

2011年度 卒業論文

エネルギー波表現における  
光源効果の研究

指導教員：渡辺 大地 講師

メディア学部 ゲームサイエンスプロジェクト  
学籍番号 M0108361  
仁藤 将輝

**2011年度 卒業論文概要**

**論文題目**

エネルギー波表現における  
光源効果の研究

**メディア学部**

**学籍番号：M0108361**

**氏名**

仁藤 将輝

**指導  
教員**

渡辺 大地 講師

**キーワード**

3DCG、CG エフェクト、アニメーション、  
リアルタイムレンダリング、トゥーンレンダリング

近年、アニメーションやビデオゲームといった創作コンテンツ上で、3次元コンピュータグラフィクス(以下、3DCG)を用いた表現が盛んである。その中で、3DCGを漫画や2Dアニメーションのように表現するトゥーンレンダリングも盛んである。そういった創作コンテンツの中で、エネルギーの塊が強く発光し、形状変化を伴いながら移動していく現象をよく見かける。本研究では、創作コンテンツ上でのそういった表現を「エネルギー波」と名付けた。また創作コンテンツ上でエネルギー波を表現するとき、エネルギー波の強い発光により周囲の物体の色や陰影の付き方が大きく変化する現象がある。この現象を「エネルギー波の光源効果」と名付けた。本研究では創作コンテンツ上におけるエネルギー波の光源効果の特徴に着目した。

3DCGにおけるエネルギー波の表現では阿部らが提案した手法があるが、この手法はエネルギー波の光源効果については考慮していない。本研究では阿部らの手法を基に、創作コンテンツ上におけるエネルギー波の光源効果の特徴を満たす表現を3DCGで行うことを目的とした。3DCGで創作コンテンツ上におけるエネルギー波の光源効果を再現するには、特殊なシェーディングやシャドウイングを行わなければならない。そのため、従来のシェーディングやシャドウイングの手法では本研究の目指す表現はできない。

本研究では、エネルギー波の光源効果の表現手法を新しく提案した。本手法のシェーディングやシャドウイングでは、処理を行うモデルや面上の点ごとに光源の位置を定めることにより、エネルギー波の光の当たり方を考慮した表現を行った。顔や服の部分などの特徴的な部分の表現には、特徴的な部分専用のテクスチャを用意し、特徴的な部分専用のテクスチャの色をシェーディングした色と乗算することにより特徴的な部分を表現した。モデルの輪郭線の表現には裏ポリゴンモデルを利用し、視点の位置によらず均一な輪郭線の表現を可能とした。提案した手法を実装することにより、創作コンテンツ上の表現に近い、効果的なエネルギー波の光源効果が表現できた。

# 目次

<b>第1章</b>	<b>はじめに</b>	<b>1</b>
1.1	研究の背景と目的 . . . . .	1
1.2	論文構成 . . . . .	5
1.3	数式の定義 . . . . .	6
<b>第2章</b>	<b>提案手法</b>	<b>7</b>
2.1	周囲の物体にエネルギー波特有の陰影が付く表現 . . . . .	7
2.2	顔や服の模様などの特徴部分の表現 . . . . .	10
2.3	輪郭線の表現 . . . . .	12
2.4	エネルギー波の発光による特殊な影の表現 . . . . .	12
<b>第3章</b>	<b>動作検証と考察</b>	<b>21</b>
3.1	本手法の実行結果 . . . . .	21
3.2	実行速度の検証 . . . . .	27
3.3	考察 . . . . .	28
<b>第4章</b>	<b>おわりに</b>	<b>29</b>
	<b>謝辞</b>	<b>31</b>
	<b>参考文献</b>	<b>32</b>

# 目 次

1.1	エネルギー波の光源効果による物体の色の付き方の変化 . . . . .	2
1.2	物体の面の色の明暗を表す模式図 . . . . .	3
1.3	生成する影の形の違い . . . . .	4
2.1	点 <b>A</b> における最近点を表す模式図 . . . . .	8
2.2	<b>F</b> の最近点を表す模式図 . . . . .	9
2.3	<b>G</b> の最近点を表す模式図 . . . . .	9
2.4	特徴部分用テクスチャ利用の模式図 . . . . .	11
2.5	最近点を定める模式図 . . . . .	13
2.6	<b>e</b> を <b>X</b> 、 <b>Y</b> 、 <b>Z</b> の座標系で表した図 . . . . .	14
2.7	$\lambda$ の値により影の長さが変化する図 . . . . .	15
2.8	$\lambda$ が $\theta$ より小さい場合と大きい場合の模式図 . . . . .	16
2.9	影を落とす位置を求める模式図 . . . . .	17
2.10	光源方向に誤った影を生成する模式図 . . . . .	19
3.1	実行結果：通常の点光源を利用してシェーディングを行った図 . . . . .	22
3.2	実行結果：本手法のシェーディングを行った図 . . . . .	22
3.3	実行結果：手前の位置から奥方向へエネルギー波を撃った図 . . . . .	23
3.4	実行結果：奥の位置から奥方向へエネルギー波を撃った図 . . . . .	24
3.5	実行結果：手前の位置から手前方向へエネルギー波を撃った図 . . . . .	24
3.6	実行結果：奥の位置から手前方向へエネルギー波を撃った図 . . . . .	25
3.7	実行結果：上空から見た図（エネルギー波を撃つ位置は左） . . . . .	26
3.8	実行結果：上空から見た図（エネルギー波を撃つ位置は右） . . . . .	26
3.9	実行結果：輪郭線と特徴的な部分を表す図 . . . . .	27

# 第 1 章

## はじめに

### 1.1 研究の背景と目的

近年、アニメーションやビデオゲームといった創作コンテンツ上で、3次元コンピュータグラフィクス(以下、3DCG)を用いた表現が盛んである。その中で、3DCGを漫画や2Dアニメーションのように表現するトゥーンレンダリングも盛んである。そういった創作コンテンツの中で、エネルギーの塊が強く発光し、形状変化を伴いながら移動していく現象をよく見かける。代表的な例として、漫画「ドラゴンボール [1]」の作中における「かめはめ波」がある。他の例として、テレビアニメーション「宇宙戦艦ヤマト [2]」の作中における「波動砲」など、多くの創作コンテンツでみることができる。本研究では、創作コンテンツ上でのそういった表現を「エネルギー波」と名付け、「エネルギーの密度が高い場所が強く発光し、形状変化を伴いながらある地点に向かって移動する」現象と定義する。エネルギーとは、創作コンテンツ上の空間中に存在するエネルギー波を構成する要素であり、密度が高い部分が強く発光するものとする。また創作コンテンツ上でエネルギー波を表現するとき、エネルギー波の強い発光により周囲の物体の色や陰影の付き方が大きく変化することが多い。本研究ではこの現象を「エネルギー波の光源効果」と名付け、その特徴として、物体の色と陰影の付き方、そして物体が地面に落とす影の形に着目した。

まず創作コンテンツ上のエネルギー波の光源効果の特徴として、物体の色と陰影の付き方の特徴について述べる。物体はエネルギー波の光源効果により元々持っていた色を完全に失い、エネルギー波の色が物体の基色となる。ただし物体は元々持っていた色を完全に失うものの、顔や服の模様などの特徴的な部分や、輪郭線は描く。これらを表す模式図が図 1.1 である。

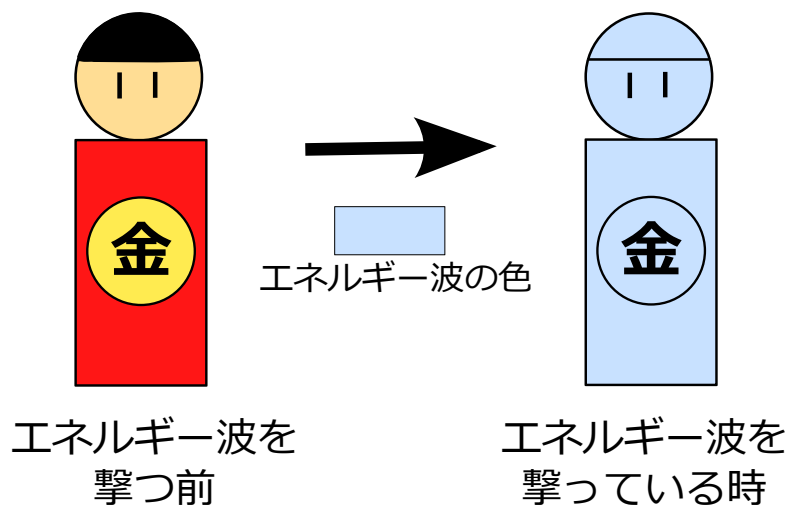


図 1.1: エネルギー波の光源効果による物体の色の付き方の変化

そして物体の面の色は、エネルギー波からの光が直接当たっている面が明るい色になる。ただし光が直接当たっていない面でも、光が直接当たっている面の付近にあり、光が直接当たっている面と向いている方向が近い面は明るい色になる。物体の面の色の明暗を表す模式図が、図 1.2 である。

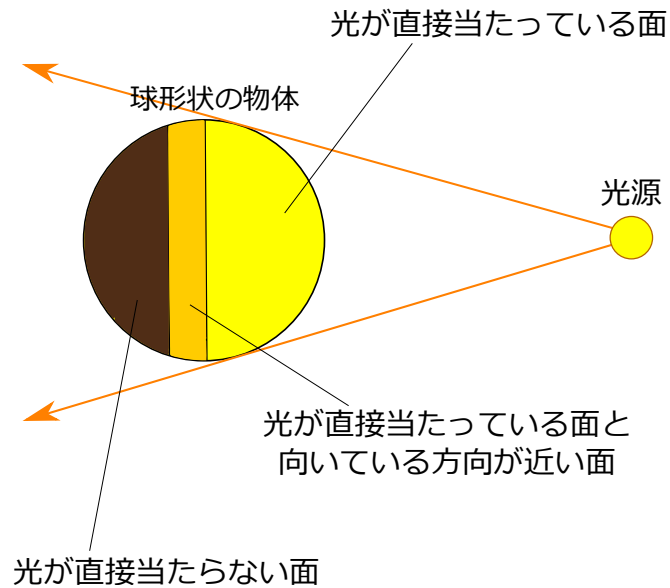


図 1.2: 物体の面の色の明暗を表す模式図

3DCG では、光源の位置などによりモデルの面の色を決める処理をシェーディングと呼ぶ。ここでは3DCGにおいて、上述のような創作コンテンツ上の表現を一般的なシェーディング手法で再現することを考える。一般的なシェーディング手法は、面の色はモデルの色と光源からの光の色を乗算して求める。したがって例えば黒い色のモデルに一般的なシェーディングを行った場合、エネルギー波の色がモデルの基色にはならず、モデルの色は黒いままとなる。そこでモデルが元々持っていた色は無視し、光源からの光の色のみでシェーディングした場合を考える。その場合、テクスチャで描いていた顔や服の模様などの特徴的な部分の色の情報も失い、特徴的な部分の表現が出来なくなるという問題が生じる。

次に創作コンテンツ上のエネルギー波の光源効果の特徴として、物体が地面に落とす影の形の特徴を述べる。影の形は、太陽光など、平行光源によってできる影の形とほぼ同じである。光源が高い位置にあった場合は影は短くなり、光源が低い位置にあった場合は影は長くなる。ただし、光源が物体より低い位置にあった場合でも、影が無限に長くなることはない。

3DCG では、モデルが光源のある方向と逆の方向に影を投げかける処理をシャド

ウイングと呼ぶ。一般的なシャドウイング手法は、Crow[3]が提案したシャドウボリューム法や Williams[4]が提案したシャドウマップ法などがあり、シャドウマップ法を基としたシャドウイング手法 [5][6][7][8] は多数存在する。これらの手法は物理的に正しい影を生成できるものの、創作コンテンツ上の影など特殊な影を生成することはできない。例えば地面の上に立つ物体の正面に光源がある場合、影は無限に長くなる。よって創作コンテンツ上のエネルギー波の光源効果による特徴的な影の形を作ることはできない。一般的なシャドウイングでの影の形と、創作コンテンツ上のエネルギー波の光源効果による特徴的な影の形の違いを表した図が図 1.3 である。

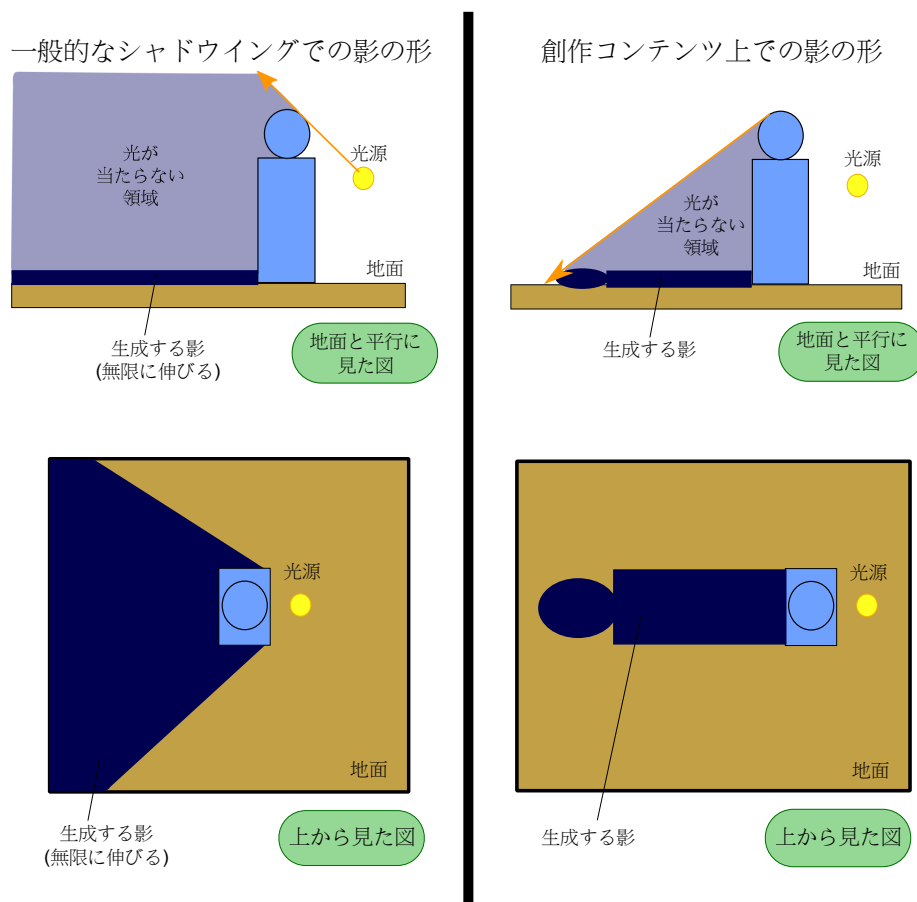


図 1.3: 生成する影の形の違い

3DCG におけるエネルギー波の表現は、阿部ら [9][10] が提案した手法がある。線



積分が可能な関数を用いてエネルギーの分布状況を規定し、エネルギー波の表現を行った。この手法により、「エネルギーの密度が高い場所が強く発光する」という定義を任意視点で正確に表現した。さらにエネルギー波のレンダリングはリアルタイムで可能である。しかし阿部らの提案したエネルギー波表現では、エネルギー波の光源効果については考慮していない。

そこで本研究では阿部らの手法を基に、3DCGにおいて創作コンテンツ上のエネルギー波の光源効果の特徴を満たす表現手法を新しく提案した。この光源効果によって、より創作コンテンツ上のエネルギー波表現に近い、効果的なエネルギー波表現を可能にした。本手法では、モデルのシェーディングには点光源を利用する。点光源の位置は、シェーディングを行うモデルの面上の点の位置とエネルギー波の位置、エネルギー波を放つ方向により定める。これにより創作コンテンツ上のエネルギー波の光の当たり方に似たシェーディングの効果を得ることができた。顔や服の部分などの特徴的な部分の表現には、特徴的な部分専用のテクスチャを用意し、特徴的な部分専用のテクスチャの色をシェーディングした色と乗算することにより特徴的な部分の表現を可能とした。モデルの輪郭線の表現には裏ポリゴンモデルを利用し、視点の位置によらず均一な輪郭線の表現を可能とした。シャドウイングにおいてもモデルごとに適切な光源の位置を定める。定めた光源の位置を考慮し、影を落とす平面上の適切な位置に複製したモデルの全ての頂点を移動する。そして複製したモデルの面の色を黒などに変更することにより、創作コンテンツ上のエネルギー波の光源効果による影の形に近いシャドウイングを行った。

これらの提案手法をプログラム上で実装し、描画速度検証を行い、提案手法の有用性を確認した。

## 1.2 論文構成

本論文は全4章で構成する。2章で提案手法について述べ、3章において実際に適応した結果から動作検証と考察を行う。最後に4章でまとめと今後の展望を述べる。

### 1.3 数式の定義

本論文で用いる数式を次で定義する。

- $\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}$  はベクトル  $\mathbf{A}$  と  $\mathbf{B}$  の内積を表す。
- $\mathbf{A} \times \mathbf{B}$  はベクトル  $\mathbf{A}$  と  $\mathbf{B}$  の外積を表す。
- $|\mathbf{V}|$  はベクトル  $\mathbf{V}$  のノルムを表す。

# 第 2 章

## 提案手法

本章では、本研究で提案するエネルギー波の光源効果の表現手法について述べる。まず 2.1 節で周囲の物体にエネルギー波特有の陰影が付く表現を行う。2.2 節では、2.1 節のシェーディングと関連して、テクスチャで表現していた顔や服の模様などの特徴的な部分の表現について述べる。2.3 節では、輪郭線の表現について述べる。最後に、2.4 節では、エネルギー波の発光による特殊な影の表現について述べる。

### 2.1 周囲の物体にエネルギー波特有の陰影が付く表現

本手法のシェーディングは、点光源からの光の入射角度で色を決定するという点で、一般的な Lambert 反射 [11] を利用したシェーディングと似ている。ただし点光源の位置は、シェーディングを行うモデルの面上の点の位置とエネルギー波の位置、エネルギー波を撃つ方向により定まる。これにより、創作コンテンツ上のエネルギー波の光の当たり方に似たシェーディングの効果を得ることができる。

はじめに、エネルギー波を球と円柱の組み合わせと考えたとき、球の中心点から円柱が伸びる方向への半直線を本研究では「中心線」と呼称する。さらに、モデルの面上のある点から中心線までを最短距離とする中心線上の点を「最近点」と呼称する。この最近点を点光源の位置とし、シェーディングを行う。図 2.1 はモデルの面のある点 A における最近点を表す模式図である。

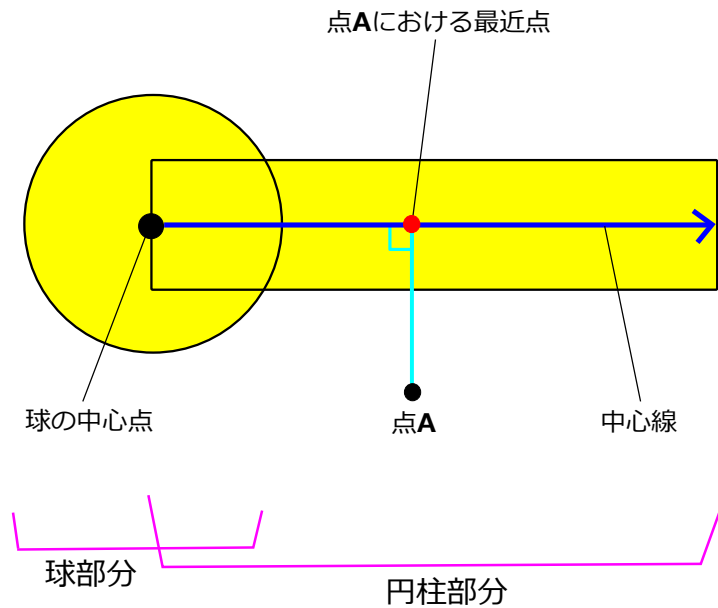


図 2.1: 点 A における最近点を表す模式図

最近点の求め方は、まずエネルギー波の球部分の中心点の位置ベクトルを  $\mathbf{C}$ 、円柱部分が伸びる方向への半直線である中心線の単位方向ベクトルを  $\mathbf{D}$  とする。さらにモデルの面上のある点の位置ベクトルを  $\mathbf{M}$  とする。 $\mathbf{C}$  から  $\mathbf{M}$  へのベクトルと、 $\mathbf{D}$  の内積の値を  $a$  とする。

$$a = (\mathbf{M} - \mathbf{C}) \cdot \mathbf{D} \quad (2.1)$$

$a$  の値によって、最近点の位置ベクトル  $\mathbf{E}$  を求めることができる。

$$\mathbf{E} = \begin{cases} \mathbf{C} & (a \leq 0 \text{ のとき}) \\ \mathbf{C} + a\mathbf{D} & (0 < a \text{ のとき}) \end{cases} \quad (2.2)$$

$a \leq 0$  となる位置に存在するモデルの面上のある点  $\mathbf{F}$  の最近点を表した模式図が、図 2.2 である。 $0 < a$  となる位置に存在するモデルの面上のある点  $\mathbf{G}$  の最近点を表した模式図が、図 2.3 である。

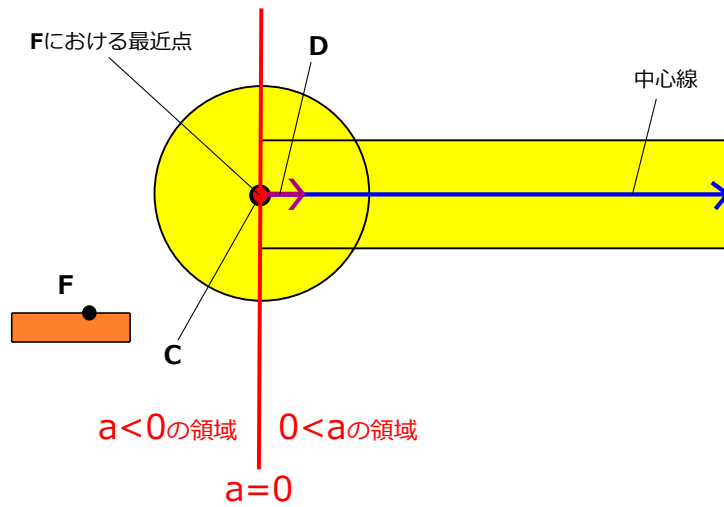


図 2.2: F の最近点を表す模式図

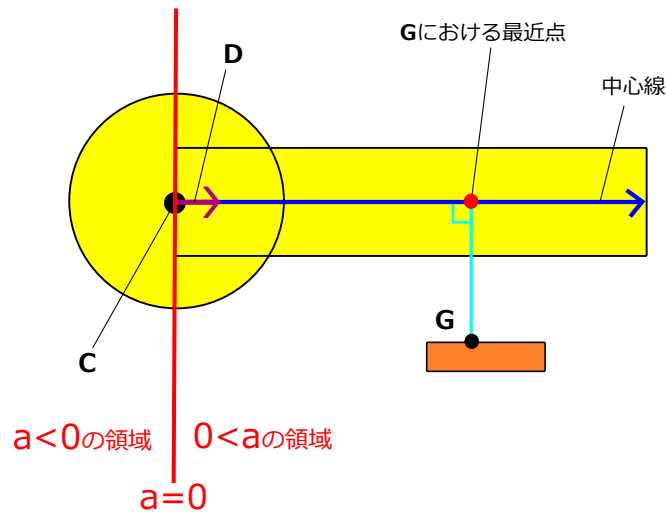


図 2.3: G の最近点を表す模式図

式 (2.1) と式 (2.2) により求めた最近点を点光源の位置と考え、シェーディングを行う。M から E への正規化したベクトル  $\mathbf{L}$  は、次の式 (2.3) で求める。

$$\mathbf{L} = \frac{\mathbf{E} - \mathbf{M}}{|\mathbf{E} - \mathbf{M}|} \quad (2.3)$$

Mの単位法線ベクトルをNとする。NとLの内積の値mを求める。

$$m = \mathbf{N} \cdot \mathbf{L} \quad (2.4)$$

求めたmはNとLは単位ベクトルのため、必ず-1から1の範囲の値になる。mは1に近い値であるほどエネルギー波中の最近点からの光が強くとっており、負の値の場合はエネルギー波中の最近点からの光が直接当たっていないと判断できる。一般的なLambert反射では、mが負の値のときmを0とするが、本手法ではmが負の値であっても0としないこととする。なぜならば、本研究では1.1節で述べたとおり、光が直接当たっていない面でも明るい色になる面があるためである。

求めたmの値から、エネルギー波の色に合わせ事前に用意した-1から1の条件式により色を決定する。式(2.5)はRGBの色成分を(r, g, b)とし、mの値から色を決める条件式の例である。

$$\begin{cases} (r, g, b) = (0.0, 0.2, 0.4) & (-1 \leq m < -0.3 \text{ のとき}) \\ (r, g, b) = (0.5, 0.7, 0.9) & (-0.3 \leq m < 0 \text{ のとき}) \\ (r, g, b) = (0.9, 0.9, 1.0) & (0 \leq m \leq 1 \text{ のとき}) \end{cases} \quad (2.5)$$

このようにモデルの面上の点の色を決めるが、モデルの面上の点により最近点の位置は各々異なる。したがってこの処理をモデル全体の面上の点に行うことで、モデルのシェーディングを行う。

## 2.2 顔や服の模様などの特徴部分の表現

2.1節ではシェーディングの提案を行ったが、2.1節のシェーディングでは、モデルの面が持っていた元々のマテリアルやテクスチャの情報を全て無視する。つまり、テクスチャに顔や服の模様などを描いていたとしても、全て無視してシェーディングする。テクスチャで表現していた顔や服の模様など、エネルギー波の光源効果を受けてなお表現したい部分を「特徴部分」と本研究では呼称する。本小節では、特徴部分を表現するために2.1節のシェーディング手法に改変を加える。

まず特徴部分のための、特徴部分用テクスチャを用意する。特徴部分用テクスチャは、通常のテクスチャマッピングのテクスチャと同様なものであるが、特徴部分のみを黒や黒に近い暗い色で描き、それ以外は白で描く。本研究における黒を RGB の色の成分を  $(r, g, b)$  で表すと、 $(r, g, b) = (0, 0, 0)$  とする。また白は、 $(r, g, b) = (1, 1, 1)$  とする。

2.1 節で配列データから参照した RGB 値を  $S_{rgb}$ 、特徴部分用テクスチャから参照する RGB 値を  $T_{rgb}$  とすると、最終的な RGB 値  $H_{rgb}$  は、次の式 (2.6) で求める。

$$H_{rgb} = (S_r T_r, S_g T_g, S_b T_b) \quad (2.6)$$

式 (2.6) により、特徴部分用テクスチャで暗い色で描いた部分は、2.1 節でシェーディングした色より暗い色になる。特徴部分用テクスチャで白で描いた部分は、2.1 節でシェーディングした色と変わらない。よって特徴部分用テクスチャを、顔や服の模様などの特徴部分のみ黒や黒に近い暗い色で描き、他の部分は白で描くことにより、特徴部分の表現が可能である。ただしシェーディングした色よりも明るい色の特徴部分の表現は考慮していない。特徴部分用テクスチャ利用の模式図が、図 2.4 である。



図 2.4: 特徴部分用テクスチャ利用の模式図

## 2.3 輪郭線の表現

本研究の輪郭線の表現には、裏ポリゴンモデルを利用する。この手法は、Rossignacら [12] がモデルの背面を拡大することで輪郭線を描画する手法を最初に提案し、Evan[13] らが裏ポリゴンモデルを利用する手法を提案した。本手法での輪郭線の表現には、鈴木ら [14] の手法を参考にした。

本手法は輪郭線を表現したいモデルを複製し、複製したモデルを変形することにより輪郭線を表現する。視点の座標系において、複製したモデルのある頂点の位置ベクトルを  $\mathbf{R}$ 、単位法線ベクトルを  $\mathbf{U}$  とする。 $\mathbf{R}$  を  $\mathbf{U}$  の方向へ移動する。移動量としてパラメータ  $d$  を用意する。視点位置によらず輪郭線の太さを均一にするため、 $d$  には深度値  $R_z$  の絶対値を乗算する。深度値とは  $\mathbf{R}$  の  $Z$  成分であり、視点からの奥行きを表す値である。 $\mathbf{R}$  の移動後の位置ベクトル  $\mathbf{R}'$  は、次の式 (2.7) で求める。

$$\mathbf{R}' = \mathbf{R} + d|R_z|\mathbf{U} \quad (2.7)$$

この処理を複製したモデルの面上の全頂点に対して行う。輪郭線を描画するときのみ、ポリゴンの描画順を逆回りにする。するとポリゴンの表裏が逆になり、裏ポリゴンを描くことができる。裏ポリゴンを描画する際、面の色を黒などの色に変更することで輪郭線を表現できる。またパラメータ  $d$  の値を変更することで輪郭線の太さを変更することができる。

## 2.4 エネルギー波の発光による特殊な影の表現

本手法のシャドウイングは、複製したモデルの各頂点を影を落とす平面へ移動することにより影を表現するといった点で高草木ら [15] の手法に似ている。しかし本手法では一様な平行光源ではなくエネルギー波を光源としていることや、光源がモデルより低い位置にある場合においても一定の大きさ以内の影を生成でき



るなどの特徴がある。また、本手法のシャドウイングは凹凸のある面への影の生成は考慮していない。

まず2.1節と同じように最近点を定める。しかしシャドウイングではモデルの面上の各点に最近点を定めず、最近点は1つのモデルごとに1つだけ定める。モデルの中で最近点を1つ定めるための基準となる位置が必要だが、モデルの中心位置となる位置を基準とする。最近点の求め方は、式(2.1)と式(2.2)を利用する。2.1節と同じように最近点の位置を光源の位置と考え、シャドウイングを行う。最近点を定める模式図が図2.5である。

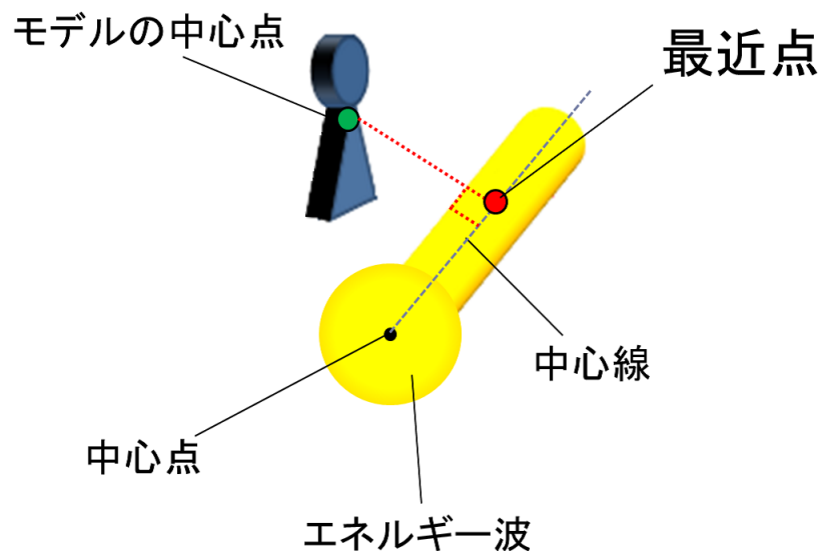


図 2.5: 最近点を定める模式図

影を落とすモデルの中心位置となる位置を  $B$ 、光源の位置を  $W$  とする。 $W$  から  $B$  への正規化した方向ベクトル  $e$  を求める。

$$e = \frac{B - W}{|B - W|} \quad (2.8)$$

影を落とす平面を  $\alpha$  とする。平面  $\alpha$  上には  $I$ 、 $J$ 、 $K$  の3点が存在し、この3点は同一直線上にないこととする。さらに  $I$  から  $J$  へのベクトルを  $X$ 、 $I$  から  $K$  への

ベクトルを  $\mathbf{x}$  とし、 $\mathbf{X}$  と  $\mathbf{x}$  は単位ベクトルであり、直交していることとする。 $\mathbf{X}$ 、 $\mathbf{x}$  はそれぞれ式 (2.9)、式 (2.10) で求める。

$$\mathbf{X} = \mathbf{J} - \mathbf{I} \quad (2.9)$$

$$\mathbf{x} = \mathbf{K} - \mathbf{I} \quad (2.10)$$

$\mathbf{X}$  と  $\mathbf{x}$  の外積が平面  $\alpha$  の法線ベクトル  $\mathbf{Y}$  となる。

$$\mathbf{Y} = \mathbf{x} \times \mathbf{X} \quad (2.11)$$

さらに  $\mathbf{X}$  と  $\mathbf{Y}$  の外積  $\mathbf{Z}$  を求める。

$$\mathbf{Z} = \mathbf{X} \times \mathbf{Y} \quad (2.12)$$

$\mathbf{e}$  を  $\mathbf{X}$ 、 $\mathbf{Y}$ 、 $\mathbf{Z}$  の座標系で表した図が、図 2.6 である。

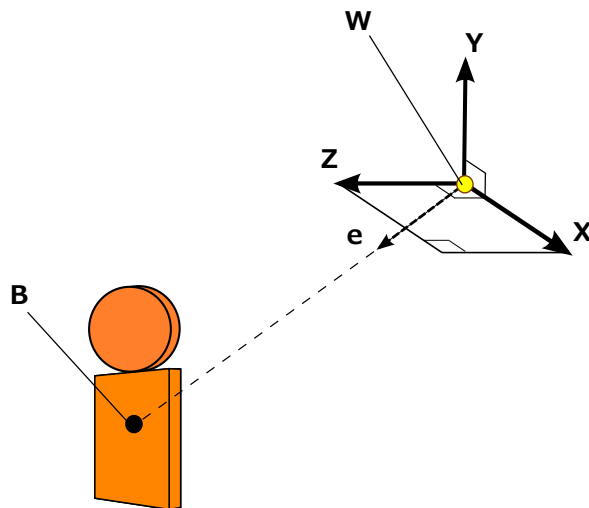


図 2.6:  $\mathbf{e}$  を  $\mathbf{X}$ 、 $\mathbf{Y}$ 、 $\mathbf{Z}$  の座標系で表した図

本手法では、複製したモデル上のある頂点から  $\mathbf{e}$  方向への直線と、平面  $\alpha$  との交点を考え、その位置へ複製したモデルの頂点を移動する。同じように複製したモデル上の全頂点を平面  $\alpha$  上へ移動することにより影の形を表現する。

$e$  と  $-Y$  の成す角を  $\lambda$  とする。 $\lambda$  は次の式 (2.13) で求めることができる。

$$\lambda = \arccos \left( \frac{e \cdot (-Y)}{|e||-Y|} \right) \quad (2.13)$$

本手法では  $\lambda$  の値が小さいほど影は短くなり、 $\lambda$  の値が大きいほど影は長くなる。

図 2.7 が  $\lambda$  の値により影の長さが変化する図である。

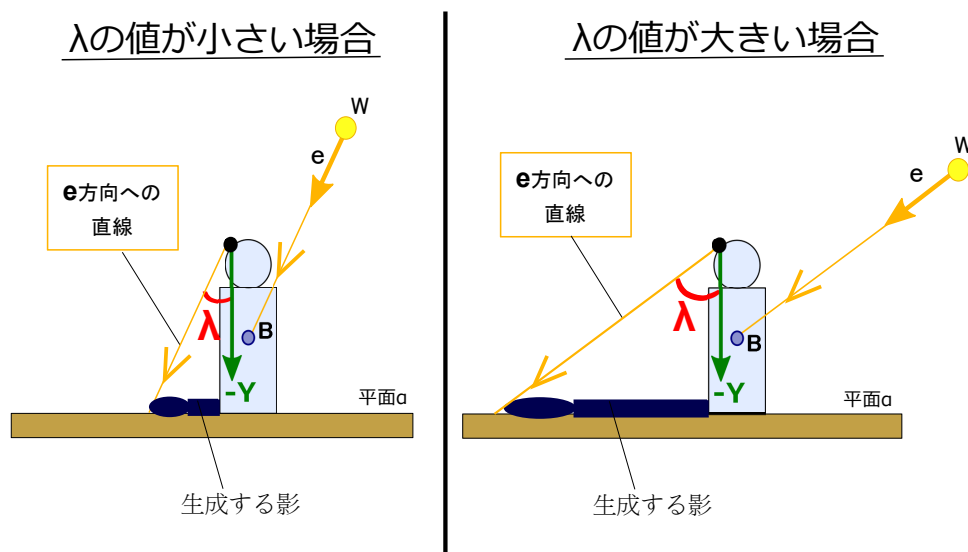


図 2.7:  $\lambda$  の値により影の長さが変化する図

しかし  $\lambda$  の値が  $\frac{\pi}{2}$  以上となると平面  $\alpha$  との交点を持たなくなったり、交点の位置が逆側となる。そこで閾値として  $\theta$  を用意する。 $\theta$  は次の範囲の値をとることとする。

$$0 \leq \theta < \frac{\pi}{2} \quad (2.14)$$

$\lambda$  が閾値  $\theta$  より大きい場合は、 $\lambda$  を  $\theta$  とし影を生成する。つまり、 $\theta$  は影の長さをもっとも長くなる限度のパラメータとなる。図 2.8 が  $\lambda$  が  $\theta$  より小さい場合と大きい場合の模式図である。

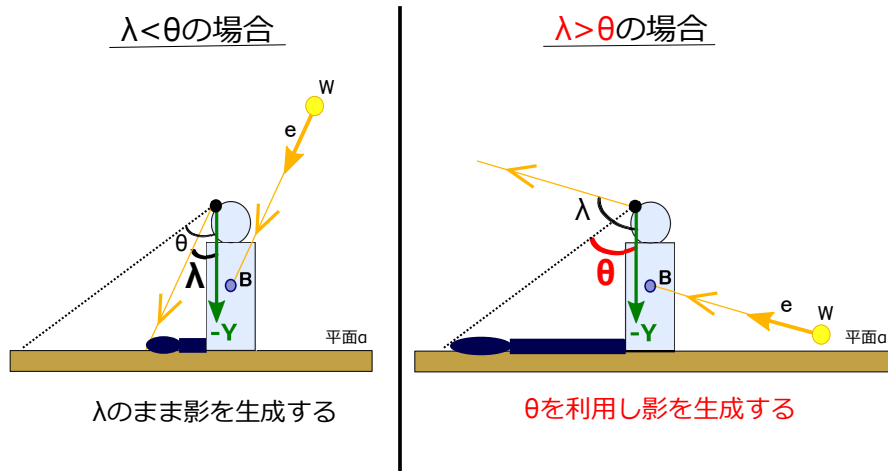


図 2.8:  $\lambda$  が  $\theta$  より小さい場合と大きい場合の模式図

ここからは  $\lambda$  が閾値  $\theta$  より大きくなってしまった場合の手法を述べていく。 $\mathbf{e}$  を平面  $\alpha$  上に射影したベクトルを  $\mathbf{f}$  とする。

$$\mathbf{f} = (\mathbf{e} \cdot \mathbf{X})\mathbf{X} + (\mathbf{e} \cdot \mathbf{Z})\mathbf{Z} \quad (2.15)$$

$\mathbf{f}$  を正規化したベクトルを  $\mathbf{i}$  とする。

$$\mathbf{i} = \frac{\mathbf{f}}{|\mathbf{f}|} \quad (2.16)$$

次に  $\mathbf{i}$  と  $\mathbf{Y}$  の外積  $\mathbf{j}$  を求める。

$$\mathbf{j} = \mathbf{i} \times \mathbf{Y} \quad (2.17)$$

$\mathbf{j}$  を軸中心とし、 $\mathbf{i}$  を  $\phi$  ラジアン回転する。 $\phi$  は次の値をとる。

$$\phi = \frac{\pi}{2} - \theta \quad (2.18)$$

回転には四元数 [16] を利用する。ベクトル  $\mathbf{j}$  を軸中心とし、 $\phi$  ラジアン回転する変換を、四元数  $q$  を用いて次のように表す。

$$q = \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) + \mathbf{j} \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (2.19)$$

四元数  $q$  のスカラー部を  $s$ 、ベクトル部を  $\mathbf{V}$  で表した式がそれぞれ式 (2.20)、式 (2.21) である。

$$s = \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (2.20)$$

$$\mathbf{V} = \mathbf{j} \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (2.21)$$

$q$  の逆元を  $q^{-1}$  とする。回転後のベクトル  $\mathbf{k}$  を求めるには、次の式 (2.22) を用いる。

$$\mathbf{k} = qi q^{-1} = (s^2 - |\mathbf{V}|^2)\mathbf{i} + 2s(\mathbf{V} \times \mathbf{i}) + 2(\mathbf{V} \cdot \mathbf{i})\mathbf{V} \quad (2.22)$$

影を落とすモデルの面上のある点  $\mathbf{P}$  と、 $\mathbf{P}$  と  $\mathbf{k}$  を足したベクトルを  $\mathbf{Q}$  とする。このとき、 $\lambda$  が  $\theta$  より小さい値だった場合は  $\mathbf{e}$  を  $\mathbf{k}$  とし、式 (2.23) を計算する。

$$\mathbf{Q} = \mathbf{P} + \mathbf{k} \quad (2.23)$$

直線  $\mathbf{PQ}$  と平面  $\alpha$  の交点  $\mathbf{G}$  が、平面  $\alpha$  上でモデルの面上の点である  $\mathbf{P}$  が影を落とすべき位置となる。図 2.9 が影を落とす位置を求める模式図である。

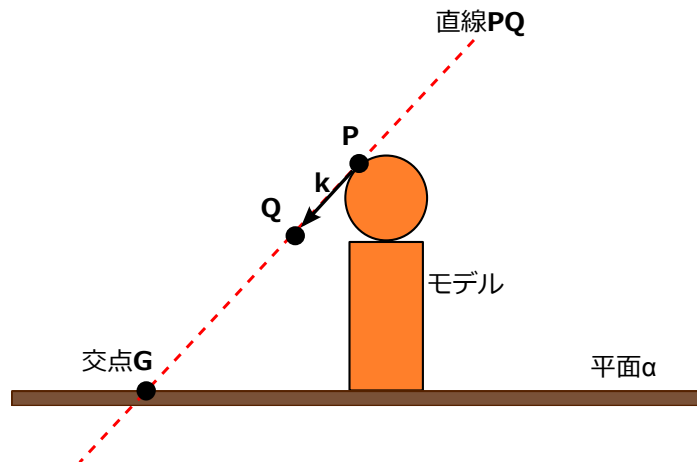


図 2.9: 影を落とす位置を求める模式図

直線  $\mathbf{PQ}$  上の任意の点  $\mathbf{l}$  は、実数  $t$  を用いて、次の式 (2.24) で表すことができる。

$$\mathbf{l} = (1 - t)\mathbf{P} + t\mathbf{Q} \quad (2.24)$$

$\mathbf{I}$ 、 $\mathbf{X}$ 、 $\mathbf{x}$  と、実数  $u$ 、 $v$  を用いると、平面  $\alpha$  上の任意の点  $\mathbf{h}$  は次の式 (2.25) で表すことができる。

$$\mathbf{h} = \mathbf{I} + u\mathbf{X} + v\mathbf{x} \quad (2.25)$$

このとき、直線  $\mathbf{PQ}$  と平面  $\alpha$  が  $\mathbf{G}$  で交わるとすると、次の式 (2.26) が成り立つ。

$$\mathbf{l} = \mathbf{h} \quad (2.26)$$

式 (2.26) は、次の式 (2.27) に置き換えることができる。

$$(1 - t)\mathbf{P} + t\mathbf{Q} = \mathbf{I} + u(\mathbf{J} - \mathbf{I}) + v(\mathbf{K} - \mathbf{I}) \quad (2.27)$$

式 (2.27) より、次の式 (2.28) が成り立つ。

$$u(\mathbf{J} - \mathbf{I}) + v(\mathbf{K} - \mathbf{I}) + t(\mathbf{P} - \mathbf{Q}) = \mathbf{P} - \mathbf{I} \quad (2.28)$$

式 (2.28) を行列式で表すと、式 (2.29) となる。

$$\begin{pmatrix} J_x - I_x & K_x - I_x & P_x - Q_x & 0 \\ J_y - I_y & K_y - I_y & P_y - Q_y & 0 \\ J_z - I_z & K_z - I_z & P_z - Q_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_x - I_x \\ P_y - I_y \\ P_z - I_z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.29)$$

式 (2.29) は直線  $\mathbf{PQ}$  と平面  $\alpha$  の交点を求める連立方程式であり、直線  $\mathbf{PQ}$  と平面  $\alpha$  は必ず交点を持つため、式 (2.29) の左辺の行列は必ず正則行列であり逆行列を持つ。したがって、式 (2.30) により、 $t$ 、 $u$ 、 $v$  の値を求めることができる。

$$\begin{pmatrix} t \\ u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_x - I_x & K_x - I_x & P_x - Q_x & 0 \\ J_y - I_y & K_y - I_y & P_y - Q_y & 0 \\ J_z - I_z & K_z - I_z & P_z - Q_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} P_x - I_x \\ P_y - I_y \\ P_z - I_z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.30)$$

最後に、式 (2.30) で求めた  $t$  の値を、次の式 (2.31) に代入することにより交点  $G$  を求めることができる。

$$\mathbf{G} = (1 - t)\mathbf{P} + t\mathbf{Q} \quad (2.31)$$

これらの処理を複製したモデルの面上の全頂点に行い、面の色を黒などの色に変更することにより、平面  $\alpha$  上に影を表現できる。さらにパラメータである  $\theta$  の値によって、光源からモデルへ方向の影の最大の長さを変更することができる。

ただし本手法では、モデルが影を落とす平面の法線方向の逆側の領域に交点があった場合、誤った位置に影を生成してしまう。図 2.10 が誤った影を生成する模式図である。

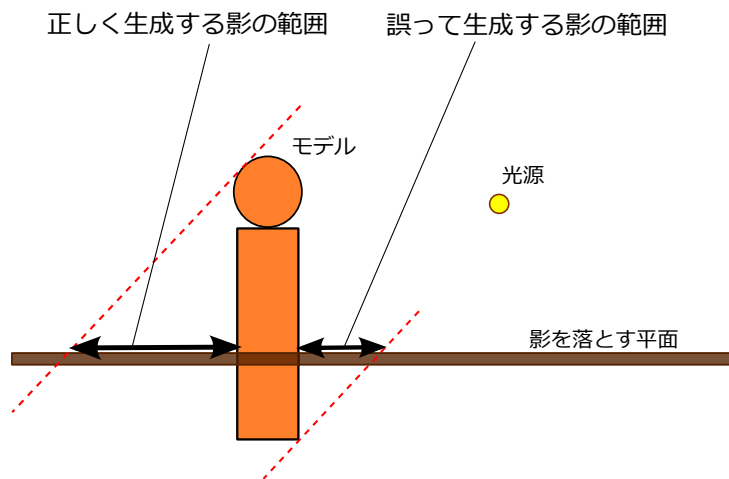


図 2.10: 光源方向に誤った影を生成する模式図

この問題を解決するために、式 (2.30) で求めた  $t$  を利用する。 $t$  の値の判別により、誤った影の領域を透明とし、見えなくする。不透明度を表す値である  $r$  を 0 から 1 の値で表し、0 のとき完全に透明、1 のとき完全に不透明とすると、 $r$  は次の式 (2.32) で求める。

$$r = \begin{cases} 0 & (t < 0 \text{ のとき}) \\ 1 & (0 \leq t \text{ のとき}) \end{cases} \quad (2.32)$$



## 第 3 章

# 動作検証と考察

本章では、第 3 章で提案した手法を用いて実装したプログラムの結果とその検証を行う。実装したプログラムは、グラフィクス API の OpenGL[17] をベースとした 3 次元グラフィクスツールキットである Fine Kernel Tool Kit System[18][19] を利用した。シェーダには、NVIDIA 社の Cg[20] を利用した。

### 3.1 本手法の実行結果

本節では、本手法の実行結果を示す。図 3.1、図 3.2 は、通常の点光源を利用してシェーディングを行った図と、本手法のシェーディングを行った図を表している。

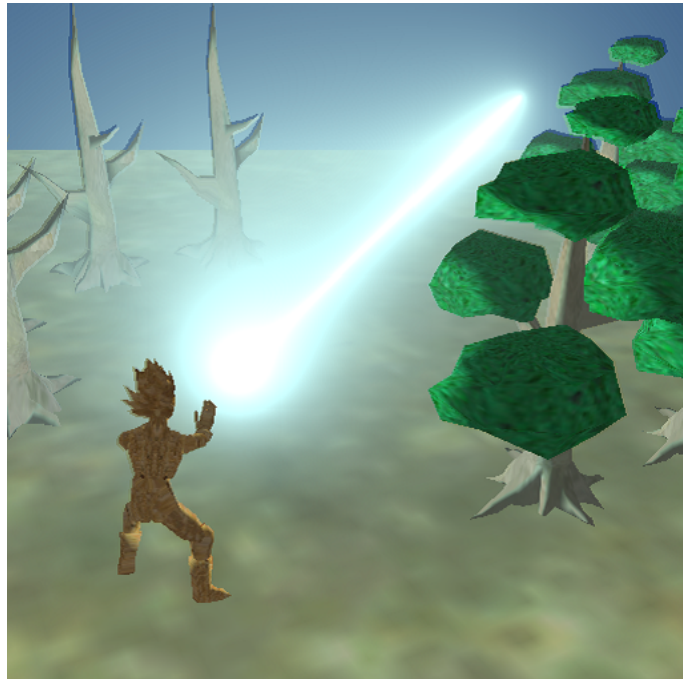


図 3.1: 実行結果：通常の点光源を利用してシェーディングを行った図

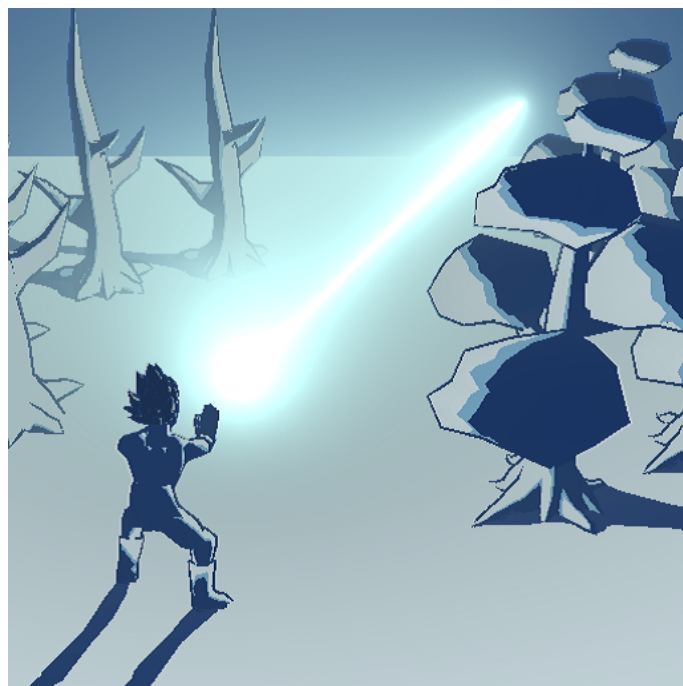


図 3.2: 実行結果：本手法のシェーディングを行った図

図 3.1、図 3.2 より、エネルギー波の強い発光により、物体は元々持っていた色を完全に失い、エネルギー波の色が物体の基色になったことがわかる。

図 3.3、図 3.4、図 3.5、図 3.6 は、各位置から各方向へエネルギー波を撃った図である。

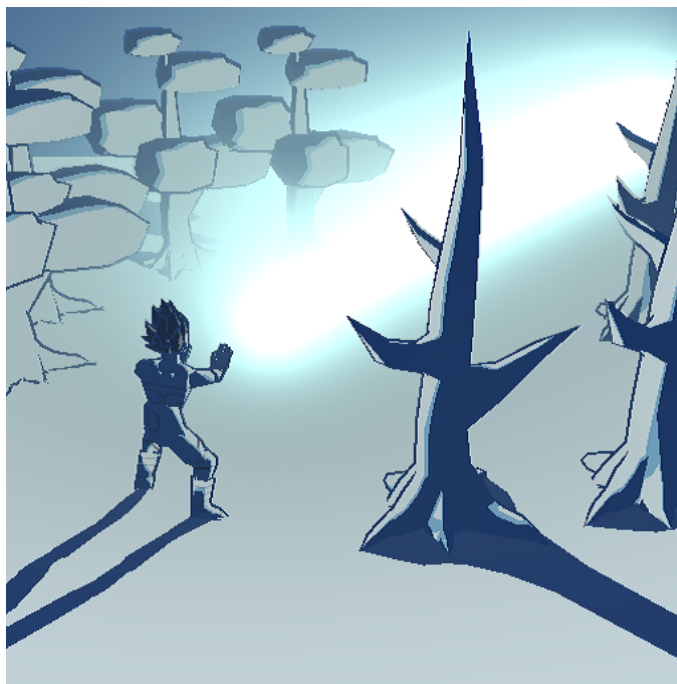


図 3.3: 実行結果：手前の位置から奥方向へエネルギー波を撃った図

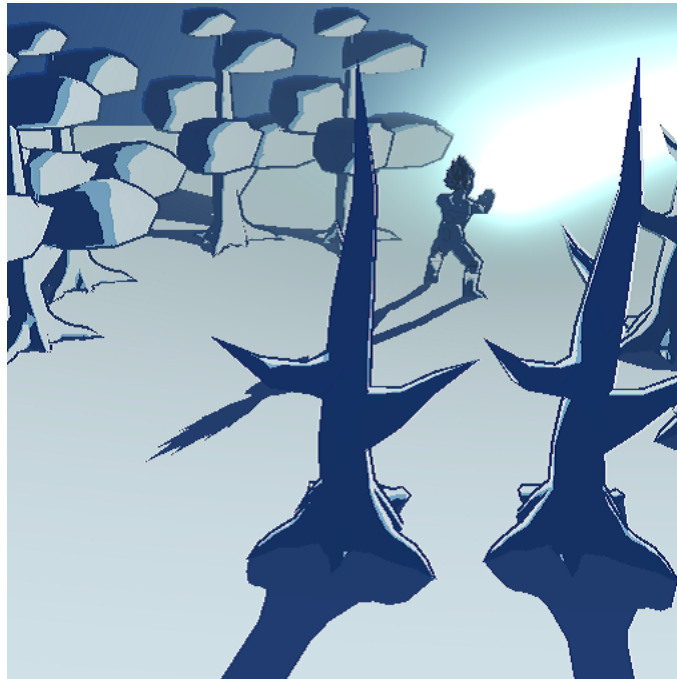


図 3.4: 実行結果：奥の位置から奥方向へエネルギー波を撃った図

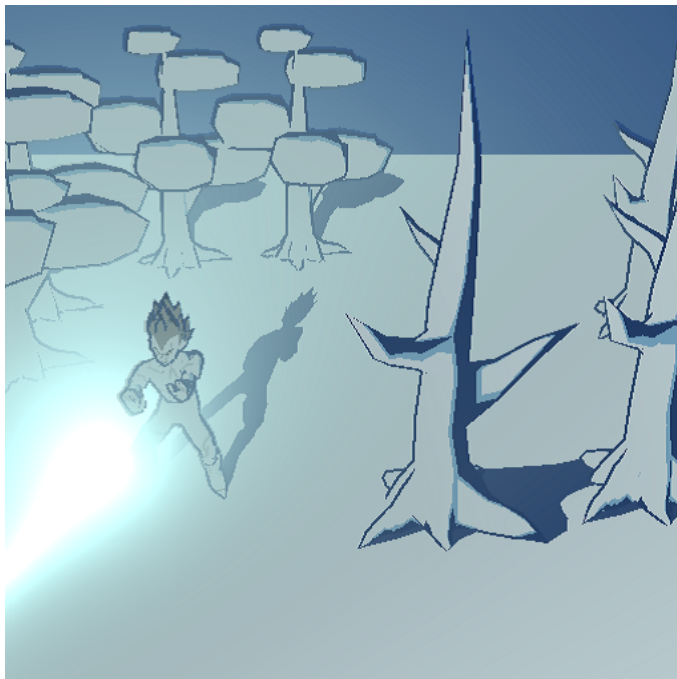


図 3.5: 実行結果：手前の位置から手前方向へエネルギー波を撃った図

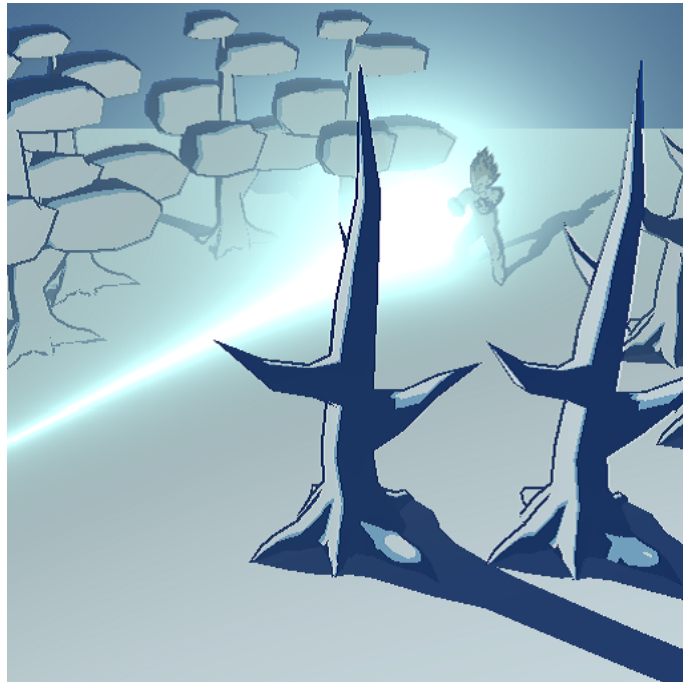


図 3.6: 実行結果：奥の位置から手前方向へエネルギー波を撃った図

図 3.3、図 3.4、図 3.5、図 3.6 により、物体の面の明るさはエネルギー波からの光が当たっている面ほど明るくなり、光が直接当たってなくても、物体の面がエネルギー波が存在する方向に近い方向を向いていれば明るい色になったことがわかる。

視点を上空に移動し、エネルギー波を上空から見た図が、図 3.7、図 3.8 である。図 3.7 と図 3.8 ではエネルギー波を撃つ位置を変えている。

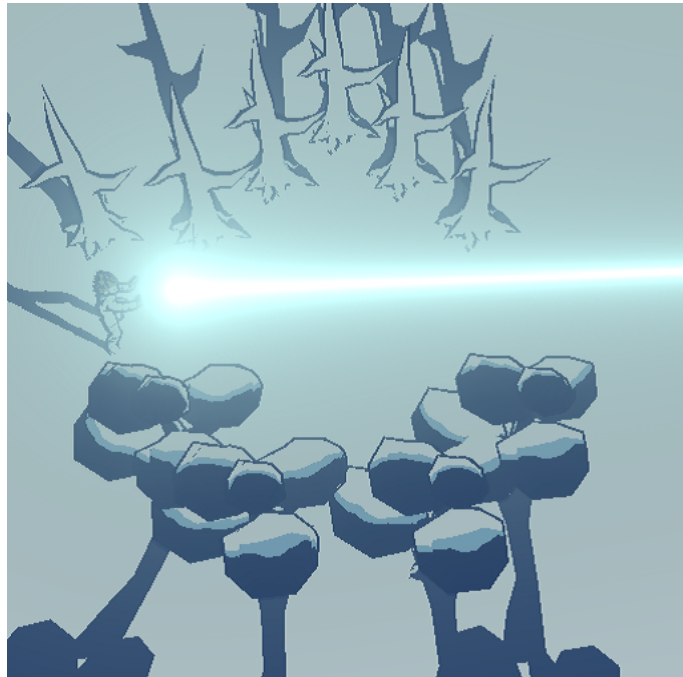


図 3.7: 実行結果：上空から見た図（エネルギー波を撃つ位置は左）

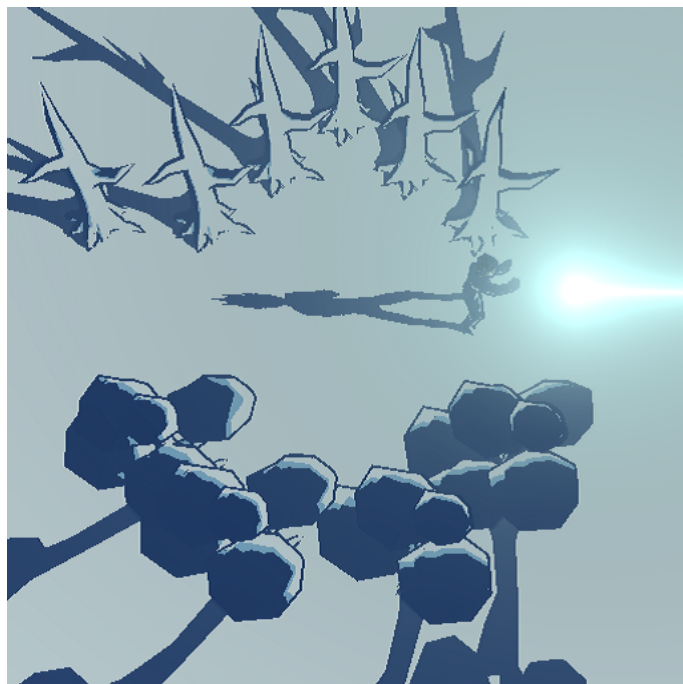


図 3.8: 実行結果：上空から見た図（エネルギー波を撃つ位置は右）

図 3.7、図 3.8 より、各モデルは、エネルギー波から各モデルへ方向へモデル自身を傾けて倒したような形の影を生成できたことがわかる。よって本研究が目指したシャドウイングが実現できたといえる。

視点をモデルの近くに移動した図が、図 3.9 である。



図 3.9: 実行結果：輪郭線と特徴的な部分を表す図

図 3.9 より、モデルの輪郭線と、テクスチャで表現した顔などの特徴的な部分が表現できていることがわかる。

## 3.2 実行速度の検証

本手法で実装したプログラムの処理速度を検証した。処理速度に用いた PC の構成は表に示す。これらの環境において 256 × 256 画素、512 × 512 画素の描画を行った結果を示す。処理速度の単位は FPS(Frame Per Second) であり、1 秒間に可能な描画処理の回数を表す。それぞれの画素数における処理速度の検証結果を表 3.2 に示す。

表 3.1: 実行環境

OS	Windows 7 Enterprise 64 ビット
CPU	Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU E8500 3.16GHz
GPU	NVIDIA GeForce 9800 GTX/9800 GTX+
メモリ	4GB

表 3.2: 処理速度の検証結果

256 × 256 画素	512 × 512 画素
60 FPS	30 FPS

表 3.2 より、リアルタイム性は実現できているといえる。

### 3.3 考察

検証の結果、提案した手法により、エネルギー波の光源効果が表現できた。またエネルギー波の光源効果の特徴を考慮することができ、創作コンテンツ上の表現に近い、エネルギー波の光源効果を再現することができた。

しかし現状の問題点として、シャドウイングに問題がある。本手法では、シャドウイングを行うことのできるのは平面に限っており、凹凸のある面などではシャドウイングを行うことができない。



# 第 4 章

## おわりに

本研究では、3DCG における新たなエネルギー波の光源効果の表現を提案した。

モデルのシェーディングには点光源を利用した。点光源の位置を、シェーディングを行うモデルの面上の点の位置とエネルギー波の位置、エネルギー波を放つ方向により定め、シェーディングを行った。これにより創作コンテンツ上のエネルギー波の光の当たり方に似たシェーディングの効果を得ることができた。顔や服の部分などの特徴的な部分の表現には、特徴的な部分専用のテクスチャを用意し、特徴的な部分専用のテクスチャの色をシェーディングした色と乗算することにより特徴的な部分の表現を可能とした。モデルの輪郭線の表現には裏ポリゴンモデルを利用し、視点の位置によらず均一な輪郭線の表現を可能とした。シャドウイングにおいてもモデルごとに適切な光源の位置を定めた。影を落とす平面上の適切な位置に複製したモデルの全ての頂点を移動し、面の色を黒などに変更することにより、創作コンテンツ上のエネルギー波の光源効果による影の形に近いシャドウイングを行った。

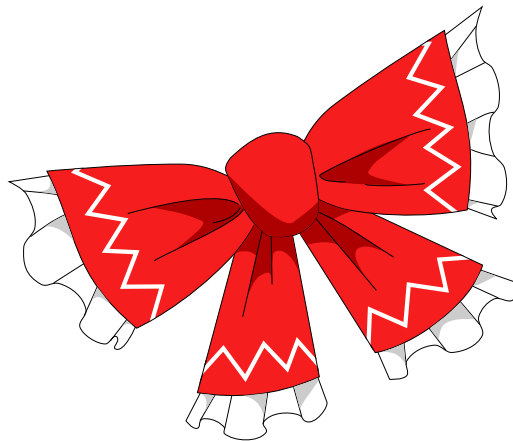
提案した手法を実装することにより、創作コンテンツ上の表現に近い、効果的なエネルギー波の光源効果が表現できた。3DCG においてエネルギー波の表現を行うとき、本手法を用いれば効果的な光源効果を得ることができるだろう。

しかし本手法では、シャドウイングを行うことのできるのは平面に限っており、凹凸のある面などではシャドウイングを行うことができない。この問題を解決す

ることにより、さらにエネルギー波の光源効果の表現の向上につながるだろう。

# 謝辞

はじめに、終始熱くご指導して下さった、渡辺大地先生、三上浩司先生に深く感謝致します。また、阿部雅樹先生にはエネルギー波への熱い思いが感じられ厳しく優しくご指導いただきました。そしてプログラミングで困った時にはいつも相談に乗って頂きました、同研究室の竹内亮太先生には、本当に支えられました。研究室の院生の方々にも、大変お世話になり、様々な助言をくださいました。最後に、苦楽を共にしてきた研究室のメンバーに感謝します。惜しまらくもゲームサイエンスプロジェクトの卒研究生としてはお別れです。みんな大好きです。



## 参考文献

- [1] 鳥山明, 集英社. ドラゴンボール, 1985.
- [2] オフィスアカデミー, 讀賣テレビ. 宇宙戦艦ヤマト, 1974.
- [3] F.C. Crow. Shadow algorithms for computer graphics. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, Vol. 11, No. 2, pp. 242–248, 1977.
- [4] L. Williams. Casting curved shadows on curved surfaces. In *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, Vol. 12, pp. 270–274. ACM, 1978.
- [5] R. Fernando, S. Fernandez, K. Bala, and D.P. Greenberg. Adaptive shadow maps. In *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 387–390, 2001.
- [6] M. Stamminger and G. Drettakis. Perspective shadow maps. In *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 21, pp. 557–562. ACM, 2002.
- [7] M. Wimmer, D. Scherzer, and W. Purgathofer. Light space perspective shadow maps. In *Eurographics Symposium on Rendering*, Vol. 2004, pp. 92–104, 2004.
- [8] W. Donnelly and A. Lauritzen. Variance shadow maps. In *Proceedings of the 2006 symposium on Interactive 3D graphics and games*, pp. 161–165. ACM, 2006.

- [9] 阿部雅樹, 渡辺大地. エネルギー波表現のリアルタイムレンダリング. PhD thesis, 東京工科大学大学院バイオ・情報メディア研究科メディアサイエンス専攻 修士論文, 2010.
- [10] 阿部雅樹, 渡辺大地. エネルギー波表現のリアルタイムレンダリング. 芸術科学会論文誌, Vol. 9, No. 3, pp. 93–101, 2010.
- [11] James D. Foley and Andries van Dam and Steven K. Feiner and John F. Hughes. コンピュータグラフィックス理論と実践. オーム社, 2001.
- [12] J. Rossignac and M. van Emmerik. Hidden contours on a frame-buffer. In *Proceedings of the 7th workshop on computer graphics hardware*, 1992.
- [13] Evan Hart, Dave Gosselin, and John Isidoro. Vertex shading with direct3d and opengl. 2001.
- [14] 鈴木隼人, 渡辺大地. リアルタイム 3DCG における米国漫画調レンダリング手法. PhD thesis, 東京工科大学大学院バイオ・情報メディア研究科メディアサイエンス専攻 修士論文, 2005.
- [15] 高草木隼, 渡辺大地. Shockwave3d における影の生成, 2004. 東京工科大学メディア学部 卒業論文.
- [16] Tomas Akenine-Moller and Eric Haines. リアルタイムレンダリング第2版. ボーンデジタル, 2006.
- [17] OpenGL.org. OpenGL.  
<http://www.opengl.org/>.
- [18] Fine Kernel Project. Fine Kernel ToolKit System.  
<http://fktoolkit.sourceforge.jp/>.

[19] 渡辺大地. リアルタイムグラフィックスのためのツールキットに関する研究,  
1996.

[20] NVIDIA. Cg.

<http://www.nvidia.co.jp/object/cg-jp.html>.