

修士論文

2017年度

タイトル

堀井 絵里

(学籍番号：81621728)

指導教員 教授 藤代 一成

2018年3月

慶應義塾大学大学院理工学研究科
開放環境科学専攻

論文要旨

ああああああああああああああああああああ。

キーワード

あああああ， いいいいい， ううううう。

Thesis Abstract

Title

aaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaa.

Keywords

Aaaaa; bbbbb; cccc.

目 次

1	序論	1
1.1	研究背景	2
1.1.1	3次元ディスプレイの種類	2
1.1.2	レーザプラズマ式3次元ディスプレイ (LPSD)	3
1.2	研究目的	3
1.3	本論文の構成	3
2	関連研究	4
2.1	レーザプラズマ式3次元ディスプレイに関する研究	5
2.2	物体の表面特徴量に関する研究	5
2.2.1	曲率	5
2.2.2	マルチスケールな特徴量算出	5
2.2.3	Tangent Spehre Accessibility (TSA) と Tangent Sphere Intersection Value (TSIV)	5
2.2.4	mesh saliency	5
2.3	画像の評価方法に関する研究	5
3	提案手法	6
3.1	描画したい物体の表面特徴量算出	7
3.1.1	曲率	7
3.1.2	大局的な曲率	9
3.1.3	TSIV	9
3.1.4	mesh saliency	9
3.2	描画用ファイルの作成	9
3.2.1	点のリサンプリング	9
3.2.2	一筆書きの戻り経路の追加	9
3.3	特徴量の値を使用した各点の明度の変更	9
3.3.1	閾値との比較による明度の変更	9
3.4	Point Cloud Generator	10

4	実験結果と評価	12
4.1	閉鎖空間型 LPSD を用いた描画結果	13
4.1.1	特徴的な部分を明るくした場合の実験結果	13
4.1.2	暗い部分の密度を変更した場合の実験結果	13
4.2	シミュレーション画像を用いた評価実験	13
4.2.1	アンケート形式の評価実験	13
4.2.2	ゲージを用いた評価実験	13
4.3	描画物体と選択する表面特徴量の数理関連	13
5	結論	14
5.1	まとめ	15
5.2	今後の課題	15
5.2.1	線画作成手法を応用した特徴点列配置	15
5.2.2	評価方法の改善	15
5.2.3	他の 3 次元ディスプレイにおけるリソースアウェア・レンダリング	15
	参考文献	17
	公開文献	19
A	Point Cloud Generator 利用マニュアル	A-1
A.1	使用するポリゴンモデルのスケール変更	A-2
A.2	表面特徴量の算出	A-2
A.3	シミュレーション	A-2
A.4	描画用ファイルの出力	A-2
A.5	ゲージを用いた描画の評価	A-2

図 目 次

1.1	3次元ディスプレイの分類の例	2
3.1	ある点に隣接する頂点の位置を用いて主曲率を近似する文献 [3] の手法	7
3.2	hand モデル [29] において, 特徴量と閾値を比較した場合と, 特徴量の絶対値と閾値 と比較した場合の特徴点列の結果. (a) 平均曲率のカラーマップ, (b) 特徴量と閾値 0.1 の比較, (c) 特徴量の絶対値と閾値 0.1 の比較.	10
3.3	Point Cloud Generator のインタフェース	11
A.1	Point Cloud Generator のインタフェースと各機能の説明	A-2

表 目 次

4.1 描画実験に使用した各モデルにおいて選択した特徴量と閾値	13
---	----

第 1 章

序論

本章では、1.1 節で研究背景、1.2 節で研究目的、1.3 節で本論文の構成について述べる。また 1.1 節では様々な 3 次元ディスプレイ（1.1.1 項）と、本論文の研究で使用するレーザプラズマ式 3 次元ディスプレイ（1.1.2 項）について、それぞれ詳しく説明する。

1.1 研究背景

近年、3 次元画像・3 次元ディスプレイに関する研究が盛んに行われており、エンタテインメント性の高いバーチャルリアリティ（VR）コンテンツや種々の可視化への応用が期待されている。

文献 [21] では、立体画像と 3 次元画像を次のように分けて定義しているが、学術的には 3 次元画像であっても、立体画像と表記されるケースは少なくない [25]。

- 立体画像
左右二眼分の画像を提示するもの
- 3 次元画像
連続的な視点移動に対応した画像を提示するもの、すなわち空間のある場所に物体の再生像が浮かび上がって見えるもの

現在最も実用化が進んでいる二眼ステレオ立体視方式は、両眼視差を利用することで「立体画像」を提示するが、本研究ではあらゆる方向から見ることのできる「3 次元画像」を表示する、レーザプラズマ式 3 次元ディスプレイを用いる。

1.1.1 3 次元ディスプレイの種類

3 次元ディスプレイには文献 [24] でも紹介されているように多くの種類が存在し、様々な文献でその分類が行われている [19][21][25]。図 1.1 は著者が行った 3 次元ディスプレイの分類である。

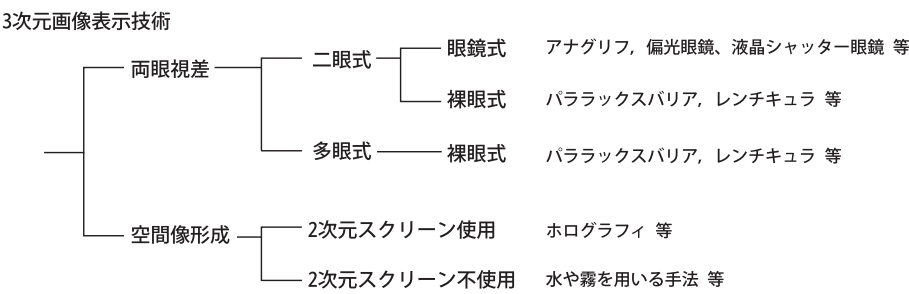


図 1.1 3 次元ディスプレイの分類の例

両眼視差を利用して左右の眼に別々の画像を見せることで立体映像を表示する二眼ステレオ立体視方式に、立体視眼鏡を用いる手法がある。これは眼鏡を用いて、左右それぞれの眼に視差を考慮した画像を見せることで、立体像を認識させる手法である。眼鏡を用いた二眼ステレオ立体視方式には、左右に赤と青のフィルムが貼られた眼鏡を用いるアナグリフ方式や、偏光フィルタの付いた眼鏡を利用した偏光眼鏡方式、眼鏡にシャッターを取り付けて左右の表示を素早く切り替える液晶シャッター眼鏡方式等がある。特に色味の変化が少ない偏光眼鏡方式や液晶シャッター眼鏡方式は、原理が

簡単かつ動画像対応が容易であることから実用化が進み、2009 年に 20 世紀フォックスより配給された大作映画「アバター」の公開を契機に、映画館でよく見られるようになった。

二眼ステレオ立体視方式や、複数の視差画像が左右の眼にそれぞれ入る多眼ステレオ立体視方式には、パララックスバリア方式やレンチキュラ方式のように眼鏡を必要としないものもある。最近ではこのような方式を用いた携帯型ゲーム機や 3DTV も販売され、実用化の兆しを見せ始めている。

しかし二眼ステレオ立体視方式は、いずれも 2 次元平面上に投影される映像を脳内の視覚情報処理によって 3 次元として認識させる手法を利用しているため、顔の位置や向きにより 3 次元を知覚させられなかったり、長時間の視聴によって疲労を感じさせてしまったりする場合がある。

一方、両眼視差を利用せずに 3 次元画像を表示することのできるディスプレイも存在する。3 次元物体から発せられる光の波面を再現することで、自然な立体表示を可能にするホログラフィ方式や、スクリーンに投影された画像を複数のミラーに映し出すことで 3 次元画像を得ることのできる方式 [15] などがあるが、これらはいずれも、画像を投影する 2 次元のスクリーンやディスプレイを必要とする。ミラーやレンズを用いて空間に画像を表示することのできるディスプレイも存在するが、何も無い空中に物体を描くことのできるディスプレイは少ない。水や霧などに投影する手法では、明るいところでは見にくく、スクリーンとしての安定性に欠けるという欠点がある。

1.1.2 レーザプラズマ式 3 次元ディスプレイ (LPSD)

1.2 研究目的

1.3 本論文の構成

本論文は次章以降、以下のように構成されている。

第 2 章 関連研究

LPSD に関する研究や、提案手法で用いる表面特徴量に関する研究について述べる。

第 3 章 提案手法

1.2 節で示した研究目的を達成するための手法を説明する。

第 4 章 実験結果と評価

LPSD を用いて行った描画実験の結果とその評価をまとめる。

第 5 章 結論

本研究の結論を述べ、今後の課題に言及する。

なお、本研究で用いた Tangent Sphere Accessibility という表面特徴量に関する成果は文献 [33] に掲載されている。また本研究の成果の一部である特徴点列作成に関するシミュレーション評価について、Visual Computing / グラフィックスと CAD 合同シンポジウム 2011 にて発表を行った [32]。

第 2 章

関連研究

本章では、レーザプラズマ式3次元ディスプレイに関する研究について2.1節で、物体の表面特徴量に関する研究について2.2節で、表面特徴量を使用した描画の評価に関する研究について2.3節で述べる。2.2節では曲率の算出手法(2.2.1項)や、曲率をマルチスケールに算出する手法(2.2.2項)、また曲率以外の表面特徴量として Tangent Sphere Accessibility (TSA) と Tangent Sphere Intersection Value (TSIV) の算出手法(2.2.3項)、mesh saliency の算出手法(2.2.4項)についてそれぞれ詳しく説明する。なおこれらの表面特徴量は、3.1節に示す本論文の提案手法にて用いられている。

2.1 レーザプラズマ式3次元ディスプレイに関する研究

2.2 物体の表面特徴量に関する研究

2.2.1 曲率

2.2.2 マルチスケールな特徴量算出

2.2.3 Tangent Spehre Accessibility (TSA) と Tangent Sphere Intersection Value (TSIV)

2.2.4 mesh saliency

2.3 画像の評価方法に関する研究

第 3 章

提案手法

本研究の目的は、物体の表面特徴量を使用して点の明度や密度の制御により、物体の特徴を最大限に引き出した描画を実現することである。しかし LPSD を使用しながら点の明度や密度を決定するにはたいへんな手間や時間がかかるため、PC 上で事前にシミュレーションを行う。まず表示したい物体のポリゴンモデルから表面特徴量を算出し、LPSD 描画用の一筆書き点列データを作成する。その後ポリゴンモデルの表面特徴量を参照することで、一筆書き点列データの各点における明度・密度を決定する。

本章では各ステップでの操作について詳しく説明していく。まず 3.1 節では物体の表面特徴量算出方法を示し、3.1.1 項～3.1.4 項で本研究で使用する特徴量である曲率、大局的な情報を用いる曲率、Tangent Sphere Intersection Value (TSIV), mesh saliency の算出方法について記述する。3.2 節では、特徴量算出に用いたポリゴンモデルをディスプレイで描画可能なファイル形式に変換する方法を示す。3.2.1 項では一筆書き点列のリサンプリングについて、3.2.2 項では一筆書きの終点から始点への戻り経路追加についてそれぞれ説明する。3.3 節では、算出された表面特徴量と描画用一筆書きデータを用いて各点の明るさを決定する方法について記述する。3.3.1 項では明るさの変更について、3.3.2 項では密度の変更について述べる。また 3.1 節～3.3 節で示される処理を実現するソフトウェアについて、3.4 節で説明する。

3.1 描画したい物体の表面特徴量算出

描画対象とする物体の 3 次元ポリゴンモデルに対し、次の 8 つの特徴量を算出する。これにより、表示する物体に合わせて特徴量を選択することが可能となる。

3.1.1 曲率

本論文では、まず Goldfeather らの手法 [3] を用いて主曲率を算出し、2 つの主曲率の値からガウス曲率と平均曲率を算出する。

図 3.1 のように、物体表面上のある点を \mathbf{p} 、頂点法線を \mathbf{N}_p とし、 \mathbf{p} に隣接する n 個の頂点を $\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \dots, \mathbf{q}_n$ とおく。また各 \mathbf{q}_i から \mathbf{p} への変位ベクトル $\mathbf{q}_i - \mathbf{p}$ を点 \mathbf{p} の接平面に射影したベクトルを \mathbf{y}_i 、 \mathbf{p} における \mathbf{q}_i 方向の曲率を $\kappa_{\mathbf{y}_i}$ とおくと、曲率テンソル \mathbf{W} に関する次の式が成り立つ：

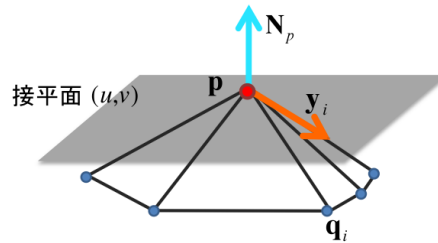


図 3.1 ある点に隣接する頂点の位置を用いて主曲率を近似する文献 [3] の手法

$$\kappa_{\mathbf{y}_i} = \mathbf{y}_i^T \mathbf{W} \mathbf{y}_i \quad (3.1)$$

Goldfeather らは \mathbf{N}_p と \mathbf{y}_i から主曲率を近似できるとしており、このときの各曲率の近似値 $\kappa'_{\mathbf{y}_i}$ は、

$$\kappa'_{\mathbf{y}_i} = 2 \frac{(\mathbf{p} - \mathbf{q}_i) \cdot \mathbf{N}_{\mathbf{p}}}{(\mathbf{p} - \mathbf{q}_i) \cdot (\mathbf{p} - \mathbf{q}_i)} \quad (3.2)$$

という式で求めることができる。これはすべての頂点 \mathbf{q}_i について成り立つので、式 (3.1)，式 (3.2) から次のような n 個の式が成立することとなる。

$$\mathbf{y}_i^T \mathbf{W} \mathbf{y}_i = \kappa'_{\mathbf{y}_i} (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3.3)$$

ここで曲率テンソルは二次対称行列であるので

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} a & b \\ b & c \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

とおき，各変位ベクトル \mathbf{y}_i を局所座標系 \mathbf{u}, \mathbf{v} で表すと

$$\mathbf{y}_i = (u_i, v_i) \quad (3.5)$$

となる。式 (3.4)，式 (3.5) を式 (3.3) に代入すると，

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_i^T \mathbf{W} \mathbf{y}_i &= (u_i, v_i) \begin{pmatrix} a & b \\ b & c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_i \\ v_i \end{pmatrix} \\ &= (u_i^2, 2u_i v_i, v_i^2) \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \kappa'_{\mathbf{y}_i} \end{aligned}$$

という式が導ける。この式は n 個の頂点について成立するので，次の方程式が成り立つ：

$$\begin{pmatrix} u_1^2 & 2u_1 v_1 & v_1^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ u_i^2 & 2u_i v_i & v_i^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ u_n^2 & 2u_n v_n & v_n^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \kappa'_{\mathbf{y}_1} \\ \vdots \\ \kappa'_{\mathbf{y}_i} \\ \vdots \\ \kappa'_{\mathbf{y}_n} \end{pmatrix}$$

この連立方程式を最小二乗法で解く。 n 個の式における二乗誤差の和を $E(a, b, c)$ とおくと

$$E(a, b, c) = \sum_{i=1}^n \left[\begin{pmatrix} u_i^2 & 2u_i v_i & v_i^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} - \kappa'_{\mathbf{y}_i} \right]^2$$

このとき $E(a, b, c)$ を最小にする以下の偏微分方程式が成り立つ。

$$\frac{\partial E(a, b, c)}{\partial a} = 0, \frac{\partial E(a, b, c)}{\partial b} = 0, \frac{\partial E(a, b, c)}{\partial c} = 0 \quad (3.6)$$

ここで式 (3.6) の係数から次の三元連立一次方程式が成り立ち、これを解くことで a, b, c が求まる。

3.1.2 大局的な曲率

3.1.3 TSIV

3.1.4 mesh saliency

3.2 描画用ファイルの作成

3.2.1 点のリサンプリング

3.2.2 一筆書きの戻り経路の追加

3.3 特徴量の値を使用した各点の明度の変更

3.3.1 閾値との比較による明度の変更

3.1 節に示した計算方法を用いて算出した各種特徴量と設定した閾値を比較し、明るさを調整することで、特徴点列を作成する。以下にアルゴリズムを示す。

Algorithm 1 各頂点の明度の決定

```
1: FOR 全ての頂点 DO
2:   IF 特徴量  $\geq$  閾値 THEN
3:     明るめに描画
4:   ELSE
5:     暗めに描画
6:   END IF
7: END FOR
```

この方法では、図 3.2(a) の青い部分のように特徴量の絶対値が大きくても、閾値より小さいと暗めに描画されてしまうことがある。特徴量の値をそのまま使用するか、絶対値を使用するかは対象のモデルによって異なると考えられるので、場合によっては次のように特徴量の絶対値を使用できるようにする。

Algorithm 2 各頂点の明度の決定（絶対値使用）

```

1: FOR 全ての頂点 DO
2:   IF 特徴量の絶対値  $\geq$  閾値 THEN
3:     明るめに描画
4:   ELSE
5:     暗めに描画
6:   END IF
7: END FOR

```

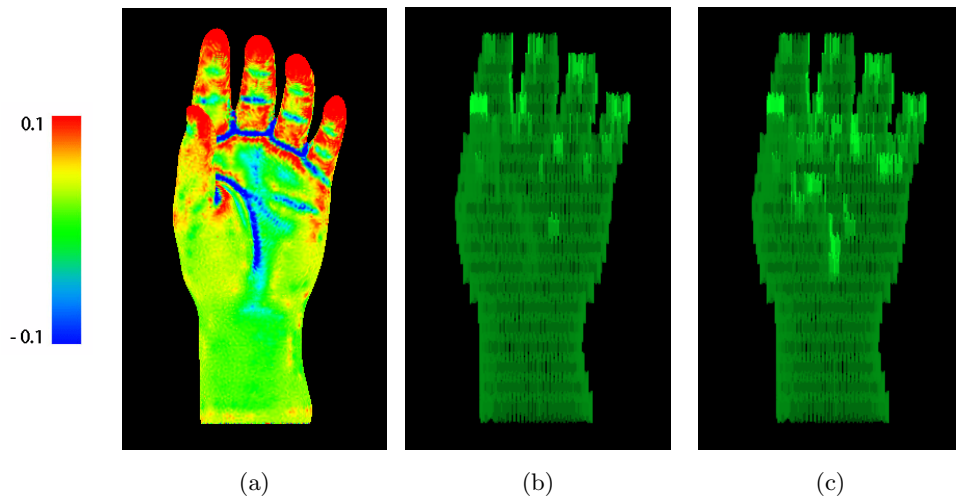


図 3.2 hand モデル [29] において、特徴量と閾値を比較した場合と、特徴量の絶対値と閾値と比較した場合の特徴点列の結果。(a) 平均曲率のカラーマップ, (b) 特徴量と閾値 0.1 の比較, (c) 特徴量の絶対値と閾値 0.1 の比較.

3.4 Point Cloud Generator

3.1 節～3.3 節で、物体の表面特徴量を利用して明度を決定した一筆書きデータを作成する方法について述べたが、LPSD を使用しながら点の明度や密度を決定するにはたいへんな手間や時間がかかる。そこでコンピュータ上で事前評価を行い、LPSD に入力可能な、適切な点列データを生成するための専用ソフトウェアとして、Mac OS 上で動作する Point Cloud Generator を開発した（図 3.3）。このソフトウェアは次に挙げる 5 つの機能をもつ。詳しい使用方法是付録 A にて解説する。

- 3 次元ポリゴンモデルのスケール変更機能

LPSD で描画可能なサイズである $200 \times 200 \times 200$ のサイズへスケール変更を行う。

- 3 次元ポリゴンモデルからの表面特徴量算出機能

3.1 節で説明した各種表面特徴量を算出する。

- シミュレーション機能

スライダにて閾値を変化させることで、一筆書き点列における各点の明度や密度を変え、描画の事前評価を行う。またシミュレーション画面に対し、次に記す操作が可能である。

- 点で描画するモード／SRV-5000での描画の見えに近いモードの切り替え
 - 透視投影モード／平行投影モードの切り替え
 - 明暗の反転
 - 視点から物体までの距離の変更
 - 物体の回転
- 最終的な描画ファイルの出力機能
シミュレーションで決定した明度の情報をもつ LPSD 描画ファイルを出力する。
 - ゲージを用いた描画の評価機能
Cole らの手法 [2] を応用した，ゲージを用いた評価実験を行う。

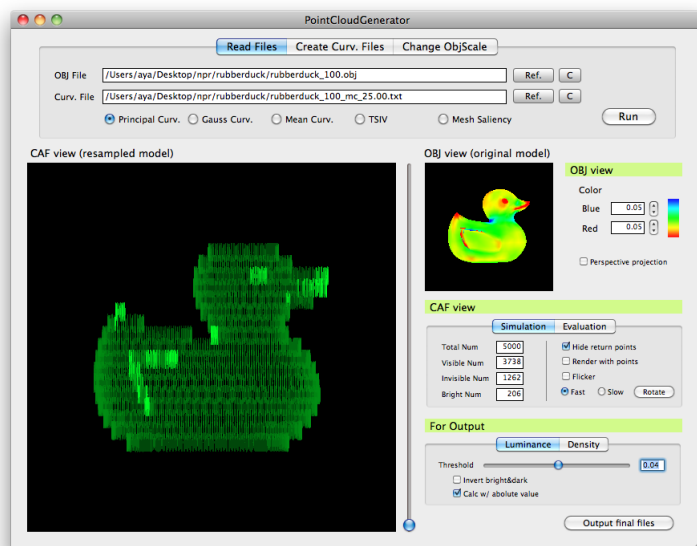


図 3.3 Point Cloud Generator のインタフェース

第 4 章

実験結果と評価

本章では，3章で紹介した手法によって得られた LPSD 描画用の一筆書き点列データを用いて行った実験の結果と，その評価について記述する．4.1 節では閉鎖空間型の LPSD である SRV-5000 で描画した結果について説明する．4.1.1 項では特徴的な部分を明るくした場合の描画結果，4.1.2 項ではあまり特徴的でない部分の密度を小さくした場合の描画結果をそれぞれ示す．4.2 節では，シミュレータ機能をもつ Point Cloud Generator で得られた点列画像を用いた評価実験について記述する．4.2.1 項ではアンケート形式の評価実験結果について，4.2.2 項ではゲージを用いた評価実験結果について述べる．4.3 節では描画対象のモデルと，各点の明度決定のために選択する表面特徴量の数理的関連について考察する．

4.1 閉鎖空間型 LPSD を用いた描画結果

4.1.1 特徴的な部分を明るくした場合の実験結果

3.1 節で示した手法を用いて 6 つのモデルについて表面特徴量の算出を行った．その後算出された特徴量の中から 1 つ選択し，3.3.1 項で説明したように各点において設定した閾値と比較することで，Point Cloud Generator 上でシミュレーションして一筆書き点列データの各点の明度を決定した．表 4.1 は，実験に用いた各モデルにおいて選択した特徴量の種類と，明度決定のために比較した閾値の値をまとめたものである．特徴量と閾値は，Point Cloud Generator 上での試行錯誤により決定した．また図 ?? に，選択した特徴量を可視化したカラーマップを示す．得られた一筆書きデータを SRV-5000 に入力し，特徴点列を明るくした場合の描画実験を行った．

表 4.1 描画実験に使用した各モデルにおいて選択した特徴量と閾値

	選択した特徴量	閾値
banana	主曲率 (そのままの値)	0.06
casting	大局的 (範囲: 15) な平均曲率 (絶対値)	0.03
cow	大局的 (範囲: 25) な主曲率 (絶対値)	0.09
hand	平均曲率 (絶対値)	0.1
rubberduck	大局的 (範囲: 25) な平均曲率 (絶対値)	0.04
teapot	主曲率 (絶対値)	0.04

4.1.2 暗い部分の密度を変更した場合の実験結果

4.2 シミュレーション画像を用いた評価実験

4.2.1 アンケート形式の評価実験

4.2.2 ゲージを用いた評価実験

4.3 描画物体と選択する表面特徴量の数理関連

第 5 章

結論

5.1 まとめ

本論文では、種々の物体の表面特徴量を利用することで、3次元ディスプレイの表示資源を有効に活用し、物体の特徴を引き出すリソースアウェア・レンダリングを実現できることを示した。

5.2 今後の課題

本研究に関連した今後の課題を次に示す。

5.2.1 線画作成手法を応用した特徴点列配置

NPR 技術の中でも3次元オブジェクトからの線画作成手法は盛んに研究がなされており、手法は多数存在する。これらを応用することで、閾値との比較とは異なった特徴点列作成が可能になると考えられる。線画作成手法の多くは視点に依存するが、LPSDのようにどの方向からでも見ることのできるディスプレイでの描画に応用する際には、視点非依存型の線画作成手法がより有用である。視点に依存しない線画作成手法として、古典的な手法である ridges and valleys[5] や、Kolomenkin ら [11] の提案する demarcating curves がある。これらを応用することで、本研究で得られた結果とは違った描画結果を得ることができると考えられる。

5.2.2 評価方法の改善

4.2.2 項に記したゲージを用いた評価実験は、PC に表示される画像上で行っている。本研究は LPSD における描画に関する研究であるため、ディスプレイの描画時にシースルー型のヘッドマウントディスプレイをかぶり、データグローブを用いて同様の操作をすることで、より実際の描画に基づいた評価実験を行うことを考えている。

5.2.3 他の3次元ディスプレイにおけるリソースアウェア・レンダリング

本論文では、閉鎖空間型レーザプラズマ式3次元ディスプレイ（LPSD）を用いて描画実験を行ったが、この成果は他のディスプレイへも適用できるものとする。LPSD は閉鎖空間型と、より解像度の低い空中型の2種類が存在するため、本手法を応用して空中型 LPSD 用のデータを作成し実験を行うことや、その他の3次元ディスプレイでのリソースアウェア・レンダリングの実現は今後の課題である。

謝辭

参考文献

- [1] Cipriano, G., Phillips Jr., G., and Gleicher, M.: “Multi-Scale Surface Descriptors,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Volume 15, Issue 6, pp. 1201-1208, November 2009.
- [2] Cole, F., Sanik, K., DeCarlo, D., Finkelstein, A., Funkhouser, T., Rusinkiewicz, S., and Singh, M.: “How Well Do Line Drawings Depict Shape?” *ACM Transactions on Graphics*, Volume 28, Issue 3, Article No. 28, August 2009.
- [3] Goldfeather, J. and Interrante, V.: “A Nobel Cubic-Order Algorithm for Approximating Principal Direction Vectors,” *ACM Transactions on Graphics*, Volume 23, Issue 1, pp. 45-63, January 2004.
- [4] Gumhold, S.: “Maximum Entropy Light Source Placement,” in *Proc. IEEE Visualization '02*, pp. 275-282, November 2002.
- [5] Interrante, V., Fuchs, H., and Pizer, S.: “Enhancing Transparent Skin Surfaces with Ridge and Valley Lines,” in *Proc. IEEE the 6th conference on Visualization '95*, pp. 52-59, October-November 1995.
- [6] Ishikawa, H. and Saito, H.: “Point Cloud Representation of 3D Shape for Laser- Plasma Scanning 3D Display,” in *Proc. 34th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 1913-1918, November 2008.
- [7] Ishikawa, H. and Saito, H.: “Closed-Line Based Representation of 3D Shape for Point Cloud for Laser-Plasma Scanning 3D Display,” in *Proc. 18th International Conference on Artificial Reality and Telexistence*, pp. 28-35, December 2008.
- [8] Ishikawa, H. and Saito, H.: “Billboard Representaion for Laser-Plasma Scanning 3D Display,” in *Proc. ASIAGRAPH 2009*, pp. 41-46, October 2009.
- [9] Itti, L., Dhavale, N., and Pighin, F.: “Realistic Avatar Eye and Head Animation Using a Neurobiological Model of Visual Attention,” in *Proc. SPIE*, pp. 64-78, August 2003.
- [10] Kimura, H., Uchiyama, T., and Yoshikawa, H.: “Laser Produced 3D Display in the Air,” *ACM SIGGRAPH 2006 Emerging Technologies*, August 2006.
- [11] Kolomenkin, M., Shimshoni, I., and Tal, A.: “Demarcating Curves for Shape Illustration,” *ACM Transactions on Graphics*, Volume 27, Issue 5, Article No. 157, December 2008.
- [12] Lee, C. H., Varshney, A., and Jacobs, D. W.: “Mesh Saliency,” *ACM Transactions on Graphics*, Volume 24, Issue 3, pp. 659-666, July 2005.

- [13] Meyer, M., Desbrun, M., Schröder, P., and Barr, A. H.: “Discrete Differential-Geometry Operators for Triangulated 2-Manifolds,” in *Visualization and Mathematics III (Proc. of VisMath 2002)*, pp. 35-54, November 2002.
- [14] Miller, G.: “Efficient Algorithms for Local and Global Accessibility Shading,” in *Proc. SIGGRAPH 94*, pp. 319-326, August 1994.
- [15] Otsuka, R., Hoshino, T., and Horry, Y.: “Transpost: A Novel Approach to the Display and Transmission of 360 Degrees-Viewable 3D Solid Images,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Volume 12, Issue 2, pp. 178-185, March-April 2006.
- [16] Saito, H., Kimura, H., Shimada, S., Naemura, T., Kayahara, J., Jarusirisawad, S., Nozick, V., Ishikawa, H., Murakami, T., Aoki, J., Asano, A., Kimura, T., Kaehata, M., Sasaki, F., Yashiro, H., Mori, M., Torizuka, K., and Ino, K.: “Laser-Plasma Scanning 3D Display for Putting Digital Contents in Free Space,” in *Proc. SPIE Stereoscopic Displays and Applications XIX*, pp. 680309:1-10, January 2008.
- [17] Taubin, G.: “Estimating the Tensor of Curvature of a Surface from a Polyhedral Approximation,” in *Proc. IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 902-907, June 1995.
- [18] 市川 尋代：空間表示 3D ディスプレイにおけるコンテンツ描画に関する研究，慶應義塾大学理工学研究科博士論文，2010 年 5 月。
- [19] 稲田 修一：三次元映像，昭晃堂，1991 年 7 月。
- [20] 江浦 由佳，藤代 一成：「Tangent Sphere Accessibility にもとづくエイジング効果のレンダリング」，情報処理学会研究報告 96-CG-81，pp. 79-84，1996 年 8 月。
- [21] 大越 孝敬：三次元画像工学，朝倉出版，1991 年 7 月。
- [22] 櫻井 良昭：デザイナーの意図を考慮した線描法の提案，慶應義塾大学理工学研究科修士論文，2010 年 3 月。
- [23] 藤代 一成：「3 次元ディスプレイのためのリソースアウェア・レンダリング」，日本色彩学会視覚情報基礎研究会第 8 回研究発表会論文集，招待講演 CSA-FVI-2011-1，pp. 3-5，2011 年 6 月。
- [24] 本田 捷夫，奥井 誠人，高木 康博，河北 真宏，吉川 浩，陶山 史朗：「立体映像技術」，映像情報メディア学会誌，Volume 62，No. 8，pp. 1262-1265，2008 年 8 月。
- [25] 吉田 隆：立体視テクノロジー 一次世代立体視技術の最前線一，株式会社エヌ・ティー・エス，2008 年 10 月。
- [26] 淀川 英司，東倉 洋一，中根 一成：視聴覚の認知科学，電子情報通信学会，1998 年 3 月。
- [27] Assembla, <https://subversion.assembla.com/svn/ezshade/trunk/code/geom/teapot.obj>
- [28] FormAssembly, <https://app.formassembly.com/>
- [29] Liris – A Benchmark for 3D Mesh Watermarking, <http://liris.cnrs.fr/meshbenchmark/>
- [30] TurboSquid, <http://www.turbosquid.com/>

公開文献

- [31] Kimura, H., Asano, A., Fujishiro, I., Nakatani, A., and Watanabe, H.: “True 3D Display,” *ACM SIGGRAPH 2011 Emerging Technologies*, August 2011, abstract available in Full Conference DVD-ROM.
- [32] 中谷 文香, 藤代 一成, 木村 秀尉, 浅野 明: 「3次元ディスプレイのための特徴点列の抽出に関するシミュレーション評価」, *Visual Computing/GCAD 合同シンポジウム 2011DVD 予稿集*, No. 30, 2011 年 6 月.
- [33] 中谷 文香, 藤代 一成, 大野 義夫: 「山岳形状における積雪量を制御するサーフェス記述子の提案」, *芸術科学会論文誌*, Volume 10, No. 2, pp. 79-86, 2011 年 6 月.

付 録 A

Point Cloud Generator 利用マニュアル

ここでは本論文で紹介したソフトウェア, Point Cloud Generator (図 A.1) の利用方法について記述する. このソフトウェアは LPSD で描画する物体の点の明度・密度を事前評価することを可能とし, LPSD に入力可能な点列データを生成する. また次に示す 5 つの機能をもち, Mac OS X 上で動作する.

- 3次元ポリゴンモデルのスケール変更機能
- 3次元ポリゴンモデルからの表面特徴量算出機能
- シミュレーション機能
- 最終的な描画ファイルの出力機能
- ゲージを用いた描画の評価機能

各機能について A.1~A.5 で詳しく説明する.

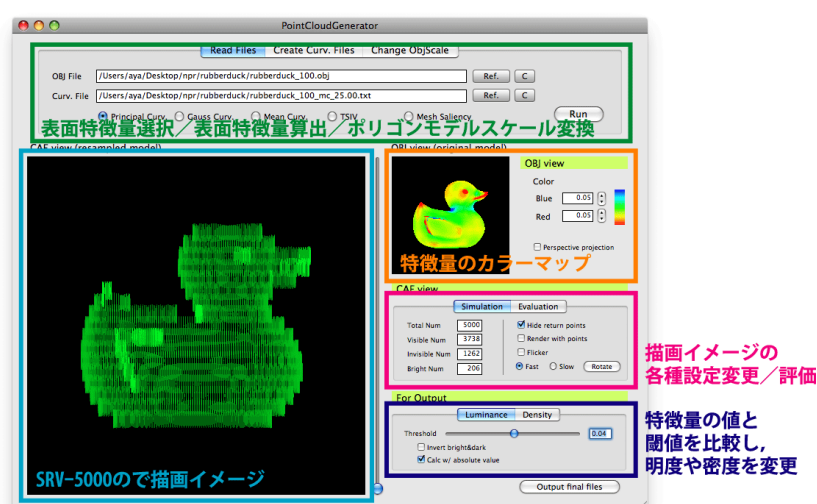


図 A.1 Point Cloud Generator のインターフェースと各機能の説明

A.1 使用するポリゴンモデルのスケール変更

A.2 表面特徴量の算出

A.3 シミュレーション

A.4 描画用ファイルの出力

A.5 ゲージを用いた描画の評価