

裸眼全周囲ステレオ動画ディスプレイ TWISTER III

TWISTER III: A Panoramic Autostereo Display for Motion Pictures

田中 健司[†], 林 淳哉[†], 川 渕 一 郎^{††},
正会員 稲 見 昌 彦^{†††*}, 舘 暲^{†††}

Kenji Tanaka[†], Junya Hayashi[†], Ichiro Kawabuchi^{††}, Masahiko Inami^{†††*} and Susumu Tachi^{†††}

Abstract TWISTER (Telexistence Wide-angle Immersive STEReoscope) is a panoramic autostereo display designed for face-to-face telecommunications. This device works as a cylindrical display by rotating multiple display units around an observer and by presenting time-varying patterns. Panoramic autostereo vision is achieved by using a “rotating parallax barrier” method, the effectiveness of which was already reported. To date, we have succeeded in presenting panoramic stereo motion pictures using the third prototype TWISTER III. Its design, implementation, and evaluation are reported, and past and present problems are enumerated. The discussion includes psychophysical experiments conducted to evaluate the display performance. Issues on constructing panoramic stereo images are also described.

キーワード：3次元、立体画像、没入型提示、裸眼立体提示、全周囲ステレオ

1. はじめに

我々が目標とする、遠く離れた人間同士がバーチャルな3次元空間を共有して面談コミュニケーションを行う相互テレグジスタンス¹⁾では、バーチャルリアリティの3要素である(1)3次元の空間性、(2)実時間の相互作用性、(3)自己投射性に加え、ユーザの顔が明瞭に観察できるという条件が必要である。体験者の頭部に光学系を搭載するHMD(Head-Mounted Display)²⁾や、CAVEに代表されるIPT(Immersive Projection Technology)³⁾は、3要素は満たすものの立体視のため特殊な眼鏡を使用するため、体験者の顔を直接撮影することは困難である。

特殊な眼鏡を利用しない立体視ディスプレイの中で、と

くにパララクスバリアやレンチキュラーレンズを用いたシステムとしては、pi-cell電子光シャッタを用いるもの⁴⁾、Varrierとよばれる可変バリアスクリーン⁵⁾などが挙げられるほか、SeaPhone⁶⁾、三洋電機⁷⁾などから商品化されている。また、二人以上の観察者に同時にステレオ画像を提示することのできるものとして、ICFLCDを用いて複数ゾーン裸眼立体ディスプレイ⁸⁾や、IPテレビ⁹⁾などが挙げられる。しかしながら、上記の裸眼立体ディスプレイはいずれも、全周囲に画像を提示するという性能は持たない。全周囲提示できる裸眼立体ディスプレイとしては、TWISTERが最初の提案であり、現在までにTWISTER IおよびIIの試作を通して¹⁰⁾¹¹⁾回転パララクスバリアと呼ばれる方法の有効性が確認されている。

1.1 TWISTERの原理

TWISTERの原理は次のようなものである。時変パターンで発光する2本の縦に長い1次元LED(Light Emitting Diode)アレイがパララクスバリアと呼ばれる遮蔽板とともにディスプレイユニットをなし、円筒形に配置されて高速に観察者の周りを回転する。この時、視覚の残像効果が生じ、観察者はライン状に並んだLEDを2次元的な円筒状の広画角な画像として知覚する。パララクスバリアは、LEDアレイの1列が左目のみに、もう1列が右目のみによって観察されるようにする働きを持つ。図1で、領域LとRでは、それぞれ左目、右目用の画像のみが観察される。領域Bでは、両方の画像が観察され、領域Nでは、いずれの画像も観察されない。体験者は、パララクスバリアによって、特殊な眼鏡をかけることなく、没入的かつ

2003年、3次元画像コンファレンスにて発表
2003年10月31日受付、2004年2月10日再受付、2004年4月9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, TEL 03-5841-6915)

†† 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, TEL 03-5841-6915)

†† テックエキスパート

(〒143-8564 大田区大森西 4-15-5 パイオニア株式会社大森事業所内, TEL 03-3763-5101)

* 現在、電気通信大学 知能機械工学科

† Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

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

†† Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

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

†† Tech Experts

(4-15-5 Omori-Nishi, Ota-ku, Tokyo, 143-8564 Japan)

* Department of Mechanical Engineering and Intelligent Systems, The University of Electro-Communications

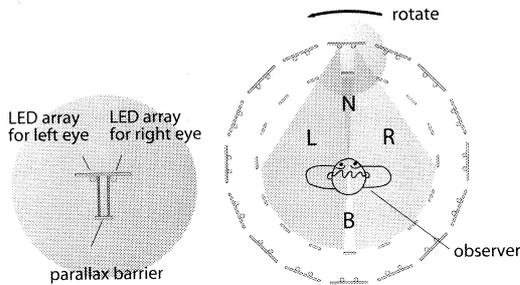


図 1 回転パララクスバリア方式
The rotating parallax barrier.

表 1 TWISTER の仕様
Specifications of TWISTER.

仕様		I	II	III
水平	画素数 (pixel/360 deg)	960	1,080	1,920
	画素ピッチ (mm)	3.9	3.5	2.62
	解像度視力換算	0.3	0.05	0.09
垂直	画素数 (pixel/360 deg)	128	128	256
	画素ピッチ (mm)	3.5	3.5	3.75
	解像度視力換算	0.05	0.05	0.06
時間解像度 (frame/s)		静止画	静止画	30
水平画角 (deg)		70	90	90
垂直画角 (deg)		40	40	64
色表現		赤一色	RGB 24bit	RGB 24bit
回転体の半径 (mm)		600	600	800
回転速度 (rpm)		60	60	60-90
裸眼立体視		可能	可能	可能

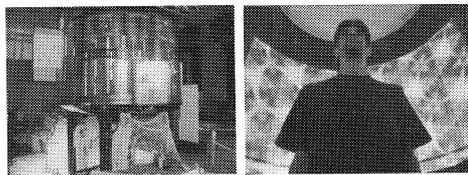


図 2 TWISTER III (左) とそれを体験する観測者 (右)
TWISTER III (left) and an observer experiencing it (right).

立体的な映像を体験できるため、映像を提示中でも体験者の顔が隠れなく撮影可能である (回転パララクスバリア方式¹⁾)。

本稿では、回転パララクスバリア方式を用いた全周囲ステレオディスプレイとして、はじめて動画提示を可能とした TWISTER III について述べる。その構造と実装上の課題や工夫に触れた後、観測者の頭部を追跡することなく、観測者が見た方向に応じてステレオ画像を提示する方法やそのための画像の生成について述べる。また、奥行き知覚や輻輳性融像に関する心理物理実験を行い、奥行き提示性能を評価する。最後に、設計パラメータについて、実装後の知見も交えて考察を行う。この中で、回転ディスプレイに特有の時空間サンプリングパターン²⁾の問題、適視領域の大きさの評価や最大化などについて議論する。TWISTER の仕様を表 1 にまとめる。また、図 2 に、TWISTER III の概観と体験者の写真を示す。

2. TWISTER III の機構および動作

2.1 TWISTER III の機構

TWISTER III は、30 のディスプレイユニットを備えた直径 1.6m の回転体とそれを支持し駆動するスタンド部分とで構成される (図 3 左)。この構造は、回転体を天井から吊る方法と比較して、組立てや分解が容易で、可搬性に優れている。一方、吊り方式に比して騒音が大きく、回転体の回転速度が 60rpm の場合、観測者の耳の位置で 75dB、ブースの外で 60~68dB (少し騒がしいレストランと同程度) という計測結果が得られているが、展示場や博物館など、公共スペースに設置する場合は問題ない。

回転体は、円形をした上下のリングによって、30 本の LED 基板支持柱およびディスプレイユニットをはさむ構成になっている。回転体の最下部のリングを、スタンドから外し上に持ち上げた状態を図 3 右に示す。このリングは、アルミニウム切削加工により、高精度に製作されている。駆動は、スタンド上部の四隅に設置した DC モーターによって行い、8 箇所に設置したポリアスチール製ガイドローラにより、回転体を半径方向と鉛直方向とにおさえている。リングの高精度な加工とガイドローラにより、周速 5 m/s (毎秒 1 回転) 程度で回転しても、半径方向のぶれ量が ±0.25mm 以下に抑えられている。機構としては、120 rpm まで回転速度を上げられることを確認したが、この状態では、回転体の外周には 13 G の加速度がかかるため、基板搭載状態では最大でも 90 rpm 程度で回転させている。

電源および信号は、回転体上部の梁に固定された 32 極のスリップリング (日本サーボ製 S70 を使用) を経由して供給される。スタンドに固定された透明なアクリル製円筒 (防護壁) の上部には、2 本の交差する梁があり、ここにスリップリングの自由回転する配線の一方が固定されているほか、150W のスイッチング電源 (Cosel 社製 LDA150W) 6 台を、搭載している。

一つのディスプレイユニットは、高さが 960mm (480mm の基板を縦に 2 枚接続) の基板の上に LED のアレイ 2 列が 56mm の間隔で配置されたものと、その正面手前 200mm の位置に配置されたパララクスバリア (幅が 42mm の黒色薄板) とで構成される (図 4)。1 列の LED アレイは、RGB 3 色一体型の LED (豊田合成製 E1S10-1W, Type:3in1 Lens) が縦一列に 256 個配置されている。LED アレイは、回転体の中心 (ほぼ視点の位置と考えるとよい) から 800mm の位置に配置されている。

後述するように、TWISTER III の水平画角は 90 deg 程度であり、広画角の HMD や、液晶シャッター眼鏡で視野が制限される IPT の水平画角とほぼ同じ値をとる。ヒトの大画面視聴に影響を与える安定注視野が、水平方向に 90 deg 程度であること、周辺視が動画像の知覚にとって重要であることを考慮すると、動画像の提示に適した画角といえる。また、垂直画角は 64 deg であり、2 m 離れた人間

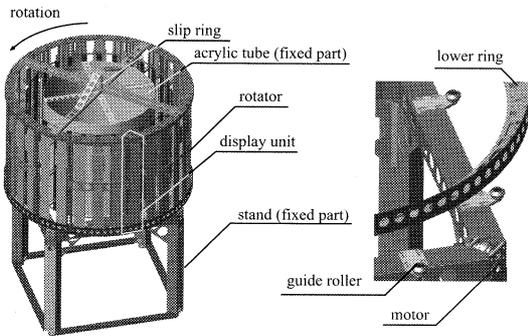


図3 TWISTER IIIの構造 (全体と回転体支持部の拡大図)
Structure of TWISTER III (Whole part and closer look of the rotator and the rollers).

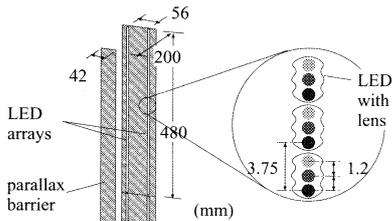


図4 ディスプレイユニット
Display unit.

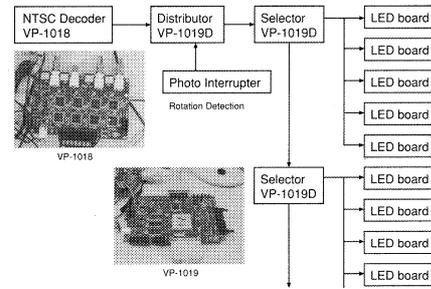


図5 回転体内部の信号伝送
Signal transmission inside the rotator.

の上半身を提示することができる程度の値である。観察者は適宜、台に載って体験するが、これは、下方視界が上方視界よりも多く取られる¹²⁾ようにするためである。

2.2 TWISTER IIIの動作

ビデオ信号処理

一般的な動画ソースを利用できるように、NTSC コンポジット信号およびSビデオ信号を入力ソースとしてとることができるビデオ信号処理回路を作成した。信号は、NTSC信号で回転体内部に伝送される。回転体をスタンドに固定した座標系について90 degごとに4部分に分割し、分割したそれぞれの領域に対して、左右画像、合計8系統のビデオ(NTSC)信号を入力可能とした。映像ソースは、4系統のDVD Videoに記録し、タイムベースコレクタ(朋栄製A-30)を用いて、すべての入力に対して同期をかけた。

回転体内部の信号伝送経路を図5に示す。左右それぞれのビデオ信号は、回転体上のNTSCデコーダ基板(ViewPLUS社製, VP-1018)で、デジタル信号に変換され、画像分配基板(VP-1019D)に送られたのち、108 MB/sのデータバス(6ch LVDS信号)を介し、デジチェーンで接続された画像セレクタ基板(VP-1019S)により、各LED基板に分配される。また、フォトインタラプタにより、回転体の回転を1回転につき1回読取り、これを分周して提示のための同期信号を発生させた。

LEDの階調制御

LEDは、定電流ドライバ(東芝製TB62706BF.動作周波数10MHz)を用い、PWM制御の一種であるサブフィールド法により駆動した。これは、中間調を持つ画像をそれ

ぞれ2のべき乗で重付けられた複数の2値画像に分け、時間的にこれらを重ね合わせることで表示する方法で、LEDの発光時間は入力信号に比例する。LEDの点灯最小時間幅は2[μs]であり、8ビット階調の制御を行うには、1画素につき最低2×256=512[μs]の時間幅が必要になる(実際にはデータを転送する時間も必要であるが、充分小さい)。この値から、一つのLEDは、毎秒約2000の点を描画することが可能である。PWM制御による装置のγは約1.0であり、逆補正を行った。

3. 全周囲ステレオ画像の取得・生成および提示

全周囲立体視提示の2つの方法

観察者の頭部位置および方向が取得可能である場合、ある状態において観察者の網膜上の物体の位置が、実際のシーンにおける場合と等しくなるように、画素を点灯させることは可能である。この方法では、提示される画像情報は、観察者の頭部がある方向を向いている場合は正確であるが、頭部を回転させると正確ではない。この提示方法をモード1と呼ぶことにする。一方、観察者が頭部を回転させたとしても、常に観察者の正面に関しては、正しい光線情報が到来するような提示方法も考えられる。以下ではこの方法をモード2と呼ぶ。モード2では、他の方向から到来する光線情報は近似であり、誤差を含む。図6に、2つの提示方法の違いを示す。

モード2における奥行き提示

モード2において、観察者がある角φの方向を向いた時に、提示される奥行きに含まれる誤差を計算する。物体の奥行き(d)について次の式が成り立つ。

$$\frac{1}{d} = \frac{1}{r} - \frac{\sin \theta}{e_x \cos \theta} \approx \frac{1}{r} - \frac{\sin \theta}{e_x} \quad (1)$$

ここで、 e_x は、観察者の瞳孔間距離の半分の値であり、 θ は、角 $\angle P_1 R O Q_1$ の大きさである。 r は、図6で定義されたTWISTERの中心からディスプレイ面までの距離である。ある点が角φの方向にあるとき、物体までの距離 d' は次のように評価できる。

$$\frac{1}{d'} \approx \frac{1}{r} - \frac{\sin \theta'}{e_x \cos \phi} \quad (2)$$

ここで、瞳孔間距離の半分は、 $e'_x = e_x \cos \phi$ と近似できる

* VP-1018 および VP-1019 は、Xilinx 社製 FPGA を搭載している。

ことを利用した。ところで、モード2提示において、 $|\overrightarrow{OQ}|$ が一定である場合、 θ はどの方向についても一定であるので、同心円上の点をモード2で提示したシーンの歪みは、 $\theta' = \theta$ を用いて、次のように評価できる。

$$\frac{1}{d'} = \frac{1}{d} - \frac{\sin \theta}{e_x} \left(\frac{1}{\cos \phi} - 1 \right) \quad (3)$$

$$\approx \frac{1}{d} - \frac{\theta}{e_x} \left(\frac{1}{\cos \phi} - 1 \right)$$

図7は、ある ϕ と d に対する $\frac{1/d'}{1/d}$ の値を示したもので、モード2提示における奥行き提示の歪みを示している。TWISTERの半径より大きい d の値に対して、奥行きはより大きく、ある ϕ の値に対して d' が無限大になることが確認できる。輻輳による奥行き知覚は一般に5m以内で有効であり、また、頭部が自由に動く場合には、人間がサッケードだけで物体に注視する範囲は15 deg以内である¹³⁾。またグラフから、 $|\phi| < 15 \text{ deg}$ かつ $d < 4 \text{ m}$ である範囲においては、誤差は15%以内であることが確認できる。これらより、モード2における奥行き知覚の歪みは、大きな問題にはならないと考えられる。

パノラマ画像の取得と生成

まず、静止風景のパノラマ画像を取得・再構成して提示した。画像の取得は、成人の平均的な瞳孔間距離である65mmだけ離して、互いに固定した2台のカメラをそれらの視点の中心を中心に、水平面内で回転させて行った。このような画像の取得やレンダリングは、同心モザイク¹⁴⁾としても提案されている。図8左は、左目を担当するカメラのみを取り出し、方向によって視点および視線が変化する様子を上から観察したものである。

動画生成は、CG (Computer Graphics) を用いて上述のパノラマ画像取得をシミュレートし、実時間にレンダリングを行った。実際の処理としては、全周囲を水平に32方向に均等分割し、各方向で別々のビュー変換を行う。ビューポートは各方向でレンダリングされた画像の中央の縦長の矩形領域とし、これらをつなぎ合わせてパノラマ画像を構成した。分割数の32は、構成した画像の連続性およびレンダリングの実時間性が両立するように決定した。図8右は、実際にレンダリングしたパノラマ画像の一部である。

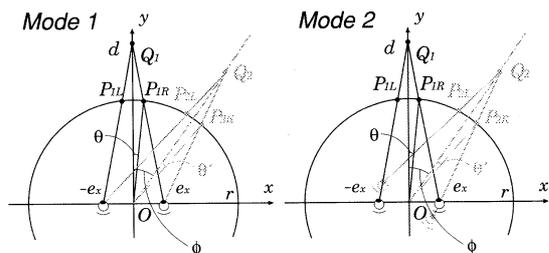


図6 2つのモードにおける提示ダイアグラム
Rendering diagram of two modes.

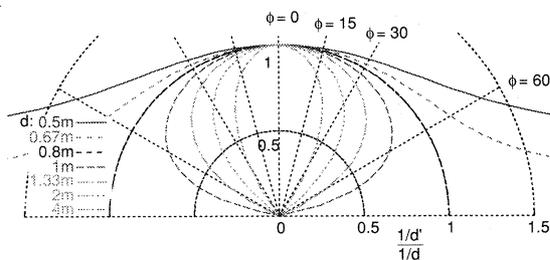


図7 モード2における奥行き提示
Depth presentation in mode 2.

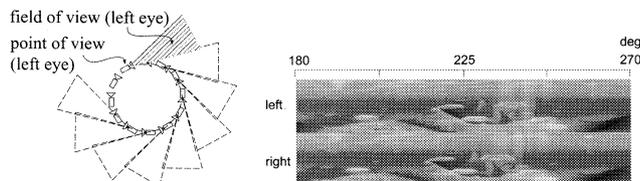


図8 左カメラの視点・視界の方向依存性(左)およびCGで構成したパノラマ画像(右)。

Variety of point of view and field of view of left camera (left) and the panoramic image constructed by CG (right).

4. 性能評価

4.1 カラー動画の提示

全周ステレオの映像ソースをあらかじめ製作し、4系統のDVD Videoに記録して再生した。回転体の回転速度は、安定した画像提示を続けるため、60 rpmとした。以下では、ディスプレイ性能の評価および改善について述べる。

空間解像度

図9左に、人物像を提示したところを示す。全身像でも、顔の表情がある程度読み取れることが確認できる。表1に示すように、現状の解像度は視力換算で0.1であり、CAVEやHMD(0.15~0.17)と比較すると若干低いが、今後、0.2程度まで向上させる計画である。

一方、発光するLEDの輪郭が知覚されることにより、画質が低下したり、画枠効果により立体視性能に悪影響が与えられる現象があったため、対策として、LEDの前に拡散板を配置した。拡散板としては、メンディングテープ(3M社製)を2重に重ねたものをアクリル製5mm角棒に貼り付け、LEDの手前23mmの位置に配置した。これにより、輝度が若干低下するものの、画像が必要以上にぼけることなくLEDの粒も知覚されなくなった。図9右に拡散板の効果を示す。写真では比較のため、下半分のみ拡散板を適用している。ディスプレイユニットを、1枚おきに縦方向にLEDピッチの半分の値だけずらして設置し、LEDの間隙を埋める工夫も行った。

輝度

拡散板を使用しない状態で、輝度は最大で740 cd/m²であり、明るい部屋でも提示に問題がなかった。また、上述の逆γ補正の結果、画像の暗い領域では、偽輪郭が目立った。画像のビット数を上げる、もしくは指数的に輝度を変

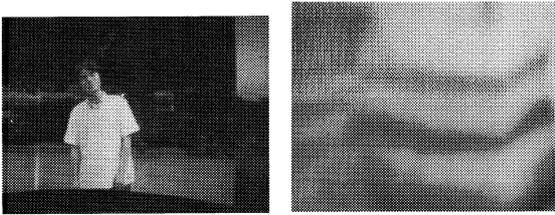


図 9 左は TWISTER III で提示した人物像，右は拡散板使用領域 (下) と未使用領域 (上) の画像

Actual image presented on TWISTER III(= left)/ Diffused (lower) and non-diffused (upper) image(= right).

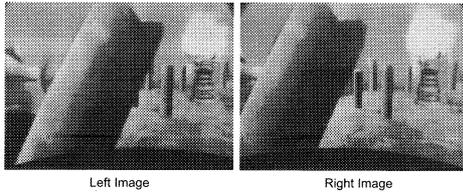


図 10 CG による立体視
Stereoscopic presentation.

化させる量子化を行うなど，今後の改善が必要である。

回転精度

筐体が精密に加工されているため，ディスプレイ面の，円柱の半径方向の時間的な揺らぎは ± 0.25 mm 以下と小さかった。ディスプレイの画素の水平方向，垂直方向の時間的な揺らぎは，安定回転状態ではそれぞれ ± 1 mm， ± 0.5 mm 以下であり，視認上問題にならなかった。

4.2 立体視提示

水平 90 deg 程度の画角で，パノラマでかつ立体視が可能な提示を行うことができた。図 10 は，立体視可能な映像が提示されている状態で，ブース内で実際に左目の位置および右目の位置にカメラを配置して撮影した写真である。背景が手前のオブジェクトに隠れ，視差が提示されていることが分かる。提示時の回転体の回転速度は，毎秒 0.7~1.5 回転とした (ディスプレイユニットが観察者の前を横切る周波数は 20~45Hz である)。これらのいずれの場合にも，フリッカは知覚されたものの，立体視は可能であった。回転体の回転速度と立体視については 5.1 節でも議論する。後述するとおり (図 13)，光が遮蔽された側の視点の照度は，周りからの漏れ光に遮蔽板が照明された明るさ 0.5 lx で，検出限界に近い値であり，クロストークがほとんどないと言える。

4.3 絶対的な奥行き知覚の実験

被験者に実際の指標の奥行きとディスプレイ上に提示された指標の奥行きとを比較させる，恒常法を用いた実験を行った。実際の指標は，TWISTER の外側に透けて見えるように配置した白色の LED を用い，その輝度とサイズとが，ディスプレイ上の指標と同程度になるように輝点の部分をマスクしたり光が拡散するようにした。部屋は暗黒状態にした。この実験で回転体の回転数は， 60 ± 1.8 (rpm) とした。実際の指標は，20 回の連続した試行を通じてその

奥行きを，0.5m，1.0m，1.33m，2m，4m のいずれかに固定して提示し，ディスプレイ上の指標は，ランダムな奥行きで提示する。実際の指標とディスプレイ上の指標とは同じ高さに提示するものとし，被験者の頭部は，あご台を利用して，床から 160cm の高さに固定する。1 シーケンスは順に，1.5 秒間のディスプレイ上の指標，1.0 秒間の暗黒，1.5 秒間の実際の指標，および 2.0 秒間の暗黒とした。被験者の瞳孔間距離をあらかじめ測定し，通常視力，ステレオ視力ともに問題がないことを確認した。ディスプレイ上に提示された指標の想定される奥行きは，式 (1) を用いて計算した。図 11 のグラフは，横軸がディスプレイ上の指標の距離，縦軸が実際の指標の距離を，ともに輻輳角が線形になるようにとってある。プロットは，五人の被験者についてのもので，ディスプレイ上の指標が奥にあると判断された場合と，手前にあると判断された場合とで色を変えている。プロットは，明確に奥か手前か分からない場合は省略し，同じ場所に重ならないように，適宜若干量を垂直方向にずらして表示する。プロットを重ねて，ディスプレイ上の指標が奥に提示されているという判断が 50% になる PSE (主観的等価点)，および同判断が 25% から 75% になる範囲を示す。さらに，PSE に対する回帰直線を追加した。0.5m から 3m の範囲 (面談コミュニケーションで想定される奥行きでもある) では，奥行き知覚はディスプレイ上の指標によって提示される奥行きの (意図した) 値と線形な関係を持っており，物体の前後関係を正しく表現できることが確認できる。

本実験では，拡散板を用いており，LED の粒が知覚されることによる画枠効果の悪影響は少ない。また，画素ピッチ以下の表示を行っていないので，空間解像度が充分でないという可能性も少ないと考えられる。このことから，奥行き知覚におけるシフトは，輻輳調節矛盾が最大の原因として考えられる。Donders の輻輳線として知られる輻輳・調節の関係¹²⁾によると，調節が 1.25 D (0.8 m に相当) に固定されているとき，輻輳反応の可能な範囲は 0.3 MW (3 m に相当) から 5 MW (0.2 m に相当) である。奥行き知覚のシフトは，TWISTER の半径である 0.8m より遠くは近くに，近くは遠くに知覚されるように起こっており，そのシフト量は輻輳角にして 20% 程度である。

4.4 輻輳性融像の限界

どの程度の奥行きの物体であれば輻輳により融像するかを，その物体内の相対的な奥行きが判断できるかどうかを見ることにより調査する実験を行った。この実験では，回転体の回転速度を毎秒 1 回転とし，五人の被験者に対して各々 50 回ずつ，22.5 min/arc の視差を持つ円と (その周りに配置された) 円環のパターンを 5cm から無限遠までの意図した距離に提示した。この視差は，画素以下の提示をしない場合に表示可能な最小の視差であり，静止物体を指標とした実験で，注視点付近でヒトが両眼からの情報を単一像として処理できる最大の両眼視差範囲 (約 15~20 分)¹⁵⁾ に

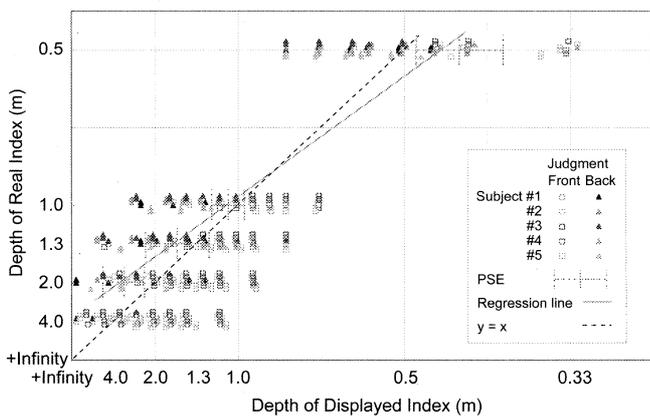


図 11 奥行き知覚の実験
Depth Perception Experiment.

近い値である。指標の提示距離を 0~12 cm, 12~50 cm, 50 cm ~ 1.33 m, 1.33 m~∞ に分類し、中央の円が円環より手前に提示された場合と、奥に提示された場合とで正答率および両側 2 項検定の p 値を求めた。この結果、12 cm から無限遠までの範囲において、両側 2 項検定の p 値が $p < 0.001$ 以下の有意水準で円と円環の前後関係が判別可能であることが確認された。この範囲で輻輳性融像が可能であることが確認された。

5. 考察

5.1 回転体の回転速度

回転速度は速い方が望ましいが、装置や部材の強度の問題があり、とくに回転による加速度が回転速度の 2 乗に比例するため、120rpm 程度が上限である。一方で、速い回転速度を要求する要因はいくつかあり、この章ではそれらについて議論を行う。

フリッカおよび時間解像度

TWISTER III では、30 本のディスプレイユニットを使用するので、臨界フリッカ周波数としてよく利用される 60Hz¹⁶⁾ の条件を満たすには、120 rpm の回転速度が必要である。フリッカ周波数はディスプレイユニットの本数および回転速度に比例する。毎秒 30 コマのプログレッシブ提示を行うため、NTSC ソースは、各フレームについて先頭フィールドのみを利用した。また後述のように、撮像時と提示時の時空間サンプリングパターンの違いから画像の割れや偽の動きが発生することがあった。

サーキュラーベクション

回転するドラムの内側に立った被験者は、自分自身が反対方向に回転しているかのように感じるサーキュラーベクションでは、回転速度が低い (0.3~20 rpm) 場合、ドラムの回転速度とサーキュラーベクションにより誘発され知覚されるスピードとの間には、線形な関係が存在する¹⁷⁾。TWISTER III の 60~90(rpm) という回転速度においては、この影響は避けられるが、体験者の中には、ディスプレイ部の回転と同じ方向に頭部を回転させた場合や、目を動かした場合

に、酔いを感じたと訴える者もいた。

サッケード

回転速度がサッケードの最大角速度と等しい場合、LED アレイは網膜上で静止しているように観察される。サッケードの最大角速度は 500~600 deg/s であり、83~100 rpm に相当する。TWISTER III の回転速度 (60~90 rpm) は、この領域に該当している。サッケードの最大角速度よりも充分早い回転を行った場合には、この現象は避けられると考えられるが、実際にはサッケード抑制などが働くことも予想されるため、どの程度まで回転数を上げれば充分かは、今後の検討が必要である。頭部の回転による見回し時にも、同様に LED の残像が正しく網膜に残らない現象が起こった。これは静止画提示時にも動画提示にも見られる現象であった。

時空間サンプリングパターン

TWISTER は、表示素子の LED が回転しているため、画像の全ての画素が同一時刻に取得されたものであるような動画像 (以下、フィルム画像と呼ぶ) が入力された場合、実際には物体が存在しない部分に物体が表示されたり、その逆が起こる可能性がある。この現象は、TWISTER のように回転しているディスプレイに特有のものである。TWISTER III では、毎フレームの最初に LED が回転しながら点灯すべきパターンがプログラムされ、このパターンが、1/30 秒の間に 12 deg 回転しながら表示される。図 12 左はこの状況を示したものであり、空間の x 軸 (水平方向。正確には回転角 θ に対応する)、 y 軸 (垂直方向) および時間で張られる 3 次元情報空間の、空間 y 軸のある高さにおける断面で、横軸が空間 x 軸、縦軸が時間となっている。Frame 0, 1, 2 は、1/30 秒間隔の離散的な時刻を示している。水色で示す物体が画面右から左に移動する場合、この情報はフィルムには、時空間内で濃い青で示される箇所記録される。一方、LED は画面右から左に走査しており、その点灯は、Frame 0, 1, 2 といった離散的な時刻だけではなく、その間の連続的な時刻においても行われている。図では、LED の走査は、物体の動きよりも速いものとし、より水平に寝たラインで示されている。この LED により、情報が提示される時空間内の位置は図中赤く示される箇所となり、もとの物体の軌跡とは外れることが読取れる。映像がもともと意図されていない部分に表示されるため、ジッターや偽の動きが発生したり、時にはもとの画像が分割されて提示されることもありえる。

この現象を回避する手段としては、図右に示すように、LED の動きに正確に沿うような軌道上で画像情報を取得し、LED の回転を逆算して、その点灯区間が必ず実際の物体の軌跡と一致するように提示するという方法が挙げられる。このように、TWISTER では、通常のフィルムとは異なった時空間サンプリングパターンを採用する必要がある。この現象は、画像中の物体のもつ速度が、回転体の回転速度の何倍であるかに依存して発生し、回転体の回転速

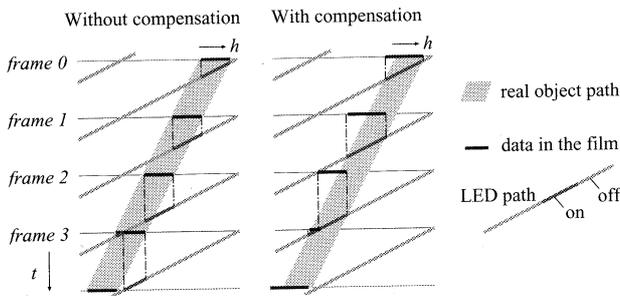


図 12 時空間サンプリングパターン
Spatio-temporal sampling.

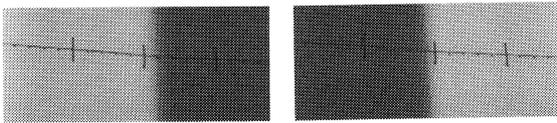


図 13 右のみ、左のみの LED アレイで照射した場合の実際のバリアの影のパターン
The actual shadow pattern of the barrier when illuminated by only right and left LED arrays.

度が遅く、物体の速度が大きい場合に問題になる。

5.2 頭部位置の選択自由度

頭部の運動（並進運動および回転運動）が、観察される画像におよぼす影響について解析を行う。

画像の分離

設計パラメータとして、2本のLEDアレイ間の距離とパララクスバリアの幅とがある。より正確には、LEDは幅を持っているため、図1における領域Lは、領域Rと隣接せず、左右のLEDアレイからの光がともに見える緩衝領域が存在する。図13に、TWISTERの中央に置かれたスクリーンの写真を示す。写真は、左のLEDアレイだけで照射された状態（左）および、右のLEDアレイだけで照射された状態（右）のもので、10mm間隔の目盛りを添えている。この計測結果から緩衝領域の幅は、20mm程度であると見積もられる。

頭部の並進運動

図14は、上述の緩衝領域を考慮し、いくつかの画角を想定した際に立体視が可能な頭部の存在範囲（以下、適視領域と呼ぶ）を、頭部の並進運動に対してプロットしたものである。プロットは、ひし形をしており、その対角線の長さは単純な幾何計算により次のように見積もられる。

$$a = i/2 - z/(2 \sin \phi) \quad (4)$$

$$b = i/(2 \tan \phi) - z/(2 \sin \phi) \quad (5)$$

ここで、 i は、瞳孔間距離、 z は上述の緩衝領域の幅、 ϕ は観察物体の方向を示す角である。 ϕ の最大値、すなわち立体視の水平画角は、

$$\phi_{max} = \cos^{-1}(z/i) \quad (6)$$

と計算される。この値は、 $z = 20\text{mm}$ のとき、平均的な瞳孔間距離の65mmに対しては72 degである。このとき、

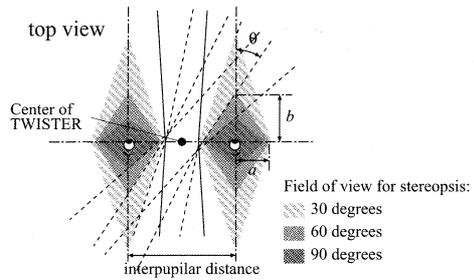


図 14 いくつかの立体視の画角に対する適視領域
Observable eye positions for a certain stereoscopic FOV.

トータルの立体視が可能な画角は144 degとなる。現実的には、20mm程度の並進移動自由度を前後左右に確保するためには、水平画角は90 deg程度となる。 z が最小になるようにパララクスバリアの幅を決定することも重要である。

頭部の回転運動

前章の例では、緩衝領域がもっとも狭くなる位置が、TWISTERの中心にあることを前提とした。しかし、頭部の回転運動を考慮すると、これは必ずしも最適な設計ではない。図15は、頭部の回転にともなう立体視可能領域がどう変化するかを示している。左は、緩衝領域がもっとも狭くなる位置が、TWISTERの中心にある場合、右はこの位置が、TWISTERの中心から離れている場合である。両眼の中心が頭部回転の中心とは一致しないため、前者では頭部の回転可能角が片側に約15 deg程度を超えると、瞳孔が適視領域から外れる。これに対して、後者では適視領域は小さくなるが、同時に頭部の回転可能角は片側で30 degにのぼる。実際の設計は、このトレードオフの間で後者により近い状態としている。

実用上は、適視領域の問題はそれほど深刻ではない。片方の眼が一時的に適視領域を外れた場合でも、もう一方の眼は必ず上述の緩衝領域に位置する。緩衝領域の輝度は比較的高く、領域の境界を知覚することができるため、観察者は容易に適視領域を見つけられる。

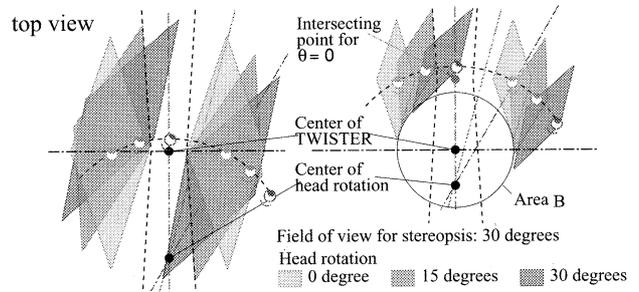


図 15 頭部の回転運動と適視領域
Observable eye position for head rotations.

6. むすび

回転パララクスバリア方式を用いた全周囲ステレオディスプレイ

プレイとして、はじめて動画提示を可能とした TWISTER III の設計、実装、評価について述べた。

没入感: 水平 90 deg 程度の画角で、パノラマかつ高輝度な (740 cd/m²) ステレオ映像を提示した

裸眼立体視: クロストークのほとんどない (遮蔽側の照度が 0.5 lx) 立体視を実現した。0.5~3m の距離での絶対的な奥行き提示において、知覚される距離が意図した距離と輻輳角が線形になる関係をもっており、物体の前後関係を正しく表現できることを確認した。また、観察者から 12 cm 以上離れた物体を、輻輳によって融像できることを確認した。

動画像の提示: 毎秒 30 フレームで、RGB 8 ビット階調のカラー画像を、左右それぞれの目に対して 1920×256 画素の空間解像度で提示した。

全周囲ステレオ: 全周囲にわたって近似的にステレオ表示をすることができるような画像の生成と提示方法の有効性を確認し、実写静止画像で妥当性を確認したのち CG 動画像の提示を行った。

回転ディスプレイ特有の時空間サンプリングパターンや、適視領域の最大化などについても議論した。

今後の課題として、空間解像度の向上、回転速度の向上および回転体の半径拡大が考えられるほか、全周囲を動画像で取得するシステムについても取組む予定である。

最後に、本研究は独立行政法人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】

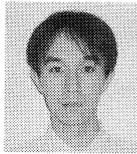
- 1) Susumu Tachi, Taro Maeda, Yasuyuki Yanagida, Masaaki Koyanagi, and Hiroki Yokoyama. A Method of Mutual Tele-Existence in a Virtual Environment. In *Proceedings of ICAT 96*, pp. 9-18 (1996)
- 2) Ivan E. Sutherland. A head-mounted three dimensional display. In *Proceedings of the 1968 Fall Joint Conference; AFIPS Conference Proceedings*, Vol. 33, pp. 757-764 (1968)
- 3) Carolina Cruz-Neira, Daniel J. Sandin, and Thomas A. DeFanti. Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE. In *Proceedings of SIGGRAPH 1993*, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pp. 135-142. ACM, ACM Press / ACM SIGGRAPH (1993)
- 4) Ken Perlin, Salvatore Paxia, and Joel S. Kollin. An Autostereoscopic Display. In *Proceedings of SIGGRAPH 2000*, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pp. 319-326. ACM, ACM Press / ACM SIGGRAPH (2000)
- 5) Daniel J. Sandin, Todd Margolis, Greg Dawe, Jason Leigh, and Thomas A. DeFanti. The Varrier Auto-Stereographic Display. In *Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems VIII, Proceedings of the SPIE*, Vol. 4297, pp. 204-211 (2001)
- 6) Tomohiko Hattori, Shigeru Omori, Kunimasa Katayama, and Sayayuki Sakuma. Stereoscopic Liquid Crystal Display. In *TAO First International Symposium on Three Dimensional Image Communication Technologies*, pp. S-5-4-1 to -7 (Dec. 1993)
- 7) Goro Hamagishi, Masahiro Sakata, Atsuhiko Yamashita, Ken Mashitani, Eiji Nakayama, Shun-Ichi Kishimoto, and K. Kanatani. Stereoscopic LC Displays without Special Glasses. In *SID95 Applications Digest*, pp. 75-78 (1995)
- 8) Jesse Eichenlaub. Multiperspective Look-around Autostereoscopic Projection Display using an ICFLCD. In John O. Merritt, Mark T. Bolas, and Scott S. Fisher, editors, *Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems VI, Proceedings of the SPIE*, Vol. 3639, pp. 110-121 (1999)
- 9) Fumio Okano, Haruo Hoshino, Jun Arai, and Ichiro Yuyama. Real-time Pickup Method for a Three-dimensional Image based on Integral Photography. *Applied Optics*, 36, 7, pp. 1598-1603 (1997)

- 10) 國田豊, 尾川順子, 佐久間敏士, 稲見昌彦, 前田太郎, 館 暉. 没入型裸眼立体ディスプレイ TWISTER I の設計と試作. *映像学誌*, 55, 5 (2001)
- 11) Yutaka Kunita, Naoko Ogawa, Atsushi Sakuma, Masahiko Inami, Taro Maeda, and Susumu Tachi. Immersive Autostereoscopic Display for Mutual Teleexistence: TWISTER I (Teleexistence Wide-angle Immersive STEReoscope model I). In *Proceedings of IEEE VR 2001*, pp. 31-36 (2001)
- 12) 日本応用物理学会光学懇話会. 生理光学 - 眼の光学と視覚 -. 朝倉書店, (1975).
- 13) A. Terry Bahill, Deborah Adler, and Lawrence Stark. Most naturally occurring human saccades have magnitudes of 15 degrees or less. In *Investigation of Ophthalmology*, 14, pp. 468-469 (1975)
- 14) Heung-Yeung Shum and Li-Wei He. Rendering with concentric mosaics. In *Proceedings of SIGGRAPH 1999*, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pp. 299-306. ACM, ACM Press / ACM SIGGRAPH (1999)
- 15) 元木紀雄, 矢野澄男 (編). 3 次元画像と人間の科学. オーム社出版局, (2000). 原島 博 監修.
- 16) 松田隆夫. 視知覚. 培風館 (1995)
- 17) Bernd De Graaf, Alexander H. Wertheim, Willem Bles, and Jan Kremers. Angular velocity, not temporal frequency determines circular vection. In *Vision Research*, 30, pp. 637-646 (1990)



たなか けんじ

田中 健司 1997 年, 東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年, ソニー株式会社に入社。現在に至る。2004 年, 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。博士 (工学)。テレレジスタンスに関する研究に従事。



はやし じゅんや

林 淳哉 2003 年, 東京大学大学院情報理工学系研究科修士課程修了。同年同大学院工学系研究科博士課程に進学, 現在に至る。テレレジスタンスに関する研究に従事。



かわぶち いちろう

川瀬 一郎 1999 年, 東京工業大学工学部機械工学科博士課程修了。工学博士。(株) テック・エキスパート社員。2001~2003 年, 科学技術事業団 CREST 研究員。主に遠隔操作型ヒューマノイドロボットの研究に従事。



いなみ まさひこ

稲見 昌彦 1999 年, 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。博士 (工学)。東京大学国際・産学共同研究センターリサーチ・アソシエイト, 東京大学大学院情報理工学系研究科助手を経て, 2003 年, 電気通信大学知能機械工学科講師, 現在に至る。オーグメンテッドリアリティおよびテレレジスタンスの研究に従事。正会員。



たち すずむ

館 暉 1973 年, 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。工学博士。同年東京大学工学部助手, 機械技術研究所等を経て, 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, 東京大学工学部教授, 2001 年, 同大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻教授。現在に至る。信号処理, 盲導犬ロボット, テレレジスタンス等に関する研究に従事。