

## 裸眼立体ディスプレイとバーチャルリアリティー

館 障

### Auto-Stereoscopic Display for Virtual Reality

Susumu TACHI

Auto-stereoscopic display plays an important role in virtual reality (VR). It is not only comfortable for a user to experience VR without using any eyewear like shutter glasses, but also it is inevitable to use auto-stereoscopic display for communication purposes because the real time facial expression is essential for natural communication. TWISTER (Telexistence Wide-angle Immersive STEReoscope) is a cylindrical display with LED arrays and movable parallax barriers, which enables a user inside it to see 360 degree full-color stereoscopic image in real time without using any eyewear. Moreover, since omni-directional image of the user can be captured without hindering the user's view, mutual telexistence communication becomes possible using TWISTERS as communication booths.

**Key words:** virtual reality, telexistence, TWISTER, auto-stereoscopy, movable parallax barrier

バーチャルリアリティー (VR: virtual reality) の最も特徴的な点は、コンピューターの生成した環境や遠く離れた環境であっても、(1) 自分の周りに自然な三次元空間を構成しており、(2) 自分がその中で、実時間の相互作用をしながら自由に行動でき、(3) 使用している自分と環境とがシームレスになっていて、自分が環境に入り込んだ状態が作られているということである。これらはそれぞれ、「三次元の空間性」「実時間の相互作用性」「自己投射性(没入性)」とよばれ、VRの三要素をなし、これら三要素すべてを兼ね備えたものが理想的なVRシステムである<sup>1)</sup>。すなわち、バーチャルリアリティーとは、これらの三要素を有したシステムを構成することにより、人間が現前の実環境を利用しているのと本質的に同等な状態で、コンピューターの生成した人工環境や遠隔環境を利用することを可能とする技術といえる。なおちなみに、「バーチャル」とは、「みかけは違っても本質的に同等」という意味である。

頭部搭載型ディスプレイであるHMD(head mounted display)をはじめ、さまざまな方式の立体ディスプレイ

がVRのために開発されてきたが、専用の顔面に装着する機器、いわゆる「メガネ」が必要であるか、「メガネ」が必要ない場合には、限られた視野の映像しか呈示することができなかった。CAVE(CAVE automatic virtual environment)など、専用メガネとプロジェクターを用いて全周囲の映像を呈示する装置を用いるIPT(immersive projection technology)すなわち、没入型投影技術は、比較的高品位かつ広視野の全周囲立体映像を呈示することを可能とするすぐれた方式であるが、映像を投影するために非常に大きなスペースが必要であるのに加え、裸眼では使えない。一方、従来の裸眼のディスプレイでは、全周囲360度を覆うものは開発されておらず、したがって、没入感をもたせることはできなかった。

また、将来、立体テレビ電話等のコミュニケーションへの応用を指向する場合、立体映像の呈示と同時に話者を撮影するための設備が必要となるわけであるが、撮影用のカメラが呈示装置と重なり、特に正面の視線での撮影は困難を極める。さらに、専用の立体メガネにより話者の表情が隠れてしまうという問題点もあった。すなわち、例えば、

東京大学大学院情報理工学系研究科(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1) E-mail: tachi@star.t.u-tokyo.ac.jp

従来の呈示方式である CAVE を利用して臨場感のある通信をしようとする、CAVE では本質的にシャッター方式あるいは偏光方式の特殊なメガネが必要となるため、特殊なメガネをした顔の相手あるいは合成した人工顔の相手とコミュニケーションすることになってしまう。また、カメラを設置すると、その部分には映像が呈示できなくなる。特に、正面に撮像装置がくると明らかに視界の妨げとなる。

したがって、臨場感通信など VR のコミュニケーションや協調作業への応用のためには、次に示す従来からの 2 つの問題点の解決が緊要であった。

- ・立体映像を見るために顔面に装着する機器が必要であると、使用者の表情を隠してしまい、人対人の対面コミュニケーションの質が大きく低下すること。

- ・双方向のコミュニケーションを行う際、使用者の映像を撮影する機構を呈示装置の前面に置くと相互に干渉しあい、撮影と呈示が同時に行えないこと。

筆者らは、これらを解決する方法として「回転型パララクスバリア」を用いた立体映像呈示 TWISTER を提案している<sup>2-12)</sup>。TWISTER は、Telexistence Wide-angle Immersive STEReoscope の略で「ツイスター」と読む。1995 年の秋から研究を進めてきたが、2002 年に、専用のメガネを用いることなく全周囲の立体映像を観察することができる新原理のディスプレイシステムとして開発に成功した。その成果は、米国テキサス州サン・アントニオ市で開催された SIGGRAPH2002 で展示され、世界中から集まった約 3000 の人に体験され好評を博した。

本解説では、円筒の中に人が入り込み 360 度全周方向に裸眼で立体映像が観察可能な TWISTER システムを紹介するとともに、裸眼立体視がバーチャルリアリティーの世界にもたらす効果について解説する。

## 1. TWISTER

電話、テレビ電話と続いてきた遠隔実時間コミュニケーションシステムの延長として、より高度なコミュニケーションシステムの実用化が期待されている。筆者らは、三次元視覚情報を呈示・取得するデバイスの開発によって、遠隔地にいる人間どうしが共通の VR 空間を共有して高度なコミュニケーションを行うシステムの実現を目指している。このようなシステムとして、円筒ブース型のデバイスである TWISTER を開発し、三次元映像の呈示と、全周からのユーザー映像取得を研究してきた。図 1 に、その概念を示す。TWISTER に入った人どうしが、あたかも一堂に会したかのように集うことができる。会場は、コンピ

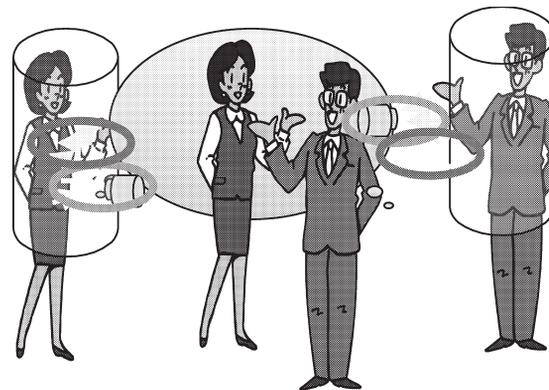


図 1 TWISTER を用いた相互テレプレゼンスの概念。

ューターの生成した三次元 CG 環境でも、立体的に撮影された実際の環境でもよい。互いの位置関係も考慮したお互いの人の三次元映像が、環境の中に立体的に観察され、自然なコミュニケーションができる。

TWISTER の三次元映像呈示においては、筆者の研究室で提案された「可動パララクスバリア」とよばれる手法を採用している。この手法は、以下の三要素を兼ね備えている点が大きな特徴である。

- (1) ユーザーの視野をほぼ覆いつくす平面方向 360 度の領域に映像を呈示
- (2) 特殊な装置を顔面に装着しなくても、使用者は裸眼で立体映像を観察できる
- (3) 任意の角度からの使用者の映像を、使用者の視界を妨げることなく撮影できる

(1) か (2) の一方の条件を満たした立体ディスプレイは存在するが、両方を兼ね備えた立体ディスプレイは他に例をみない。ユーザーの表情を隠蔽しない TWISTER は、コミュニケーションにおいて重要な役割を果たすノンバーバルな情報のやり取りを可能にする点で、高度コミュニケーションシステムの構築に適しているといえる。

実際の成果としては、1996 年に原理を提案し<sup>2)</sup>、2001 年に TWISTER II<sup>6)</sup>、2002 年に TWISTER III を設計、製作した<sup>7)</sup>。TWISTER II では、これまで「可動パララクスバリア」の原理検証にとどまっていた TWISTER I<sup>3,5)</sup> を大幅に改良し、フルカラーの静止立体画像を呈示した。さらに TWISTER III では、フルカラー動画をリアルタイムに呈示し、また TWISTER 特有の呈示映像生成法を提案し実装した。

(3) を満たす映像取得に関しては、呈示系と干渉しない形で撮像系を実装する。TWISTER の呈示系は高々数十本の LED アレイが疎に存在するだけであるため、この目標は実現されやすい。具体的には、呈示系とともに複数台

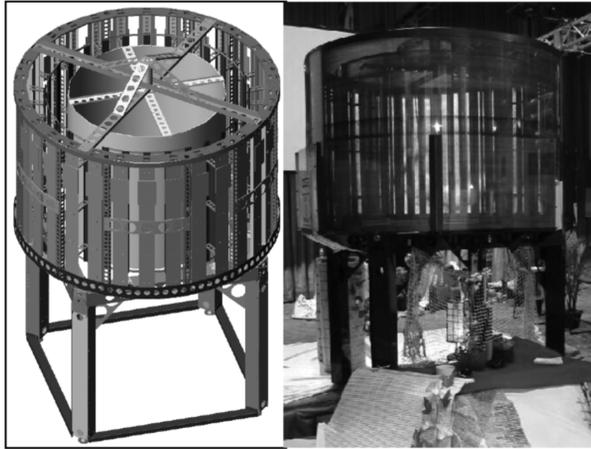


図2 TWISTER III の概観。

のカメラをユーザーの周りで回転させる方法と、デバイスの回転速度をカメラのビデオレートと同期させて呈示系のLEDアレイの間隙からユーザーを撮影する方法がある。前者は、撮像装置も回転しており、回転を早くすれば見えなくなる人間の視覚特性を利用している。ただし、回転体の中で膨大な映像情報を処理しなければならないが、ユーザーを囲む円周上の任意の視点から回転体内部を見た映像を高い分解能で得ることができる<sup>4,9)</sup>。後者については、呈示系の外部に配置するカメラを可動にし、かつ呈示系の回転周期と同期をとることで実現するものである。

システムの詳細をTWISTERT IIIで説明する<sup>10,11)</sup>。図2に示すように、筐体は、スタンド部と回転部から構成される。スタンド部は、上の回転部を4本の足によって支持し、各足の上部に備え付けられたローラーによって回転部を回転させている。また、回転部はおもに、30組の呈示ユニット(LED基板とパララクスバリア)と制御基板や電源等の電装系、それらを支持する機構部材からなる。LED基板とパララクスバリアはそれぞれ、回転中心から800 mm、600 mmの円周上に等間隔に配置されている。また、回転部への電力供給と信号伝達は、スタンド部に直結したアクリル防護壁と回転体をスリップリングで接続して行った。LED基板は、縦128ピクセルのLED基板を2枚連結した縦256ピクセルのLED基板を使用している。また、LED基板の前面にはパララクスバリアが配されている。

可動パララクスバリア方式では、パララクスバリア方式における裸眼立体視という長所を保ったまま、LEDの走査・残像効果によって空間解像度を上げることができる。また、観察者の周りでLEDアレイを回転させるため、人間にとっては360度の連続な呈示が可能となり、観察者は



図3 TWISTER IIIを用いた画像呈示(上)とコミュニケーションの例(下)。

高い没入感を得ることができる。試作と検討の結果、良好な立体視を行うには呈示面までの距離が1 m以上必要である(本機は80 cm)、回転速度が500 deg/s以下であると、人間の眼球運動のひとつであるサッカードの影響が生じ画像が乱れて観察されるため、500 deg/s以上の回転速度(本機は360 deg/s)が必要である、等試作によって数多くの設計上の指針がはじめて明らかとなった。図3に、実際に呈示されている画像と、実際に観察者が中に入ってコミュニケーションをしている様子を示す。

TWISTER IIIを用いた各種実験・検討で得られた新たな知見をもとに、さらなる高解像度化を測った試作4号機(TWISTER IV)を試作した。図4に概観を示す。本機では先に挙げた問題点を改善するため、呈示面の半径を1 mに広げ大型化を図り、画像の安定性を増すため回転速度を720 deg/s(秒速2回転)まで可能とした。また、呈示部の部品の見直しにより、解像度を水平約1.7倍、垂直約2.3倍に向上させた。また、より滑らかな映像を呈示するため、フレームレートを60 fpsに、階調を8 bitから10 bitに向上させた。さらに、撮像系を搭載することで、同時に呈示と撮影を可能とした。撮像情報と呈示情報は、光信号に変換され、光ロータリージョイントによって回転接続されており、呈示機能にはDVI、撮像機能にはIEEE1394



図4 TWISTER IVの概観。

を用い、5.94 Gbps という広帯域のデータ伝送が可能となっている。

レンダリングについては、VR空間の物体の描画において物体を正面方向に見据えた使用者の視点位置を仮定し、物体の存在位置に応じて仮定する視点位置を連続的に移動させながら描画する手法を用いている。

なお、CGの空間ではなく、遠隔の実世界を実時間で呈示するには、全周囲のステレオ映像を実時間で取得する必要がある。これについては、TORNADOとよぶシステムを研究開発中である<sup>12)</sup>。

## 2. 可動パララクスバリア

可動パララクス式の原理は、図5に示すように、左右眼用の光源列がそれぞれ一方の眼にしか入らないように、光源列より少し手前にバリアを設け、これを1つのユニットとして観察者の周りを回転走査させることでメガネなしの立体視を実現させるものである。このシステムの原理は、人間の眼の特性を巧みに利用しているところにある。1秒に1.4回転以上の高速に回転することで、パララクスバリアが人間の眼には見えなくなる。しかし、見えなくてもパララクスバリアの遮蔽効果は残るので、左右の目に視差のある映像を呈示し続けることで、ユーザーに立体映像を認識させることができる。

ディスプレイとしては、左右眼用の多数のフルカラーLEDを短冊状の基板にそれぞれ縦に密に並べて、その短冊とパララクスバリアを円筒に沿って複数個配置し、その円筒をモーターで回転させる。回転円筒状のLEDを、呈示したい映像がその位置にきたときに、見せたいパターンで点灯する。それが人間の感覚で統合されることにより、360度でのフルカラー立体映像が再生可能となる。テレビ

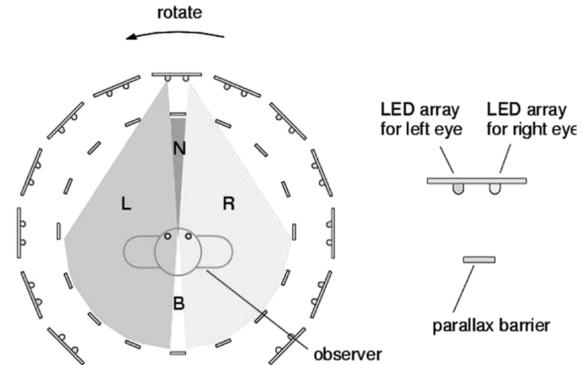


図5 可動パララクスバリア方式の原理。

ジョンでも走査線が走っているが、人間には平面の映像として見えるのと似ているが、本装置では立体的にしかも全周囲の映像の視聴ができる。

加えて、LEDの短冊状の隙間や遮蔽版上に、多数のカメラを円筒の内向きに配置できる。カメラも高速に回転していることで、人間にはカメラも見えない。もちろん、人間の視線の高さで真正面にきても人間の眼には見えない。しかし、カメラは、適当なタイミングで人間の任意の角度からの映像を撮影できる。これも、可動式パララクスバリアに付随する大切な効果である。

## 3. 裸眼立体ディスプレイのVRにもたらす効果

VRには大別して、(1) コンピューターの生成したCG環境を呈示する、(2) 遠隔の実環境を呈示する、(3) 現前の実環境にCG環境を重ねて呈示する、(4) 遠隔の実環境にCG環境を重ねて呈示する、の4種類があり、それぞれ、狭義のVR、狭義のトレイグジスタンス、拡張現実(AR: augmented reality)、拡張型トレイグジスタンスとよばれている。

これまでも繰り返し述べてきたように、裸眼でないと大きな障害となるのは、コミュニケーションや協同作業などを目的とした場合であり、VRシステムを利用している人の特殊なメガネなしの顔を実時間で必要とする場合である。これは、トレイグジスタンスで特に必要とされる。

一見、使用している本人のみが没入感や臨場感をもってCG環境で行動する際には、必ずしも裸眼である必要はないと考えられがちであるが、実は、VRが研究されはじめかなりの年月が経つにもかかわらず、いまだにキラーアプリが生まれていない大きな原因のひとつに、裸眼でVRを体験できないことがあるのではないかと筆者には思われる。やはり、特殊なメガネをかけることへの心理的な抵抗は、思ったより大きいのである。

しかし、残念ながら、現在の裸眼ディスプレイは全周を呈示して没入感を出すことができないものが大半であり、厳密な意味でのVRには使用できない。裸眼立体ディスプレイであって、なおかつは没入感を生むようなディスプレイが進展することが、今後のVRにとって大きなブレークスルーとなるであろう。

可動パララクスバリアを立体映像呈示に用いることで、裸眼のユーザーに対して視野全体を覆う立体映像を呈示するとともに、回転することにより、映像呈示を妨げることなく、ユーザーを全周囲から撮影することが可能となる。利用者は円筒の中央部に入り、透明アクリル製の防護壁を介して全周立体映像を観察することができる。本手法により、従来のパララクスバリア式の立体ディスプレイで問題となっていたバリアや呈示面の精度、視点移動範囲、クロストーク、視野角等の問題を可動型とすることで解決できたわけで、世界ではじめての全周型のメガネなしフルカラー立体映像呈示が、メカトロニクス的手法で日本において成功したといえる。本原理を用いることにより、将来、省スペースで臨場感あふれる立体映像シアターや、新型ゲーム機、立体テレビ電話等への応用が期待できる。

また、カメラも同時に回転システムに組み込むことにより、自由な視点からの映像が得られる。したがって、このようなブースを将来、街角に数多く置くことにより、誰でもがいつでもトレイグジスタンス<sup>9)</sup>できるような社会が実現するであろう。現在、日本科学未来館に、TWISTER Vが設置され、東京大学のTWISTER IVとの通信実験も始まっており、今後の進展が期待されている。

## 文 献

1) 舘 暉：バーチャルリアリティー入門（筑摩書房，2002）pp. 26-28.

- 2) S. Tachi, T. Maeda, Y. Yanagida, M. Koyanagi and Y. Yokoyama: "A method of mutual tele-existence in a virtual environment," *Proceedings of ICAT (International Conference on Artificial Reality and Telexistence)*, Tokyo (1996) pp. 9-18.
- 3) Y. Kunita, N. Ogawa, A. Sakuma, M. Inami, T. Maeda and S. Tachi: "Immersive autostereoscopic display for mutual teleexistence: TWISTER I (Telexistence Wide-angle Immersive STEReoscope model I)," *Proceedings of IEEE Virtual Reality*, Yokohama (2001) pp. 31-36.
- 4) 國田 豊, 稲見昌彦, 前田太郎, 舘 暉: "多眼カメラを用いた任意視点人物像の実時間生成システム", 電子情報通信学会論文誌, **J84-D-II-1** (2001) 129-138.
- 5) 國田 豊, 尾川順子, 佐久間敦志, 稲見昌彦, 前田太郎, 舘 暉: "没入形裸眼立体ディスプレイ TWISTER I の設計と試作", 映像情報メディア学会論文誌, **55** (2001) 671-677.
- 6) K. Tanaka, J. Hayashi, Y. Kunita, M. Inami, T. Maeda and S. Tachi: "The design and development of TWISTER II: Immersive full-color autostereoscopic display," *Proceedings of ICAT (International Conference on Artificial Reality and Telexistence)*, Tokyo (2001) pp. 56-63.
- 7) K. Tanaka, J. Hayashi, Y. Kunita, N. Kawakami, D. Sekiguchi, M. Inami, T. Maeda and S. Tachi: "TWISTER technical challenges," *ACM SIGGRAPH Conference Abstract and Applications*, San Antonio (2002) p. 271.
- 8) S. Tachi: "Two ways of mutual teleexistence: TELESAR and TWISTER," *Telecommunication, Teleimmersion and Telexistence*, ed. S. Tachi (Ohmsha, Ltd., 2003) pp. 3-24.
- 9) J. Hayashi, K. Tanaka, M. Inami, D. Sekiguchi, N. Kawakami and S. Tachi: "Issues in image-capture system for TWISTER," *Proceedings of ICAT (International Conference on Artificial Reality and Telexistence)*, Tokyo (2002) pp. 44-51.
- 10) 田中健司, 林 淳哉, 川淵一郎, 稲見昌彦, 舘 暉: "裸眼全周囲ステレオ動画ディスプレイ TWISTER III", 映像情報メディア学会誌, **58** (2004) 819-826.
- 11) K. Tanaka, J. Hayashi, M. Inami and S. Tachi: "TWISTER: An immersive autostereoscopic display," *Proceedings of the IEEE Virtual Reality*, Chicago (2004) pp. 259-278.
- 12) K. Tanaka and S. Tachi: "TORNADO: Omnistereo video-imaging with rotating optics," *Trans. Visual. Comput. Graph.*, **11** (2005) 614-625.

(2006年3月27日受理)