

修士学位論文

表面構造を考慮した  
複眼のリアルタイムレンダリング

平成 26 年度

東京大学大学院 学際情報学府

先端表現情報学コース

136313

佐川 和輝

指導教員 河口 洋一郎 教授



# 目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景 . . . . .	1
1.2	本研究の目的 . . . . .	1
1.3	本論文の構成 . . . . .	1
第 2 章	関連研究	3
2.1	微細構造を扱った研究 . . . . .	3
2.2	本研究の位置づけ . . . . .	3
第 3 章	周辺技術	5
第 4 章	予備実験	7
4.1	実験の目的 . . . . .	7
4.2	実験方法 . . . . .	7
第 5 章	提案手法	9
5.1	フレームワーク . . . . .	9
5.1.1	複眼モデル . . . . .	9
5.1.2	アルゴリズムの全体像 . . . . .	10
5.2	オブジェクトファイルフォーマット . . . . .	11
5.3	転送データ . . . . .	11
5.3.1	テキスト座標軸方向 3 次元単位ベクトル . . . . .	12
5.4	GPU 処理 . . . . .	15
5.4.1	新しいサブ sekusyon . . . . .	15

iv		目次
第 6 章	結果と考察	17
6.1	*サブセクション* . . . . .	17
第 7 章	結論	19
7.1	結論 . . . . .	19
7.2	今後の展望 . . . . .	19
謝辞		20

## 図目次

5.1	シェーディングモデル . . . . .	10
5.2	アルゴリズムフレームワーク . . . . .	10
5.3	ポリゴン上における頂点座標値およびテクスチャ座標値の関係 . . . . .	13
5.4	平面上の変位ベクトル . . . . .	14



# 表目次





# 第 1 章

## 序論

### 1.1 研究背景

近年では、コンピュータグラフィックスの表現において、実写並みのリアリズムが要求されるようになってきた。実物と見間違ふほどの CG も珍しくなくなり、聴衆は実物と CG との差異に敏感になってきている。

### 1.2 本研究の目的

これまでに紹介したように、技術の進歩にともなって、コンピュータグラフィックスに対する要求は増してきつつある。さらに、近年では実時間での計算

### 1.3 本論文の構成

#### \*\*\*要チェックポイント\*\*\*

本論文の構成について述べる。次の第 2 章では、本研究と関連のある技術手法や生物分野で複眼について調査等を行った研究を紹介する。第 3 章では、周辺技術として本研究の基礎となるシェーダアルゴリズムについて解説を行う。続いて第 4 章では、過去の研究に基づいて本研究で実際に行った予備実験について説明する。実験結果を踏まえて第 5 章では、新しく提案するシミュレーション手法を述べる。



## 第 2 章

# 関連研究

りれーてっどわーく。てすとてすとてすとテストテストテストテストテストテストテストテストテストテストテストテストテストテストテストテストテストテスト

### 2.1 微細構造を扱った研究

表面微細構造をもつ物質をレンダリングする研究が過去にいくつか行われている。

### 2.2 本研究の位置づけ

本研究の位置づけについて述べる。



## 第 3 章

# 周辺技術

本章では、……と関連の深いなにかかんとか。



## 第 4 章

# 予備実験

### 4.1 実験の目的

実験の目的は……これこれこういうことですよ～。

### 4.2 実験方法

こんな風にして実験を行いましたよん。





## 第 5 章

# 提案手法

1.2 節で述べたように、本研究の目的は複眼表面に観測される光学的現象をリアルタイムレンダリングによって表現することである。本章では、レンダリング時の計算アルゴリズムについて詳細に解説していく。まず、5.1 節で本手法で用いた複眼の近似モデルを提案する。次に 5.3 節では、アプリケーションから画像処理用演算プロセッサ（GPU）へと転送するデータと、その生成時に用いた計算アルゴリズムを説明する。そして 5.4 節では、画像処理用演算プロセッサにおいて描画色を求める手法を説明する。

### 5.1 フレームワーク

#### 5.1.1 複眼モデル

第 4 章で取り上げた実験をもとに、シェーダアルゴリズムに図のようなモデルを採択した (Fig.5.1)。ポリゴン直下に屈折レンズの役割を果たす球体を配置し、表面を埋め尽くすように多数配置している。さらに、テクスチャ平面と称してポリゴンと平行な位置にテクスチャ情報を取得するための平面を配置している。テクスチャ平面は、??節で説明した色素細胞の役割を担っている。レンズによって屈折された光はテクスチャ平面へ到達し、テクスチャ平面上の情報から色への影響を決定する。

続いて、モデルの利点を説明する。まず、このモデルは複雑な複眼の構造を球や平面などの単純な幾何立体の集合として扱うことができる。そのため、光の屈折等を計算する際に、きわめて軽量の計算量で済むという利点がある。次に、第 4 章の実験は永田 [] が示しているように偽瞳孔現象の特徴を十分に再現している。ゆえに、近似モデルとして十分に目的を果たすことが期待できる。



Fig. 5.1 シェーディングモデル

- ポリゴンの直下にレンズとして球体を配置。
- 距離を開けてポリゴンと平行にテクスチャ平面を配置。

### 5.1.2 アルゴリズムの全体像



Fig. 5.2 アルゴリズムフレームワーク

本手法のアルゴリズムの全体像を説明する。本手法の構成は大きく分けると、最初にオブジェクトファイルの読み込み、次にアプリケーションによる処理および GPU への転送。そして最後に GPU による処理がなされる (Fig.5.2)。GPU で処理を行うのはシェーダとよばれ

るプログラムであり、このシェーダによって演算処理が実行される。アプリケーションでは通常の手法で作成されたオブジェクトファイル情報を加工し、計算に必要な変数を GPU（シェーダ）へ送る。シェーダでは屈折などを考慮した物理計算を行い、最終的に画面に描画する色情報を計算する。

## 5.2 オブジェクトファイルフォーマット

モデリングソフト等により前もってオブジェクトファイルを作成し、アプリケーションで読み込みを行う。さらに、物体形状および法線やテクスチャ座標などの情報を元にアプリケーション内でシェーダへの転送データを生成する。本手法で必要になるオブジェクトファイルのデータは以下の要素である。

- 頂点座標値
- 頂点法線ベクトル
- テクスチャ座標値
- 面情報

頂点座標値および頂点法線ベクトルはそれぞれ 3 次元の浮動小数点型、テクスチャ座標値は 2 次元の浮動小数点型の値となっている。面情報は、頂点座標値、頂点法線ベクトル、テクスチャ座標値のインデックス番号の組み合わせとなっており、面が表す多角形の頂点の数だけこれらの情報が与えられている。本手法では三角形ポリゴンのみを対象としているため、この組み合わせが 3 つずつ続く。

## 5.3 転送データ

読み込んだオブジェクトファイルデータから転送データを生成する。この処理はアプリケーション内で一度だけ行われ、GPU（シェーダ）へ転送されたのち保持される。

頂点情報としてにシェーダへ転送されるデータは、頂点座標値、頂点法線ベクトル、テクスチャ座標値、そして後述する接ベクトル情報である。これらのうち頂点座標値および頂点法線ベクトルは更新されず、オブジェクトファイルから読み取った値を面情報にしたがって順次バーテックスバッファオブジェクトの形で配列情報として転送される。テクスチャ座標値はユーザ指定の浮動小数点型の値であるテクスチャ解像度  $R_t$  を以下のように乗算し転送される。

$$\mathbf{T}_{vert} = \mathbf{R}_t \mathbf{T}_{obj} \quad (5.1)$$

ここで、 $\mathbf{T}_{obj}$  はオブジェクトファイルから読み込んだテクスチャ座標値、 $\mathbf{T}_{vert}$  はバーテックスシェーダ (??節) へ転送されるテクスチャ座標値である。

本手法ではテクスチャ座標値をもとに屈折レンズ (5.1.1 節) の配置を決定しているため、 $\mathbf{R}_t$  を変更することで複眼表面のレンズの配置すなわち表面構造の細かさを任意に変更することができる。

これらの頂点情報の他にシェーダへ与えられる定数などの情報は `uniform` 変数として適宜転送される。

### 5.3.1 テクスチャ座標軸方向 3 次元単位ベクトル

通常、2 次元空間上のデータであるテクスチャは、テクスチャ座標値と空間上の点との対応づけにより 3 次元空間上に描写される。すなわち、3 次元空間における面は 2 次元の座標空間として考えることができる (Fig.??)。そこで、3 次元空間内の情報から 2 次元情報であるテクスチャ座標値を算出するためには、異なる次元同士を橋渡しする変数が必要になる。

本手法では、オブジェクト上の各位置におけるテクスチャ座標系の単位ベクトルを 3 次元ベクトルとして表すことによって、異なる次元の情報を結びつけている。本項では、2 次元ベクトルであるテクスチャ座標空間の単位ベクトルを、3 次元空間上の 3 次元ベクトルとして表す方法について述べる。また、3 次元空間上のテクスチャ座標軸方向単位ベクトルを用いると、ポリゴン上の任意の点においてテクスチャ座標値を逆算できるようになる。

ポリゴン上のある位置におけるテクスチャ座標空間の軸方向の単位ベクトルを 3 次元ベクトル  $\mathbf{U}_p, \mathbf{V}_p$  として表すと、ポリゴン上の任意点  $\mathbf{P}$  は  $\mathbf{U}_p, \mathbf{V}_p$  を利用して以下のように表現することができる。

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_c + a\mathbf{U}_p + b\mathbf{V}_p \quad (5.2)$$

ここで、 $\mathbf{P}_c$  は既知の点  $\mathbf{P}_e$  およびそのテクスチャ座標値  $(a_e, b_e)$  によって

$$\mathbf{P}_c = \mathbf{P}_e - a_e\mathbf{U}_p - b_e\mathbf{V}_p \quad (5.3)$$

式 (5.3) のように表される。また、式 (5.2) の  $a$  および  $b$  は点  $\mathbf{P}$  におけるテクスチャ座標値  $(a, b)$  を表している。すなわち、3 次元空間上のテクスチャ座標軸方向単位ベクトル  $\mathbf{U}_p, \mathbf{V}_p$  が既知であれば、式 (5.2) の係数を利用してポリゴン上の任意の点におけるそのテクスチャ座標

値  $(a, b)$  を逆算することが可能になる。本手法では、シェーダでの処理に 3 次元ベクトル  $P_c$ ,  $U_p$  および  $V_p$  が必要となるため、これらの値を作成しシェーダへ転送する必要がある。

テクスチャ座標軸方向 3 次元単位ベクトル  $U_p$  および  $V_p$  は以下の手順で求める。 $U_p$  および  $V_p$  はポリゴン毎に変化するベクトル変数であり、ポリゴンを構成する各頂点の頂点情報としてバッファに格納される。まず、本手法で対象としている三角形ポリゴンの各頂点の頂点座標値を  $P_0, P_1, P_2$  とし、テクスチャ座標値を  $T_0, T_1, T_2$  とする。ここでは、頂点座標値が 3 次元ベクトルであるのに対してテクスチャ座標値が 2 次元ベクトルであることに留意し、ポリゴン上で両者の対応関係を明確にしていく。

三角形ポリゴンは 3 次元空間上における平面を一意に表すことができるため、この平面に対応するベクトルを  $P_0, P_1, P_2$  および  $T_0, T_1, T_2$  から求めていく。



Fig. 5.3 ポリゴン上における頂点座標値およびテクスチャ座標値の関係

頂点座標値から相対ベクトル  $P_{10}, P_{20}$  を以下のように定義する。

$$P_{10} = P_1 - P_0 \quad (5.4)$$

$$P_{20} = P_2 - P_0 \quad (5.5)$$

同様に、テクスチャ座標値から相対ベクトル  $T_{10}, T_{20}$  を以下のように定義する。

$$T_{10} = T_1 - T_0 \quad (5.6)$$

$$T_{20} = T_2 - T_0 \quad (5.7)$$

これらの相対ベクトルはポリゴンのエッジに相当し、それぞれ平面上の変位を表すベクトルとなっている (Fig.5.3)。

さて、テクスチャ座標軸方向3次元単位ベクトル  $U_p$  および  $V_p$  は  $i, j, k, l$  を適当な係数として以下のように表すことができる。

$$U_p = iP_{10} + jP_{20} \quad (5.8)$$

$$V_p = kP_{10} + lP_{20} \quad (5.9)$$

そして、係数  $i, j, k, l$  は  $T_{10}$  および  $T_{20}$  から導くことができる。



Fig. 5.4 平面上の変位ベクトル

続いて、ポリゴン平面上の任意の位置にある点  $A$  および  $B$  を考える (Fig.5.4)。点  $A$  の頂点座標値を  $P_A$  そして点  $B$  の頂点座標値を  $P_B$  とすると、点  $A$  および点  $B$  の3次元空間上における位置の変位は、 $c, d$  を適当な係数として以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} P_{AB} &= P_A - P_B \\ &= cP_{10} + dP_{20} \end{aligned} \quad (5.10)$$

さらに、 $P_{10}$  と  $T_{10}$  および、 $P_{20}$  と  $T_{20}$  がポリゴン上で対応関係にあることから、点  $A$  のテクスチャ座標値を  $T_A$  そして点  $B$  のテクスチャ座標値を  $T_B$  とすると以下の式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_{AB} &= \mathbf{T}_A - \mathbf{T}_B \\ &= c\mathbf{T}_{10} + d\mathbf{T}_{20} \end{aligned} \quad (5.11)$$

ここで、 $i, j, k, l$  を用いて

$$i\mathbf{T}_{10} + j\mathbf{T}_{20} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5.12)$$

$$k\mathbf{T}_{10} + l\mathbf{T}_{20} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5.13)$$

とし、テクスチャ座標空間を UV 座標で表すと、2次元空間内において式 (5.12) は U 軸単位ベクトル、式 (5.13) は V 軸単位ベクトルを表すことになる。さらに、式 (5.10) および式 (5.11) の対応関係から式 (5.8) および式 (5.9) を導くことができる。

2 次正方行列  $\mathbf{A} = (\mathbf{T}_{10}, \mathbf{T}_{20})$  とすると式 (5.12) と式 (5.13) から

$$\mathbf{A} \begin{pmatrix} i & k \\ j & l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.14)$$

式 (5.14) が成り立ち、これを変形すると以下のようになる。

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} i & k \\ j & l \end{pmatrix} &= \mathbf{A}^{-1} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &= \mathbf{A}^{-1} \end{aligned} \quad (5.15)$$

以上から  $i, j, k, l$  を求めることができた。

さらに、式 (5.3) において  $\mathbf{P}_e = \mathbf{P}_0$ ,  $(a_e, b_e) = \mathbf{T}_0$  として  $\mathbf{P}_c$  を作成し、 $\mathbf{U}_p, \mathbf{V}_p$  と合わせてシェーダへ転送する。

## 5.4 GPU 処理

### 5.4.1 新しいサブ sekusyon





## 第 6 章

# 結果と考察

### 6.1 ＊サブセクション＊

さぶせく～～。



## 第 7 章

# 結論

### 7.1 結論

本研究では、複眼のリアルタイムレンダリングを行った。などなど。以下の成果を確認できた。

- 
- 
- 
- 

本研究は～だけではなく……………。

### 7.2 今後の展望

第 7.1 章で既述したように……………。といった使い方ができる。



# 謝辭

[illegible]

以上

1 p ~ 22 p 完

修士学位論文

平成 26 年度

東京大学大学院 学際情報学府先端表現情報学コース

136313 佐川 和輝