真の3次元像を実現する体積走査型ディスプレイ

宮崎 大介

大阪市立大学大学院 工学研究科電子情報系専攻 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)

Volumetric Displays that Create True Three-Dimensional Images

Daisuke MIYAZAKI

*Department of Physical Electronics and Informatics, Graduate School of Engineering, Osaka City University,
3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-8585*

(Received August 14, 2006)

Studies on volumetric three-dimensional (3-D) displays are reviewed briefly. A volumetric display method based on 3-D scanning of an inclined image, developed by the author, is introduced. An optical image of a two-dimensional (2-D) display placed obliquely in an optical imaging system is moved laterally by a mirror scanner. Inclined cross-sectional images of a 3-D object are displayed on the 2-D display in accordance with the position of the image plane to form a volumetric image. The three-dimensional images formed by this display system satisfy all the requirements for stereoscopic vision. Experimental results of 3-D imaging achieved by a volumetric display system using a digital micromirror device are presented. Research for improving the practical performance of the volumetric display, such as realizing real-time volumetric imaging from 3-D measurement data and forming volumetric directional images and 3-D fluorescent images, is presented.

Key Words: Volumetric display, Stereoscopic display, Three-dimensional display, Three-dimensional measurement, Digital micromirror device

1. はじめに

近年の情報技術の発展によって、扱われる情報量は飛躍的に増大しており、効率的に情報を提示できるインターフェイス技術の開発が重要な課題となっている。特に、人に多くの情報を伝えることのできる視覚情報の提示は重要である。装置の薄型化・大型化や映像の高精細化に関してディスプレイ技術は目覚ましく発展したが、その延長線上の性能向上は飽和状態に近づいており、新たな技術的展開が模索されている。その方向性の一つとして3次元立体映像表示が注目されている。現在、3次元映像情報の利用は工業、医療、教育、エンターテインメントなど様々な分野に広がっており、そのような3次元情報を直感的に把握することのできる実用的な立体表示技術が待望されている。特に最近、偏光眼鏡などの装着物を必要としない裸眼による立体ディスプレイの研究が活発に行われている。

有望な3次元立体表示技術の一つとして、体積走査型ディスプレイ (volumetric display) がある。その基本概念は、従来のディスプレイ装置における2次元走査を3次元へ拡張し、光点を3次元的に配置することで像を形成する。体積走査法は真の3次元像を形成することができ、他の立体表示手法にはない優れた特徴を持つことから、50

年以上前から現在に至るまで最新の技術を取り入れて様々な手法が提案されてきた¹⁻³⁾。

我々は、体積走査法の一方式として、傾斜した光学像をミラースキャナにより光軸に垂直な方向へ高速に移動させることにより3次元像を形成する手法を提案した。本稿では、我々が行った研究について紹介する。まず、一般的な体積走査型ディスプレイについて概説し、動向を紹介する。次に、我々が提案する手法の原理を説明し、試作システムによる実験結果を示す。次に、3次元映像の伝送を目指して3次元計測結果を実時間で立体表示するシステムについて述べる。さらに、観察角度によって変化する指向性画像の実現について述べる。また、提案手法を蛍光による3次元像形成に適用した結果について述べる。

2. 体積走査型ディスプレイの概説と動向

体積走査型ディスプレイでは実際に光点が3次元的に配置されているため、立体視の生理的な要因である両眼視差や焦点調節、輻輳に関して矛盾のない自然な立体感が得られる。それに対して、両眼に視差画像をそれぞれ提示する立体表示手法では、立体視要因の間に不整合が生じ、目の疲労の原因となることがある⁴⁾。真の3次元像を形成できる他の手法としてホログラフィがあるが、非常

に高い解像度を有する空間光変調素子が必要であるため、現時点での実用化は難しい。一方、体積走査方式では通常の解像度の表示デバイスが利用できるため、実現性も高いといえる。

これまで3次元的に光点を分布させるための様々な走査手法が考案されてきた。その代表的なものとして、目に残像が残る速さでスクリーンを動かし、その位置に応じて3次元物体の断面像を投影する手法がある。Fig. 1 (a), (b), (c)に示すように、平板や螺旋状など形態のスクリーンを用いて、平行移動や回転などの各種の駆動方法が試されている⁵⁻⁸⁾。また、LEDアレイなどの自発光式の表示デバイスを並進や回転させる手法も開発されている^{9,10)}。これらのスクリーン掃引型ディスプレイの多くは、周囲の広い範囲から観察が可能という特長を持つ。Actuality Systems社によりこのタイプの市販品が登場している^{3,7)}。高い表示フレームレートを有するデジタルマイクロミラーデバイス(digital micromirror device: DMD)¹¹⁾を用いて回転する円盤に像を投影しており、断面数198、各面の画素数 768×768 、RGB各3ビットのカラーの3次元表示が実現されている。

機械的な駆動機構を用いない手法として、LightSpace Technologies社のDepthCubeでは、Fig. 1 (d)に示すように、積層した散乱性液晶パネル切替えによりスクリーンの並進と同様の効果を実現している¹²⁾。透過状態と散乱状態の透過率がそれぞれ約90%および2%の透過性の液晶パネルを利用することで面数20を実現している。画素数 1024×748 のDMDを用いて散乱状態の液晶パネルへ画像を投影して各面の画像を形成している。液晶パネルの間に位置する画素を表現するために、前後のパネルにおける輝度の割合を変化させるエイリアシング技術により、パネル数以上の608段階の奥行き分解能を実現している。

スクリーンを利用せずに、空中に形成された像を光学的に移動させることで3次元走査を行うことも可能である。光軸方向に像を移動させるために焦点距離を高速に変化できる振動凹面鏡^{13,14)}(Fig. 1 (e))や液晶レンズ¹⁵⁾を用いる手法が提案されている。また、複屈折性を用いた

二焦点レンズと液晶による波長板を用いて焦点を可変にする手法も提案されている¹⁶⁾。これらの手法は、像を観察できる範囲が光学系の開口数で制限されることが欠点となる。

スクリーンを用いずに全周囲からの観察が可能な3次元ディスプレイとして、蛍光物質を含有する透明媒体中に発光点による3次元像を形成する手法がある。多段階励起に基づくアップコンバージョン蛍光材料を利用することで、Fig. 1 (f)に示すように異なる波長を持つ2本の赤外レーザービームの交点において蛍光を発生させ、ビームの交点を高速に移動させることで3次元的な発光分布を実現することができる¹⁷⁾。また、固体媒体を用いずに、瞬間的なパワー密度の高いパルスレーザーを利用して空気中の一点にプラズマを発生させ、3次元パターンを形成する技術が開発された¹⁸⁾。この手法では媒体による制限がないので大きなサイズの像を形成することも可能となる。

3. 傾斜面像面による体積走査型3次元ディスプレイ

3.1 原理

我々は、傾斜像面をミラースキャナで移動させる体積走査法を提案した¹⁹⁾。Fig. 2にその概念図を示す。ミラースキャナを用いた走査光学系において、2次元ディスプレイ装置が光軸に対して傾けて配置されている。光学系の像領域には、傾斜した光学の実像が空中に形成される。ミラースキャナを駆動すると、傾斜像が光軸に対して垂直な方向に平行移動する。傾斜像の移動位置に合わせて、3次元物体の斜め断面像を2次元ディスプレイに順次表示する。ミラースキャナを目に残像が残る速さで駆動すると各断面形状を同時に観測でき、3次元像として観察することができる。

本手法ではミラースキャナにより3次元走査を実現しているため、スクリーン掃引法のような大きな機械的な駆動機構を必要としない。また、回転スクリーンによる方法では、スクリーンが観察者に対して垂直になる位置における光点の観察は困難であるが、本手法ではそのよう

Fig. 1 Three-dimensional scanning methods for volumetric display: Rotational motion of (a) a planar surface, and (b) a helical surface. (c) Translational motion of a surface. (d) Layered display panel. (e) Varifocal mirror method. (f) Fluorescence at intersection point of two laser beams.

Fig. 2 Schematic diagram of the volumetric display system using an inclined 2D display device and a mirror scanner.

な特異な表示位置はない。さらに、本手法では焦点距離を変化させないので、結像素子に特殊な機能を付加することで結像性能が犠牲になることはない。

3.2 体積走査型3次元ディスプレイの実験結果

提案手法の検証実験の結果を以下に示す。表示デバイスとしては、高速性が必要とされることから我々はLEDアレイ¹⁹⁾や、ベクトル走査CRT(cathode ray tube)²⁰⁾、DMD²¹⁾を用いてきた。Fig. 3にDMDを用いた体積走査型3次元ディスプレイシステムの構成図と写真を示す。凹面鏡とガルバノメータミラースキャナにより結像光学系を構成し、スクリーンを光軸に対して45度傾けて配置し、DMDにより像を投影した。凹面鏡の焦点距離は152.4 mm、直径は152.4 mmである。ミラースキャナは、水平方向100 mm、垂直方向50 mmの大きさのミラーを周期22 Hz、振れ角±15度で振動させた。利用したDMDはTexasInstruments社製で、1.1 cm×1.5 cmの面積中に1024×768個の微小ミラーにより構成されており、最高で每秒6,756枚の二値画像表示が可能である。150枚の断面像で一つの3次元像を構成した。

X線CT(Computer Tomography)により得られた人の頭蓋骨の3次元表示結果をFig. 4に示す。Fig. 4 (a), (b)は同じ像を異なる方向から観察した結果を示しており、見え方が変わっていることから3次元像が形成されていることが確認できる。輝点の残像により像を形成しているため、前後に重なりがあっても隠蔽することはできず透けて見えている。3次元像の解像点数は1024×768×150、表示領域は1辺約6 cmの立方体である。視野角はミラーのサイズと凹面鏡の焦点距離によって制限され、水平方向に約30度、垂直方向は約15度であった。

4. 3次元計測データの実時間立体表示

実世界の物体の三次元形状を高速に計測し、その結果を実時間で表示できれば、例えばロボットの遠隔操作や遠隔手術のように、3次元情報が有用であり、なおかつインタラクティブ性を必要とする応用分野へ適用することができる。体積走査方式では対象物体の3次元情報が必要になるため、両眼視差方式等と比べると、実物体の実時間表示を行うのは困難であった。我々は体積走査法に基づく実時間3次元画像伝送の一方式として、光切断法による3次元計測結果の実時間立体表示を行った²²⁾。光切断法

Fig. 3 (a) Schematic diagram and (b) photograph of the volumetric display system using a DMD.

Fig. 4 Three-dimensional images formed with a volumetric display using a DMD. The 3D images were viewed (a) from the front and (b) from the left at an oblique angle.

では、シート状の光を測定対象に投影したときのパターンを異なる角度から観察することにより物体の断面形状情報を得ることができる²³⁾。シート光の投影位置を変えて測定対象全体を走査することで3次元情報が取得できる。シート光の照射角度を体積走査型ディスプレイにおける2次元ディスプレイ装置の傾斜角度と一致させることにより、取得した断面形状データを直接表示データとして利用することができる。

Fig. 5に3次元計測装置の構成図を示す。半導体レーザービームをシリンドリカルレンズにより一方向へ広げてシート光とし、ミラースキャナを介して測定対象に照射した。断面形状を高速に取得するために、撮像素子と並列処理回路を有するインテリジェントビジョンシステム²⁴⁾(浜松ホトニクス社製:C8201)を使用した。これにより、画素数128×128の画像に対して取得・処理・出力までを1 msで実行することができる。画像におけるモーメントの計算をインテリジェントビジョンセンサにより行い、それを元に重心を計算することで断面形状パターンの中心座標を得る。これにより断面形状データを1 msで得ることができる。実験においては、3次元計測のために128回の断面形状計測を行ったため、全体の計測時間は128 msとなった。立体表示を行うため、ベクトル走査CRTを利用した体積走査型ディスプレイを構成した。Fig. 3の同等の光学系において、投影スクリーンとDMDの代わりにベクトル走査CRTを設置した。Fig. 6 (a)に計測対象を、

Fig. 5 Configuration of 3-D measurement system.

(b)に実時間での立体表示結果を示す。3次元像の画素数は $128 \times 128 \times 128$ である。ビデオレートでの計測・表示を実現するためには、センサの高速化や複数の断面形状の同時計測などの高速化の検討が必要である。

5. 体積走査型ディスプレイにおける指向性制御

体積走査法では基本的に表示像からの光は等方的に放射される。このことは、立体感に関しては問題ではないが、指向性の制御ができればさらに自然な3次元像の形成が可能となる。例えば、前後に表示点が重なる像において、隠される部分の表示を消去する隠面消去処理により奥が透けて見えることを避けることができるが、規定外の角度で観察すると不自然さを生じることがある。観察角度に応じて消去部分を変えることができれば、より自然な隠蔽関係を表現できる。

我々は、体積走査型ディスプレイにおいてパララクスバリア等を適用し、指向性を付加する手法を提案した²⁵⁾。実証のため、パララクスバリアとして縦方向のストライプ状のマスクを適用した体積走査型ディスプレイを構成した(Fig. 7)。2次元表示装置としてベクトル走査CRTを用いた。パララクスバリアの設置により、観察角度によってCRTディスプレイの見える位置が変わることを利用して、角度に対応する像の輝度をそれぞれ設定することができる。自然な立体感が得られる原理的は従来の体積走査法と同じである。Fig. 8 (a)に示すような大小の二つの直方体で構成される3次元像を表示データとし、正面と左右4度の方向から観察したときの隠面となる部分を消去した3種類の表示データを用意した。それぞれ対応する角度から観察したときにそれらの表示データが見えるよう

Fig. 6 Experimental results of real-time volumetric imaging: (a) Measured object and (b) displayed image.

Fig. 7 Schematic diagram of the volumetric display system for directional image formation: (a) System configuration and (b) control of light directions by a parallax barrier.

Fig. 8 Experimental results of volumetric directional image formation. (a) CG image of 3-D data, (b) volumetric image observed on the diagonal, and (c) on the right diagonal.

に、パララクスバリアとCRTの表示関係を設定した。Fig. 8 (b)は正面の斜め上から表示3次元像を観察した結果、(c)は右方向に観察位置を少し移動した観察結果を示す。表示された3次元像を上方から観察すると、重なり合った奥の消去部分を見ることができる。二つの観察結果を比べると、隠面消去処理により暗くなった部分の位置が異なっていることから、指向性の実現が確認できる。消去部分が十分に暗くなっていない原因としては、パララクスバリアの遮光性が不十分なことと、CRTの輝点の広がりのために観察角度による分離が不十分なことが考えられる。また、横方向の解像度が低下するため、表示像には縦方向のストライプが観察されている。

6. 1ビーム励起蛍光体積型ディスプレイ

これまで述べた我々の体積走査型ディスプレイは光学の実像を観察するため、観察角度は光学系の開口数により制限されてあまり大きくすることはできない。そこで、Fig. 9に示すように、像の形成領域にアップコンバージョン蛍光材料を置いて再発光させると広い範囲からの観察が可能となる。我々は収束レーザービームの集光点における2段階励起により蛍光を発し3次元像を形成する手法を提案した²⁶⁾。Fig. 10に実験光学系を示す。このシステムでは、傾斜断面像を表示するために、二つの直交したスキャナ1, 2を用いて赤外レーザービームによりスクリーン上に2次元パターンを描画した。次段の光学系へ光を効率的に導くために、スクリーンとしてブレイズ化反射型回折格子を用いて反射光に指向性を持たせた。蛍光ガラス内に45度傾斜した像が形成されるように、スキャナ3を含む結像光学系をスクリーンに対して傾けて配置した。傾斜像をスキャナ3により横方向に移動させること

Fig. 9 Fluorescent volumetric display using an inclined image plane.

Fig. 10 Experimental system of an one-beam fluorescent volumetric display.

で、蛍光ガラス内を3次的に走査した。蛍光ガラスとしてEr³⁺添加ZBLAN(zirconium, barium, lanthanum, aluminum, sodium)ガラスを用い、励起光として波長810 nmの赤外光を入射すると、波長約546 nmの蛍光を生じた。収束ビームの開口径を約0.08とし、焦点付近で発光するように励起光強度を約4 mWに設定した。3つのスキャナにそれぞれ簡単な波形を入力して、蛍光ガラス中に3次元的なパターンを描いた結果をFig. 11に示す。像は全周囲から観察することが可能であった。各点の発光パターンはビームの伝搬方向の方が垂直な方向よりも長くなり、それぞれ約1 mmおよび約0.2 mmとなった。

7. おわりに

真の3次元像が形成できる体積走査型3次元ディスプレイの研究・開発について概況を述べ、さらに傾斜像による体積走査法に関する我々の研究について述べた。体積走査法には自然な立体感という利点があるが、機械的な駆動部や特殊な光学素子にコストを要し、これまでは解像度や使い勝手などが不十分であったため、あまり普及してこなかった。しかし、近年は高精細で高速な表示デバイスであるDMDの利用や情報処理能力の向上により、実用性が高まっている。我々の研究においてもDMDを用いて画素数1024×768×150の3次元画像が形成できた。さらに、体積走査法の有用性を高めるために、3次元計測情報の実時間表示や、指向性画像の形成、蛍光による3次元像の形成に関する研究を行った。今後の研究により、さらに3次元像の品質と使い勝手の向上を図ることができれば、体積走査法の利点が再認識され、大きく発展する可能性がある。ディスプレイ装置の開発のみではなく、入力、コンテンツ作製、処理、伝送などを含めたトータルなシステムとして研究・開発を行うことも重要である。

Fig. 11 Experimental results of the one-beam fluorescent volumetric display.

参考文献

- 1) M. J. Parker and P. A. Wallis: J. IEE **95** (1948) 371.
- 2) B. G. Blundell and A. J. Schwarz: *Volumetric three-dimensional display systems* (Wiley-IEEE Press, New York, 2000).
- 3) A. Sullivan: IEEE Spectrum **42** (2005) 22.
- 4) T. Miyashita and T. Uchida: *Proc. the Society of Information Display* **31** (1990) p. 249.
- 5) V. V. Saveljev, P. E. Tverdokhlebov, and Y. A. Shchepetkin: *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **3402** (1998) p. 222.
- 6) C.-C. Tsao and J. Chen: *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **3296** (1998) p. 191.
- 7) G. E. Favalora, J. Napoli, D. M. Hall, R. K. Dorval, Michael G. Giovinco, M. J. Richmond, and W. S. Chun: *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **4712** (2002) p. 300.
- 8) P. Soltan, M. Lasher, W. Dahlke, N. Acanilado, and M. McDonald: *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **3057** (1997) p. 496.
- 9) K. Kameyama, K. Ohtomi, and Y. Fukui: *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **1915** (1993) p. 12.
- 10) 山口 拓見, 坂本 康正, 福田 一郎: 3次元画像コンファレンス2006講演論文集(2006年7月) 161.
- 11) D. Dudley, W. M. Duncan, and J. Slaughter: *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **4985** (2003) p. 14.
- 12) A. Sullivan: *Proc. the Society of Information Display* (2003) p. 354.
- 13) A. C. Traub: *Appl. Opt.* **6** (1967) 1085.
- 14) E. G. Rowson: *Appl. Opt.* **7** (1968) 1505.
- 15) S. Suyama, M. Date, and H. Takada: *Jpn. J. Appl. Phys.* **39** (2000) 480.
- 16) 陶山 史朗, 伊達 宗和, 高田 英明: 3次元画像コンファレンス2006講演論文集(2006年7月) p.13.
- 17) E. Downing, L. Hesselink, J. Ralston, and R. Macfarlane: *Science* **273** (1996) 1185.
- 18) 島田 悟, 木村 龍実, 欠端 雅之, 佐々木 史雄: 産総研TODAY **6** (2006) 16.
- 19) D. Miyazaki and K. Matsushita: *Appl. Opt.* **40** (2002) 3354.
- 20) D. Miyazaki, K. Shiba, K. Sotsuka, and K. Matsushita: The 11th International Display Workshops, Niigata, December, 2004, p. 1483.
- 21) 本田 武士, 惣司 浩史, 宮崎 大介, 向井 孝彰: 3次元画像コンファレンス2006講演論文集(2006年7月) p. 5.
- 22) 惣司 浩史, 本田 武士, 宮崎 大介, 向井 孝彰: 3次元画像コンファレンス2006講演論文集(2006年7月) p. 9.
- 23) 吉澤 徹: 光3次元計測(新技術コミュニケーションズ, 1998).
- 24) Y. Nakabo, M. Ishikawa, H. Toyoda, and S. Mizuno: IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, San Francisco, April, 2000, p. 650.
- 25) 惣司 浩史, 芝 健介, 宮崎 大介, 向井 孝彰: 第66回応物学会予稿集(2005, 秋) p. 881.
- 26) D. Miyazaki, M. Lasher, and Y. Fainman: *Appl. Opt.* **44** (2005) 5281.

レーザーワード

体積走査型3次元ディスプレイ(volumetric display)

体積走査法は、何らかの3次元的な走査機構により空間の中に光点を分布させて3次元像を形成するディスプレイの方式である。実際に光点が3次元的に配置されているため、立体視の生理的な要因である両眼視差や焦点調節、輻輳に関して矛盾のない自然な立体感が得られる。3次元

空間の走査手法としては、投影スクリーンやLEDアレイの様な表示装置を高速に回転あるいは平行移動させる手法や、焦点距離を高速に変化できる結像素子を用いて光学像を移動させる手法が提案されている。(宮崎 大介)