

# ボリュウムディスプレイによる3Dフラクタル図形の可視化ツールと評価

新井 諒介<sup>1,a)</sup> 山本 欧<sup>1,b)</sup>

概要: Mandelbulb, Mandelbox などの3Dフラクタル図形は, その複雑で興味深い形状から近年CG分野で注目され, メディア作品の視覚効果に用いられている他, 専用の可視化ツールも多く開発されている. しかしこれらのほとんどは2D表示あるいは視差式3D表示による可視化に留まっており, 立体視の生理的要因を満たす形での3D可視化例はまだない. 本研究では, 筆者らが先行研究として開発した体積走査式ボリュウムディスプレイ上でこれらの図形を可視化するためのツールを開発し, 3Dフラクタル図形の立体的な観察の容易さについて, 市販の視差式3Dディスプレイ上の表示との比較評価を行った.

## 1. はじめに

Mandelbulb, Mandelbox などの3Dフラクタル図形は, その複雑で興味深い形状から近年CG分野で注目され, メディア作品の視覚効果にも用いられている.

Mandelbulb [1] は  $z = [0, 0, 0]$  を初期値としたときに次の漸化式が無限遠に発散しないような定数  $c \in R^3$  の集合である.

$$z \mapsto z^n + c, \quad z \in R^3 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} z^n &= [x, y, z]^n \\ &= r^n [\sin n\theta \cos n\phi, \sin n\theta \sin n\phi, \cos n\theta] \end{aligned} \quad (2)$$

可視化においては,  $n = 8$  が用いられることが多い.

Mandelbox [2] は箱形状のフラクタルであり,  $z = [0, 0, 0]$  を初期値としたときに次の漸化式が無限遠に発散しないような定数  $c \in R^3$  の集合である.

$$v \mapsto s \text{ballFold}(r, f \text{boxFold}(v)) + c \quad (3)$$

ここで,  $r, s, f$  は, パラメタであり,  $\text{ballFold}, \text{boxFold}$  は以下のアルゴリズムで定義される関数である.

---

### アルゴリズム 1 $\text{boxFold}(v)$

---

```
1: function BOXFOLD(v)
2:   for each axis a do
3:     if  $v_a > 1$  then
4:        $v_a = 2 - v_a$ 
5:     else if  $v_a < -1$  then
6:        $v_a = -2 - v_a$ 
7:     end if
8:   end for
9: end function
```

---

---

### アルゴリズム 2 $\text{ballFold}(r, v)$

---

```
1: function BALLFOLD(r, v)
2:   if  $\|v\| < r$  then
3:      $v = v/r^2$ 
4:   else if  $\|v\| < 1$  then
5:      $v = v/\|v\|^2$ 
6:   end if
7: end function
```

---

ここで,  $r = 0.5, s = 2, f = 1$  とすると, 標準的な Mandelbox となる.

図1に代表的な Mandelbulb, Mandelbox の図を示す. 図1に示されるように, これらの図形は立体的かつ無限の再帰構造を有する複雑な形状を持つ. また, パラメタ変化に伴い, 複雑な変形も行う性質を持つ.

図1のような可視化は距離関数を用いたレイマーチングによるレンダリングで行われるが, 近年のPCの性能向上により実用的な時間で実行可能になったため, Mandelbulber [3] といった可視化のためのソフトウェアツールも多く

---

<sup>1</sup> 東京電機大学

<sup>a)</sup> 19kmh02@ms.dendai.ac.jp

<sup>b)</sup> ou@mail.dendai.ac.jp

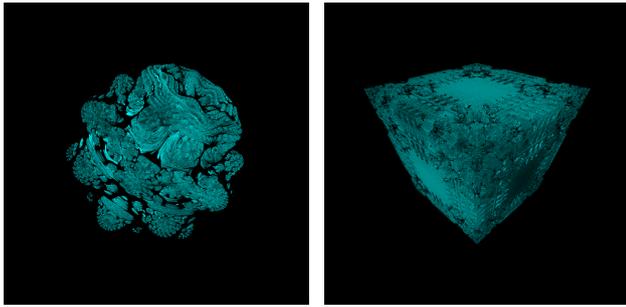


図1 Mandelbulb (左) と Mandelbox (右)

開発されている。しかしこれらのほとんどは PC 画面での 2D 表示あるいは視差式 3D 表示による可視化に留まっており、立体視の生理的要因を満たす形での 3D 可視化例はまだない。

そこで本研究では、筆者らが先行研究として開発した体積走査式ボリュームディスプレイ [4] [5] を用い、立体視の生理的要因を満たす形でこれらの図形を可視化するためのソフトウェアツールを開発し、3D フラクタル図形の構造の立体的な観察の容易さについて、市販の視差式 3D との比較評価を行った。

## 2. 本研究で用いたボリュームディスプレイ

ボリュームディスプレイは、実空間に直接立体像を表示するディスプレイである。これまでに様々な方式のものが考案され [6–11]、近年では往復運動するスクリーンに、プロジェクタで立体の断面を同期して投影する体積走査により立体表示を行う方式のものが商品化されている [12]。

図 2 に本研究で利用したディスプレイを示す。本ディスプレイは蛍光表示パネル (VFD) を表示面と垂直方向に往復運動させて体積走査を行い立体を表示する。本ディスプレイで利用した VFD [13] は縦 128×横 64 の解像度を持ち、立体は移動する VFD による 128 枚の断面画像により表示される。残像効果を利用して表示するため、立体の断面や輪郭を、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。そのため、入手の容易な VFD を選択した。

図 2 において、サーボモータ 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、M の回転速度は 12[rps] (720[rpm]) 一定である。C1 の寸法は  $r = 3[\text{cm}]$ 、 $l = 20[\text{cm}]$  であり、S1 は  $2r = 6[\text{cm}]$  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。M の回転はまた、ベルト B を介しプーリー 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。体積走査は往復運動の中心 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

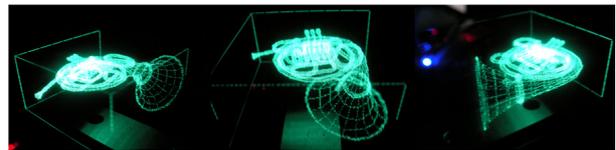
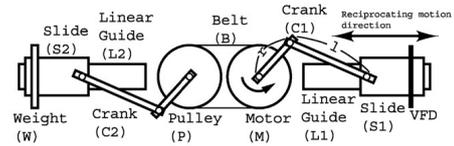
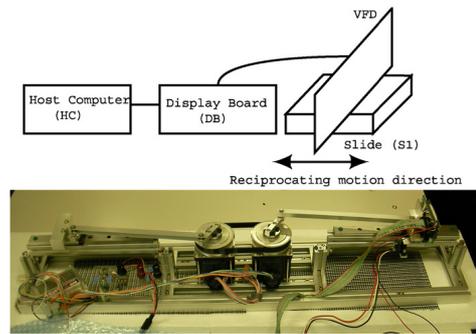


図 2 (上から順に) 本ボリュームディスプレイの構成、往復運動機構の外観、往復運動機構の構造、表示画像例 (3 つの視点から)

うため、体積走査レートは 24[Hz] である。

表示データはホストコンピュータ HC に保存され、USB 2.0 I/F を介して表示ボード DB に転送される。DB はメモリにデータを一時的に保存し、体積走査と同期してデータを VFD に送信する。立体は縦 2cm×横 4cm×奥行 4cm の表示エリアに縦 64×横 128×奥行 128 の解像度で表示される。

本ディスプレイは自発光する VFD パネルにより直接体積走査を行うため、スクリーンに投影する方式に比べ画素の滲みがなく、0.3mm 角のピクセルを広い視野角 (上下左右 170°) かつクロストークなしで表示することができる。これにより、表示画像は小さいものの、単一のオブジェクトを表示する用途には不足のない解像度で鮮明な立体表示を実現している。

## 3. ソフトウェアツール

本ツールは、Qt Creator 4.8 および Qt 5.1.2 を使用して実装した。確認用のビューアを備え、パラメタ (図形パラメタと計算範囲) を設定し、ボリュームディスプレイ表示用のアニメーションデータを生成する機能を持つ。図 3 にアプリケーション画面を、図 4 にボリュームディスプレイ上での表示例を示す。

計算範囲を指定すると、その範囲外の計算がスキップされるため、出力に必要な場所以外の計算を無視し、最終的な出力時間を削減することができる。計算範囲で指定された範囲は、実際のディスプレイに表示される範囲と一致している。ユーザはビューアで好みの形状を探索しながら、パラメタ変化する Mandelbulb や、Mandelbox などのアニ

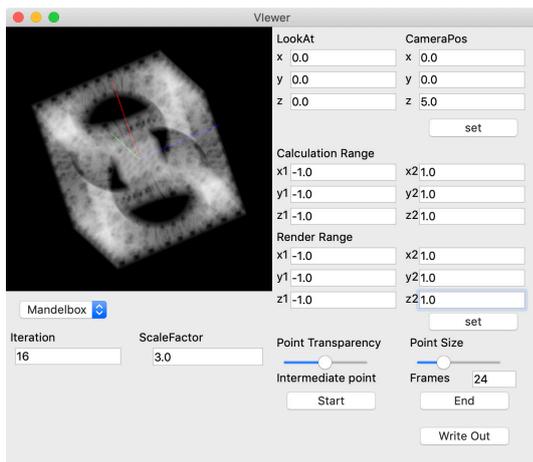


図 3 アプリケーション画面



図 4 ボリュームディスプレイ上での Mandelbox 表示例

メーションデータを作成することができる。

#### 4. 評価と検討

評価は、市販の視差式裸眼立体ディスプレイ Looking Glass [14] と本ボリュームディスプレイについて、3D フラクタル図形の構造の立体的な観察の容易さを比較することにより行った。

ボリュームディスプレイに表示する図形のデータは、本ツールにより Mandelbox の中心に向かってズームインするアニメーションデータを作成し使用した。Looking Glass に表示するデータは、アニメーションの各フレームに対応するボクセルデータ（縦 128 × 幅 128 × 奥行き 128）を本ツールにより生成し、さらにこのボクセルデータからポリゴンモデルを作成した後、Unity を使ってアニメーションデータの作成を行った。Looking Glass 上での表示例を図 5 に示す。

評価は 25 人の被験者を対象として行った。各被験者には、最初ボリュームディスプレイ上で、次に Looking Glass 上で図形を観察させた後、ボリュームディスプレイと Looking Glass のどちらがより 3D フラクタル構造の立体的な観察が容易であったかをアンケートにより回答させた。参加者は全て、フラクタル図形に関する知識のない



図 5 Looking Glass 上で表示した Mandelbox

工学系大学生と一般の男女である。結果は 1 人を除き、ボリュームディスプレイによる表示の方がより立体的に観察できると回答した。両側二項検定による P 値は  $1.5 \times 10^{-6}$  となる。

この結果から、ボリュームディスプレイによる表示は 3D フラクタル構造の観察が容易であると言える。この結果の理由としては、視差式 3D 表示の Looking Glass では立体視の生理的要因が満たされていないこと、および視野角の狭さと垂直方向の視線移動に対応していないことから、立体物の構造把握に必要な自由な視点移動による多方向からの観察が、ボリュームディスプレイに比べ困難であったことが考えられる。

#### 5. 結論

本研究では、ボリュームディスプレイ上で代表的な 3D フラクタル図形である Mandelbulb および Mandelbox を可視化するツールを実装した。そして、3D フラクタル図形の構造の立体的な観察の容易さについて、市販の視差式裸眼 3D ディスプレイと、ボリュームディスプレイによる表示の比較評価を行った結果、ボリュームディスプレイによる表示の優位性が認められた。

#### 参考文献

- [1] White, D.: The unravelling of the real 3d mandelbulb., <http://www.skytopia.com/project/fractal/mandelbulb.html>, (2009)
- [2] Lowe, T: What is a mandelbox?, <https://sites.google.com/site/mandelbox/what-is-a-mandelbox>, (2010)
- [3] <https://www.mandelbulber.com/>
- [4] 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, 芸術科学会論文誌 8, 15-24, (2009)
- [5] 山本 欧, 國分 雅敏, ボリュームディスプレイによる極小曲面の等長変形の可視化, 可視化情報学会論文集, 30, no.6, 39-45, (2010)
- [6] Suyama, S., Date, M., Takata, H.: Three-Dimensional Display System with Dual-Frequency Liquid-Crystal Varifocal Lens. Jpn. J. Appl. Phys. 39, 195-197 (2000)
- [7] Favolora, G., Napoli, J., Hall, D., Dorval, R., Giovinco, M., Richmond, M., Chun, W.: 100 Million-voxel volu-

- metric display. In: Proc. SPIE 4712, pp.300-312 (2002)
- [8] Sullivan, A.: DepthCube solid state 3D volumetric display. In: Proc. SPIE 5291, pp.279-284 (2004)
- [9] Downing, E., Hesselink, L., Ralston, J., Macfarlane, R.: A Three-Color, Solid-State, Three-Dimensional Display. *Science*, 273, no. 5279, pp.1185-1189 (1996)
- [10] Refai, H.H.:Static Volumetric Three-Dimensional Display. *J. Display Technol.* 5, no. 10, pp.391-397 (2009)
- [11] Saito, H., Kimura, H., Shimada, S., Naemura, T., Kayahara, J., Jarusirisawad, S., Nozick, V., Ishikawa, H., Murakami, T., Aoki, J., Asano, A., Kimura, T., Kakehata, M., Sasaki, F., Yashiro, H., Mori, M., Torizuka, K., Ino, K., Laser-plasma scanning 3D display for putting digital contents in free space. In: Proc. SPIE 6803 Stereoscopic Displays and Applications XIX, 680309 (2008)
- [12] <https://voxon.co/voxon-vx1-available-for-purchase/>
- [13] [https://www.noritake-itron.jp/eng/cs/appnote/apf100\\_vfd/index.html](https://www.noritake-itron.jp/eng/cs/appnote/apf100_vfd/index.html)
- [14] <https://lookingglassfactory.com/>