

修士論文

平成 19 年度 (2007)

リアルタイム 3DCG における  
ブラシタッチレンダリング手法の研究

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

堤 靖典

修士論文

平成 19 年度 (2007)

# リアルタイム 3DCG における ブラシタッチレンダリング手法の研究

指導教員 渡辺 大地 講師, 近藤 邦雄 教授, 若林 尚樹 教授

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

堤 靖典

## 論文の要旨

論文題目	リアルタイム3DCGにおける ブラシタッチレンダリング手法の研究
執筆者氏名	堤 靖典
指導教員	渡辺 大地 講師, 近藤 邦雄 教授, 若林 尚樹 教授
キーワード	リアルタイム3DCG NPR イラスト シェーダ
[要旨]	<p>近年3DCGを用いて、ペン画調や水彩画調、セル画調といった、人の手によって描かれた非写実的な画像を再現する Non-Photorealistic Rendering(以下 NPR)の研究が盛んに行われている。NPRは視点や光源の位置が異なる手描き風の画像を、コンピュータで計算するだけで容易に生成できるため、手描き風の画像を大量に必要とする分野において非常に効率的である。この効率化の利点により、NPR技術はアニメーションやビデオゲーム、テクニカルイラスト等で数多く実用されている。しかし、リアルタイムでの処理が可能なNPRは実現できていない表現が多く、ブラシタッチ表現もその一つである。ブラシタッチとは、2DCG作成ソフトウェアにおけるブラシツールによりグラデーションを描いた際にできる段階的な色のムラのことを指す。この段階的な色のムラは、グラデーションの色が変化しない方向にストロークを何度も走らせ、グラデーションを描くことにより生成する。ブラシタッチ表現の従来手法は、3D空間上の光源や視点、物体の位置を考慮した陰影の計算ができないという問題があり、インタラクティブな挙動を考慮したリアルタイムに動作するブラシタッチ表現手法は確立されていない。</p> <p>本研究は、リアルタイム3DCGによる、光源や物体の位置の変化に対応したブラシタッチ表現手法を提案する。本手法では、ブラシタッチを描いた1枚の画像を入力とし、レンダリング対象となる3Dモデルに対してマッピングすることでブラシタッチ表現を行う。その際に入力画像のマッピング位置を、光源や物体の位置関係に合わせて調整することによって、リアルタイムなインタラクションに対応可能な表現手法を実現した。</p>

# A b s t r a c t

Title	Brush-touch Rendering for Real-time 3DCG
Author	Yasunori Tsutsumi
Advisor	Lecturer Taichi Watanabe,Professor Kunio Kondo,Professor Naoki Wakabayashi
Key Words	Realtime-3DCG , NPR , Illustration , Shader

**[summary]**

In recent years, Researches on Non-Photorealistic Rendering (NPR) techniques, which create images that appear to be hand-drawn images rather than real images using 3D computer graphics, have become popular. NPR can generate an hand-drawn image that the positions of a light source and a viewpoint are different , by calculating with a computer. Therefore, it is very effective in a field needing a many hand-drawn images. NPR has been in use by animation, video game, technical illustration, and so on. However, NPR of the real-time processing has much expression that can't be realized, and Brush-touch expression is also one of them. Brush-touch is color irregularity that is generated by doing a drawing of gradation with paint software. This color irregularity is generated with making a brush-stroke in the direction where the color of the gradation doesn't change. The existing technique of Brush-touch have a problem that shading which look around a light source and a viewpoint isn't possible. Therefore, The expression technique of the Brush-touch of the real-time processing isn't established.

In this study, The expression technique of the Brush-touch of the real-time processing is presented. In this technique, the image with brush touch expression is input first. And, In consideration of movement of a light source and a viewpoint, a input image is mapped to 3D model. As a result, The expression technique of the Brush-touch of the real-time processing is realized.

# 目次

<b>第1章</b>	<b>はじめに</b>	<b>1</b>
1.1	研究背景	2
1.2	研究の目的	5
1.3	本論文の構成	5
1.4	数式の定義	5
<b>第2章</b>	<b>イラストにおけるブラシタッチ表現</b>	<b>6</b>
2.1	2DCG制作ソフトウェアにおけるブラシツール	7
2.2	ブラシタッチ表現の特徴	8
2.2.1	ブラシタッチ表現の生成	9
2.2.2	段階的なムラの大きさ	9
2.2.3	ブラシタッチの特徴の軽減	11
2.3	イラストにおける陰影	11
<b>第3章</b>	<b>提案手法</b>	<b>12</b>
3.1	ブラシタッチ表現の基となる画像の入力	13
3.2	陰の濃淡画像の生成	13
3.3	陰影のムラの変化を表す画像の生成	14
3.3.1	円柱マッピング	15
3.3.2	陰影のムラの変化を表す値の計算	17
3.4	マッピング画像密度の調整	19
3.4.1	画像リピート回数の調整	20
3.4.2	画像リピート回数の滑らかな切り替え	22
3.5	ブラシタッチ画像のマッピング	23
<b>第4章</b>	<b>影のブラシタッチ表現</b>	<b>26</b>
4.1	シャドウマップ法	27
4.2	ソフトシャドウの生成手法	28
4.2.1	PCFによるソフトシャドウ生成	30
4.2.2	ソフトシャドウのノイズ平滑化	32
4.3	影のブラシタッチ生成	35

第5章	検証と評価	37
5.1	実行結果 . . . . .	38
5.2	リアルタイム性の検証 . . . . .	42
5.3	問題点 . . . . .	43
第6章	おわりに	45
	謝辞	47
	参考文献	49

# 目次

1.1	イラストにおけるブラシタッチの例 [6][7]	4
2.1	ブラシタッチ表現の特徴 拡大画像	8
2.2	ブラシタッチの生成	10
2.3	着色範囲の大きさによるグラデーション	10
3.1	入力するブラシタッチ画像	14
3.2	陰の濃淡画像	15
3.3	濃淡の円状の連続	16
3.4	円柱マッピング	17
3.5	陰影のムラの変化を表す画像	19
3.6	マッピングする画像密度の問題	20
3.7	画像リピート回数	21
3.8	リピート領域の滑らかな切り替え	23
3.9	陰のブラシタッチ表現 結果画像	25
4.1	シャドウマップ法	28
4.2	シャドウマップ法により生成した影の濃淡画像	29
4.3	Percentage Closer Filtering	32
4.4	PCF により生成したソフトシャドウ	33
4.5	滑らかに接続している面の ID 分け	34
4.6	ノイズ除去後のソフトシャドウ	35
4.7	影のブラシタッチ表現 結果画像	36
5.1	検証に用いたブラシタッチ画像	38
5.2	生成したブラシタッチ表現画像	39
5.3	平面で構成した形状への処理結果	40
5.4	グラデーションの変化が変則的なブラシタッチ画像による処理結果	40
5.5	複数の入力画像による処理結果	41
5.6	速度の検証に用いたシーン	42

# 第 1 章

## はじめに

## 1.1 研究背景

近年、コンピュータの高性能化により 3次元コンピュータグラフィクス (以下 3DCG) の表現の幅が大きく広がり、写実的でリアルな 3DCG 生成技術だけでなく、3DCG を用いて線画調や油絵調、水彩画調、セル画調などの人の手によって描かれた非写実的な画像を再現する Non-Photorealistic Rendering(以下 NPR) という技術 [1][2][3][4] が注目され、研究が盛んに行われている。

NPR は一枚一枚描く手描きでの作業とは異なり、3D 形状データや光源などのシーン情報をコンピュータに計算させるだけで、視点や光源の位置が異なる手描き風の画像を容易に生成できるため、効率化など様々なメリットがある。このメリットにより、NPR 技術は、構造を理解しやすいように線画調などに単純化した対象物を、多視点から見た画像を必要とするテクニカルイラストの作成や、セルアニメ調の画像が大量に必要なアニメーション制作などに数多く実用されている [5]。また、フォトリアルに近似した描画が殆どであったビデオゲームなどのリアルタイム 3DCG コンテンツにおいて、設定画や基となる漫画などの表現を忠実に再現したり、新しい視覚表現を得る目的で、様々な NPR 表現が実用されてきている。しかし、毎秒数十回という描画処理を必要とするリアルタイム 3DCG において、処理時間の制約により実現できていない表現が多いのが現状であり、ブラシタッチ表現もその一つである。

本研究におけるブラシタッチとは、2DCG 作成ソフトウェアにおけるブラシツールを用いてグラデーションを描いた際にできる段階的な色のムラのことを指す。図 1.1(a)(b) にブラシツールを用いて生成したイラストよりブラシタッチ表現の例 [6][7] を示す。図 1.1 それぞれの左の画像の一部分を拡大したものが右の画像である。図 1.1(a) では拡大画像のキャラクターの顔の輪郭部分に、図 1.1(b) ではアヒルの顔の下の陰の部分に対して段階的な色のムラが出ているのが解る。近年では、Adobe 社の PhotoShop<sup>TM</sup>[8] や GNU GPL により公開しているフリーソフトである GIMP[9] などの非常に高性能な 2DCG 作成ソフトウェアが普及し、画像の編集

や修正が容易である利点や、制作するコンテンツのデジタル化などにより、イラスト作成においてブラシツールが用いられる機会が増えている。その為、書籍の挿絵や漫画の表紙、ビデオゲームのキャラクターイラストなど、様々な用途のイラストでこのブラシタッチ表現を見ることができる。

3DCG でブラシタッチに近似した表現を生成できる NPR 手法として、2つの手法が挙げられる。まず第一の手法は、3D モデルにテクスチャマッピングによって陰影情報を直接手描きで焼きこむ手法である。この手法では、3D モデルの作成者の感性による非常に細やかなブラシタッチの表現が可能であるが、作成に非常に手間がかかり、かつ光源や 3D モデルの移動による陰影の変化に対応することができないため、作成した 3D モデルの利用できるシーンが限定されるという問題がある。第二の手法は、Peter ら [10] により提案された Lit Sphere 手法である。Lit Sphere 手法は、手描き又は絵画から特徴的なタッチを抜き出すことにより、陰影のついた球状の画像を生成し、その球状の画像を 3D モデルの面の法線に対応させマッピングすることで、描かれている画像の特徴に則した、手描きのような陰影を生成する手法である。この手法はブラシタッチ表現の描かれた画像を 1 枚入力するだけで容易にブラシタッチのある 3D モデルを表現できるが、球状の画像に描かれた陰影を基に 3D モデルの陰影付けを行うため、3D 空間上にある光源の位置を考慮した計算をすることができないという問題がある。以上より、これら 2つの手法は、どちらも 3D 空間上の光源や視点、物体の位置を考慮した陰影の計算ができないという問題のため、動画やリアルタイム 3DCG コンテンツでの使用には不向きである。

また、現時点でペン画調 [11][12] や水彩画油絵などの絵画調 [13][14] といった NPR の研究は非常に盛んに行われており、様々な生成手法が確立されているが、陰影のグラデーション部分に対してブラシタッチ表現をリアルタイムに生成できる NPR 手法は確立されていない。



(C)Yun, <http://www.sozai-illust.com/free/>

(a)



(C) 神山達哉, <http://free-ten.com/>

(b)

図 1.1: イラストにおけるブラシタッチの例 [6][7]

## 1.2 研究の目的

本研究は、リアルタイム 3DCG において 3D 空間上にある光源や視点の移動に対応したブラシタッチ表現手法を実現することを目的とする。ブラシタッチ表現は様々な用途のイラストで非常によく見られる表現であり、ブラシタッチ表現をリアルタイム 3DCG で再現する手法の確立は、基となるイラストの忠実な再現や新しい視覚効果として需要があると言える。本研究では、ビデオゲームなどの入力に対して即時的な描画処理を必要とするリアルタイム 3DCG コンテンツでの使用を想定し、リアルタイムを秒間 10 フレーム以上の描画とする。

## 1.3 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。第 2 章では、2DCG 作成ソフトウェアにおけるブラシツールの説明や本論文で目標とするブラシタッチ表現の特徴・ブラシツールでの生成方法を説明し、ブラシタッチ表現の定義を明確化する。第 3 章では、本研究で提案するブラシタッチ表現手法について説明する。第 4 章では、影のブラシタッチ表現の生成手法について説明する。第 5 章では、本研究で開発したブラシタッチ表現のプログラムより、生成した結果画像、また画像生成にかかる処理時間の測定の結果を示し、その成果の検証と考察を行う。第 6 章では、本研究の成果と意義をまとめ、今後の展望について述べる。

## 1.4 数式の定義

本論文で用いる数式を以下で定義する。

- $A \cdot B$  はベクトル  $A, B$  の内積を表す。
- $|V|$  はベクトル  $V$  のノルムを表す。
- $\lfloor x \rfloor$  は、 $x$  以下の最大の整数を表す。

## 第 2 章

# イラストにおけるブラシタッチ表現

本章では、2DCG 作成ソフトウェアにおけるブラシツールの説明や本論文で目標とするブラシタッチ表現の特徴・ブラシツールでの生成方法を説明し、ブラシタッチ表現の定義を明確化する。2.1 節では対象とする彩色用具である 2DCG 作成ソフトウェアにおけるブラシツールについて、2.2 節ではブラシタッチ表現の特徴の説明とブラシツールでの生成方法について、2.3 節ではイラストにおける陰影表現について述べる。

## 2.1 2DCG 制作ソフトウェアにおけるブラシツール

本節では、ブラシタッチ表現を生成する彩色用具である 2DCG 制作ソフトウェアにおけるブラシツールについて説明する。ブラシツールとは、モニター上のポインタの位置を中心とした任意の形状を持つ範囲内の画素の色を変更する画像処理の機能である。ブラシツールの操作は、2DCG 制作ソフトウェアでのイラスト生成においてよく用いられる、ペン型の入力インターフェースであるペンタブレット [15] による入力を考慮する。ペンタブレットを用いると、モニター上のポインタを入力インターフェースのペンの動きと同期させて動かす事ができ、また筆圧の検知や傾きの検知を行えるため、手描きの様な感覚で 2DCG の色を塗る事ができる。ブラシツールでは、主に以下のパラメータの設定が可能である。

- 色を塗る範囲の形状とその大きさ
- 色
- 透過度

色を塗る範囲の形状は丸形状や四角形状、星型形状など、様々な形状がソフトウェアごとに定義されている。本研究では、殆どのソフトウェアにおいて実装されており、最もよく利用される形状である丸形状のブラシツールを対象とする。色を塗る範囲の大きさは定義された形状を拡大縮小するものである。ペンタブレットを使用する場合、設定した大きさを筆圧の最大時における色を塗る範囲の大きさ

とし、筆圧を弱めることにより塗る範囲を小さく調節することが可能である。本研究では、この色を塗る範囲のことを以後「着色範囲」と呼ぶ。色の設定では、定義した着色範囲内の画素に塗る色を設定する。ブラシツールに設定できる色は基本的に1色であり、設定した色で着色範囲内全体を均一に塗ることができる。透過度の設定では、色を塗った際に下地の色を透過する度合いを設定する。ペンタブレットによる筆圧の強弱により透過度を変えることが可能であり、筆圧が強い場合透過度を低く設定し、筆圧が弱い場合透過度を高く設定する。

## 2.2 ブラシタッチ表現の特徴

本節では、ブラシタッチ表現の特徴とその生成方法について説明する。本研究におけるブラシタッチとは、2DCG 作成ソフトウェアにおけるブラシツールを用いてグラデーションを描いた際にできる段階的な色のムラのことを指す。図2.1に1章で挙げたブラシタッチ表現の拡大画像を示す。図2.1それぞれの拡大画像より、描く対象となる陰影のグラデーションが変化する方向に対して段階的な色のムラが生成されているのが解る。また、陰影のグラデーションが変化しない方向に対しても、微かな色の変化が見て取れる。



図 2.1: ブラシタッチ表現の特徴 拡大画像

## 2.2.1 ブラシタッチ表現の生成

ブラシタッチ表現の特徴的な色のムラは、ブラシツールを用いて以下の工程を踏みグラデーションを生成することで表現できる。

工程 1 グラデーションの色に応じてブラシツールに設定する色を決定する

工程 2 グラデーションの色が変化しない方向に対して着色範囲を移動させながら色を塗る

工程 3 グラデーションの色が変化する方向に対して着色範囲を移動し、以上の工程を繰り返す

以上の工程を踏み、生成した画像を図 2.2 に示す。図 2.2(a) は工程 1 でブラシツールの持つ色を設定し、工程 2 で、グラデーションの色の変化しない方向に対して着色範囲を移動させながら色を塗った結果を表した画像である。図 2.2(b) は工程 3 で、グラデーションの色が明るく変化する方向に対して着色範囲を移動させ、再度工程 1,2 を行った結果画像である。以上の工程を繰り返すことにより生成した画像が図 2.2(c) であり、ブラシタッチのあるグラデーションが生成できているのが解る。このグラデーションの塗り方は、1 回のストロークで広範囲を塗ることができ、大きな範囲のグラデーションを効率よく生成できるという利点があるため、ブラシツールを用いたイラストにおいて大部分がこの方法で塗られることが多い。

## 2.2.2 段階的なムラの大きさ

ブラシタッチ表現の段階的なムラの大きさは、着色範囲の大きさにより大きく左右される。着色範囲が大きい場合、グラデーションの微妙な段階の調整など細かな描画には不向きであり、生成できるブラシタッチの段階的なムラは大きくなる傾向がある。また、着色領域が小さい場合、細かな描画が可能であり、生成できるブラシタッチの段階的なムラは細くなる傾向がある。

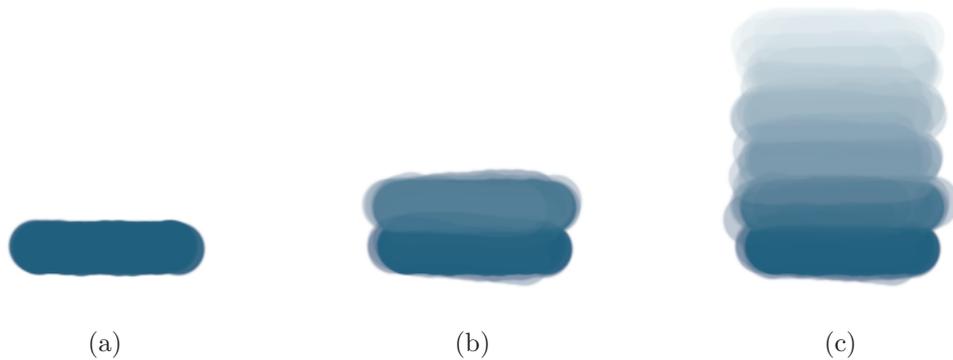


図 2.2: ブラシタッチの生成

色を少しずつ変えながら段階的に塗る手法での、着色範囲の大きさによる生成するグラデーションの違いを図 2.3 で示す。図 2.3(a) は 40 画素、図 2.3(b) は 20 画素、図 2.3(c) は 10 画素の直径を持つ丸形状の着色範囲を用いて、それぞれグラデーションを生成した。図 2.3 より、大きな着色範囲を用いて生成したグラデーションでは非常に大まかな色の段階が生成できているのに対し、小さい着色範囲を用いて生成したグラデーションは細かな色の段階が生成できているのが解る。



図 2.3: 着色範囲の大きさによるグラデーション

### 2.2.3 ブラシタッチの特徴の軽減

2DCG ソフトウェアにおけるぼかしツール、指先ツールなどは、キャンバスの色を別の場所へ延ばしたり色を平滑化する効果がある。これらの処理をブラシタッチのある部分に対して行うことで、ブラシタッチの色のムラを軽減し滑らかなグラデーションを得ることができる。ブラシツールを用いたイラストにおいて、ブラシタッチをそのまま表現するか、特徴を軽減する処理を用いて滑らかなグラデーションを表現するかは、絵描きの感性や表現したいもの、また用いた表現手法により判断する。

## 2.3 イラストにおける陰影

陰影は物体表面上に当たる光の量が増減することによって現れる色の明暗であり、イラストにおいて、空間の位置関係の把握や現実感の付与という点で非常に重要な要素である。陰影は、自身により光が遮られる部分である陰と、他の遮蔽物により光が遮られる部分である影に分けられる。これは描画する際に考慮すべき要素が異なり、光源の大きさ・位置・強さの他に、陰では物体の面の向き、影では光源と遮蔽物・遮蔽物と投影面の距離・遮蔽物の形状など様々な要素を考慮する必要がある。また、イラストにおける陰影表現では、周囲の光の色や方向などの情報は考慮しつつも、絵描きの感性により、絵全体の配色バランスを整えたり絵にアクセントをつける目的で、陰影を実際には現れない色へと調整することがある。陰影のグラデーションの色の変化も一定でなく、物体の材質や形状の起伏を強調したり表現としての色の調節のため、セルアニメ調の様にある一定領域を同じ色で塗りつぶし、色の境界部分にのみブラシタッチがあるものや、同一物体の中で陰影の色が変化するものなど様々な表現がある。

# 第 3 章

## 提案手法

本章では、提案するブラシタッチ表現手法の生成手順について述べる。本章で扱うのは陰のみであり、ブラシタッチのある影の生成については4章にて説明する。提案するブラシタッチ表現手法の大まかな流れは以下の通りである。

1. ブラシタッチ表現の基となる画像の入力
2. 陰の濃淡画像の生成
3. 陰影のムラの変化を表す画像の生成
4. マッピングする画像密度の調整
5. 生成画像から入力画像の参照位置を求め3Dモデルへマッピング

以下、個々の処理について説明する。

### 3.1 ブラシタッチ表現の基となる画像の入力

生成するブラシタッチ表現の基となる2次元画像を入力する。ここで入力する画像を以下、ブラシタッチ画像と呼ぶ。ブラシタッチ画像は上から下にかけて色が暗く変化しているグラデーションを手描きした画像であり、画像の左端と右端がシームレスに繋がる必要がある。ブラシタッチ画像を実際のイラストのグラデーション生成と同様の工程で手描きすることにより、陰影の色の操作や直感的な色の決定を可能にする。図3.1に入力するブラシタッチ画像の例を示す。図3.1はPhotoShopのブラシツールを用いて作成した。ブラシタッチ画像の縦方向は明るさを表し、横方向はストロークによる陰影のムラの変化を表す。

### 3.2 陰の濃淡画像の生成

光源の位置を考慮し陰影付けを行う場合、通常のシェーディングと同じく描画する位置の明るさを求める必要がある。よって本手法では、リアルタイム3DCGの陰の計算において基本的な手法である、ランバートシェーディング [16] を用い

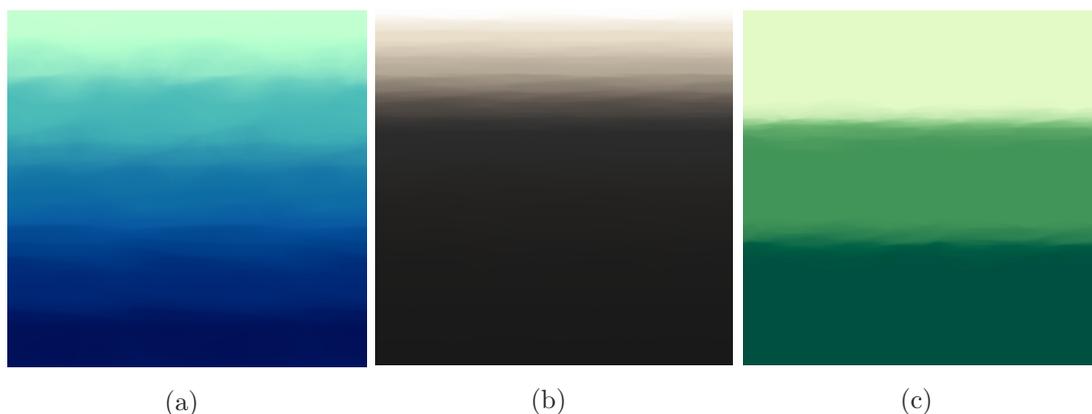


図 3.1: 入力するブラシタッチ画像

て影の濃淡画像を生成する。ランバートシェーディングは、物体表面で吸収され全方向に反射する拡散反射光による物体表面から反射する光の輝度を計算する手法である。この手法は「物体表面から反射する光の輝度は、頂点から光源への方  
向ベクトルと頂点の法線ベクトルとの余弦に比例する」というランバートの余弦則に従う。物体表面上の任意の点  $p$  における法線ベクトルを  $N$ 、光源への方  
向ベクトルを  $L$  とした時、点  $p$  における反射する光の輝度  $I$  はランバートの余弦則よ  
り (3.1) 式で求まる。

$$I = N \cdot L \quad (3.1)$$

図 3.2 にランバートシェーディングを用いて生成した陰の濃淡画像を示す。図の  
右上にある赤い点が光源の位置である。図 3.2 から光源の方向に向いている物体の  
面が明るく、逆方向に向いている面が暗くなっていることが解る。この陰の濃淡  
画像は、ブラシタッチ画像の明るさを表す縦方向の参照に使用する。

### 3.3 陰影のムラの変化を表す画像の生成

ブラシタッチ表現は、陰影の濃淡の変化が無い方向に対してブラシのストロー  
クを走らせることにより生成する。図 3.3 は図 3.2 の陰影の濃淡画像を用いて陰影  
の濃淡の変化が無い部分を明確化したものである。図 3.3 は明るさが一定の部分

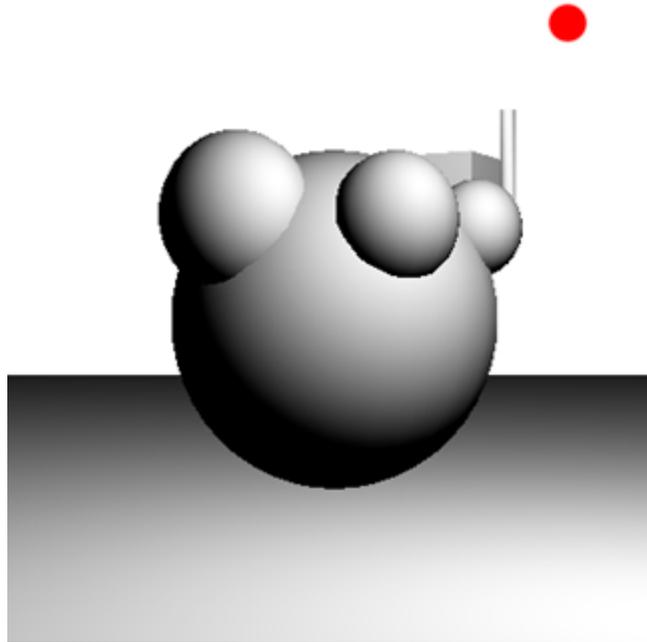


図 3.2: 陰の濃淡画像

3箇所抜き出し、それぞれを赤、緑、青で表している。図 3.3 より、個々の色の部分が一定の範囲にわたって円状に連続しているのが解る。この同じ色が円状に連続している部分に沿って、ブラシのストロークを走らせた様なブラシタッチの変化が出るのが理想的な結果である。

本手法では、陰影のムラの変化を実際に手描きし生成したブラシタッチ画像の横方向の変化に対応させ、3D モデルにマッピングすることで実現する。この横方向の変化に対応するマッピングには、円柱マッピングを基とした手法を用いる。本節では、円柱マッピングを説明した後、ブラシタッチ画像の横方向の参照に使用する陰影のムラの変化を表す画像の生成手法を述べる。

### 3.3.1 円柱マッピング

円状に連続している部分に沿ったマッピングを実現するために、本手法では円柱マッピング [17] の手法を参考にした。円柱マッピングとは、ある任意の大きさを持つ円柱の面から円柱の中心の軸への投影により、テクスチャをマッピングする手法

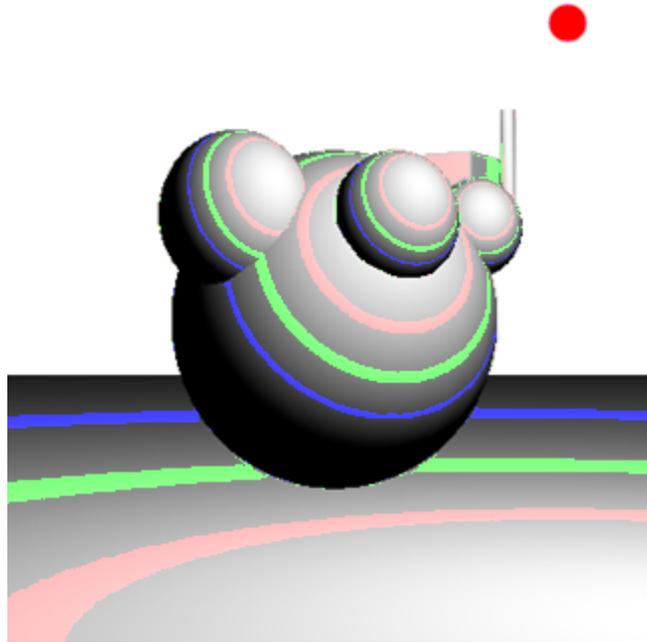


図 3.3: 濃淡の円状の連続

である。マッピングする画像の始点は、円柱の中心の軸に対して直交する任意のベクトルより決定する。図 3.4 は円柱マッピングを表した図である。図 3.4(c) はマッピングする画像であり、図 3.4(a) は円柱に、図 3.4(b) は立方体にそれぞれ上から下へ通る直線を軸として、円柱マッピングを行った結果画像である。図 3.4(a),(b) の赤い矢印が円柱の中心の軸に対して直交するベクトルを表す。図 3.4(a),(b) より、マッピングする形状に関わらず、画像の赤い矢印部分を始点に中心の軸を周る様に図 3.4(c) の画像がマッピングできていることが解る。また、高さに対してマッピングする色が変化しており、上部が白く、下部が青くなっているのが解る。この様に、円柱マッピングは形状に関わらず軸となる線を中心に円状に連続したマッピングを行うことができる。

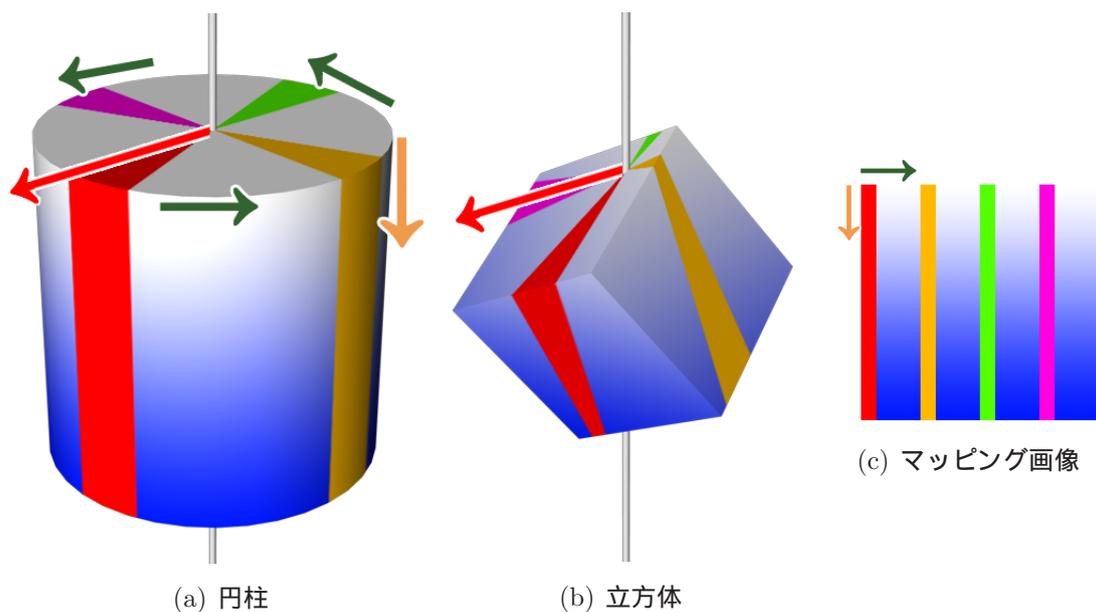


図 3.4: 円柱マッピング

### 3.3.2 陰影のムラの変化を表す値の計算

本手法の陰影のムラの変化を表す値の計算では、円柱マッピングの円柱の中心を軸に円状に連続したマッピングを行うという特徴を用いる。マッピングに用いる中心軸は、光源の位置と物体の形状に則して任意に設定する点の2点を通る直線とする。この物体の形状に則して任意に設定する点を、本研究ではマッピング基準点と定義する。マッピング基準点は、基本的に対象とする3Dオブジェクトの中心位置とする。こうすることで、常に対象とする3Dオブジェクトの中心に中心軸が通るため、中心軸が3Dオブジェクトからずれてしまうといった問題が起こりにくく、物体や光源の移動に対応しやすくなる。この方法は、球体形状に対して理想的な結果が得られる方法であるが、多くの形状に対して光源との位置関係が変化しても、違和感の少ない陰影のムラの変化に近似した結果を求められる。また特殊な形状として、地面など面法線がある一定方向に偏っているオブジェクトに対しては、面と垂直に交わる光源を通る直線を中心線と設定することで理想的な結果が得られる。この様に形状によって理想的なマッピング基準点の位置は異なるため、形状や光源の移動を考慮して任意に決定する。

次に、中心軸に平行な光源からマッピング基準点への方向ベクトル  $V$  を求める。光源の位置座標  $L_p$  からマッピング基準点の位置座標  $G$  へ向かう、中心軸に平行な方向ベクトル  $V$  は (3.2) 式により求まる。

$$V = \frac{G - L_p}{|G - L_p|} \quad (3.2)$$

次に、中心軸に対して互いに直交する2つのベクトル  $L_1, L_2$  を求める。この2つのベクトル  $L_1, L_2$  は中心軸に対する物体表面上の任意の点  $p$  の位置を計算するための指針となる。まず中心軸に平行な方向ベクトル  $V$  の  $YZ$  平面への射影ベクトル  $V_{yz}$  と  $Z$  軸のなす角  $\theta_x$ 、同様に  $V$  の  $XZ$  平面への射影ベクトル  $V_{xz}$  と  $Z$  軸のなす角  $\theta_y$  を求める。 $V_{yz}$  又は  $V_{xz}$  が零ベクトルであり、なす角が求められない場合は、各射影ベクトルに対応するなす角は0とする。 $X$  軸、 $Y$  軸を中心とする回転行列を  $R_x(\quad), R_y(\quad)$  としたとき、 $Z$  軸に平行なベクトルから  $V$  への回転変換  $R_t$  は  $R_t = R_x(\theta_x)R_y(\theta_y)$  で求まる。 $R_t$  を (3.3) 式で示す。

$$R_t = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & -\sin \theta_x \\ 0 & \sin \theta_x & \cos \theta_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & \sin \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$V$  に対して互いに直交する2つのベクトル  $L_1, L_2$  は、 $X$  軸、 $Y$  軸に平行な単位ベクトルを  $R_t$  より変換することで求まる。 $L_1, L_2$  を (3.4) 式で示す。

$$L_1 = R_t \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad L_2 = R_t \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

最後に、陰影のムラの変化を表す値  $W$  を求める。物体表面上の任意の点  $p$  における  $W$  を求めるには、マッピング基準点の位置座標  $G$  から、点  $p$  の位置座標  $P$  へ向かう方向ベクトル  $Q$  を使用する。 $Q$  は (3.5) 式により求まる。

$$Q = \frac{P - G}{|P - G|} \quad (3.5)$$

求めた  $L_1, L_2, Q$  を用いることにより、陰影のムラの変化を表す値  $W$  は (3.6) 式で求められる。

$$W = \begin{cases} \frac{\arctan\left(\frac{L_1 \cdot Q}{L_2 \cdot Q}\right)}{2\pi} + 0.5 & (L_1 \cdot Q \leq 0) \\ \frac{\arctan\left(\frac{L_1 \cdot Q}{L_2 \cdot Q}\right)}{2\pi} & (L_1 \cdot Q > 0) \end{cases} \quad (3.6)$$

$L_1$  と  $Q$  の内積が負であった場合、出力する値  $W$  を  $0 < W < 1$  に収めるため、 $W$  に 0.5 を加える。また  $L_2 \cdot Q = 0$  となる場合、 $\arctan\left(\frac{L_1 \cdot Q}{L_2 \cdot Q}\right) = 0$  とする。

図 3.2 と同一のシーンで生成した、陰影のムラの変化を表す値  $W$  の画像を図 3.5 に示す。図中の赤い線が中心軸である。図 3.5 より、中心軸を軸に周るように黒から白へのグラデーションが生成できていることが解る。この陰影のムラの変化を表す画像は、入力したブラシタッチ画像のストロークによる陰影のムラの変化を表す横方向の参照に使用する。

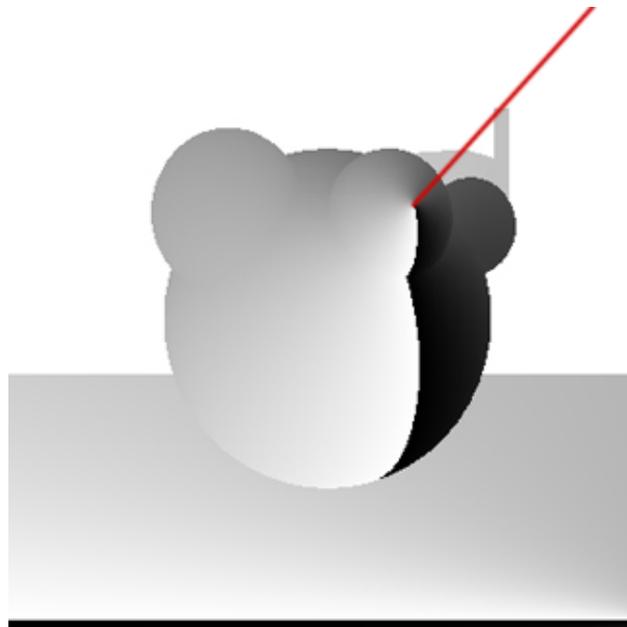


図 3.5: 陰影のムラの変化を表す画像

### 3.4 マッピング画像密度の調整

前節で生成した陰影のムラの変化を表す画像を、そのままブラシタッチ画像の横方向に対応させマッピングすると、円柱マッピングと近似した性質を持つため、中心軸に近い部分では投影像が小さくなり、遠い部分では投影像が大きくなるという傾向がある。この傾向は、投影像が小さい部分では画像を集約してマッピン

グするため、意図しないモアレが発生し、また投影像が大きい部分では画像を伸ばしてマッピングするため、正常にブラシタッチ表現が生成できないという問題に繋がる。この問題を図 3.6 に示す。図 3.6 は 3.2 節より求めた陰の濃淡画像をブラシタッチ画像の縦方向に、3.3 節により求めた陰影のムラの変化を表す画像を横方向に対応し、3D モデルへマッピングした画像である。入力したブラシタッチ画像は図 3.1(a) を用いた。図 3.6(a),(b) は、図 3.2 のシーンの光源とマッピング基準点の位置を移動して描画した画像であり、それぞれの右の画像は、左の画像の一部を拡大し、色を白黒にして強調している。図 3.6(a),(b) 共に、ブラシタッチ表現が生成できている部分はあるが、図 3.6(a) の拡大部分ではブラシタッチ表現が殆ど表れておらず、また図 3.6(b) の拡大部分では意図しないモアレが出ているのが解る。

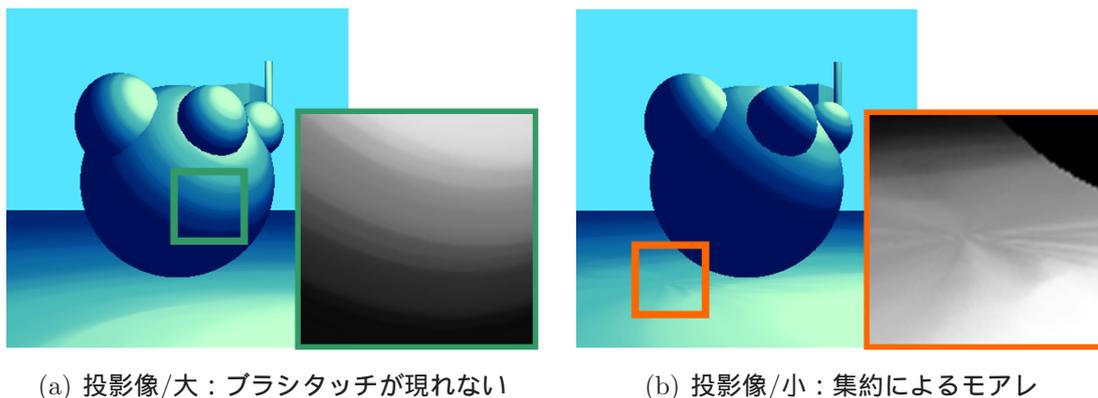


図 3.6: マッピングする画像密度の問題

本手法では、中心軸からの距離にしたがって段階的にマッピングするブラシタッチ画像の横方向に同じ画像を複数枚リピートし、マッピングする画像の密度を均一化することによりこの問題を解決する。

### 3.4.1 画像リピート回数の調整

ブラシタッチ画像 1 枚でのマッピング密度が正常な、中心軸からの距離を  $M_d$  とする。この距離  $M_d$  は、入力するブラシタッチ画像の解像度、出力する画面解像

度、表示する 3D モデルの大きさやカメラの位置などを考慮し任意に設定する。物体表面上の任意の点  $p$  の中心軸からの最短距離を  $P_d$  とすると、点  $p$  における画像のリピート回数  $T$  は (3.7) 式で求まる。

$$T = \left\lfloor \frac{P_d}{M_d} \right\rfloor \quad (3.7)$$

$T$  が 0 になる部分は、ブラシタッチ画像のマッピングする密度が非常に高い。よって画像の集約によるモアレを防ぐため、ブラシタッチ画像の左端のみを参照し、画像横方向の変化を無くすことでブラシタッチの生成を行わない。図 3.7 は図 3.2 と同一のシーンで描画した画像のリピート回数の変化を表す画像に、距離  $M_d$  とリピート回数  $T$  の説明を加えたものである。最も黒い部分は画像の集約によるしわを防ぐため、ブラシタッチを生成しない場所を表し、色が薄くなるにつれ画像横方向へのリピート回数が 1 回ずつ増えている。青い線が設定した距離  $M_d$  であり、 $M_d$  と同じ間隔で画像リピート回数が増えているのが解る。

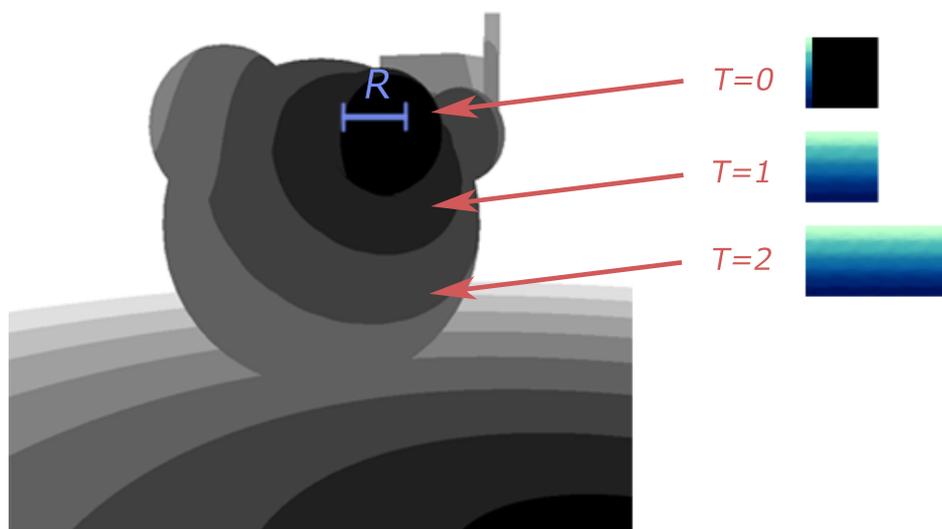


図 3.7: 画像リピート回数

### 3.4.2 画像リピート回数の滑らかな切り替え

画像のリピート回数が切り替わる境界の部分では、互いの参照するブラシタッチ画像の位置が大きく異なるため、境界部分でマッピングする画像の不連続が起こる。本手法では、描画する点  $p$  のリピート回数  $T$  と隣接するリピート回数部分  $T + 1$  の2つの値から画素値を参照する位置を決定し、3D オブジェクトにマッピングする際、線形的にマッピングする割合を変えることにより、つなぎ目の目立たない滑らかな画像リピート回数の切り替えを行う。本手法を説明するに当たり、リピート回数が  $n$  回の領域を  $R(n)$  と表す。始めに、描画する点  $p$  における  $R(T)$  内での、リピート回数が  $T + 1$  に切り替わる境界までの距離の割合  $s$  を (3.8) 式にて求める。

$$s = \frac{P_d}{M_d} - \left\lfloor \frac{P_d}{M_d} \right\rfloor \quad (3.8)$$

次に、 $R(T)$  から  $R(T + 1)$  への滑らかな接続を行う領域の大きさ  $\alpha$  を設定する。 $\alpha$  は  $R(T)$  内の割合であり、この  $\alpha$  の値は入力するブラシタッチ画像によって最適な値が異なるため、ブラシタッチ画像にあわせ  $0 < \alpha < 1$  で任意に設定する。但し、 $\alpha$  が0に近いと滑らかな接続をする範囲が小さく正常に機能しない問題があるため、多くの場合で  $0.3 < \alpha < 1$  で設定することで望ましい結果が得られやすい。以上により求めた値  $\alpha, s$  より、 $R(T)$  に対する  $R(T + 1)$  のマッピングの割合を表す値  $t$  は (3.9) 式で求まる。

$$t = \begin{cases} 0 & (s < 1 - \alpha) \\ \frac{(s-1)}{\alpha} + 1 & (s \geq 1 - \alpha) \end{cases} \quad (3.9)$$

図 3.8(a) は画像リピート回数の異なる部分の滑らかな切り替えの処理を表す概念図である。図 3.8(a) の  $R(T)$  の範囲内において、白い部分はリピート回数  $T$  でそのままマッピングする部分であり、赤いグラデーション部分は  $T$  と  $T + 1$  の両方でマッピング位置の計算を行い、赤い色が強くなるごとに  $T$  で参照した画素値から  $T + 1$  で参照した画素値へ線形的に割合を変える部分を表す。図 3.8(a) は  $\alpha = 0.5$  と設定した場合の例であり、 $R(T)$  の範囲内で、画像リピート回数が増える境界の

部分から  $\alpha$  の割合の部分にグラデーションを生成している。図 3.2 と同一のシーンで生成した、画像リピート回数が異なる領域の滑らかな切り替え部分を表す画像を図 3.8(b) に示す。図 3.8(b) は  $\alpha = 0.5$  により生成した。

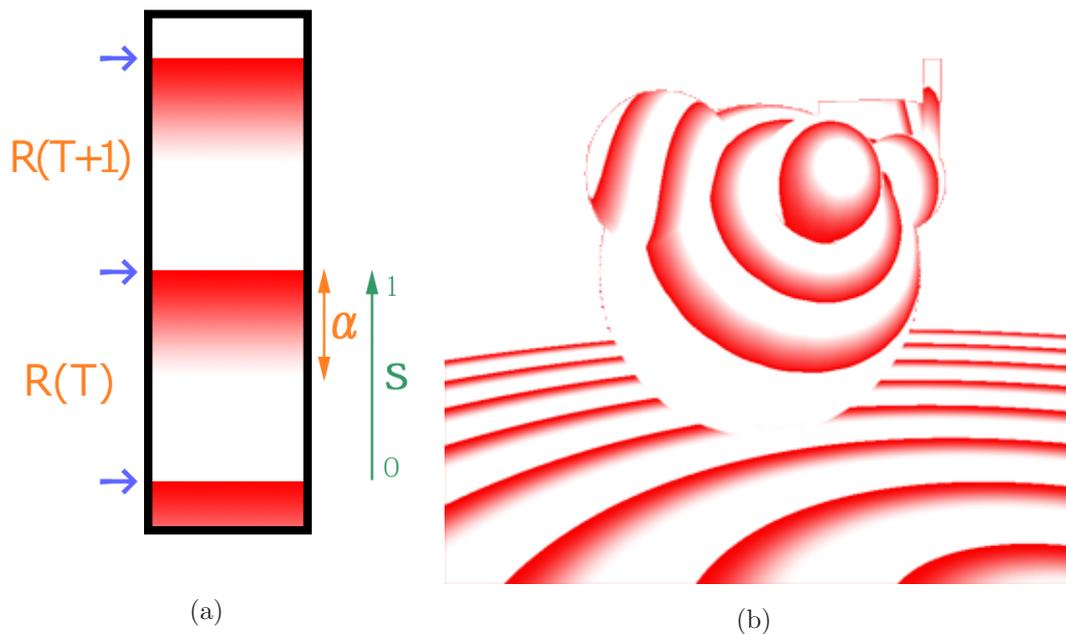


図 3.8: リpeat領域の滑らかな切り替え

### 3.5 ブラシタッチ画像のマッピング

3.2,3.3,3.4 節により求めた情報からブラシタッチ画像の参照位置を 2 点決定し、3D モデルへのマッピングを行う。3.2 節で求めた陰の濃淡画像の値  $I$ 、3.3 節で求めた陰影の変化を表す画像の値  $W$ 、3.4 節で求めた画像のリpeat回数  $T$  より、物体表面上の点  $p$  における入力画像の参照位置  $K_1, K_2$  は次式で表す。

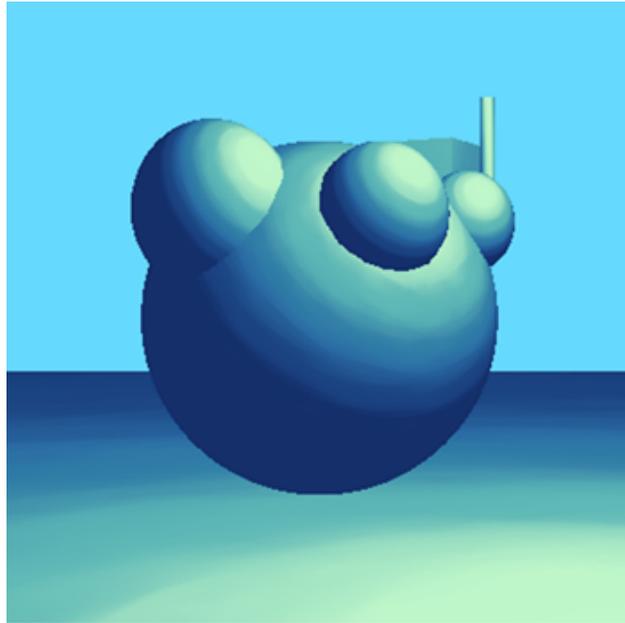
$$\begin{aligned} K_1(u, v) &= (WT, I) \\ K_2(u, v) &= (W(T+1), I) \end{aligned} \quad (3.10)$$

$K_1, K_2$  の  $u$  値は下を 0・上を 1 とする画像の横方向に対応し、 $v$  値は左を 0・右を 1 とする画像の縦方向に対応させ、ブラシタッチ画像の参照を行う。求めた  $K_1$

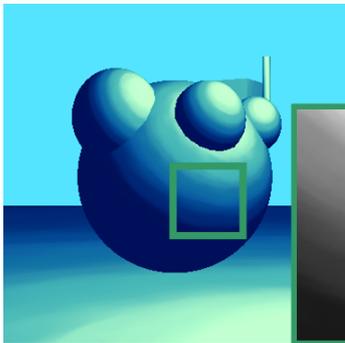
より参照した画素の色を  $C_1$ 、 $K_2$  より参照した画素の色を  $C_2$  とする。物体表面上の点  $p$  における最終的な画素色  $M$  は、3.4 節で求めたマッピングする割合を表す値  $t$  と  $C_1, C_2$  により、以下の式で求まる。

$$M = C_1(1 - t) + C_2t \quad (3.11)$$

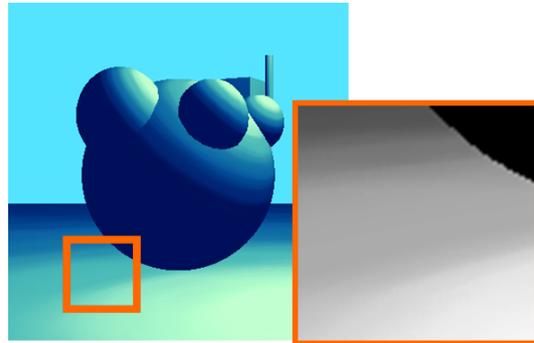
図 3.9(a) は、本章で説明した一連の処理を図 3.2 と同一のシーンで実行した結果画像である。ブラシタッチ画像は図 3.1(a) を用いた。また図 3.9(b),(c) は、図 3.6 と同一のシーンでマッピング密度調整の処理を行い描画した結果画像である。図 3.9(a) より、画像の中央にある球状の物体の面や床の陰影から、入力したブラシタッチ画像の特徴に則したグラデーションのムラが見て取ることができる。また、図 3.9(b),(c) では、図 3.6(a),(b) との比較により、意図しないモアレや画像が伸ばして張られてしまうという問題が発生していないことが解る。



(a) 結果画像



(b) 投影像/大



(c) 投影像/小

図 3.9: 陰のブラシタッチ表現 結果画像

## 第 4 章

### 影のブラシタッチ表現

本章では、本論文で提案する影のブラシタッチ表現の生成手法について説明する。4.1 節では3DCGの影生成において基本的な手法であるシャドウマップ法について、4.2 節では本手法で用いる Percentage Closer Filtering によるソフトシャドウ生成手法とその改良手法について、4.3 節では 3.3 節で求めた陰の濃淡画像と、ソフトシャドウの画像の統合方法、ブラシタッチ画像のマッピング方法について述べる。

## 4.1 シャドウマップ法

シャドウマップ法 [18] は Williams によって提案された、3DCG において非常に基本的な影の生成手法である。この手法は、シーンの幾何学的計算を必要とせず自身に影のつくセルフシャドウも含めた影が描画できる。また近年のグラフィックス機能のハードウェア化により高速な処理が可能であるため、ビデオゲームなどのリアルタイム 3DCG コンテンツを中心に広く利用されている。

シャドウマップ法は、まず光源の位置からシーンを描画し、シャドウマップ(シャドウバッファ)と呼ばれる奥行き値を記録した画像を生成する。このシャドウマップの各画素は、描画した位置の光源から最も近くにある物体までの距離を表す。そして視点からレンダリングする際に、描画する 3D オブジェクト上の点  $p$  から光源までの距離  $V$  と対応するシャドウマップの奥行き値  $S$  とを比較することで、描画する点  $p$  が影かどうかを判定する。点  $p$  が影かどうかを表す判定式を (4.1) 式で示す。 $I$  が 0 である場合点  $p$  は影であると判定し、 $I$  が 1 である場合、影でないと判定する。

$$I(V, S) = \begin{cases} 0 & (V > S) \\ 1 & (V = S) \end{cases} \quad (4.1)$$

これを図 4.1 で示す。この図において、左上の画像がこのシーンにおけるシャドウマップであり、光源からの距離が近い部分を黒く、遠い部分を白く表している。点 A は光源までの距離が対応するシャドウマップに記録した奥行き値よりも大き

いため、光源との間に遮蔽物があり影になる。また点 B は2つの値がほぼ等しいため、光源との間に遮蔽物がなく影にはならない。

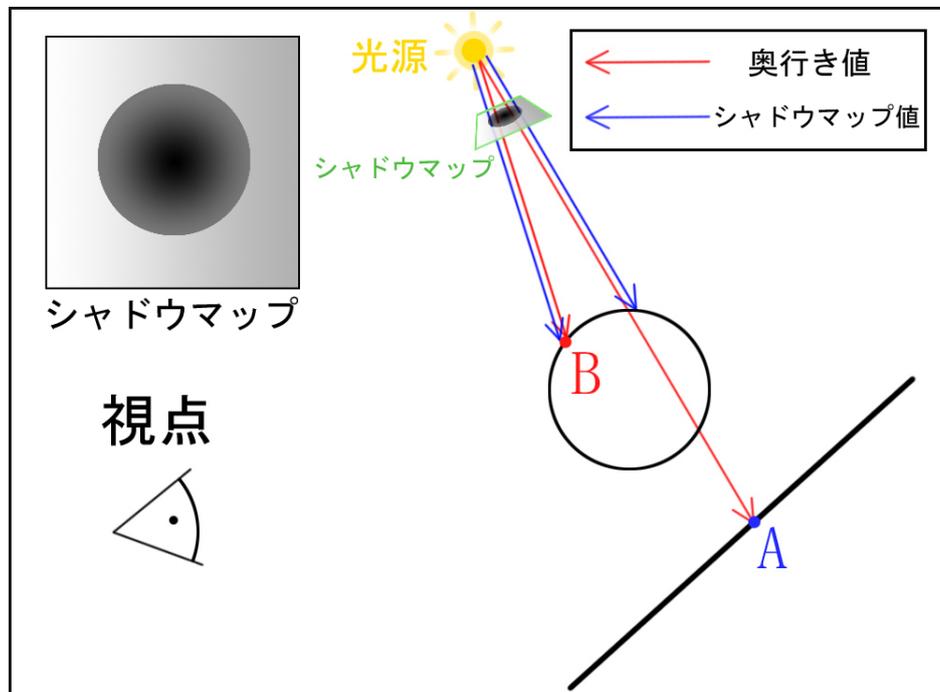
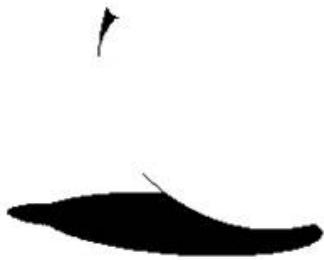


図 4.1: シャドウマップ法

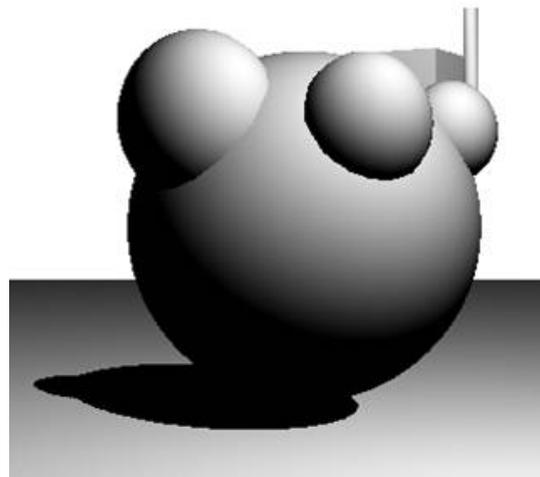
図 3.2 と同一のシーンで生成した、シャドウマップ法により生成した影の濃淡画像を、図 4.2 に示す。図 4.2(a) は影のみを表す濃淡画像であり、図 4.2(b) は図 4.2(a) の画像を図 3.2 に統合したものである。図 4.2 より、シャドウマップ法で生成した画像は影の輪郭部分がハッキリとしているハードシャドウであることが解る。これは、シャドウマップ法が影か、影でないかという2値の判定のみで影を生成しているためである。

## 4.2 ソフトシャドウの生成手法

シャドウマップ法により生成できる影は、輪郭のハッキリしているハードシャドウである。影の輪郭のぼけ方は、光源の大きさ、光源から遮蔽物への距離と遮蔽



(a) 生成ハードシャドウ



(b) 陰の濃淡画像との統合

図 4.2: シャドウマップ法により生成した影の濃淡画像

物から投影面の距離の比率によって異なり、太陽光など非常に遠くにある光源に対しては、ハードシャドウで近似した表現が得られるが、日常的に見る影の多くは輪郭のぼけているソフトシャドウである。同時に、ブラシタッチ表現は陰影のグラデーション部分に生成する表現であるため、グラデーションとなる影のぼけた部分を持たないハードシャドウでは表現することができない。よって、影のブラシタッチ表現を実現する場合、影の輪郭がぼけているソフトシャドウを生成する必要がある。

シャドウマップ法をベースとしたソフトシャドウの生成は、用途に合わせた様々な手法の研究 [19] が行われている。本研究はリアルタイムでの動作を目的とするため、投射距離や光源の大きさを考慮した物理的な計算によるソフトシャドウのぼけ方の厳密性は考慮しない。よって、見た目として違和感の少ないソフトシャドウを生成でき、かつ処理が高速に行える手法の一つである Percentage Closer Filtering(以下、PCF) によるソフトシャドウ生成手法 [20][21] を用いる。

### 4.2.1 PCFによるソフトシャドウ生成

本手法で用いる PCF とは、描画点から光源までの距離とその位置に対応したシャドウマップの値を比較する際に、ジッターサンプリングという手法を用いてシャドウマップの参照位置を一定の範囲内で無作為にずらした参照を複数回行い、個々の参照位置で影かどうかの判定を行った後、その判定した影の画像の平均から影の濃さを決定する手法である。以下で詳細を述べる。

PCF によりソフトシャドウを生成するには、まず 1 画素のソフトシャドウ生成に対するシャドウマップの奥行き値の参照回数  $n$  を設定する必要がある。この参照回数  $n$  は任意に設定が可能であり、 $n$  を増やすことでより綺麗なソフトシャドウのグラデーションを得ることができる。しかし、 $n$  を増やすと処理が増加するため、用途や処理速度を考慮して適切な参照回数を設定する必要がある。

シャドウマップの奥行き値の参照位置は、描画する物体表面上の点  $p$  に対応するシャドウマップの画素の座標から、設定した参照回数  $n$  分個々に一定の範囲内で無作為に決定する。この一定の範囲内で無作為に参照する位置を決める手法をジッターサンプリング [22] と呼び、無作為にずらすために用いる値をジッターと呼ぶ。ジッターサンプリングを用いる理由は、規則的な間隔での複数回の参照の場合、参照したシャドウマップの値に特定のパターンが発生しやすいためである。描画する物体表面上の点  $p$  に対応するシャドウマップの画素の座標を  $A$ 、参照回数  $n$  分個々に、シャドウマップの座標をランダムにずらす量を決定するジッターのベクトルを  $J(1), J(2), \dots, J(n)$  とする。ジッターのベクトル  $J(n)$  の  $x$  成分  $J_x$  と  $y$  成分  $J_y$  は、 $\sqrt{J_x^2 + J_y^2} < 1$  を満たす。参照する範囲の大きさを表す値を  $E$  とすると、参照回数  $i$  回目のジッターサンプリングによるシャドウマップの参照座標  $H(i)$  は (4.2) 式により求まる。

$$H(i) = A + EJ(i) \quad (4.2)$$

以上によって求めたシャドウマップの参照座標  $H(i)$  より、 $n$  個の参照座標をそれぞれ求め、シャドウマップの奥行き値を個々に取得する。そして、点  $p$  から光

源までの距離と個々のシャドウマップの奥行き値を (4.1) 式により影かどうか判定し、その平均値を求めることで影の濃さを決定する。ジッターサンプリングによるシャドウマップの参照回数  $n$ 、描画する 3D オブジェクト上の点  $p$  から光源までの距離  $V$ 、 $n$  個のサンプルからジッターサンプリングにより取得した個々のシャドウマップの奥行き値  $S_1, S_2, \dots, S_n$  より、PCF によるソフトシャドウの濃淡を表す値  $B$  は (4.3) 式にて求まる。但し、 $I(V, S)$  はシャドウマップの判定式である (4.1) 式を計算した結果を表す。

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n I(V, S_i)}{n} \quad (4.3)$$

PCF によるソフトシャドウ生成を表した画像を図 4.3 に示す。図 4.3 左, 中央の画像はシャドウマップを一部拡大した画像である。図 4.3 はジッターサンプリングによる参照回数  $n = 8$ 、点  $p$  から光源までの距離  $V = 4.3$  とし、各参照位置のシャドウマップの奥行き値  $S_n$  は拡大画像上に書き込まれている値とする。図 4.3 左の画像中心のオレンジ色の部分が、描画する点  $p$  に対応するシャドウマップの座標  $A$  であり、座標  $A$  から一定の範囲内で 8 回ジッターサンプリングを行った。図 4.3 中央の画像は個々の参照した座標で  $V$  と  $S_n$  を比較し、影かどうかの判定した結果を表す。赤色は光が当たっている部分、青色は影となる部分を表す。図 4.3 より、8 回の参照に対して光が当たっていると判断した画素が 5 つあるため、点  $p$  におけるソフトシャドウの濃淡を表す値  $B$  は 0.625 となる。

PCF によるソフトシャドウ生成の結果画像を図 4.4 に示す。図 4.4 より、床に落ちている影や自身に落ちているセルフシャドウの輪郭部分がぼやけたソフトシャドウが生成できていることが解る。また中心の球状の物体の左下側に、シャドウマップ法固有の問題であるエイリアシング問題によりグラデーション部分にムラが出ているのが解る。このエイリアシング問題はシャドウマップのテクスチャサイズが不足している場合に起こる問題である。この問題に対処する方法は数多く研究 [23] されているが、本研究では本節で生成した画像に対して更にぼかし処理を加える工程があるため、エイリアシングの影響が少ないという点、またエイリ

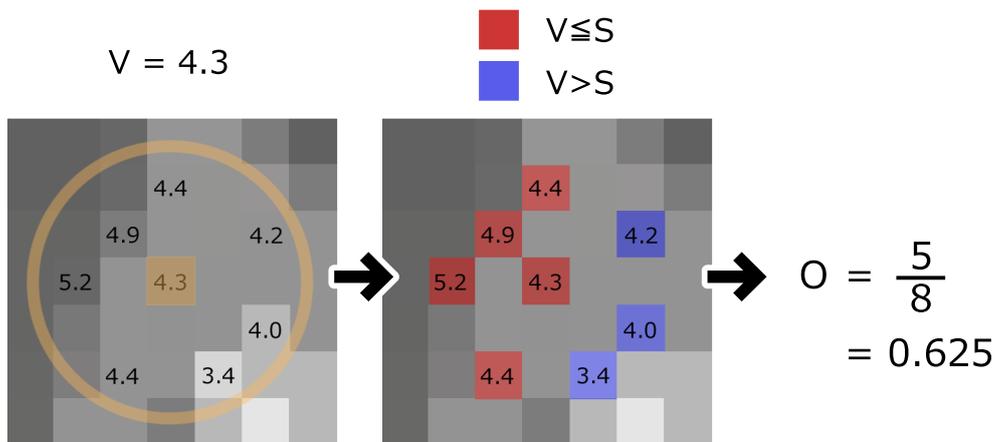


図 4.3: Percentage Closer Filtering

アシングは陰の暗くなりやすい部分に多く発生する傾向があり、結果的に見えなくなる可能性が高いという点より、エイリアシングに対する処理は行わない。

#### 4.2.2 ソフトシャドウのノイズ平滑化

PCF によるソフトシャドウ生成手法では、大まかなソフトシャドウのグラデーションは生成できるが、拡大してみるとグラデーション部分に細かいノイズが乗っているのが解る。これは無作為に参照する座標を設定するジッターサンプリングとその参照回数による問題である。本研究でのブラシタッチ手法では、連続性のあるグラデーションから入力したブラシタッチ画像をマッピングすることによりブラシタッチを表現する。よってグラデーションにノイズが乗っているとマッピングするブラシタッチ画像の参照位置が不連続になり、マッピング結果のソフトシャドウ部分にもノイズが乗ってしまうため、正常にブラシタッチが生成できない。よって、本手法では生成したソフトシャドウの画像に対して周囲の画素の値を参照し、画像平滑化を用いて画像をぼかすことでノイズを取り除く。

本手法では、画像平滑化手法に移動平均フィルタリング [24][25] を用いる。移動平均フィルタリングとは、注目画素を中心とする画像の局所領域の平均値をその注目画素に出力する処理を、対象の画像すべての画素に適用する手法である。移



図 4.4: PCF により生成したソフトシャドウ

動平均フィルタリングを用いると、画像が全体的にぼやけてしまう問題があるが、本手法では滑らかに接続している面のグループごとに ID 番号を振り、注目する画素の ID 番号に対して、異なる ID 番号間での画素の平滑化は行わないことでこの問題を回避する。図 4.5 は、図 3.2 と同一のシーンで生成した、滑らかに接続している面のグループごとに振り分けた ID 番号を可視化した画像である。図 4.5 の同一の色の部分のみで移動平均フィルタリングを用いることで、異なる物体間での影の濃淡の境界を保持しつつソフトシャドウのノイズを取り除く。

注目する画素の座標値  $(i, j)$  を中心として、 $x$  軸  $y$  軸それぞれの方向  $\pm h$  画素の矩形領域にて平滑化を行う。 $h$  の大きさは、ソフトシャドウの濃淡画像の解像度により任意に決定する。本手法では、注目画素の ID 番号と同一の ID 番号の画素のみ参照するため、注目する画素の ID 番号と同一の ID 番号かどうかを判定する判定式が必要となる。座標  $(x, y)$  における ID 番号を  $d(x, y)$  とすると、注目する画素の ID 番号  $d(i, j)$  と同一かどうか判定をする画素の ID 番号  $d(k, l)$  が、同一かどうか

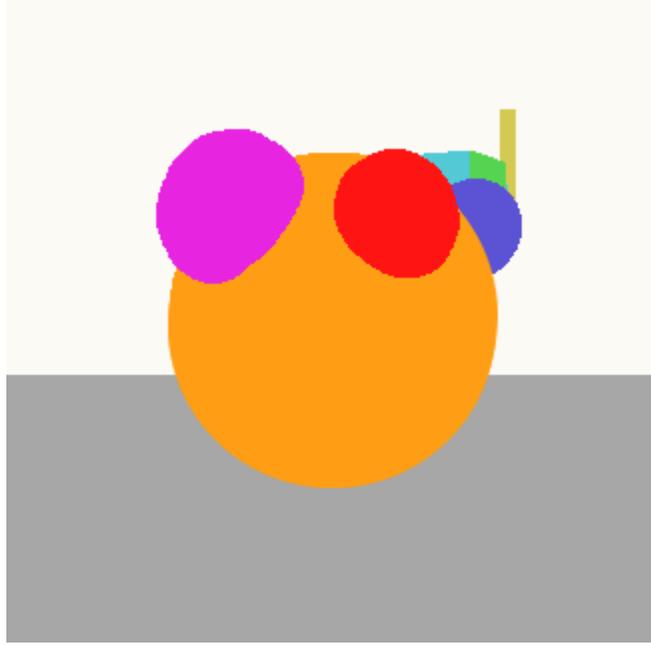


図 4.5: 滑らかに接続している面の ID 分け

かの判定式  $D(i, j, k, l)$  は (4.4) 式で表せる。

$$D(i, j, k, l) = \begin{cases} 1 & (d(i, j) = d(k, l)) \\ 0 & (d(i, j) \neq d(k, l)) \end{cases} \quad (4.4)$$

次に、注目画素と同一 ID の画素数  $r$  を求める。(4.4) 式を用いることで、 $r$  は (4.5) 式により求まる。

$$r = \sum_{u=-h}^h \sum_{v=-h}^h D(i, j, i+u, j+v) \quad (4.5)$$

同様に、同一 ID 番号の画素色の合計  $F$  を求める。PCF により生成したソフトシャドウの濃淡画像の処理対象画素色を  $f(i, j)$  とすると、(4.4) 式を用いることで、 $F$  は (4.6) 式により求まる。

$$F = \sum_{u=-h}^h \sum_{v=-h}^h (f(i+u, j+v) D(i, j, i+u, j+v)) \quad (4.6)$$

以上の式より求めた、注目画素と同一 ID の画素数  $r$ 、同一 ID 番号の画素色の合計  $F$  を用いることで、処理結果の画素色  $g(i, j)$  は (4.7) 式で求まる。

$$g(i, j) = \frac{F}{r} \quad (4.7)$$

図 4.4 に対して、本手法の平滑化処理を実行した画像を図 4.6 に示す。図 4.6 における矩形領域の大きさは  $h = 2$  で生成した。図 4.6 より、全体的なグラデーションが図 4.4 と比較し、異なる物体との影の境界部分は保持したまま、より影がぼけている部分が滑らかになっているのが解る。



図 4.6: ノイズ除去後のソフトシャドウ

### 4.3 影のブラシタッチ生成

3.5 節で用いたブラシタッチ画像のマッピング方法を基に、本章で生成したソフトシャドウの濃淡画像を用いることで影のブラシタッチを生成する。まず、4.2 節で生成した生成したソフトシャドウの濃淡画像と、3.2 節で生成した影の濃淡画像を統合する。対応するソフトシャドウの画素値を  $a$ 、影の濃淡画像の画素値を  $b$  とすると、統合後の画素値  $c$  は (4.8) 式により求まる。 $a, b$  それぞれの値は、黒を 0 白を 1 とした  $0 < a < 1, 0 < b < 1$  の値とする。

$$c = \begin{cases} 0 & (a + b \leq 1) \\ a + b - 1 & (a + b > 1) \end{cases} \quad (4.8)$$

3.5 節のブラシタッチ画像のマッピング方法における陰の濃淡画像を、上記の手法により生成した陰影の濃淡の統合画像に置き換え、ブラシタッチ画像のマッピングと同様の処理を行うことで影のブラシタッチを表現する。

図 4.7 は、図 3.2 と同一のシーンで生成した影のブラシタッチ表現の結果画像である。ブラシタッチ画像は図 3.1(a) を用いた。左下の画像が入力したブラシタッチ画像であり、右の画像が影を含めたブラシタッチ処理の結果画像である。床に投影している影や球体の自身に落ちているセルフシャドウより、入力したブラシタッチ画像の特徴に則したグラデーションのムラを見て取ることができる。

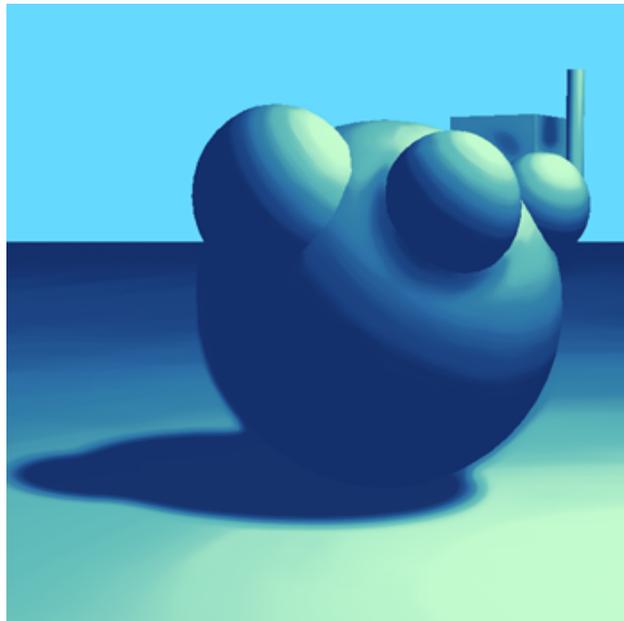


図 4.7: 影のブラシタッチ表現 結果画像

# 第 5 章

## 検証と評価

本章では、本研究で提案したブラシタッチ表現手法に沿って実装したプログラムを使用し、その有用性を検証する。ブラシタッチ表現のプログラムは、グラフィックス API の OpenGL[26] と OpenGL をベースとした 3DCG ツールキットである FK Toolkit System[27]、シェーダプログラミングには NVIDIA 社の CG 言語 [28] を用いて実装した。

## 5.1 実行結果

実装したブラシタッチ表現手法のプログラムより、入力したブラシタッチ画像を図 5.1 に、生成したブラシタッチ表現の画像を図 5.2, 図 5.3, 図 5.4, 図 5.5 に示す。図 5.2, 図 5.3, 図 5.4, 図 5.5 に表示した全てのシーンは点光源を用いて描画した。

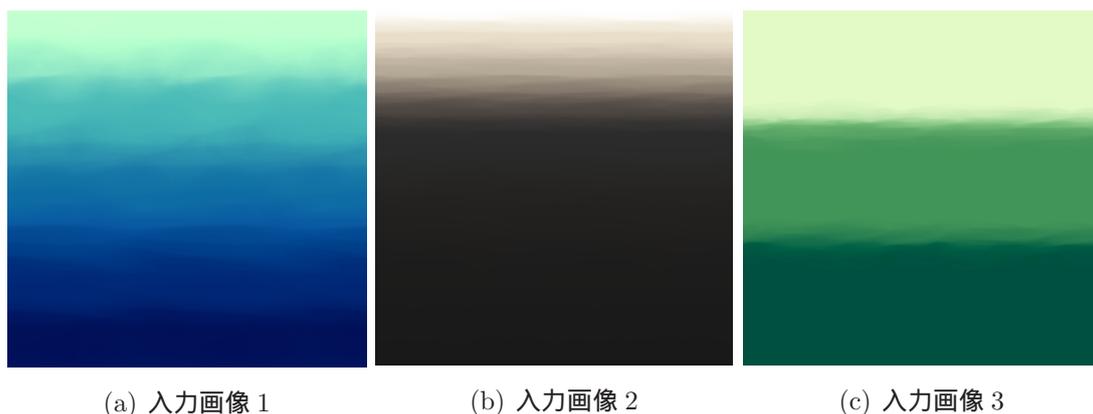


図 5.1: 検証に用いたブラシタッチ画像

図 5.2(a),(b) に表示した画像は同一のシーンを描画した画像である。それぞれ入力するブラシタッチ画像のみが異なっており、図 5.2(a) は図 5.1(a) の画像を、図 5.2(b) は図 5.1(b) の画像を入力した。図 5.2(a),(b) より、それぞれ入力したブラシタッチ画像の特徴に則した陰影のグラデーションが表現できているのが解る。この様に、本手法では入力するブラシタッチ画像を変更することで、容易に異なるブラシタッチ表現の生成結果を得ることが可能である。図 5.3 は図 5.1(b) を入力し、平面で構成している形状へブラシタッチ表現手法を適用した結果画像である。本手法の陰影のムラの変化を表す画像によるブラシタッチ画像横方向の参照手法は、



(a)



(b)

図 5.2: 生成したブラシタッチ表現画像



図 5.3: 平面で構成した形状への処理結果

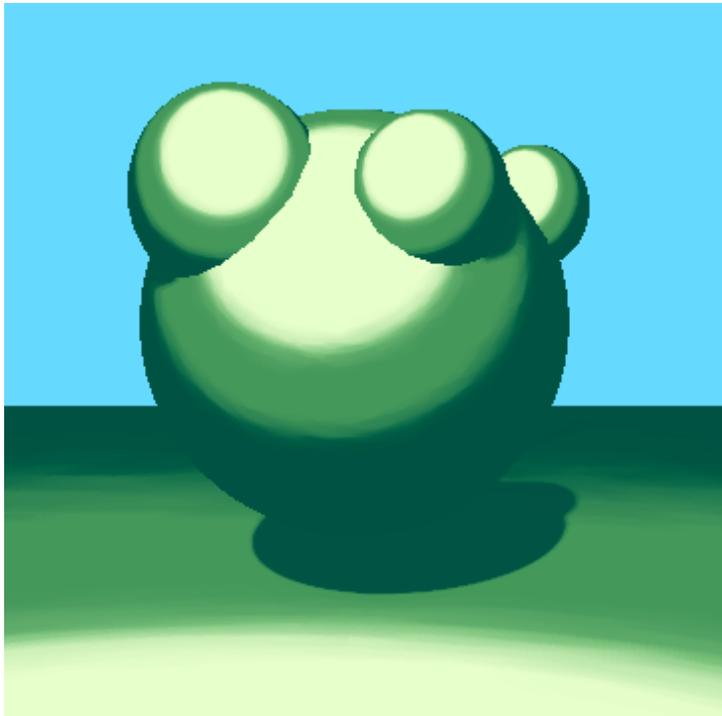


図 5.4: グラデーションの変化が変則的なブラシタッチ画像による処理結果

球形状に対して最適な結果が得られる手法であるが、図 5.3 のような平面で構成している形状に対してもブラシタッチのある生成結果を得ることができる。図 5.4 は図 5.1(c) を入力し、ブラシタッチ表現手法を適用した画像である。図 5.1(c) はセルアニメのような均一な色で段階的に塗られており、色の境界部分にのみブラシタッチが生成できているのが解る。図 5.4 より、陰影のグラデーションの変化が変則的なブラシタッチ画像であっても 3D モデルに表現できることが解る。図 5.5 は複数のブラシタッチ画像を用いて生成した結果画像である。この様に、物体の材質ごとに異なるブラシタッチ表現を用いる事が可能である為、表現したいブラシタッチの描かれた画像を用意することで、実際のイラストに近似した表現が生成可能であると言える。



図 5.5: 複数の入力画像による処理結果

## 5.2 リアルタイム性の検証

本手法で提案したブラシタッチ表現手法のプログラムの処理速度を検証した。処理速度の測定に用いた PC の構成は CPU : Core2Duo E6600、ビデオカード : GeForce7900 GS、RAM : 2GB である。描画した画面解像度、生成したシャドウマップの解像度は共に  $1024 \times 1024$  画素であり、入力したブラシタッチ画像の解像度は  $512 \times 512$  画素である。また、PCF によるソフトシャドウは参照回数を 32 回に設定した。検証に使用した形状モデルは、図 5.6(a) のポリゴン数が 9415 の椅子の形状モデルと、図 5.6(b) のポリゴン数が 65549 のランプの形状モデルである。

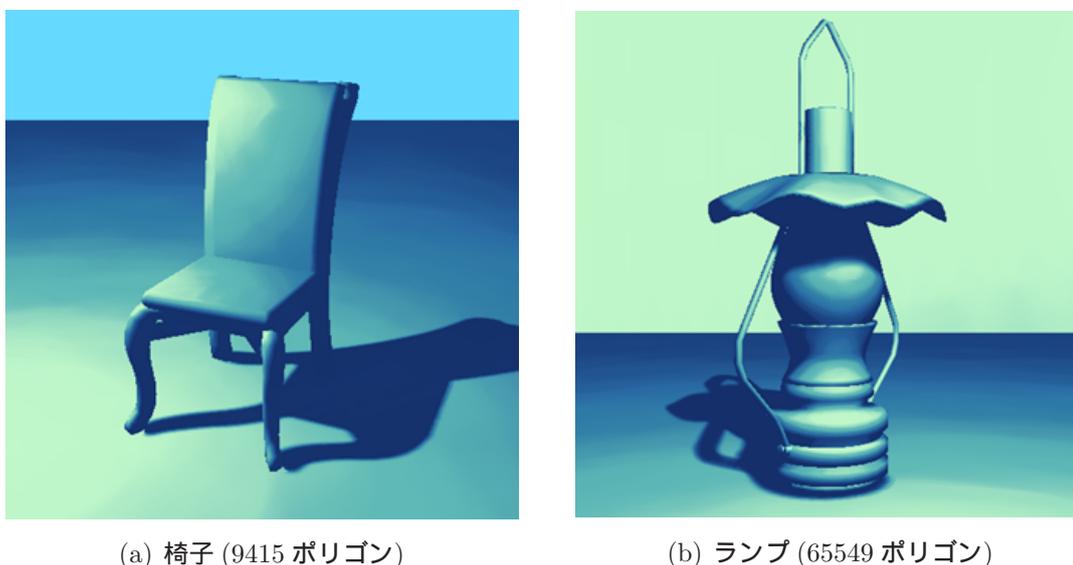


図 5.6: 速度の検証に用いたシーン

3 章にて解説した陰のブラシタッチ表現のみの手法と、4 章にて解説した影の生成を含むブラシタッチ表現手法それぞれで処理速度を測定した。処理速度の比較対象として、3.2 節で解説したリアルタイム 3DCG において最も基本的なシェーディング手法であるランバートシェーディングも同シーンで測定した。それぞれの手法の処理速度の測定結果を表 5.1 に示す。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。

表 5.1 より、影を描画しないブラシタッチ表現手法の場合、ランバートシェーディングに比べ 2 割 ~ 5 割程の処理速度の低下が見られたが、ポリゴン数の多いラ

表 5.1: ブラシタッチ表現手法 描画速度の測定

生成画像 (ポリゴン数)	椅子 (9415)	ランプ (65549)
ランバートシェーディング	610 FPS	110 FPS
提案手法 (影なし)	290 FPS	98 FPS
提案手法 (影あり)	26 FPS	16 FPS

ランプ形状モデルの描画であっても 98FPS という高いフレームレートの描画が可能であった。また影を含めたブラシタッチ表現手法では、ポリゴンの多さに関わらず著しい描画速度の低下が見られた。この処理速度の低下は、影なしの手法に対してシャドウマップの生成、PCF によるシャドウマップの複数回の参照、PCF により生成したソフトシャドウの更なるぼかし処理という 3 つの高負荷な処理が加わっているためである。しかし、影ありの手法においても椅子のモデルで 26FPS、ランプのモデルで 16FPS と本研究におけるリアルタイムの定義である 10FPS を超えており、リアルタイム性は実現できたと言える。

### 5.3 問題点

現状の問題点として、第一にマッピング基準点の位置や 3D モデルの形状によっては光源や物体が動いた時にちらつきが起こるといった問題が挙げられる。この問題は、3.4 節で設定した画像リピート回数の多い部分で光源とマッピング基準点との位置関係が変化すると、マッピングするブラシタッチ画像の参照位置が急激に変化するために起こる問題である。この問題はオブジェクト内で複数のマッピング基準点を設定できるようにすることで対処が可能であると考えられる。

第二に PCF によるソフトシャドウ生成手法より影のぼけている領域が大きなソフトシャドウが正常に生成できない問題が挙げられる。PCF によるぼけた部分が大きなソフトシャドウ生成は対応するシャドウマップの位置から画素を取得する範囲を広げることで可能であるが、影でない部分が影になる等の誤動作が非常に多くなり、実用に耐えない。また、影のぼけている領域が小さいとブラシタッチ

を効果的に表現することができないため、ソフトシャドウ生成手法の改善が必要である。

## 第 6 章

### おわりに

本研究では、グラデーションを手描きした際にできる段階的な色のムラをブラシタッチ表現と定義し、リアルタイム 3DCG によりブラシタッチ表現を実現する手法の研究に取り組んだ。その成果として、従来の手法ではできなかった 3D 空間上の光源や視点の変化に対応できるブラシタッチ表現手法をリアルタイム 3DCG で実現した。また本手法は、1 枚のブラシタッチが描かれた画像を入力とすることで、3D モデルに表現するブラシタッチの直感的な色の操作が可能である。本手法を用いることで、2DCG 作成ソフトウェアにおけるブラシツールを用いて描かれたイラストに近似した陰影表現を 3DCG で実現できるため、ブラシタッチのある手描きイラストが基となるリアルタイム 3DCG コンテンツを制作する際、原作の表現の忠実な再現や新しい視覚表現という目的において、大いに役立つだろう。

今後の展望として、5.3 節で問題点として挙げた光源や物体が動いた時にちらつきが起こるといった問題の対処や、対処方法の案として挙げたマッピング基準点の複数化による利用者の手間の増大のため、適切なマッピング基準点を自動的に設定する手法の考案、実装が挙げられる。また、影の生成手法を改良し大きくぼけたソフトシャドウの生成を可能にすることで、手法の制約が少なくなり、より効果的なブラシタッチ表現が実現できるだろう。

本研究は芸術科学会 第 23 回 NICOGRAPH 論文コンテストにおいて”リアルタイム 3DCG におけるブラシタッチレンダリング手法”[29] として発表した内容を含む。

# 謝辭

本研究を締めくくるにあたり、学部時代から引き続きまして研究の指針から開発の手法、論文の執筆と幅広いご指導ご教授を頂きました、本校メディア学部の渡辺 大地 講師に厚く感謝いたします。また副査をお引き受け下さり、NPR の資料や研究を紹介して下さった本校メディア学部の近藤 邦雄 教授、及び、副査をお引き受け下さいました、若林 尚樹 教授に厚く感謝いたします。そしてプログラムの実装方法や研究方針など、様々な相談に乗って下さった竹内 亮太先輩、渡辺 賢悟先輩、様々なご協力を頂いたゲームサイエンスプロジェクトの諸氏に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 近藤邦雄, 斉藤隆文, “Non-Photorealistic Rendering”, 画像電子学会誌第 33 巻 第 4-B 号, pp. 642-650, 2004.
- [2] 芳賀俊之, 西田友是, “ストロークによるペンアンドインク風画像の生成とそのアニメーション化”, 第 101 回 情報処理学会グラフィクスと CAD 研究会, pp.1-6 , 2000.
- [3] Amy Gooch, Bruce Gooch, Peter Shirley, Elaine Cohen, “ A Non-Photorealistic Lighting Model For Automatic Technical Illustration ”, SIGGRAPH 98, 1998.
- [4] 鈴木隼人, “リアルタイム 3DCG における米国漫画調レンダリングに関する研究”, 東京工科大学大学院メディア学専攻修士論文, 2002.
- [5] 東京工科大学編集, デジタルアニメ制作技術研究会監修, デジタルアニメマニュアル 2006-2007, 東京工科大学クリエイティブラボ, 2007.
- [6] 絵夢工房, Yun, Web 使える! イラスト素材集, <<http://www.sozaillust.com/free/>> .
- [7] 神山達哉, 使えるフリーイラスト展, <<http://free-ten.com/>> .
- [8] Adobe, “PhotoShop”, <<http://www.adobe.com/>>.
- [9] Gimp Developer Team, “GIMP”, <<http://www.gimp.org/>>.
- [10] Peter-Pike J. Sloan, William Martin, Amy Gooch, and Bruce Gooch, “The Lit Sphere: A Model for Capturing NPR Shading from art”, Proceedings of Graphics Interface 2001, 2001.
- [11] Aaron Hertzmann, Denis Zorin, “Illustrating smooth surfaces”, In Proceedings of ACM SIGGRAPH 2000, pp.517-526, 2000.
- [12] Emil Praun, Hugues Hoppe, Matthew Webb, Adam Finkelstein, “ Real-Time Hatching ”, SIGGRAPH2001 ”, 2001.

- [13] 中川大輔, 藤本忠博, 村岡一信, 千葉則茂, “水彩パース図風レンダリング法”, 芸術科学学会誌 Vol.2 No.1 pp.40-50,2002.
- [14] Robert D. Kalnins, Lee Markosian, Barbara J.Meier, Michael A. Kowalski, Joseph C. Lee, Philip L. Davidson, Matthew Webb John F. Hughes Adam Finkelstein, “WYSIWYG NPR: Drawing Strokes Directly on 3D Models”, In proceedings of SIGGRAPH 2002, pp. 755-762, 2002.
- [15] Wacom, “Pen Tablet”, <<http://tablet.wacom.co.jp/>>.
- [16] Ron Fosner, Real-Time Shader Programming, Born Digital, 2003.
- [17] Tomas Akenine-Moller, Eric Haines, リアルタイムレンダリング 第2版, Born Digital, 2006 .
- [18] L.Williams, “ Casting Curved Shadows on Curved Surfaces ”, In Proceedings of ACM SIGGRAPH '78, Vol.12, No.3, pp.270-274, 1978.
- [19] M. Hasenfratz, M. Lapierre, N. Holzschuch and F.X. Sillion, “A survey of real-time soft shadows algorithms”, Computer Graphics Forum , pp753-774, 2003.
- [20] Randima Fernando, NVIDIA Corporation, “Percentage-Closer Soft Shadows”, In Proceedings of ACM SIGGRAPH2005 Sketches,2004.
- [21] T. Reeves, D. Salesin and R. Cook, “Rendering Antialiased shadows with depth maps”, In Proceedings of ACM SIGGRAPH 87, pp.283-291, 1987.
- [22] James D. Foley, Steven K. Feiner, Andries van Dam, 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.
- [23] M.Stamminger and G.Drettakis, “Perspective Shadow Maps ”, In Proceedings of ACM SIGGRAPH 2002, pp.557-562, 2002.

- [24] 技術編 CG 標準テキストブック編集委員会, 技術編 CG 標準テキストブック, 画像処理教育振興協会, 1999.
- [25] 画像処理標準テキストブック編集委員会, Image Processing 画像処理標準テキストブック, 画像処理教育振興協会, 1997.
- [26] OpenGL.org, OpenGL, <<http://www.opengl.org/>>.
- [27] 渡辺大地, FK Tool Kit System , <<http://www.teu.ac.jp/aqua/earth/FK/>>.
- [28] NVIDIA, <<http://jp.nvidia.com/page/home.html>>.
- [29] 堤靖典, 渡辺大地, “リアルタイム 3DCG におけるブラシタッチレンダリング手法”, 芸術科学会 第 23 回 NICOGRAPH 論文コンテスト, 2007.

## 発表論文

堤靖典, 渡辺大地, “リアルタイム 3DCG におけるブラシタッチレンダリング手法”, 芸術科学会 第 23 回 NICOGRAPH 論文コンテスト, 2007.