。そのため、実時間での映像提示が困難である。
- 画素ピッチが3.75mm、回転半径が800mm、角解像度が視力換算0.06であり、解像度が低い。
- 当初毎秒1.5回転での運用を目標としていたが、実際の運用は毎秒1.2回転程度であったため、走査す

2005年9月6日受付、2006年2月7日最終受付、2006年4月11日採録

[†] 東京大学大学院 工学系研究科
(〒113-8656 文京区本郷 7-3-1, 03-5841-6917)

^{††} 名古屋大学大学院 工学研究科
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町, 052-789-3163)

^{†††} 東京大学大学院 情報理工学系研究科
(〒113-8656 文京区本郷 7-3-1, 03-5841-6915)

* トライアックス株式会社

[†] School of Engineering, University of Tokyo
(7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan)

^{††} Graduate School of Engineering, Nagoya University
(Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya City, Aichi Prefecture 464-8603, Japan)

^{†††} Graduate School of Information Science and Technology, University of Tokyo

(7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan)

* TriAx Corp.

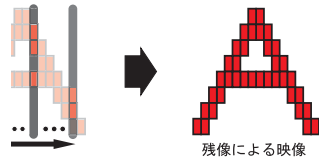


図 2 LED アレイの走査による映像提示
Led Array Scanning.

る LED アレイの動きが目で追いやすく、フリッカーが強い。

- 8ビットの PWM で階調を表現していたため、主に低輝度の領域で色分解能が低い。
- 立体視可能な立ち位置が機構中心に制限される。
- 奥行き方向の立体映像提示性能が弱く、特に無限遠の提示が困難である。
- 上記の原因を総合して、利用者が眼の疲れを訴えたり、立体視できないことがある。

これらの問題は主に、各画素を構成している LED の大きさと、データ転送における回転接続部での信号劣化に起因する。

そこで我々は、より小型の LED を使用すると同時に、大容量の映像データ伝送に光信号を用い、回転接続部に光ロータリージョイントを採用して、TWISTER 提示映像の高品位化をはかった。また新しい試作機では、LED 駆動周波数の変更、利用者の使いやすい機構インタフェースなど、数々の改善を施している。

本論文では、TWISTER III の反省点を踏まえて作成した新しい試作機的设计と製作について述べる。

2. 立体映像提示の原理

本項では、

- LED アレイの走査による映像提示
- 回転型パララクスバリアによるステレオ映像提示

という提示システムの二つの原理について説明する。

2.1 LED アレイの走査による映像提示

TWISTER は、人が入れるほどの大きさの円筒形状ディスプレイであり、ディスプレイ部は円筒状に配置された複数の LED アレイからなる。図 2 のように、LED アレイを高速に動かしながら通過点に応じた点灯パターンを提示することによって、1次元の LED アレイの残像が、2次元映像として利用者に知覚される。

2.2 回転型パララクスバリアによる立体映像提示

前述の LED 走査に加え、TWISTER では回転型パララクスバリアという原理によって利用者の右目と左目に異なる映像を提示している(図 3, 図 4)。

TWISTER の提示ユニットは 2本の LED アレイと幅数 cm 程度の遮光板(パララクスバリアと呼ぶ)からなる。LED アレイとパララクスバリアのエッジによって構成される平面は円筒型回転部の中心軸を含むような配置

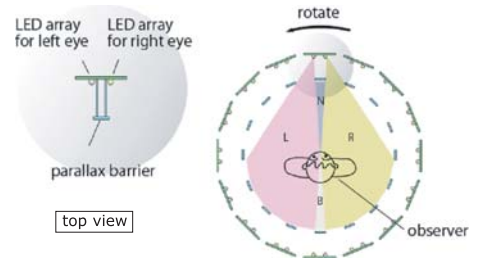


図 3 回転型パララクスバリア²⁾
Rotating Parallax Barrier.

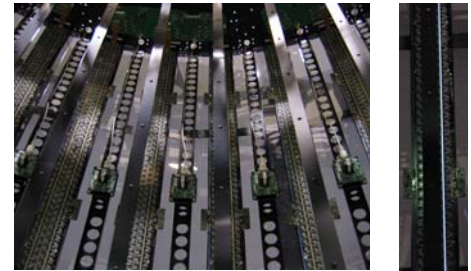


図 4 実際の提示ユニット
Display Units.

に設計されている。そのため、機構の中心に立った利用者が正面方向の提示ユニットを見たとき、パララクスバリアによる遮光効果によって、右目からは右側の LED アレイだけが見え、左目からは左側の LED アレイだけが見える。この状態を保ったまま、複数の提示ユニットを利用者の周りで高速移動させることで、利用者の右目と左目に別々の全周映像を提示し、利用者はステレオ映像を見ることができる。

厳密には、利用者が立体視可能な視野の領域は正面方向の視野数十度(利用者の眼間距離や立ち位置に依存)に限られ、周辺視領域では両目に同じ映像が提示される。しかし、周辺視領域での立体視能力は低いため、周辺視領域に映像を提示することは必要であるが、それが立体映像である必要性はそれほどないと考えられる。

3. 設計

本項では、1節で述べた TWISTER III の問題点を踏まえて、新しい試作機 TWISTER IV の設計について述べる。

3.1 提示面半径と LED 素子

TWISTER IV の提示システムは、機構中心からディスプレイ面までの半径を 1000mm とし、1.5mm x 1.6mm の小型フルカラー LED (Stanley 社製 FRGB1313C) の使用を前提として設計を行った。ディスプレイ面までの半径 1000mm は、TWISTER III で課題であった奥行き方向提示性能をカバーするためのものであり、Stanley 社製小型フルカラー LED は見つけることのできたフルカラー LED の中で最小のものである。

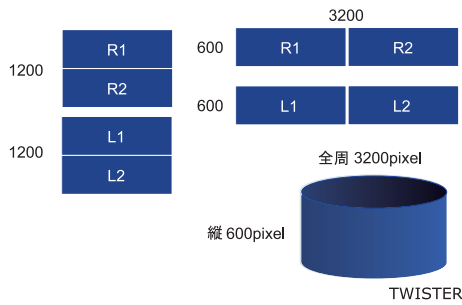


図 5 提示システム入力フォーマット
Input format for Display System.

3.2 空間解像度と入力フォーマット

上記の LED で LED アレイを構成した場合、基板製作の制約上、縦方向の画素ピッチは 1.6mm~2.0mm 以上となる。画素がほぼ正方ピクセルであるとする、ディスプレイ面までの半径が 1000mm であることから、ディスプレイ面の全周は約 6283mm であり、ディスプレイの水平方向の画素数は 3000~4000pixel 程度が適当となる。

ここで我々は、VGA 標準フォーマットの利便性を踏まえ、次の 2 通りのフォーマットを検討した。

- 全周片目映像を XGA(1024x768) 4 枚によって提示、高さ 768pixel, 全周 4096pixel, 画素ピッチ (垂直) 1.6mm 以上, 画素ピッチ (水平方向) 1.5mm.
- 全周片目映像を UXGA(1600x1200) 1 枚によって提示、高さ 600pixel, 全周 3200pixel, 画素ピッチ (垂直) 2.0mm, 画素ピッチ (水平方向) 2.0mm. ただし、UXGA は上下に分割し、UXGA の上半分をディスプレイ面の前半分、UXGA の下半分を後ろ半分に用いる。

検討の結果、基板における LED 実装を 2.0mm よりも小さくするのは難しいこと、片目分の映像を UXGA 信号 1 本で提示できることは、通常のディスプレイとの対応が明確で扱いやすいことから、後者を採用した (図 5)。またアナログ RGB 信号と DVI 信号を比較して、より信号劣化の防ぎやすい DVI 信号を採用することとした。

なお、LED 基板一つおきに機構的な装着位置を半画素ずらす、機構的なインタレース方式も検討したが、実装上のハードルが大きいため今回は見送った。

3.3 リフレッシュレートと提示ユニット数、回転速度

リフレッシュレートは、利用者の目へのフリッカーの影響を考慮して、一般ディスプレイと同等レベルの 60Hz とし、フレームレートは 60Hz のリフレッシュレートを最大限に生かして 60fps とした。

また、提示ユニットの数とリフレッシュレート、回転速度、輝度は相関があるため、合わせて値を決定した。これらのパラメータを決める上での制約条件は、次に示したとおりである。

- 回転速度の 2 乗に比例した遠心力がかかるが、遠心

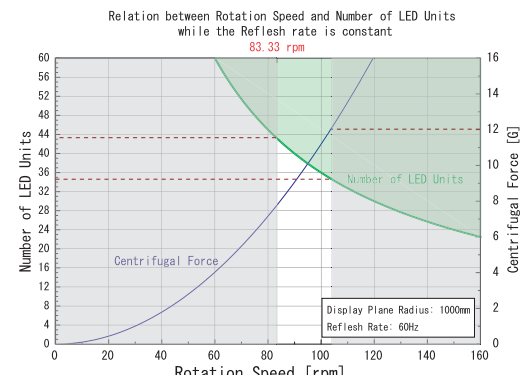


図 6 提示ユニット数と回転速度の関係

Relation between Rotation Speed and Number of Display Units.

力はリスクであるためできる限り小さい方がよい

- リフレッシュレートを固定した場合、回転速度と提示ユニット数は反比例の関係にある
- 提示ユニットの作成コストを考えると、提示ユニットの数は少ない方がよい
- 人間の目のサッカド速度が約 500deg/s であるため、この速度よりも速い速度で回転することが望ましい

これらの条件をグラフに表したのが、図 6 である。サッカド速度の 500deg/s (83.33rps) よりも回転速度が大きく、遠心力が 12G (なるべく小さな遠心力における目安) よりも小さい領域を白で表しているが、この領域に対応した提示ユニットの数は約 35 個~43 個である。TWISTER IV では、この条件内で扱いやすい数字を選び、提示ユニットの数を 36 個とした。このとき、機構の回転速度は 100rpm (1.66rps)、遠心力は約 11G となる。

3.4 階調解像度

一般に、ディスプレイにおける入力信号 E と出力輝度 L の関係は非線形であり、次式で近似される。

$$L = kE^\gamma \quad (1)$$

このとき、べき関数の指数部に現れる数を γ と呼び、輝度信号と実際の輝度の間の非線形性度合いを表す。一般の CRT ディスプレイの γ は 2.2 前後であり、LED の PWM 制御によって輝度階調を表現する TWISTER の γ は 1.0 である。

ここで、PC から出力される映像信号は $\gamma 2.2$ 程度を前提としているため、TWISTER では輝度変換が必要となる。この輝度変換について、PWM による輝度階調が 8 ビットの場合 (TWISTER III に対応) と 10 ビットの場合でシミュレーションを行った (図 7)。

シミュレーションによると、8 ビットの PWM 階調では、低輝度領域の出力輝度の階調が大きく縮退していることがわかった。人間の目に感じられる明るさは実際の輝度の対数にはほぼ比例し、人間の目の感度は低輝度領域ほど大きいことから、低輝度領域での階調の縮退は提示

映像の低品位化をもたらす。そこで、TWISTER IV においては、PWM による輝度階調を 10 ビット確保することとし、この条件を満たす LED ドライバとして、TI 製 TLC5930 を採用した。

3.5 伝送部

3.2 項および 3.3 項で示したように TWISTER IV では映像の入力信号として 60Hz の UXGA (DVI 信号) を採用することとした。しかし DVI 信号 (UXGA) には、

- 60Hz の UXGA に必要な帯域は約 2.6Gbps であり、RGB の 1 チャンネルごとに見ても約 0.86Gbps の高帯域を必要とする。

- DVI 信号は TMDS と呼ばれる伝送方式によって、RGB の各チャンネルごとに 2 本の信号線を用いて差動駆動され、信号線の各ペアはツイストペアをなしてシールドされている。

- DVI 信号のケーブル長は、電気信号の場合、標準で 5m に制限されている。

といった特徴があり、従来の TWISTER III で用いていたようなスリップリングによる回転体内部へのデータ転送は困難である。特にスリップリングの接続部においては、TMDS のツイストペアが 1 本ずつの信号線に分断されるため、ノイズがのりやすい。

そこで、TWISTER IV においては光信号を介したデータ転送を設計することとした。DVI 信号の光信号による伝送には次のようなメリットがある。

- DVI 信号の延長には信号劣化の少ない光信号が用い

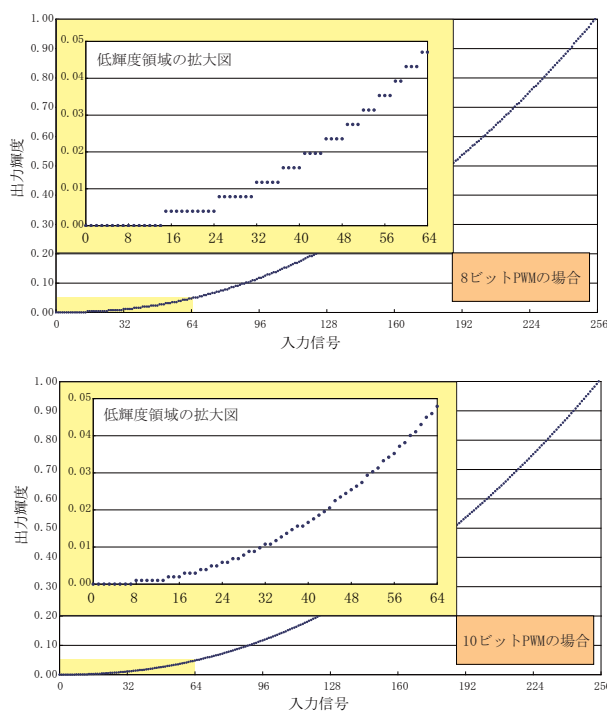


図 7 輝度変換のシミュレーション (上: PWM8 ビット階調, 下: PWM10 ビット階調)
Simulation of Luminance Conversion (top: 8bit conversion, bottom: 10bit conversion).

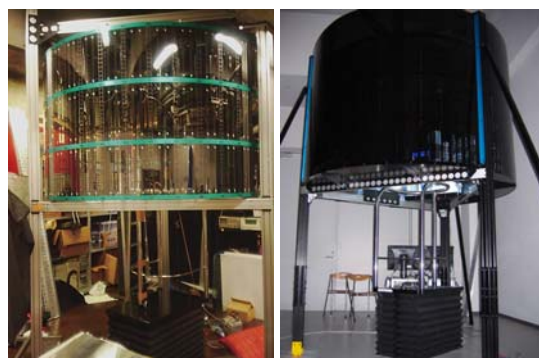


図 8 TWISTER IV (左図) と TWISTER V (右図)
TWISTER IV (left) and TWISTER V (right).

られることが多く、光による DVI 信号の伝送には実績がある。

- 光学的な手法によって、光信号を低損失で回転接続することが可能である。

- 撮像系で用いる IEEE1394 信号に関しても、光によって伝送することができる。

具体的には、入力映像信号、撮像信号、回転接続部において、それぞれ下記の方式を導入することとした。

(a) 入力映像信号 (DVI UXGA)

opticis 社製 M1-201UX-TR を用いて DVI 信号を光に変換。

(b) 撮像信号 (IEEE 1394 フォーマット)

リピータハブによって信号を 2 本に集約後、Newnex 社製 FireNEX800 を用いて IEEE1394 信号を光に変換。

(c) 回転接続部

日立電線製 低損失多心光ロータリジョイント 12 心によって 12 チャンネルの光信号を回転接続。

光に変換された信号は、回転接続部を通過後、再び電気信号に変換されて制御基板や PC に接続される。なお、光ロータリジョイントによる信号の劣化は 2.0dB 以下であり、実用上問題ない。

4. 実装

本項では、TWISTER IV および TWISTER V の実装について、機構、提示システム、撮像システム、外部操作端末の各方面から述べる。TWISTER V は TWISTER IV と同等の提示・撮像機能を持ったシステムであるが、公共の科学技術館において、一般の人々に鑑賞されることを前提として製作したため、より観察者の安全性を考慮した構造となっている。なお、スペックについては付録 A 節を参照のこと。

4.1 機構部

TWISTER IV および TWISTER V の全体像を図 8 に示す。

以下、各部材について説明する。

(1) 筐体部

TWISTER IV の筐体部は、上部と下部を天井と床に

固定された3本の柱からなり、回転部による振動を抑えた。TWISTER V では設置場所の天井が高いため、主柱3本とそれを支える3本の補強材によって筐体を構成した。

(2) 回転部

回転部は軽量・コンパクトであることを目指し、配置する基板類が上下方向で隙間なく入る大きさに設計した。回転部の高さを抑えることで、ディスプレイ面全体を押し上げ、入口の高さを確保している。

(3) 内部シールド、外部シールドと昇降機

利用者がTWISTERに出入りする利便性を高め、利用者による身長差を吸収するため、昇降機を設置した(図9)。

また、利用者の安全性を確保するため、TWISTER内部にはアクリル製の円筒シールドを設置した。アクリル表面での映像の反射を抑えるため、アクリルには反射防止膜が貼られている。

TWISTER Vではさらに、TWISTER外部への安全性を考え、半透明のポリカーボネートで筐体を覆っている。

4.2 提示システム

提示システムのシステム構成を図10に示す。システムへの入力信号はDVIフォーマットのUXGA信号2チャンネルであり、これを制御基板によって各LEDアレイ用の信号に変換し、提示している。

(1) LED基板とパララクスバリア

LED基板1枚は縦200個のフルカラーLED2列からなる。LED基板を縦に3枚並べることで、縦600pixelのLEDアレイを構成し、これを全周に36組配置した。

また、基板上2本のLEDアレイの間隔は32mmであり、パララクスバリアは幅24mmのものが半径750mmの円筒状に配置されている。

(2) 映像信号制御基板と映像分配基板

映像信号制御基板では主に以下の操作を行っている。

- DVI信号のデコード
- TWISTERの走査線が一般のディスプレイと比較して90度回転していることから、入力信号を90度回転
- 入力信号の輝度を γ 補正して、10ビットの輝度信号

に変換

- 各映像分配基板に、変換した映像信号を伝送
- エンコーダパルスとZ相をもとにLEDの点灯タイミングを生成し、各映像分配基板に伝送

また、映像分配基板は全部で12枚あり、それぞれ3組9枚のLED基板を制御している。

(3) 提示解像度の変更

全周画素数の3200が提示ユニット数36で割り切れないため、各画素の点灯タイミングが同時でなく、映像信号の制御が困難であった。そのため、全周画素数3200を36で割り切れる3168画素に変更した。これにより、入力信号であるUXGAの右側16画素は用いないこととなる。

4.3 撮像システム

内部の利用者を撮影することを目的として、各提示ユニットの間に計36台のカメラを設置した。カメラに関しても提示ユニット同様、利用者の周りで高速に移動することから、外部信号によって適切なタイミングでシャッターをきることのできる、外部トリガ機能付きのカメラを用いた(Pointgrey社製: Dragonfly VGA Color)。

ただし、撮像システムに関しては本論との関連が薄いため、ここでの詳細は省く。

4.4 外部操作端末

操作端末は、提示システム用、モータ制御用、撮像システム用に各1台ずつのPCを配置している。また、提示映像確認の利便性のため、DVI分配器を用いて、TWISTERに提示している映像と同様の映像をディスプレイ上に表示している。(図11)

5. むすび

本論文では、TWISTERの新しい試作機であるTWISTER IVの設計と実装について述べた。TWISTER IVでは、回転接続部に光ロータリージョイントを用いることで、回転体内部へのデータ転送の大容量化を実現し、従来機と比較して小型のLEDをより多く配置することによって、高品位な映像の提示に成功した。詳しくは、以下のような改善が見られる。

- 画素ピッチが3.75mmから2.0mmの約半分になり、

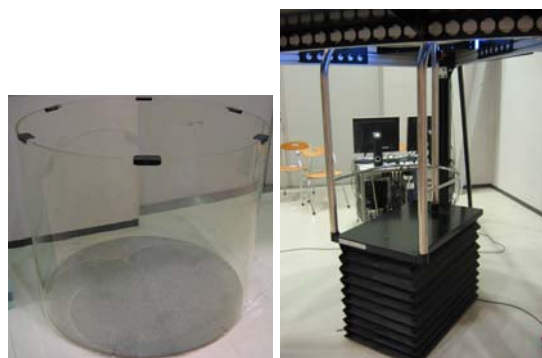


図9 内部シールドと昇降機
Inner Shield and Lifter.



図11 外部操作端末
Operation Desk.

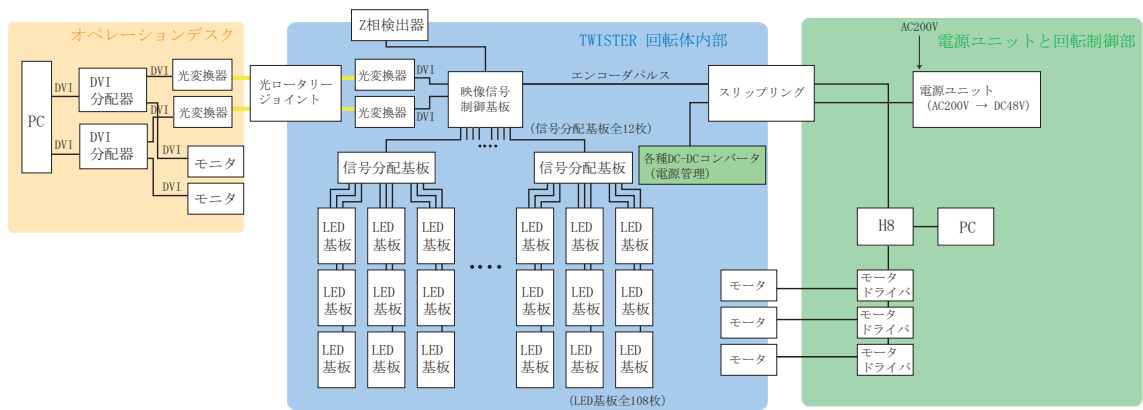


図 10 提示システム
Display System for TWISTER IV.

利用者からディスプレイ面までの距離を 800mm から 1000mm に拡大したことで、角解像度の視力換算が 0.062 から 0.148 の 2 倍以上になった。

- 回転接続部のデータ伝送に光信号を用いることで、信号劣化の心配がなくなり、提示解像度が全周 1920pixel, 垂直 256pixel から全周 3168pixel, 垂直 600pixel に増加した。また、映像信号にデジタル信号 (DVI) を用いることができた。
- 解像度および画素数が増したが、垂直方向の画角に関しては約 60 度から変化していない。
- リフレッシュレートが 30Hz から 60Hz へと倍になり、利用者がフリッカーを感じにくくなった。
- 回転部の回転速度が約 1.2rps から 1.66rps へと約 1.4 倍になり、移動する LED を目で追いにくくなった (回転方向と同じ方向に顔を動かすなどすると、依然として LED を目で追えることがある)。
- 上記の改善を総合して、利用者がより立体視しやすくなった。
- TWISTER に提示する映像の入力信号が UXGA の DVI フォーマット 2 チャンネル (片目全周で UXGA1 チャンネル) となり、コンテンツ制作のハードルが低くなった。
- 出入り口の高さを高くし、昇降機を設置することで、利用者の利便性が増した。

なお、立体視するための利用者の頭部位置が制限されるという制約が依然としてあるが、映像の高品位化に伴って、立体視ができていないときとできていないときの判別が容易になり、数秒以内の試行錯誤で最適な頭部位置に頭を持っていくことのできる観察者が増えた。

最後に、本研究は科学技術振興機構の戦略的基礎研究推進事業の一部として行われた。

【文 献】

- 1) S. Tachi, T. Maeda, Y. Yanagida, M. Koyanagi and Y. Yokoyama: "A method of mutual tele-existence in a virtual environment", Proceedings of ICAT '96, pp.9-18 (1996)
- 2) K. Tanaka, J. Hayashi, M. Inami and S. Tachi: "TWISTER:

an immersive autostereoscopic display", Proceedings of IEEEVR 2004, pp.59-278 (2004)

〈付 録〉

A. スペック

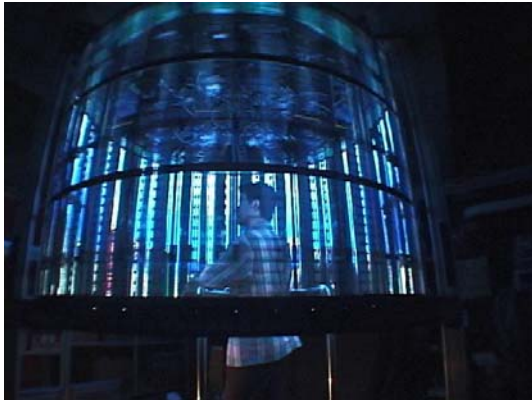
TWISTER III および IV, V のスペックを付・表 1 に示す。

付・表 1 TWISTER III および IV, V のスペック
Spec of TWISTER III and TWISTER IV, V.

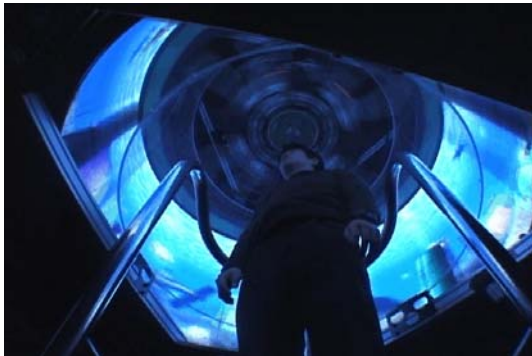
| 項目 | TWISTER III | TWISTER IV, V |
|------------------|-------------|----------------|
| 解像度 (水平) [pixel] | 1920 | 3168 |
| 解像度 (垂直) [pixel] | 256 | 600 |
| 提示面半径 [mm] | 800 | 1000 |
| 提示面高さ幅 [mm] | 960 | 1200 |
| 画素ピッチ [mm] | 3.75 | 2 |
| 視力換算解像度 | 0.062 | 0.148 |
| フレームレート [fps] | 30 | 60 |
| 輝度階調 | RGB 各 8bit | RGB 各 10 bit |
| 入力フォーマット | NTSC x 8ch | UXGA x 2ch |
| 回転速度 [rps] | 約 1.2 | 1.66 |
| 提示ユニット数 [組] | 30 | 36 |
| センターシールド直径 [mm] | 1000 | 1200 |
| カメラ解像度 | - | VGA |
| カメラ焦点設置半径 [mm] | - | 950 |
| カメラ画角 [deg] | - | 45 |
| カメラフレームレート [fps] | - | 15 |
| カメラ出力フォーマット | - | IEEE1394 x 2ch |

B. 提示映像

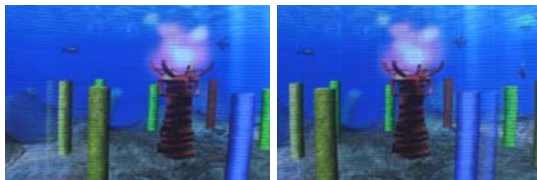
実際に映像を提示している様子を付・図 1~4 に示す。



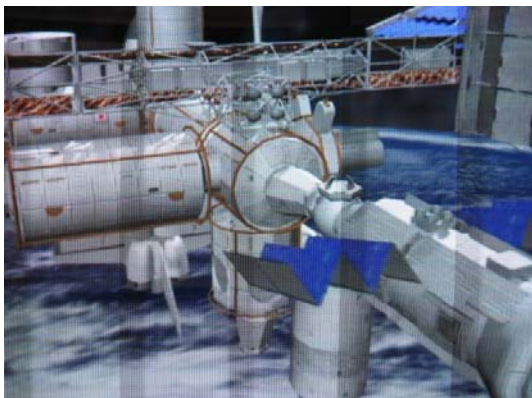
付・図 1 TWISTER IV の外側から撮影した画像
Side View (TWISTER IV).



付・図 2 TWISTER IV の下から撮影した画像
Bottom View (TWISTER IV).



付・図 3 TWISTER IV の内部から撮影した画像 (左: 左目位置から撮影, 右: 右目位置から撮影)
Displayed Image on TWISTER IV(left: from left eye position, right: from right eye position).



付・図 4 TWISTER V の内部から撮影した画像
Displayed Image on TWISTER V.



はやし じゅんや
林 淳哉 2001 年, 東京大学工学部物理工学科卒業. 2003 年, 同大学院情報理工学系研究科修士課程修了. 2006 年, 同大学院工学系研究科博士課程修了. トライアックス株式会社研究開発事業部所属. 博士 (工学). 主として三次元映像およびテキストマイニングに関する研究に従事.



えんどう ともひろ
圓道 知博 1996 年, 東京工業大学工学部卒業. 1998 年, 同大学院修士課程修了. 2001 年, 同博士課程修了. 1998 年, 通信・放送機構 高度三次元動画遠隔表示プロジェクト研究員. 2002 年, 科学技術振興事業団研究員. 2004 年, 名古屋大学助手. 博士 (工学). 三次元映像の撮影および表示システムの研究に従事.



かわかみ なおき
川上 直樹 1996 年, 東京工業大学大学院理工学研究科修了. 1999 年, 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了. 同年, 同大学院工学系研究科助手. 2002 年より, 同大学院講師. 博士 (工学). パーチャルリアリティの研究に従事.



たち すすむ
館 障 1973 年, 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了. 同年, 同大助手. 1975 年より通産省工技院機械技研を経て, 1989 年, 東京大学先端科学技術研究センター助教授. 1992 年, 同教授. 1994 年, 同大学院工学系研究科教授. 2001 年より, 同大学院情報理工学系研究科教授. 博士 (工学). 信号処理, 盲導犬ロボット, テレレグジスタンスなどの研究に従事. 正会員.