

実世界情報システムプロジェクト～バーチャルリアリティ研究グループ～  
**空間型相互トレイグジスタンスルームの構築**

舘 暲 川上直樹  
情報理工学系研究科システム情報学専攻

## 概要

実世界と計算機内の情報世界の高度な融合を実現する画像提示技術として、没入型裸眼立体ディスプレイとして TWISTER を開発している。本稿では、従来機の解像度やリフレッシュレートなどの問題を改善することで TWISTER 提示映像の高品位化をはかった。

## 1 はじめに

近年の情報技術の発展に伴い、たとえ互いに遠く離れていても、あたかも時間と空間を共有するかのように出会ったり、会話したりといったコミュニケーションを可能にする「相互トレイグジスタンス」技術の実現の必要性が高まっている。我々は「空間型相互トレイグジスタンス」の実現のためのシステム構築として TWISTER (Telexistence Wide-angle Immersive STEREOSCOPE) の開発を進めてきた。本年度、その最新版である TWISTER V を設計・製作した。システムの概略に関しては本研究グループの別項「全周囲裸眼立体提示システムの研究」にて論じる。本稿では、TWISTER の設計について論じる。

## 2 全周型立体ディスプレイ

### 2.1 TWISTER の概略

我々は円筒型ブース型のディスプレイとして TWISTER を試作 1 から 4 号機 (TWISTER I-IV) を開発し、三次元映像の提示を実現している。TWISTER の三次元映像提示においては、我々の提案する「回転型パララクスバリア」と呼ばれる手法を採用している。この手法により (1) 水平方向 360 度の領域に映像を提示 (2) 裸眼立体視可能、という 2 つの技術的特長を同時に満たす新規なディスプレイを構成する。裸眼と広画角を同時に満たすことで、コミュニケーションにおいて、非常に高い臨場感を提示できるディスプレイとなった。また

TWISTER IV をベースとし特に実用機としての安定性と安全性を目指した、TWISTER V を作成した。本稿ではこれらの設計について詳細を記す。

### 2.2 設計

#### 2.2.1 解像度と入力フォーマット

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。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。画素を正方ピクセルとすると、ディスプレイ面までの半径が 1000mm であり、ディスプレイ面の全周は約 6283mm となることから、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。

入力フォーマットに関しては検討の結果、全周片目映像を UXGA (1600x1200) 1 枚によって提示 (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) 方式とした。

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

#### 2.2.2 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、輝度の間にはトレードオフの関係があるため、これらのパラメータは以下の制約条件の下、決定した。

- 回転速度の 2 乗に比例した遠心力がかかる

が、遠心力は安全面などにおいてリスクであるため回転速度はできる限り小さくする

- 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くする
- 人間の目のサッカード速度が約 500deg/sec であるため、この速度よりも速い速度で回転させる

以上を条件をグラフに表したのが、図 1 である。

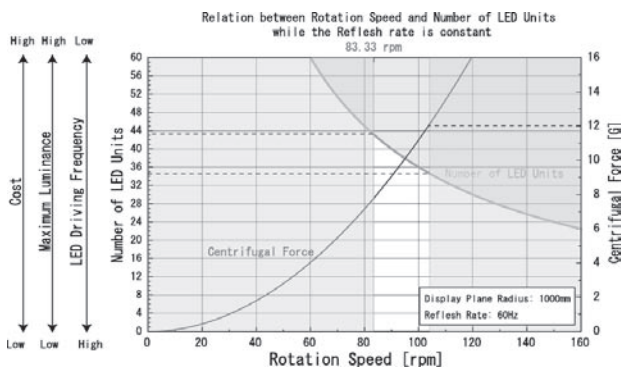


図 1 提示ユニット数と回転速度の関係

サッカード速度の 500deg/sec (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として提示ユニットの数を 36 個 (36=2x2x3x3) 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。

### 2.2.3 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、 $E = kL^\gamma$  で近似される。このとき、べき関数の指数部に現れる数を  $\gamma$  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  $\gamma$  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  $\gamma$  は 1.0 である。

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 2)

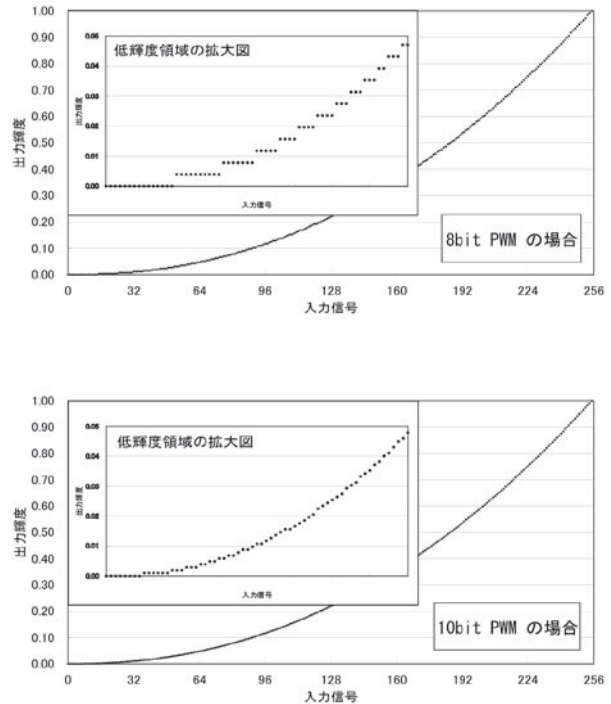


図 2 輝度変換のシミュレーション  
(上: PWM8bit 階調, 下: PWM10bit 階調)

シミュレーションの結果から 8bit 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分かる。人間の目に感じられる明るさは実際の輝度の対数にほぼ比例し、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 10bit 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。

### 2.2.4 伝送部

前述のとおり 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、規格上標準で 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、ノイズが生じやすい。

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。

#### 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

#### 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

#### 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 12ch 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。

### 2. 3 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、外部操作端末の各観点から述べる。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。

#### 2. 3. 1 機構部

TWISTER IV および TWISTER V の全体像を図 3 に示す。以下、各部について説明する。

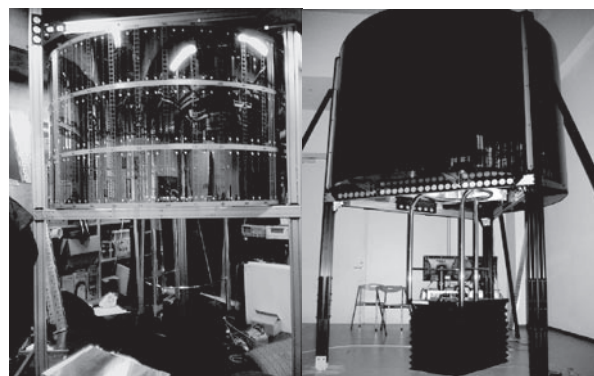


図 3 TWISTER IV (左図) と TWISTER V (右図)

#### 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に十分な高さがあったため、支柱 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。

#### 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。

#### 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。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慮し、半透明のポリカーボネートで筐体を覆っている。

## 提示システム

提示システムのシステム構成を図4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 2ch 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。

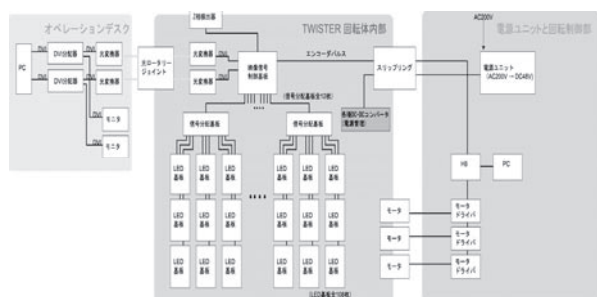


図4 提示システムの構成

## 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。

## 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。(1)DVI 信号のデコード、(2)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、(3)入力信号の輝度を $\gamma$ 補正し、10 ビットの輝度信号に変換、(4)各映像分配基板に、変換した映像信号を伝送、(5)エンコーダパルスと Z 相を基に 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。また、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。

## 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できる、外部トリガ機能付きのカメラを用いた。

## 3. まとめ

本論文では、TWISTER の新しい試作機である TWISTER IV・V 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、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。
- リフレッシュレートの 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
- 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 2ch (片目全周で UXGA1ch) となり、コンテンツ制作のハードルが低くなった。

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。

## 参考文献

- [1] Susumu Tachi(Ed.): Telecommunication, Tele-immersion and Telexistence, ISBN 4-274-90586-1 Ohmsha(2003)