

蛍光表示管を用いたボリュウムディスプレイと表示データ生成ツール

山本 欧

東京電機大学工学部電子工学科

A Volumetric Display using VFD, and A Display Data Generator

O Yamamoto

Dept. of Electronic Engineering, Tokyo Denki University
ou @ d.dendai.ac.jp

概要

ボリュウムディスプレイは、立体を3次元空間内に直接描画し表示するディスプレイであり、実体感のある立体表示が可能である。このため、科学だけでなくアートの分野においてもボリュウムディスプレイの利用が期待される。しかし、従来のものは装置が複雑・高価格であり、アート分野での利用は進んでいない。本論文では、光学系の不要な単純な構造を持ち、市販部品から容易に構成可能なボリュウムディスプレイ、およびそのための表示データ生成ツールの提案と実装について述べる。本ディスプレイは、往復運動する蛍光表示管(VFD)上に立体の断面を位置に応じて表示し、残像効果により立体表示を行う。これにより、単色で表示画像は小さいものの、鮮明な立体静止画像および動画像が表示できる。また、表示データ生成ツールは、表示エリアを立体的に指定するフレームにより、本ディスプレイのための表示データを一般の3Dモデリングソフトウェアを用いて容易に作成可能とするものである。

Abstract

Volumetric displays, which directly draw 3D images in the real 3D space, are expected to be used not only in science but also in art. However, most of these displays need complex and expensive optical systems, so they are rarely used in art. In this paper, we propose and describe a volumetric display that has no such optical systems and can be easily constructed using parts on the market. In the display, sectioned images of 3D objects are displayed in sequence on a vacuum fluorescent display (VFD), which moves in a reciprocating motion, and the 3D images of the objects appear due to afterimage effect. Although the displayed images are small and monochromatic, clear 3D still and animation images can be displayed by the display. We also propose and describe a data generator for the display. The generator offers a frame, which specifies a display area three-dimensionally. Using the frame, the display data for the display can be easily generated on 3D software on the market.

1 はじめに

ポリウムディスプレイは、立体を3次元空間内に直接描画し表示するディスプレイであり [1]、視野角の範囲内であれば、立体視の生理的要因（両眼視差、輻輳角、焦点調節、運動視差）を満足する立体表示が可能である。描画方式としては、これまでに（1）パフォーカルミラーを用いる方式（2）液晶レンズによる可変焦点方式（3）プロジェクタ用素子と回転スクリーンを用いる方式（4）プロジェクタ用素子と液晶シャッタを用いる方式（5）アップコンバージョンレーザ方式（6）レーザ集光によるプラズマ発光方式、等が提案・実装され（3）と（4）の方式のものは製品化もなされている。

（1）は、ボイスコイルにより往復運動する鏡に、立体の断面や輪郭の2D画像を位置に応じて映し、残像によって立体を描画する方式である [2]。しかし、2D画像の投影面を直接運動させ、広い視野角と高解像度を実現する（3）（4）の方式が出現したことから、現在ではほとんど研究がなされていない（2）は、焦点距離が動的かつ連続的に可変な液晶レンズを用い、立体の断面や輪郭の2D画像の結像位置を奥行き方向に周期変化させ、残像によって立体を描画する方式である [3]。可動部分を持たない点で優れた方式であるが、本論文執筆時点では（3）～（6）の方式に比べ視野角が狭い（ $\pm 10^\circ$ ）という問題点がある（3）は、プロジェクタ用素子を用い、立体の断面や輪郭を、回転スクリーン上に回転角に応じて投影し、残像によって立体描画を行う方式である。この方式で製品化されたものに Perspecta 3D [4] がある。この方式は回転軸周りの視野角が 360° であるという特長を持つが、スクリーンおよび光学系の一部を回転させる必要があるため、可動部分の複雑化や、回転中心付近における表示の明瞭度の低下といった問題点がある（4）は、プロジェクタ用素子を用い、立体の断面や輪郭を、奥行き方向に平行に並べた液晶シャッタ上に位置に応じて順に投影し、やはり残像によって立体描画を行う方式である。この方式で製品化されたものに DepthCube [5][6] がある。この方式は（2）同様、可動部分を持たないという特長を持つ。しかし、液晶シャッタの透明度の制約から、本論文執筆時点でその枚数は20に制限されている（5）は、波長の異なる2種類のレーザを、希土類元素を含むガラス中で交差させ、その交点を発光させる方式である [7][8]。この方式も可動部分を持たないが、本論文執筆時点ではレーザの走査にミラースキャナを用いているため、単純な幾何学曲線や、数十ポリゴン程度の3D物体のワイヤフレーム画像の表示に留まっている（6）は、レーザを空中で集光させ空気をプラズマ発光させることにより、光点からなる図形を空中に描画する方式である [9]。しかし、本論文執筆時点では光点の描画速度が毎秒1000個であり、文字等の単純な図形の描画に留まっている。

立体視の生理的要因を満たす立体ディスプレイとしては、ポリウムディスプレイの他にホログラフィーがあり、単色ではあるが高解像度の動画表示が可能なホログラフディスプレイも開発されている [10]。しかし本論文執筆時点では、視点追跡が必要であるため多人数による同時観察が困難であり、また視野角も

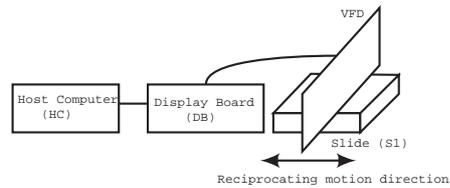


図 1: 本ディスプレイの構成

約 10° に留まっている。また、多眼方式と呼ばれるものの1種であるが、回転スクリーン上に、立体を多方向から見た画像を回転角に応じて表示し立体表示を行う方式も存在する。代表的なものに Light Field Display [11] があるが、垂直方向の視点移動に対しては、視点追跡を行い映像の歪みを補正する必要がある。

ポリウムディスプレイは、立体視の生理的要因を満足する立体表示が可能であり、広い視野角も実現できることから、科学だけでなくアートの分野においても、その特長を活かした利用が期待される。しかし現状では、ポリウムディスプレイの実装には光源やレンズ等の光学系、および入手困難な素子や部品を必要とするため、製品化されているものは高価格であり、自作も困難である。このため、ポリウムディスプレイのアート分野での利用は進んでいない。

そこで筆者らは、ポリウムディスプレイに必要な表示性能を備え、かつ入手の容易な市販の蛍光表示管（VFD）に注目し、アート分野の研究者にも市販部品で安価に構成可能なポリウムディスプレイを提案し実装した [12]。本ディスプレイは光学系を必要とせず、往復運動するVFD上に立体の断面や輪郭を位置に応じて表示し、残像効果により立体表示を行う。本ディスプレイは、表示画像は小さく表示色も単色2値であるため、[3]～[11]のような、多色表示を行う性能や汎用性はない。しかし3Dオブジェクトの静止画像と動画画像を、約105万 voxelの解像度で鮮明に表示可能であり、アート分野におけるポリウムディスプレイの利用の研究において有用であると思われる。

図1に本ディスプレイの構成を示す。VFDは、その表示面に垂直に直線往復運動を行うスライドS1に固定されている。往復運動（12[Hz]）はモータとスライダ・クランク機構により実現している。VFDには市販の単色グラフィック表示型（ $128 \times 64[\text{dot}]$ ）を用い、往路と復路で各128枚の断面を表示し体積走査を行う。これにより、横4[cm]×縦2[cm]×奥行4[cm]の直方体空間内に、 $128 \times 64 \times 128[\text{dot}]$ の解像度で単色立体表示が可能である。往復運動の往路と復路それぞれで体積走査を行うため、立体表示レートは静止画像、動画画像共に24[Hz]である。表示立体の断面データはホストコンピュータHC上で作成し、USBインターフェース経由で表示ボードDBに転送する。DBはこれをメモリに蓄え、往復運動に同期してVFDへ表示する。

表1に、既存の主なポリウムディスプレイとLight Field Display、および本ディスプレイについて、立体表示解像度と体積走査レートに関する比較を示す。回転スクリーンにより体積走査を行うものは、走査レ

トを回転速度で示してある。また表 2 に、表示エリア、視野角、動画表示更新レートに関する比較を示す。[9] については、本論文執筆時点ではポリウムディスプレイとしての表示解像度が不十分であるため、比較対象から除外した。また、液晶レンズを用いた [3] についても、本論文執筆時点では視野角が $\pm 10^\circ$ と他のディスプレイに比べて狭く、表示解像度も不明であるため、比較対象から除外した。

表 1 に示すように、本ディスプレイは断面の解像度は最も低いものの、表示断面数は DepthCube より多い。先に述べたように、DepthCube の表示断面数が 20 と小さいのは、スクリーンに用いられる液晶シャッタの透明度の影響により、断面数を多く取ることが難しいためである。ただし、表示色数に関しては、断面 1 枚あたりの表示時間が長く多譜調表示が可能な DepthCube が大幅に有利であり、これによって空隙を挟んで配置されたスクリーン間のアンチエイリアシング表示を可能としている。DepthCube のアンチエイリアシング表示は、滑らかな曲面の表示であれば、画面の垂直軸に対し約 $\pm 45^\circ$ の視野角でスクリーン間の空隙による段差を感じさせない。しかし、ワイヤフレーム等の細かい線の表示では、画面に対し垂直方向以外からの観察に対して、アンチエイリアシングの効果は減少する。表 2 より、本ディスプレイは表示エリアの大きさは最小であるが、視野角は DepthCube と同等であり、動画表示更新レートも Light Field Display に次いで高い。また、本ディスプレイは隣接する断面間に空隙は存在しないため、視野角全体に渡って断面間の段差を感じさせない表示が可能である。

ポリウムディスプレイにおいては、表示データを作成するアプリケーションの提供も重要である。[4] ~ [11] のポリウムディスプレイの中では DepthCube のみが、ソフトウェアツール GLInterceptor[13] と Plane Mode と呼ばれるデータ転送モードにより、OpenGL を使用する多くの 3D アプリケーションの画面データを無加工でリアルタイム表示可能である [14][15]。その際、投影スクリーン間のアンチエイリアシング表示もハードウェア処理されるが、GLInterceptor がホストコンピュータのグラフィックスハードウェアのフレームバッファから読み出したデータが利用されるため、グラフィックスハードウェアが用いる Z バッファ法が原因となり表示に欠落が生じる場合がある。このため、各スクリーンの投影データを GLInterceptor を介さずに直接転送できる Block Mode と呼ばれるデータ転送モードと、それを用いたアプリケーション開発のための API を備えた SDK が用意されている。な

お Block Mode では、ハードウェアによるアンチエイリアシング処理は利用できないため、API によるソフトウェア処理となる。Block Mode を用いれば欠落のない表示が可能となるが、アンチエイリアシング処理を含め、投影データの作成と転送アプリケーションは、ユーザ自身が API を用いて作成しなければならない。

これに対し本ディスプレイは、表示ボードの仕様上、現状ではインタラクティブな表示は不可能である。しかし、表示のインタラクティブ性はなくとも、プログラミングを専門としないアート分野の研究者に対し、表示データを容易に作成できるツールを提供することは最低限必要である。そこで本研究では、オフラインではあるが、一般の 3D モデリングソフトウェア上で静止画および動画の表示データを容易に作成するためのツール「3D ビューフレーム」を提案・実装した。

以降、第 2 章で本ディスプレイの構成と実装について述べ、第 3 章で 3D ビューフレームについて述べる。第 4 章では、市販 3D モデリングソフトウェアと 3D ビューフレームを用い、実際に表示データ作成とディスプレイへの表示までを行った評価について述べる。第 5 章では今後の課題を、第 6 章ではまとめを述べる。

2 本ディスプレイの構成要素と実装

2.1 VFD

残像効果を利用するポリウムディスプレイにおいては、表示する立体の断面や輪郭画像を、数 kHz のリフレッシュレートで高速に更新しつつスタティック表示する素子が必要である。この表示性能を満足する素子としては、VFD の他に LED や有機 EL がある。しかし入手容易な市販部品で、ポリウムディスプレイに必要な解像度を持つ素子は現在のところ VFD のみである。本研究で使用した VFD (ノリタケ伊勢電子 MW12864J) の外観を図 2 に示す。この VFD は、 128×64 [bit] の半導体メモリ上に蛍光体を形成した構造を持ち、1, 0 の記憶内容をピクセルの点灯、消灯でスタティック表示する [16]。メモリは 32×32 [bit] のブロック 8 個に分かれ、表示データはブロック毎にシリアル形式で書き込む。全ブロック並列のデータ書き込みにより、最大で約 8[kHz] のリフレッシュレート

表 1: 本ディスプレイと既存ポリウムディスプレイおよび Light Field Display の比較 (解像度および走査レート, 表示色数)

	resolution (per slice or view)	#of slices or view	scan rate	color depth (non dithered)
Perspecta	768×768	198	900rpm	8
DepthCube	1024×768	20	50Hz	32768
L.F.Disp.	768×768	288	900- 1200rpm	2
our display	128×64	128	24Hz	1

表 2: 本ディスプレイと既存ポリウムディスプレイおよび Light Field Display の比較 (表示エリア, 視野角, 動画表示更新レート)

	display area	viewing angle(H,V)	animation display rate
Perspecta	10"-diam. sphere	$360^\circ, 270^\circ$	10Hz
DepthCube	$15.7" \times 11.8"$ $\times 4.0"$	$170^\circ, 170^\circ$	20Hz
L.F.Disp.	13cm-diam. pillar	$360^\circ, -$	30-40Hz
our display	$4cm \times 2cm$ $\times 4cm$	$170^\circ, 170^\circ$	24Hz



図 2: VFD の外観



図 3: 往復運動機構の外観

が可能である．表示部分の寸法は横 $4[cm]$ ，縦 $2[cm]$ である．

2.2 往復運動機構

残像効果を利用したボリュームディスプレイには，本ディスプレイのような往復運動方式の他に，[4],[11]のように表示面を回転させる方式（回転方式）が存在する．回転方式は，VFD に与える加速度を一定にできるため，耐久性の点で往復運動方式より優れる．しかし，ちらつきの少ない立体表示のためには $1200[rpm]$ 以上の回転速度が必要であり，回転振動を抑えるために回転部の重量バランスを正確に取る必要がある．また，VFD を回転させる場合，電源の必要のない投影スクリーンを回転させる [4],[11] と異なり，電源と信号を供給するスリッピングが必要となる．しかし，高速回転に対応した多極スリッピングの入手は困難である．さらに回転方式では，回転する表示面に立体の断面や輪郭を表示し体積走査を行うため，回転の内周と外周とで画素の形状と輝度が異なる．このため，3D モデルのデータ表現で広く用いられている直交座標系との親和性が低く，光学フィルタ等による輝度差の補正も必要である．他にも，表示面の中心線と回転軸を一致させるための機械的調整機構が必要である．

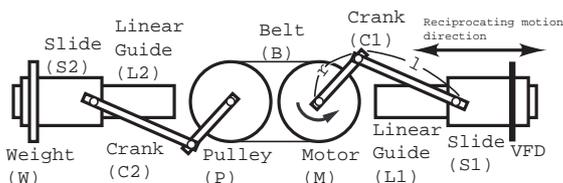


図 4: 往復運動機構の動作

以上の理由から，本研究では製作および部品入手が容易で，直交座標系との親和性の高い往復運動方式を採用した．

往復運動機構の外観を図 3 に，往復運動機構の動作を図 4 に示す．モータ M の回転が，クランク $C1$ を介しリニアガイド $L1$ のスライド $S1$ に往復運動として伝達される．往復運動は $12[Hz]$ で行うため，モータの回転速度は $12[rps]$ ($720[rpm]$) 一定である． $C1$ の寸法は $r = 3[cm]$ ， $l = 20[cm]$ であり， $S1$ は $2r = 6cm$ の区間を往復運動する．VFD は図の紙面に対し表示面が垂直となるように $S1$ に固定される．プーリー P ，クランク $C2$ ($C1$ と同寸)，リニアガイド $L2$ ，スライド $S2$ ，ウェイト W は，往復運動による振動を相殺するための機構である． M の回転は，ベルト B を介し P に伝達され， $C2$ を介して $S2$ に伝達される． $S2$ の運動は $S1$ と逆向きであり，これによって振動を相殺する． W は VFD と同質量（約 $60[g]$ ）のアルミブロックである．VFD による体積走査は速度変化の少ない往復運動の中心 $4cm$ 区間で行い，区間検出はフォトセンサにより行う．往路と復路でそれぞれ体積走査を行うため，体積走査レートは $24[Hz]$ である．構成部品に関しては，モータが $20W$ の市販 DC サーボモータ（速度制御ユニット付），リニアスライドはレール幅 $18[mm]$ のスチール製市販品，胴体フレームは市販のアルミフレームを，クランクはアルミニウム角材をそれぞれ切断・穴あけ加工したものである．可動部に遊びがあると表示画像にぶれが生じるため，ベルトとプーリーには $10[mm]$ 幅の面圧高耐トルク型を用い，クランクの各ジョイント部では 2 つ重ねたボールベアリングによりシャフトを保持し，遊びを排している．

2.3 往復運動機構による表示図形の歪み

本ディスプレイでは，モータの定速回転運動 ($12[rps]$) を，図 4 に示す機構で往復運動に変換している．このため体積走査の速度が一定とならず，表示図形に歪が生じる．いま図 4 においてモータ M の回転軸中心を原点とし，原点から右向き水平方向に z 軸をとる． M の回転角速度を $\omega[rad/s]$ とすると，時刻 $t[s]$ におけるリニアスライド $S1$ 上のクランク $C1$ の先端位置 $z(t)$ は次式で表される．

$$z(t) = r\cos\omega t + \sqrt{l^2 - r^2\sin^2\omega t} \quad (1)$$

ここで，モータの回転角 $\omega t[rad]$ は z 軸より反時計回りに測った値である． $r = 3[cm]$ ， $l = 20[cm]$ ， $\omega = 12[rps] = 24\pi[rad/s]$ のときの 1 往復分の $z(t)$ の変化を図 5 に示す．

VFD は $S1$ に固定されているので，これ以降 $z(t)$ を VFD の位置として扱う．上述のように，本ディスプレイでは表示面が横 $4[cm]$ ，縦 $2[cm]$ の VFD を z 軸上で振幅 $2r = 6[cm]$ で往復させ，往復の中心 $4[cm]$ 区間 ($18[cm] \leq z(t) \leq 22[cm]$) で体積走査を行う．その結果得られる立体表示エリアを直方体 $ABCD - EFGH$ で表したものを図 6 に示す．

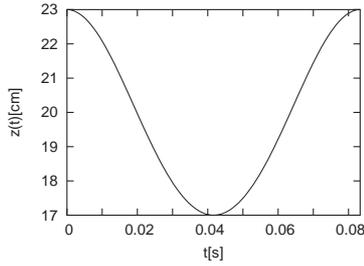


図 5: 往復運動の軌跡

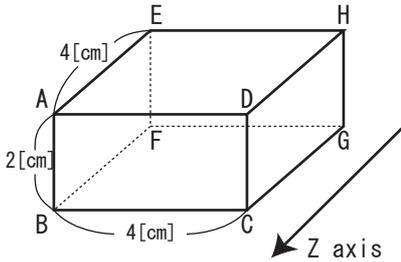


図 6: 立体表示エリア

往復運動において z 軸の負の向きに VFD が移動する場合を往路とし、往路において VFD が $\square ABCD$ の位置にある時の時刻を t_0 、 $\square EFGH$ の位置にある時の時刻を t_1 とする。このとき $z(t_0) = 22[\text{cm}]$ 、 $z(t_1) = 18[\text{cm}]$ 、 $t_0 < t_1$ である。 z 軸は VFD 表示面に垂直なので、VFD 表示面に平行な平面の線、および z 軸に平行な直線は歪まない。しかし方眼等の、これらの線が等間隔に並んだ図形の表示においては、線自身の歪みは生じないものの、間隔が不均一となる。また、VFD の移動、つまり $z(t)$ の変化と共に VFD 表面上の座標が変化する線を表示する場合にも、歪みが生じる。線全体にわたって歪みが生じる例として、図 6 における $\square ADHE$ の対角線 AH を往路で表示する場合を考える。このとき、表示される対角線は t を横軸、 z 軸を縦軸にとる tz 平面で、 $t_0 \leq t \leq t_1$ の区間における点 $(t, z(t))$ の軌跡となる。すなわち z 軸の単位を cm とすると、点 $(t_0, 22)$ と $(t_1, 18)$ が対角線の始点 A と終点 H にそれぞれ対応する。式 (1) より逆算すると $t_0 = 10.46[\text{ms}]$ 、 $t_1 = 29.71[\text{ms}]$ となる。このときの点 $(t, z(t))$ の軌跡を図 7 に示す。

$\square ADHE$ は正方形であるので、図 7 では区間 $[18, 22]$ と $[t_0, t_1]$ の長さを等しく描いてある。対角線 AH の歪みを表す量として、図 7 における点 $(t_0, 22)$ と $(t_1, 18)$ とを結ぶ直線と $z(t)$ との差を考え、これを $d(t)$ で表すと、 $d(t)$ は次式で与えられる。

$$d(t) = \frac{z(t_1) - z(t_0)}{t_1 - t_0}(t - t_0) + z(t_0) - z(t) \quad (2)$$

区間 $t_0 \leq t \leq t_1$ における $d(t)$ の変化を図 8 に示す。 $d(t)$ は $t = 24.54[\text{msec}]$ にて最大値 $1.11[\text{mm}]$ となる。式 (1) より、 l を大きくすれば $z(t)$ は純粋な

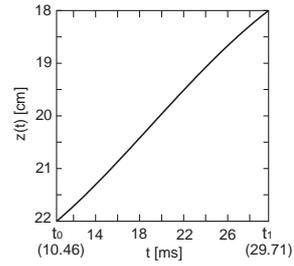


図 7: $z(t)$ の軌跡

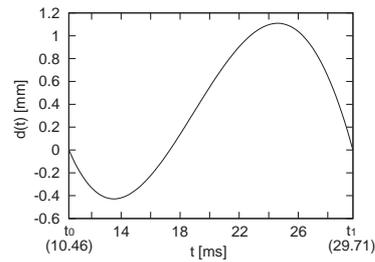


図 8: $d(t)$ の変化

正弦波に近づき、 $d(t)$ の最大値も減少することがわかる。しかし l を大きくすると装置が大型化し、強度面でも問題が生じる。 $d(t)$ の最大値を 0 とするにはモータの回転角に応じた速度制御を行う必要がある。しかし、表示画像の図形的精度を必要とする用途でなければ、第 4 章で述べるように、表示図形の歪みは問題とされない。

2.4 表示ボード

表示ボードの外観を図 9 に、表示ボードの構成を図 10 に示す。表示ボードは USB インターフェイス (UIF)、表示データメモリ (DM)、表示コントローラ (DC) からなる。表示立体の全ての断面データは、ホストコンピュータから USB インターフェイスを通じて DM に書き込まれる。ホストコンピュータ上で

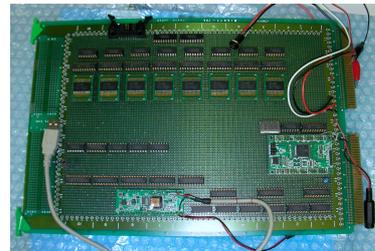


図 9: 表示ボードの外観

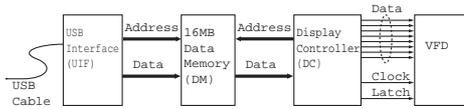


図 10: 表示ボードの構成

の断面データは、VFD の各画素の点灯 / 消灯を表す 2 進データを 16 進 ascii 文字形式で格納したテキストファイルである。このファイルは、表示ボードへの転送プログラム中でバイナリデータに変換される。断面データの転送後、表示ボードは往復運動に同期して DM から断面データを読み出し、VFD にシリアル転送する。シリアル転送は VFD 内 8 個のメモリブロックに対し並列に行う。転送クロック (10[MHz])、ラッチ信号も表示ボードから供給される。DM の容量は 16[Mbyte] で、 $128 \times 64 \times 128[bit]$ の立体画像データを 128 保持できる。各立体画像データは 12[Hz] の往復運動の往路と復路で順に表示されるため、本ディスプレイは更新レート 24[Hz] の立体動画を約 5 秒間表示できる。

2.2 で述べたように、VFD は振幅 6cm の往復運動 (12[Hz]) の中心 4[cm] 区間を通過中に 128 枚の断面表示を行う。この区間の通過時間は $t_1 - t_0 = 19.2[ms]$ であるので、1 断面の表示時間は $150[\mu s]$ である。従って、VFD へのデータ転送レートは $128 \times 64[bit] / 150[\mu s] = 54.6[Mbit/s]$ となる。

3 表示データ生成ツール

本ディスプレイの表示データを一般の 3D モデリングソフトウェアにより作成する場合、次の 2 点が主たる問題となる:

1. テクスチャを含めた表面を表示するか、ワイヤフレーム表示とするか、
2. 本ディスプレイへ表示する部分をどのように指定するか。

(1) については、次の 2 つの理由から、ワイヤフレーム表示を選択した。

- 本ディスプレイが単色 2 値表示でありテクスチャの表現に乏しい
- 高輝度の光点によって立体を描画するため、面を表示すると光点が密集し、表示立体の細部形状が見え難くなる

ワイヤフレームは立体を多角形の集まりとして表示するため、立体の細部形状を鮮明に表示できる。(2) については、一般の 3D モデリングソフトウェアには、作成した立体を 2 次元画像として撮影するカメラに相当するツールが用意されており、撮影位置やアングル、画角等を自由に設定可能である。しかし、ボリュームディスプレイは立体をそのまま 3 次元空間に表示するため、表示データの作成においては表示

範囲を立体的に指定する必要がある。本研究で提案・実装した 3D ビューフレームは、このような表示範囲の指定と表示データ作成を簡単に行えるソフトウェアツールである。また、カメラのズームや回り込みに対応する機能も提供する。

3D ビューフレームは、本ボリュームディスプレイで表示される範囲を 3D モデリングソフトウェア上で立体的に示す「ビューフレーム」と、表示データを作成する「データジェネレータ」からなる。これらの使用手順と役割は次の通りである。

1. 3D モデリングソフトウェア内で、本ディスプレイの表示エリア ($4[cm] \times 2[cm] \times 4[cm]$) と同一の寸法比率 (横:縦:奥行 = 2:1:2) を持つ直方体オブジェクトを作成し、これに “ViewFrame” という名前を付ける。このオブジェクトがビューフレームとなる。直方体は殆どの 3D モデリングソフトウェアでプリミティブ形状として提供されているので、ビューフレームの作成は容易である。ビューフレームはその中心が座標系の原点に、各辺が座標軸と平行かつ正方形の 2 面が上面と底面となるように配置しておく。この状態を市販の 3D モデリングソフトウェア Shade9[17] 上で表示した例を図 11 (a) に示す。このとき、面 ABCD がディスプレイに表示される際の正面となる。ビューフレームの位置は手順 (3) までそのまましておく。
2. ディスプレイに表示したい 3D オブジェクト (表示オブジェクト) を作成する。表示オブジェクトとして 3 つの球を作成した例を図 11 (b) に示す。ビューフレームに対する表示オブジェクトの大きさと位置は任意でよい。
3. ビューフレームと表示オブジェクトを、Wavefront OBJ 形式 [18] のファイル (OBJ ファイル) に保存する。OBJ ファイルの保存機能も、多くの 3D モデリングソフトウェアで提供されている。OBJ ファイルにおいては、オブジェクトの全頂点に通し番号 (頂点番号) が付けられる。データジェネレータはこのファイルからビューフレームの頂点番号を得る。頂点番号は、オブジェクトを新たに追加・削除しない限り、オブジェクトの配置や大きさを変えた後でも不変である。よって、これ以降の手順で作成された OBJ ファイルにおいても、データジェネレータはビューフレームを追跡できる。
4. 静止画像を表示する場合、ビューフレームを表示オブジェクトに対して好みの位置、大きさで配置し、OBJ ファイルとして保存する。その後、データジェネレータは手順 (3) で得た頂点番号からビューフレームの頂点座標 (図 11 における頂点 ABCDEFG の各座標) を抽出し、頂点 F が原点に、辺 FG が X 軸に、辺 FE が Y 軸に、辺 FB が Z 軸に一致するように、表示オブジェクトおよびビューフレームの頂点を回転・移動する。そしてビューフレームの長辺と短辺の長さがそれぞれ 128 と 64 になるように表示オブジェクトとビューフレームの頂点座標をスケールした後、各頂点を $128 \times 64 \times 128$ の 3 次元

boolean 配列に記録する．例えば，ある頂点の座標が (1.5, 3.2, 4.8) であったとすると，座標は最も近い整数に丸められ boolean 配列の (2, 3, 5) 要素が真となる．この boolean 配列は本ディスプレイの光点 voxel に対応しており，真であれば発光，偽であれば消灯を表す．頂点の記録が済むと，ポリゴンを構成する頂点の組を OBJ ファイルから抽出し，boolean 配列中でこれらの頂点間を直線で結ぶ．すなわち，直線上の voxel に対応した配列要素を真とする．この際，ビューフレームの外へ伸びる辺は自動的にビューフレーム境界でクリッピングされる．これが済んだ時点で，boolean 配列中に断面データが生成されている．すなわち，boolean 配列の，ビューフレームの面 EFGH に対応した部分には $Z = 0$ の断面データが，面 ABCD に対応する部分には $Z = 127$ の断面データが生成されている．以上のように，ビューフレーム内に切り取られる表示オブジェクトの部分がデータ生成の対象となるため，例えば図 12 (a) に示すように，円柱形の表示オブジェクトに対しビューフレームを傾けて配置した場合，本ディスプレイには同図 (b) のように表示される．また，ビューフレームを表示オブジェクトに対し大きくするほど，本ディスプレイによる表示時にオブジェクトは小さく表示される (ズームアウト)，小さくするほど大きく表示される (ズームイン)．

5. 動画像を表示する場合，使用する 3D モデリングソフトウェアのアニメーション作成機能を使い，表示オブジェクトおよびビューフレームの動きを指定する．ビューフレームは，3D モデリングソフトウェア上では単なるプリミティブオブジェクトである．よって，表示オブジェクトを 3 次元的に切り取るカメラとしてズームや回り込みも自在に可能である．アニメーション動作の指定の終了後，アニメーションの各コマを OBJ ファイルとして保存する．現在，本ディスプレイで表示可能な動画像は 128 コマであるので，128 個の OBJ ファイルを保存する．ただし，この作業は手動で行うと極めて煩雑であるので，多くの 3D モデリングソフトウェアで提供されているスクリプト機能を用いる．OBJ ファイルの保存終了後，データジェネレータはファイルを順に読み，手順 (4) と同様にビューフレーム内の表示オブジェクトの断面画像データを生成する．このデータを 2.4 で述べた表示ボードに転送することによって動画像表示を行う．

4 評価

4.1 静止画像のデータ生成と表示

市販の 3D データ素材 (OBJ 形式) より，楽器 (ホルン) の表示データを作成し，表示エリアを示す直方体の稜線と共に，本ディスプレイにより立体静止画像として表示した例を図 13 (a) ~ (c) に示す．

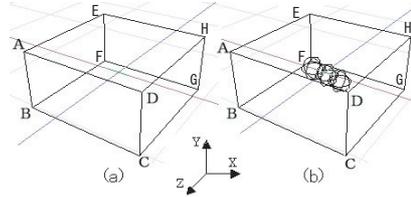


図 11: ビューフレーム表示例 1

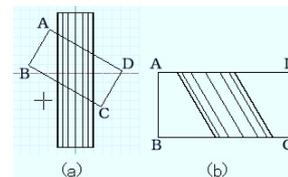


図 12: ビューフレーム表示例 2

(a) は正面上方約 30 度より (b) は上方角度はそのままに正面に対し左側約 80 度より (c) は同右側約 80 度より，それぞれ表示画像を見た場合である．視野角は図 6 における $\square ABCD$ に対し上下左右約 170 度で，視野角内のどの方向から見ても矛盾のない立体画像が得られた．また，用いた VFD の輝度が約 $3500[cd/m^2]$ [16] と高いため，室内照明下においても図 14 に示すように明瞭な表示画像が得られた．なお，図 13 においては，表示立体の中央付近，ポリゴンの集中している部分がグレアにより不鮮明となっているように撮影されている．しかし肉眼に対してはそのような眩輝感はなく，室内照明を消した状態においても，図 14 と同様に該当部分も鮮明に観察される．

データジェネレータによる表示データ生成に要した時間は，OS として Microsoft Windows2000，プロセッサとして Intel Pentium4 1.8[GHz]，メモリ 256[MByte] 使用のホストコンピュータ上で約 3 秒であった．

次に，表示画像の歪みを調べるために図 6 の表示エリアにおける対角線 AH および DE を表示した例を図 15 (a) に，表示エリアの上面 ($\square ADHE$) に正方眼パターンを表示した例を同図 (b) に示す．

(a) においては，2.3 で述べた対角線の歪みが見られるが，対角線を大きく歪ませるものではないことがわかる．同様に (b) においても方眼の間隔の大きな乱れは見られない．したがって，観察者が表示図形の形状を正しく把握することを困難にするような歪みは生じていないことがわかる．

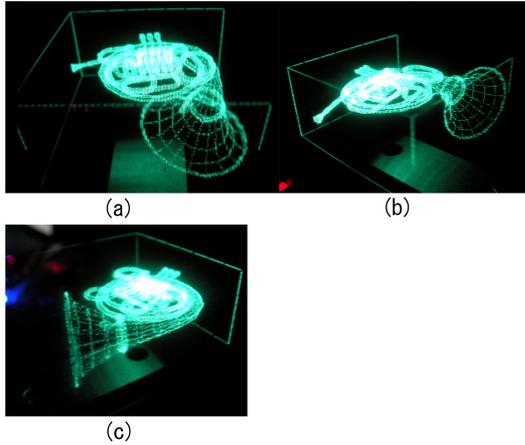


図 13: 本ディスプレイによる 3D オブジェクトの表示例

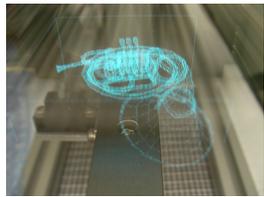


図 14: 室内照明下における表示例

4.2 動画像のデータ生成と表示

2 足ロボットが歩行する様子を、ビューフレームによりズームイン/アウトしつつ表示する動画データ (128 コマ) を、Shade9 とデータジェネレータにより作成し表示させたところ、毎秒 24 コマの滑らかな立体動画表示が得られた。ズームアウト時の表示例を図 16 (a) に、ズームイン時の表示例を同図 (b) に示す。ビューフレームは、3D モデリングソフトウェアの 1 オブジェクトであるため操作に制約が無く、スムーズにアニメーション動作の指定が可能であった。データジェネレータによる表示データ生成に要した時間は、静止画像の場合と同じホストコンピュータ上で約 300 秒であった。図 13 に示す静止画像の場合より、1 コマ当りのデータ生成時間が短いのは、表示オブジェクトの頂点数が少ないためである。

4.3 表示のちらつき

往復運動による体積走査の往路、復路共に要する $1/24[\text{sec}]$ のうち、VFD が発光する時間は 2.4 で述べたように $19.2[\text{msec}]$ である。これはデューティ比に換算すると約 46% であるが、実際はこの時間内に 128 枚の断面を表示するため、1 断面当たりの発光

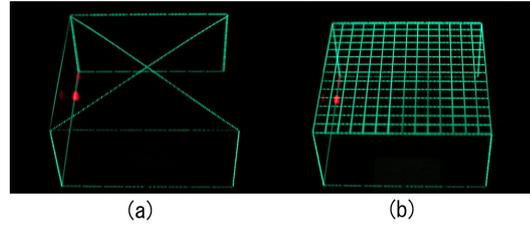


図 15: 本ディスプレイによる対角線および方眼パターンの表示例

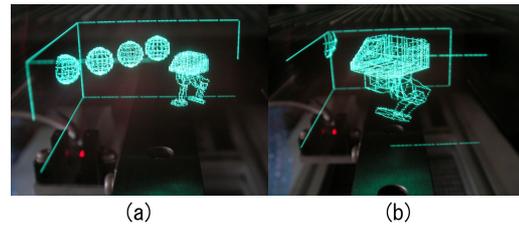


図 16: 動画データの表示例

デューティ比は約 0.36% となる。このため、本ディスプレイの表示画像には $24[\text{Hz}]$ のちらつきが発生する。しかし、体積走査により隣接した断面が次々に発光するため、強い明滅感を伴うちらつきではない。ただし、ビデオカメラ等による動画撮影においては、体積走査と撮影レートとの間に同期ずれがあると、表示画像が時折完全に消滅してしまうように撮影される。

4.4 往復運動機構

往復運動機構の振動に関しては、図 4 に示した機構により往復運動方向の振動はほぼ打ち消され、クランクの運動による振動も低く抑えられていた。これにより、装置本体を設置面に固定せずとも画像がぶれることなく表示されることが確認できた。耐久性については、現在までの動作時間の合計は約 20 時間、うち最大連続動作時間は約 3 時間である。この間、VFD パネルおよび機械系のトラブルは発生していない。

4.5 主要部品の価格

本ディスプレイを構成する主要部品の、本論文執筆時点での価格を表 3 に示す。サーボモータの数量が 2 となっているのは、1 つをブーリとして用いたためである。表示ボードとアルミ部品についてはおおよその総額を示してある。価格に関する比較は単純にはできないが、現在商品化されている Perspecta3D や DepthCube の価格が、本論文執筆時点で約 40000 ~ 50000[USD] であるのに対し、本ディスプレイは汎用

部品を用いて 1/20 以下の価格で製作可能であるため、ボリュームディスプレイのアプリケーションの研究における有用性があると思われる。

表 3: 主要部品の価格

	manufacturer, parts No.	unit price [JPY]	quantity
VFD	Noritake Itron, MW12864J	18750	1
servo motor	NIDEC SERVO, FHK6P20S-D3	21000	2
linear guide	THK, SRS9WM-200LM	15500	2
display board	-	40000 (approx.)	-
aluminium parts	-	20000 (approx.)	-

5 今後の課題

今後の改善点としては (1) 表示の解像度と大きさ, (2) 耐久性と動作音 (3) 動画表示時間の短かさ, 表示のインタラクティブ性の無さ, が挙げられる。(1) に関しては, 現状においても図 13 のように, ある程度複雑な立体を表示可能であるので, アート分野におけるボリュームディスプレイのアプリケーションの研究には利用可能であると思われる。表示の解像度と大きさを改善するには, より高解像度の表示素子の製品化を待つ必要があるが, 大サイズのパネルを用いる場合は往復運動方式よりも回転方式が動作音や耐久性の点で優れる。VFD を回転させる方式は, 2.2 で述べたような問題点があるものの, プロジェクタ素子と光学系を用いたスクリーン回転方式より実装が容易であり, 将来の選択肢の 1 つとなり得る (2) に関しては, 上で述べた動作実績では不十分であり, トラブル発生までの連続使用時間の測定を行い, 耐久性上問題のある部分の改善が必要である。動作音に関しては, その大半がリニアスライドのベアリング音であるので, 低騒音型スライドの使用や, 部品の加工・組み立て精度の向上により改善できる (3) に関しては, 表示ボードに全動画データを蓄積後に表示していることが原因であり, ホストコンピュータとの通信を高速化し, ホストコンピュータからの表示データをリアルタイム表示する表示ボードを構成することにより改善できる。

6 まとめ

VFD を用い, 単純な構造で安価に実現可能なボリュームディスプレイを提案・実装した。このディスプレイにより明瞭な立体静止画像, および滑らかな立体動画の表示が可能であることを確認できた。これにより, VFD を用いたボリュームディスプレイのアート分野における利用可能性を示すことができた。また, 一般の 3D モデリングソフトウェアを用いて本ディスプレイの表示データを作成できるソフトウェアツールを提案・実装し, その有効性を確認できた。

参考文献

- [1] Blundell, B. and Schwarz, A.: *Volumetric Three-Dimensional Display Systems*, Wiley-IEEE Press, New York, USA (2000).
- [2] Traub, A. C.: Stereoscopic Display Using Rapid Varifocal Mirror Oscillations, *Applied Optics*, Vol. 6, pp. 1085–1087 (1967).
- [3] Shiro Suyama, M. D. and Takada, H.: Three-Dimensional Display System with Dual-Frequency Liquid-Crystal Varifocal Lens, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 39, pp. 480–484 (2000).
- [4] Favalora, G., Napoli, J., Hall, D., Dorval, R., Giovinco, M., Richmond, M. and Chun, W.: 100 Million-voxel volumetric display, *Proc. SPIE*, Vol. 4712, pp. 300–312 (2002).
- [5] Sullivan, A.: DepthCube solid state 3D volumetric display, *Proc. SPIE*, Vol. 5291, pp. 279–284 (2004).
- [6] Sullivan, A.: A Solid-state Multi-planar Volumetric Display, *SID Symposium Digest of Technical Papers*, Vol. 34, pp. 1531–1533 (2003).
- [7] Downing, E., Hesselink, L., Ralston, J. and Macfarlane, R.: A Three-Color, Solid-State, Three-Dimensional Display, *SCIENCE*, Vol. 273, pp. 1185–1189 (1996).
- [8] *3D Technology Lab*. <http://www.3dtl.com/>.
- [9] 島田 悟, 欠端雅之, 佐々木史雄, 木村龍実, 屋代英彦, 森 雅彦, 鳥塚健二: 空間立体描画技術の高性能化実験に成功, *産総研 TODAY*, Vol. 7, No. 11, p. 18 (2007).
- [10] *SeeRealTechnologies*. <http://www.seereal.com/>.
- [11] Jones, A., McDowall, I., Yamada, H., Bolas, M. and Debevec, P.: An interactive 360° light field display, *SIGGRAPH '07: ACM SIGGRAPH 2007 emerging technologies*, p. 13 (2007).
- [12] 山本 欧: 蛍光表示管を用いたボリュームディスプレイと表示データ生成ツール, 第 7 回 NICOGRAPH 春季大会 論文&アート部門コンテスト (2008).
- [13] *GLIntercept*. <http://glintercept.nutty.org/>.
- [14] 佐々木宏夫: 実用段階を迎えた 3D ボリュームディスプレイ技術とその概要, *計算工学*, Vol. 10, No. 3, pp. 1192–1197 (2005).
- [15] Favalora, G. E.: Volumetric 3D displays and application infrastructure, *Computer*, Vol. 38, No. 8, p. 18 (2007).
- [16] ノリタケ伊勢電子(株): Noritake itron CL シリーズアプリケーションノート APF130R1.4 (1998).

- [17] (株)イーフロンティア:<http://shade.e-frontier.co.jp/>.
- [18] Bourke, P.: Object Files (.Obj). <http://local.wasp.uwa.edu.au/~pbourke/dataformats/obj/>.

山本 欧



昭和 42 年生．平成 7 年慶應義塾大学大学院理工学研究科計算機科学専攻博士課程満期退学．平成 8 年より東京電機大学工学部電子工学科助手．平成 9 年より同大学講師．平成 11 年より同大学准教授．並列計算機のアーキテクチャ，ポリウムディスプレイの応用に関する研究に従事．情報処理学会，芸術科学会，他会員．工学博士．