

修 士 論 文

3D モデルを入力とする
貼り絵風レンダリング手法の提案

指導教員 宮田一乗 教授

北陸先端科学技術大学院大学
知識科学研究科知識科学専攻

0950028 瀬木 宏

審査委員： 宮田 一乗 教授（主査）
西本 一志 教授
林 幸雄 准教授
金井 秀明 准教授

2011 年 2 月

目次

1	はじめに	1
1.1	研究の背景	1
1.2	研究の目的	4
1.3	本論文の構成	4
2	関連研究	5
2.1	3次元形状入力の貼り絵風レンダリング	5
2.2	2次元形状入力の貼り絵風レンダリング	8
2.3	本研究の位置付け	9
3	影の観察	11
3.1	観察の目的	11
3.2	影の定義	12
3.3	実物のフェルトの観察	13
4	アルゴリズム	20
4.1	アルゴリズムの概要	20
4.2	3Dモデルの立体感除去	22
4.3	影付け	23
4.3.1	深度マップを用いた影付け	23
4.3.2	細かいパーツに対する影付け	29
4.3.3	影の合成	31
4.4	フェルトの模様付け	31
4.5	フェルト調の貼り絵画像の生成	32

5	結果と考察	35
5.1	結果.	35
5.2	考察.	39
6	まとめ	40
6.1	まとめ	40
6.2	今後の課題	40
	謝辞	42
	参考文献	43
	研究業績	45

目次

1. 1	貼り絵の例	2
1. 2	様々な場面に応用されているフェルト調の貼り絵の例.	3
2. 1	Li らの提案手法のユーザーインターフェイス.	6
2. 2	3D Paper-Cut Modeling and Animation による貼り絵	6
2. 3	A Study for Decorative Mosaic-like Animation Rendering による貼り絵	7
2. 4	吉田による貼り絵風レンダリングのアニメーション	8
2. 5	フェルトの貼り絵に生じる影	10
3. 1	3Dモデルをフェルトの薄い3Dモデルに変換する際の貼り合わせ順の問題.	12
3. 2	実験の模式図.	13
3. 3	撮影環境の写真	14
3. 4	輝度値を計測するために用いる画像.	15
3. 5	図3.4において左から右方向に向かって計測した輝度値の変化	15
3. 6	図3.4における縦方向の輝度値の変化.	16
3. 7	図3.4において左方向に伸びる影の輝度値を正規化して比べたグラフ.	16
3. 8	図3.4における左方向に落ちる影の部分について, 縦軸と横軸を合わせ, 正規化を行なったグラフ	17
3. 9	図3.4のフェルト素材の下方方向に伸びる影の減衰を示した図.	18
4. 1	アルゴリズム全体の大まかな流れ	21
4. 2	拡散反射, 鏡面反射処理について	22
4. 3	深度マップを用いた影付け処理の手順を示した画像	25
4. 4	エッジを検出する際に掛ける各微分フィルタ.	25

4. 5	黒線全体がぼやけ，左方向にも影が伸びてしまうイメージ図	26
4. 6	フィルタ処理をしていく過程で同時に深度マップを参照するイメージ図	27
4. 7	深度マップを用いた影付け	28
4. 8	胴体パーツから白目パーツの方向に影が表現されてしまう	29
4. 9	細かいパーツに対する影付け	30
4. 10	図4.7(b)の影と図4.9(b)の影の合成	31
4. 11	二値化画像を用いてフェルトテクスチャをマスクした結果	32
4. 12	フェルト調の貼り絵画像の生成	34
5. 1	入力データとして使用した3Dモデル	35
5. 2	3Dモデルを様々な視点から見た図	36
5. 3	図5.2の図と同じ視点から生成したフェルト調の貼り絵画像の例	37
5. 4	合成過程の画像	38
5. 5	交差表現の画像	38

第 1 章

はじめに

本章でははじめに，研究の背景と意義について述べ，続いて本論文の構成を示す．

1.1 研究の背景

近年，リアルさを追求する写実的な表現の研究だけでなく，非写実的な画像を生成する Non-Photorealistic Rendering（以下 NPR と記す）の研究が盛んに行われている．これまでに NPR の研究として，絵画風レンダリング[1]，水墨画風レンダリング[2]，イラスト風レンダリング[3]，セル画風レンダリング[4]などの研究が行われている．

写真に代表されるように，写実的な表現は，ありのままの情景を記録し伝達できるという特徴がある．一方，絵画やイラストなどの NPR の非写実的な表現手法は，必要な情報や伝えたい特徴を強調して表現できるという特徴がある．例えばプラモデルの設計図など，分かりやすさを必要とする図を作る際は，写実的な表現や，手間をかけてイラストを描くよりも，NPR の技術を用いて写真などを自動でイラスト調に変換し，部品パーツの輪郭線を強調して示した方が視認しやすく合目的と言える．以上のように，NPR の技術は，表現の意図を反映させた図を制作する際の負担や時間的コストを減らしてくれるという利点がある．

NPR の目的の一つは，絵画やイラストだけでなく水墨画やセル画といった様々な表現手法をコンピュータで実現することである．NPR の利点として，絵を描くことが不得意な人でも自分が表現できない絵を自動生成することが可能となることや，手作業での制作が困難な画像や動画などを労力をかけずに生成できるようになることなどが挙げられる．

近年では NPR の研究も進み，表現できる画像の幅が広がっている．水彩画風レンダリング[5]や，銅版画風レンダリング[6]，貼り絵風レンダリング[7][8]など，特徴的な芸術表現を再現するレンダリング手法の研究も現在盛んに行われている．貼り絵風レンダリングに関しては，図 1.1 (a) に示すような紙を素材としたちぎり絵を再現するための研究は盛んに行われている．一方で，図 1.1 (b) に示すような厚みのあるフェルト生地を素材とし，表現の対象をパーツごとに表現した（例えば，指とドライバー，帽子の形状と各色彩に応じたパーツなど）貼り絵もあるが，そのような貼り絵を再現する研究に関してはまだ行われていない．そこで本研究では，図 1.1 (b) に示すフェルトの貼り絵のような表現に注目する．



(a)ちぎり絵[7]

(b)フェルト調の貼り絵

図 1.1 貼り絵の例（画像(b)は[9]より引用）

ここで貼り絵について定義する．貼り絵とは一般に，切り抜いた和紙を台紙に貼ることで絵画を表現する手法である．貼り絵の重なり合った和紙の質感は独特の温かい雰囲気を生み出すという特徴があり，貼り絵には和紙だけではなくフェルトや模様の付いた紙なども用いる．フェルトとは動物の毛を集めて圧縮して作るシート状製品の総称である．

フェルトを用いた貼り絵は現在，小さいお子様から高齢者の方まで幅広い層に親しまれており，保育教材のイラストや玩具，お菓子の表面パッケージ，手提げカバン，

文房具，カレンダー，ポストカードのデザイン，アニメーション作品など，様々な場面に応用され，ある程度の社会的な需要があるといえる．



(a)保育教材のイラスト

(b)お菓子の表面パッケージ

図 1.2 様々な場面に応用されているフェルト調の貼り絵の例

(画像は[10][11]より引用)

また，Youtube などの動画投稿サイトにはフェルトの貼り絵でキャラクターを表現したアニメーション作品や CM 作品も投稿されており，静止画や動画に限らずフェルト調の貼り絵表現に対する需要は少なくないと考えられる．

しかし一般にアニメーションを制作する際，1 秒間の動きを作るのに映画では 24 枚，テレビ映像の場合は 30 枚の画像が必要になるため，1 分に満たない短時間のアニメーションでも 1,000 枚近い画像を用意しなければならない．フェルト調の貼り絵アニメーションを制作する場合も，シーンごとにフェルト調の貼り絵画像を生成する必要があり，制作の負担や時間的なコストは大きい．

このようなアニメーション制作の負担を軽減する手段として，アニメーション編集が可能な Adobe Flash などのソフトウェアがある．しかし，3 次元的なカメラワーク

の表現には、別途カメラワークに応じた画像を制作する必要があり、制作のコストはさほど軽減されない。

このような課題に対し、3次元のモデルから所望の画像を自動生成する技術があれば、アニメーション制作のコストが軽減されると考えられる。そこで本研究では、3次元モデルからフェルト調の貼り絵風レンダリングの画像を自動生成する手法を開発し、アニメーション制作への応用を試みる。

1.2 研究の目的

本研究では、フェルト調の貼り絵アニメーションを制作可能とする、貼り絵風レンダリング手法の実現を目的とする。具体的には、3Dモデルの手や足などのパーツの輪郭形状を保持したまま貼り合わせていくタイプのフェルト調貼り絵表現の実現を目標とする。本提案手法を用い、カメラワークを調整しながら連続的にフェルト調の貼り絵風画像を生成することで、視点の移動や対象の回転を伴う3次元的な動きを表現できるフェルト調の貼り絵アニメーション制作が可能となる。一旦3Dモデルを用意すれば、3Dモデルの色彩や表面模様、視点やカメラワークを自由に設定でき、様々な視点から対象のモデルをフェルト調の貼り絵風画像に表現することが可能になる。

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「関連研究」では、3Dモデルから貼り絵と呼ばれるものを表現している研究について紹介し、既存の手法の問題点について紹介する。第3章「影の観察」では、フェルトの貼り絵の影がどのような特徴を持っているか把握するために、実物のフェルトの影について観察する。第4章「アルゴリズム」では、3Dモデルから貼り絵風画像を生成する際のアルゴリズムについて記述する。第5章「結果と考察」では、提案するアルゴリズムによって作成した貼り絵風画像の結果を示し、アルゴリズムの妥当性を検証する。第6章「まとめ」では、本論文のまとめと今後の課題、展望について述べる。

第 2 章

関連研究

本論文で提案する手法は、3次元形状（3Dモデル）からフェルトで制作した貼り絵のような画像を出力する一種のノンフォトリアリスティックレンダリング（以下 NPR）である。本章では、NPR に関連する研究について紹介し、本研究の位置づけを明確に述べる。これまでの NPR はおおまかには、絵画風レンダリング[1]、イラスト風レンダリング[3]、水彩画風レンダリング[5]、銅版画風レンダリング[6]、貼り絵風レンダリング[7]が提案されている。本研究は貼り絵風レンダリングの研究範疇に属する。2.1 節では、3次元形状を入力とした貼り絵風レンダリングについて述べ、2.2 節では2次元の貼り絵風レンダリングについて紹介する。最後に、2.3 節では、本研究の位置づけを述べる。

2.1 3次元形状入力の貼り絵風レンダリング

本節では、本研究との関連が深い2件の研究について述べる。これらの研究は、3次元のオブジェクトから貼り絵風の画像を生成する。

Li らが行った研究では、3Dモデルを入力として、紙を切り抜いたアートである Paper-cut と呼ばれる貼り絵を表現する手法を提案している[12]。この手法では、まずユーザが実際の Paper-cut 作品を参照しながら、あらかじめシステムが用意した切り抜きパターンを任意の形状と大きさに編集する。編集された切り抜きパターンに基づき、図 2.1 に示すユーザーインターフェイスで 3Dモデル上に切り抜く領域をユーザがオーバーレイしていくことで、図 2.2 に示す(a)のような入力モデルが作られる。最後に入力モデルをレンダリングすることで、図 2.2 に示す(b)のような結果画像が得られる。

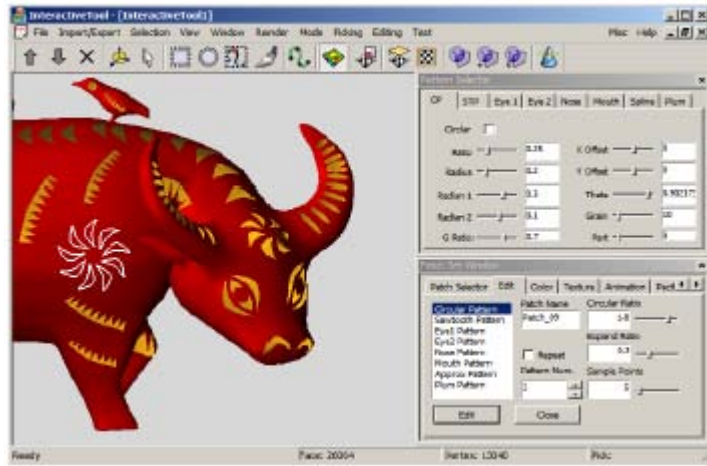


図 2.1 Li らの提案手法のユーザーインターフェイス



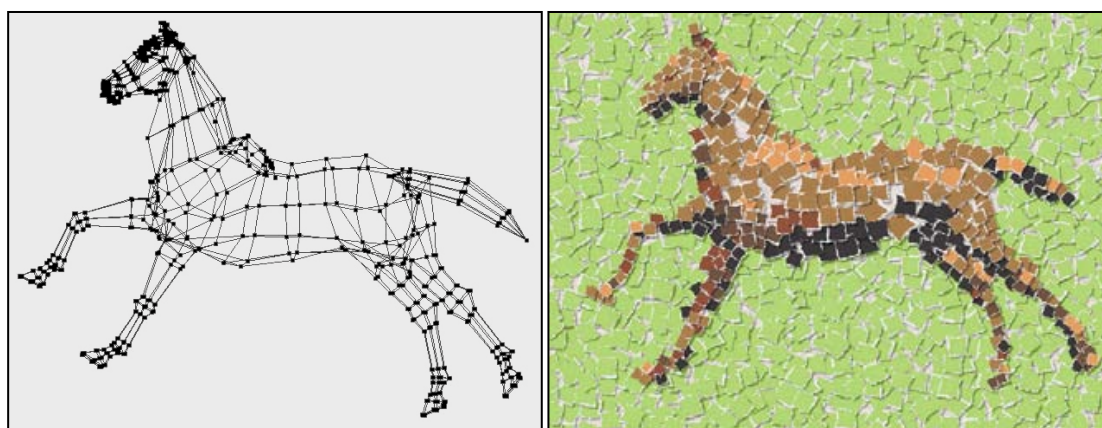
(a)入力モデル

(b)生成された貼り絵

図 2.2 3D Paper-Cut Modeling and Animation による貼り絵

吉田は、3次元形状からモザイク風画像を生成する手法を提案した[13]. この手法で得られる貼り絵風アニメーション結果は、本研究の目標である貼り絵アニメーションと近い. この手法は格子状のタイルを敷き詰めた後、タイルの構成を整えることで適切にタイルを配置している. 処理手順は、はじめに3次元形状の表面に無数のパーティクルを配置し、スクリーン座標にそれらを射影する. また、全てのパーティクルはスクリーンに投影した際に、スクリーン上における2次元座標を取得する. それぞれのパーティクルには、3次元形状の表面の色情報を付与し、これを描画時に用いる. 間が詰まり過ぎていないパーティクルを検出し、それらの位置にタイルや紙片の形状を与えることで

モザイクや貼り絵を表現する．このとき 2 次元のスクリーン座標上で，レンダリングする対象のエッジに沿うようにタイルや紙片を回転させる．この手法によって図 2.3(b) に示す結果を得ることができる．また，この手法は一般的なアニメーションと同様に，動きを付与した 3 次元モデルを時間軸に沿って連続的に貼り絵風画像を生成し，貼り絵風アニメーションを実現した．ここで，アニメーションのフレームごとにパーティクルの色やスクリーン上の位置情報を共有することで，フレーム間のコヒーレンスを保ち，レンダリング画像のチラツキを軽減している．アニメーションのある一連の画像を図 2.4 に示す．



(a)入力モデル

(b)生成された貼り絵

図 2.3 A Study for Decorative Mosaic-like Animation Rendering による貼り絵

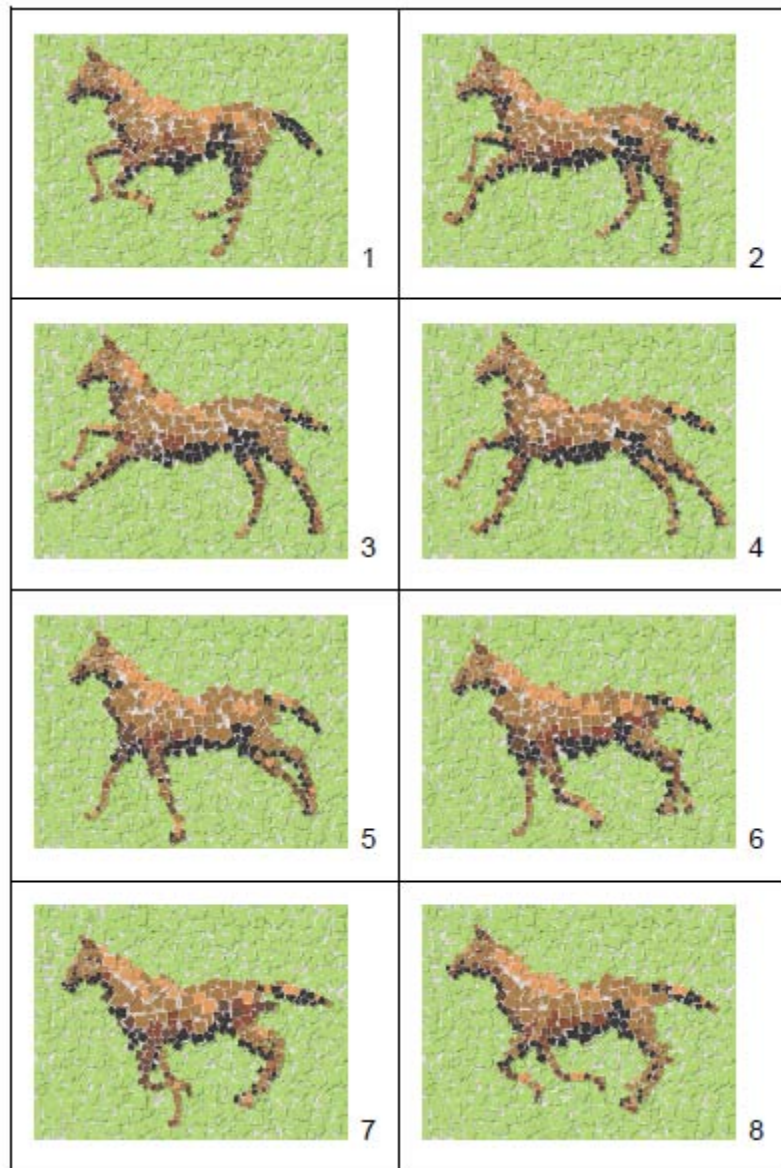


図2.4 吉田による貼り絵風レンダリングのアニメーション

2.2 2次元形状入力の貼り絵風レンダリング

井上と浦浜は写真を入力として、色付きの楕円板を重ねることで貼り絵風の画像を描画した[8]. この手法では、注目画素から周辺画素にかけて単一色で近似するように面積最大の楕円を求め、大きな楕円から描画し、細かな楕円は上書きしている. これにより細かな楕円に大きな楕円が重なり、隠れることを避けている. それぞれの楕円

に対して、紙をちぎったようなジグザグのテクスチャを割り当てることで、貼り絵風の表現をしている。

杉田らは、筆などのストロークのテクスチャを入力画像に配置することで様々な NPR を表現する手法を提案した[14]。この手法では、入力画像に対して Poisson disk distribution により点を配置し、それぞれの点にストロークや紙の質感を割り当てることで、油絵や貼り絵風のレンダリングを行った。この手法では、まずモデリングと呼ばれる工程で、テクスチャの配置とテクスチャの属性、描画順序を決定する。そのあとに、レンダリングと呼ばれる工程で絵画特有の様々な効果を付加して画像を出力する。

牧野らは貼り絵特有の紙の凹凸を考慮した NPR を提案した[15]。特徴的な処理として、エンボス加工と紙のテクスチャの明度成分を変化させることで貼り絵特有の凹凸を表現している。紙片のサイズ及び配置位置を決定した後、エンボス加工により貼り絵表面の凹凸を表現し、紙のテクスチャの明度成分を変調させることにより貼り絵特有の凹凸を表現している。

ジョハンらは、ボロノイ図を用いた領域分割することで、筆ストロークベースの油絵などと領域ベースの貼り絵などの両者を表現する手法を提案した[7]。この手法はハニカム格子状にボロノイ図の母点を配置し、画像のエッジ付近には多く点を配置し、ボロノイ図を構成する。その後、油絵などストロークベースの場合は、色の近いボロノイセルをたどり、その中心点を制御点としたスプライン曲線に沿ってストロークを描画する。貼り絵など領域ベースの場合は、ボロノイセルを一片の紙片として表現する。

2.3 本研究の位置付け

本研究では、図 2.5 に示すような厚みのあるフェルト生地を素材とし、表現の対象を、耳パーツや足パーツなどパーツごとに表現したフェルト調の貼り絵を三次元形状から求める。そのため、2.1、2.2 節で紹介したこれまでの貼り絵の手法のように、表現対象を細かな断片に分割せずに、スクリーン座標に投影された画像から抽出する各パーツの輪郭を用いる。これまでの研究では貼り絵を表現する際、細かな領域分割を行っていたため、本研究の目的であるフェルトの重ね貼りによる貼り絵風画像は生成

できなかった。また、フェルトのような厚みのある素材を想定していないため、重ねたフェルトに現れる影を表現できない。フェルトの貼り絵に生じる影の例を図 2.5 に示す。本研究では、パーツごとに加工されたフェルトの重なりに見える影の表現に注目している。

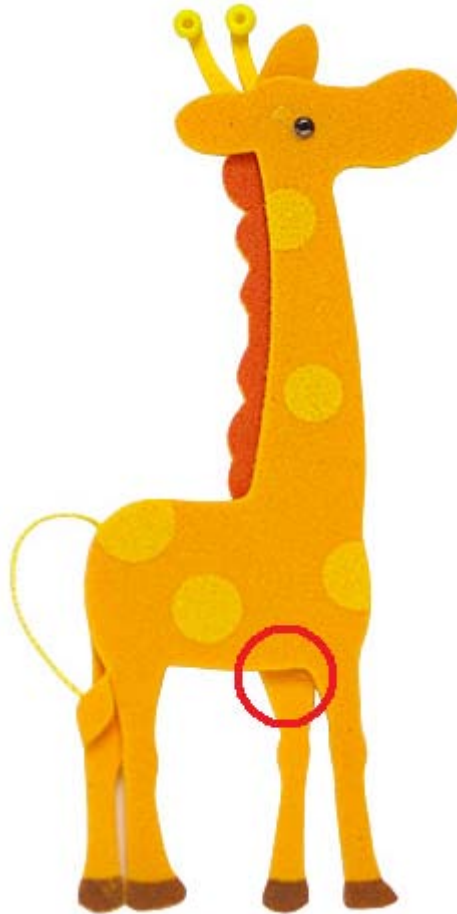


図 2.5 フェルトの貼り絵に生じる影（画像は[16]より引用）

また、2.1 節で紹介した研究と同様に、本研究の手法を用いて、連続的に貼り絵風画像を生成することで、貼り絵風アニメーションが生成可能になると考えられる。

第 3 章

影の観察

本章では，フェルトの貼り絵の影がどのような特徴を持っているか把握するために，実物のフェルトの影について観察する．

3.1 観察の目的

3DCG での影の表現には，3D モデルからシャドウボリュームを計算したり，レイトレーシングやラジオシティなどの照明計算で影付けをする方法がある．本研究の場合，表現対象の 3D モデルを，フェルトの重ね貼り表現用の 3D モデルに変換した上でレンダリングすることで，フェルト調の貼り絵の影付けを実現する方法が考えられる．

しかし立体的なモデルを，フェルトの貼り絵のようにパーツごとに一定の薄さに変換し，かつ，パーツとパーツの階層構造（貼り合わせ順）を一意に定めた 3D モデルに変換することは困難だと考えられる．その理由は，図 3.1 に示すようにパーツ同士が交差しているような場合，貼り絵パーツの貼り合わせ順が一意に定まらないためである．図 3.1(b)の場合，胴体，右足，左足パーツの貼り合わせ順が定まらない．



(a)貼り合わせ順が一意に定まらないケース (b)実物の貼り絵のケース

図 3.1 3D モデルをフェルトの薄い 3D モデルに変換する際の貼り合わせ順の問題
(図 3.1(b)の画像は[17]より引用)

本研究では、貼り合わせ順の問題を回避するアプローチとして、3次元空間での処理ではなく、2次元のスクリーンスペースで処理を行うアプローチをとる。すなわち、フェルトの境界部分に対して 2D の画像処理的な手法で影を発生させる。本手法の詳細は第 4 章で後述する。

本章では、フェルトの貼り絵を表現するため、重ね合わせたフェルトとフェルトの影の特徴を把握し、その特徴に基づいた影付けを行うためにはどうすべきか考察する。そのために、実物のフェルトを貼り合わせた際に生じる影を写した画像の輝度値に注目し、分析する。

3.2 影の定義

影は光が遮蔽された部分であるため、必然的に輝度値が減衰する。そのため、本論文では、実物のフェルトを撮影した画像からフェルトの境界部分の輝度値を観察し、輝度値が低くなる部分を観察対象の影とする。輝度値の観察のために、カラー画像をグレースケール変換した画像を用いる。

3.3 実物のフェルトの観察

複数の光源がある室内でフェルトの撮影を行った。カメラのフィルム感度の設定は ISO1600 に固定し、撮影者や撮影機材の影が写真に写らないように、カメラから被写体までの距離を 60cm、カメラの伏角を 60 度とした。ホワイトバランスなど、その他のパラメータはオートとし、カメラの自動設定に準拠した。フェルトとフェルトの境界部分のエッジに対して垂直方向に伸びる影の輝度値の変化を測るために、まず撮影された RAW データの画像をグレースケール変換する。次にフォトタッチソフト (Adobe Photoshop) を用いて、マニュアルでパース補正を行う。パース補正を行うことで、フェルトのエッジに対して垂直方向に伸びる影のデータが取りやすくなる。また、実物のフェルトの貼り絵作品は、点光源からではなく室内に設置された複数の光源下で見るのが一般的と考えられる。そこで、室内 (研究室) で実験を行った。このような環境において、影の減衰や影の長さに影響する要素として考えられるのは、フェルトの厚みである。そのため、フェルトの厚みを変えて観察を行った。1 枚 1.3mm 厚の裏面がシールになったフェルトを 2cm 角に切断して使用し、図 3.2 に示すように 1 から 4 枚重ねて貼りつける。すなわち、1.3, 2.6, 3.9, 5.2mm の厚みを持つフェルトが落とす影の変化を観察する。

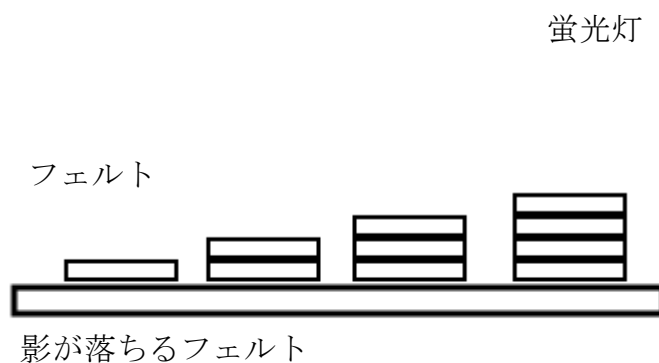


図 3.2 実験の模式図



図 3.3 撮影環境の写真

今回輝度値の算出にあたり、グレースケール 256 階調で輝度値を算出しているため、輝度値の範囲は 0 から 255 とする。輝度値の変化を観察する際、異なる色のフェルトだと互いの元々の輝度値が異なるため適切に影の部分の輝度値の変化を分析できない。そこで、本実験では同一色のフェルトを用いている。実際に撮影した画像を図 3.4 に示す。

本観察では、画像内の任意の横一列の輝度値を 3 回調べ、その値を平均する。平均することで、取得したデータにノイズが入っていた場合の影響を軽減する。図 3.4 の横方向（左から右方向）の輝度値の変化を図 3.5 にし、縦方向（上から下方向）の輝度値の変化を図 3.6 に示す。また、図 3.4 において左方向に伸びる影の輝度を正規化して比べたグラフを図 3.7 に、縦軸の輝度値と横軸の影の長さを正規化したグラフを図 3.8 に示す。

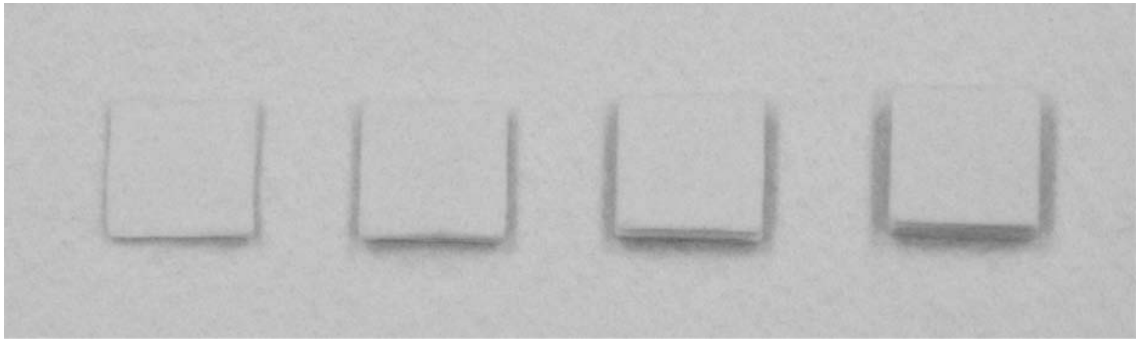


図 3.4 輝度値を計測するために用いる画像

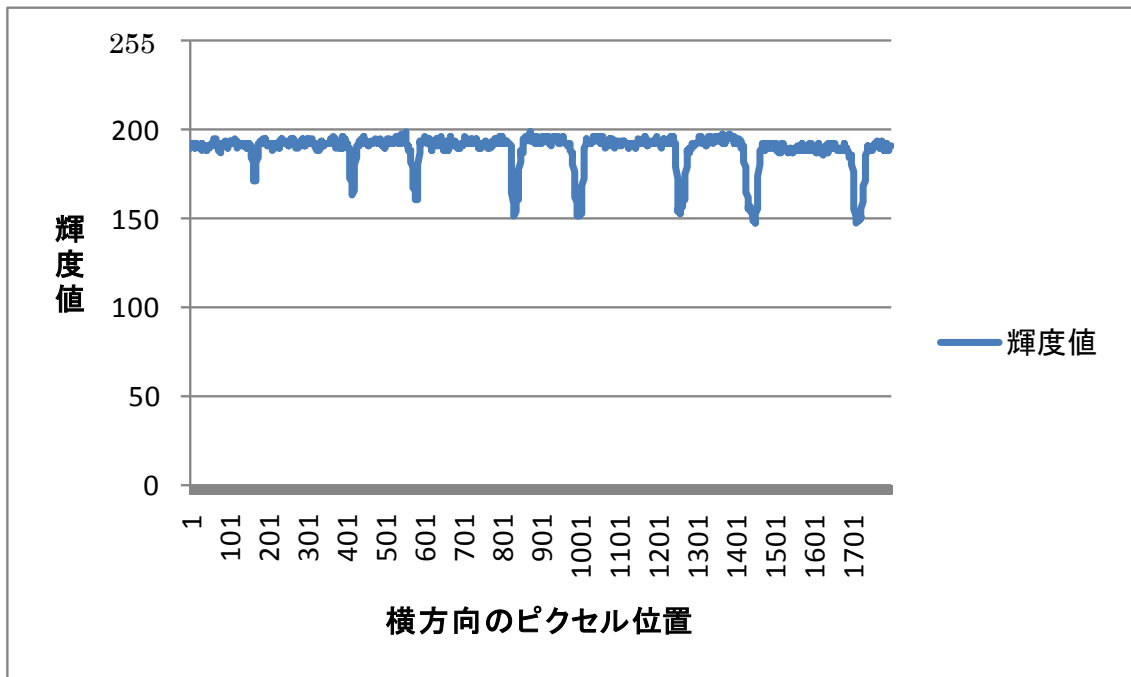


図 3.5 図 3.4 において左から右方向に向かって計測した輝度値の変化

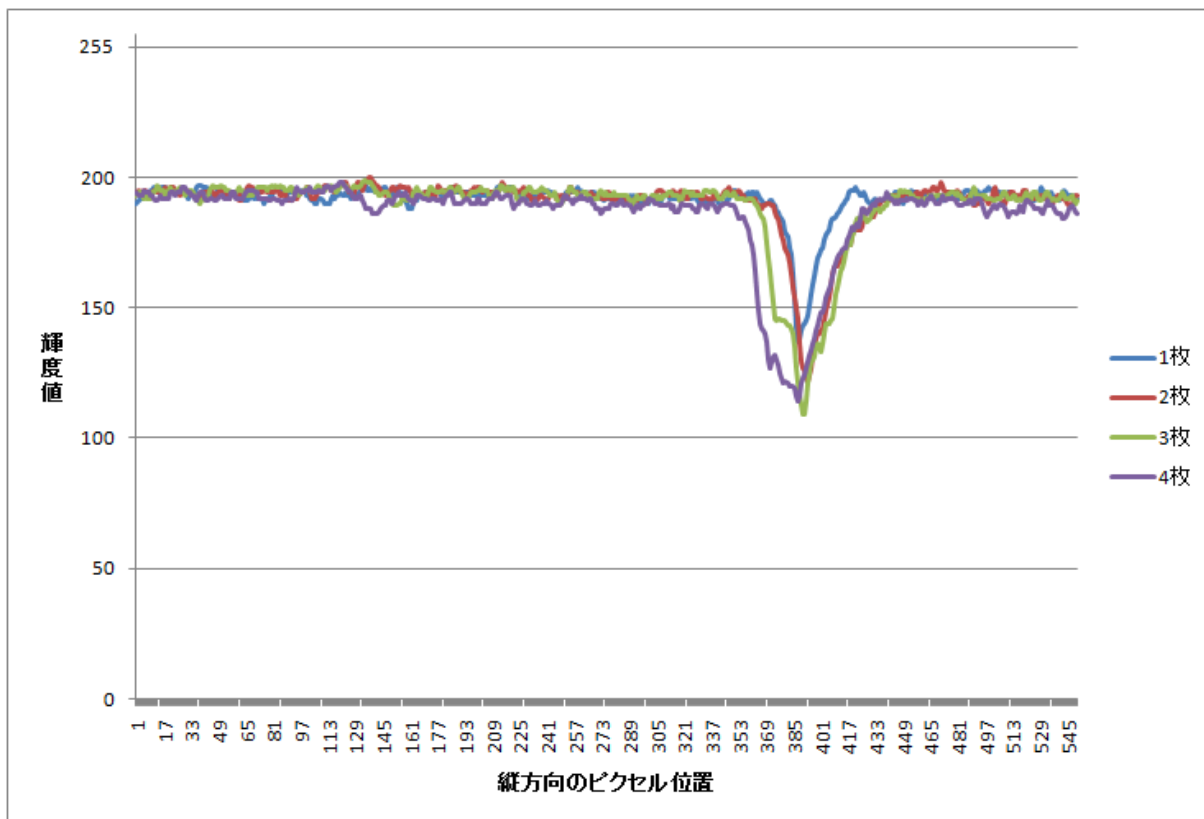


図 3.6 図 3.4 における縦方向の輝度値の変化

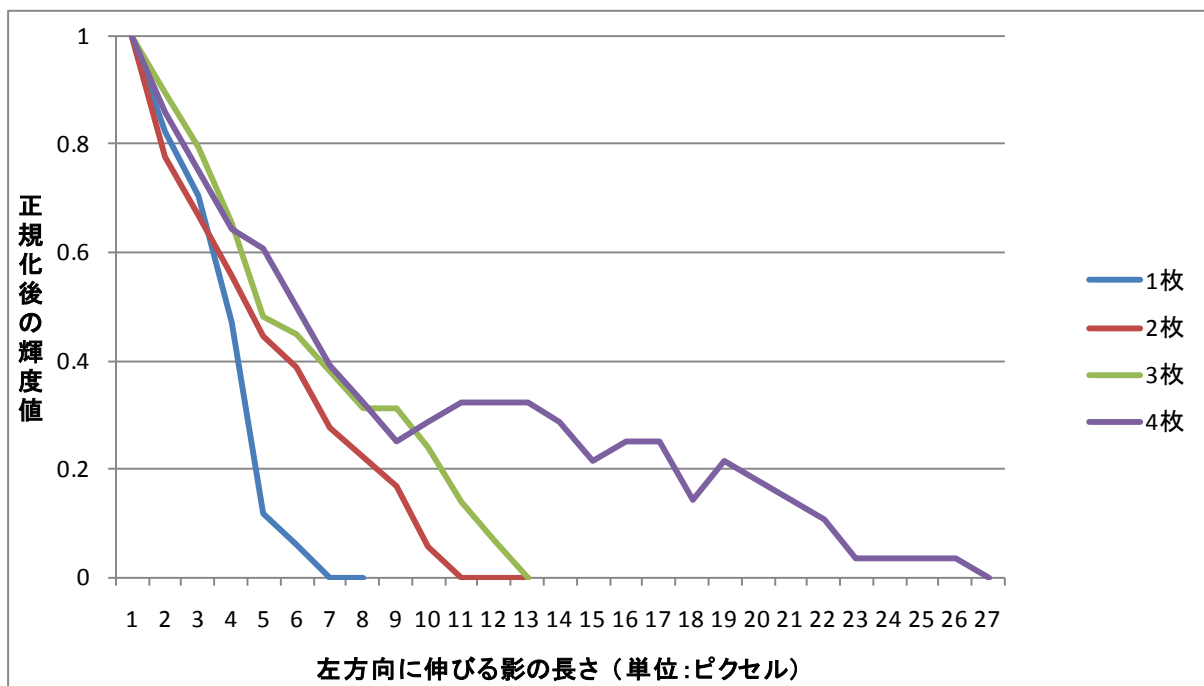


図 3.7 図 3.4 において左方向に伸びる影の輝度値を正規化して比べたグラフ

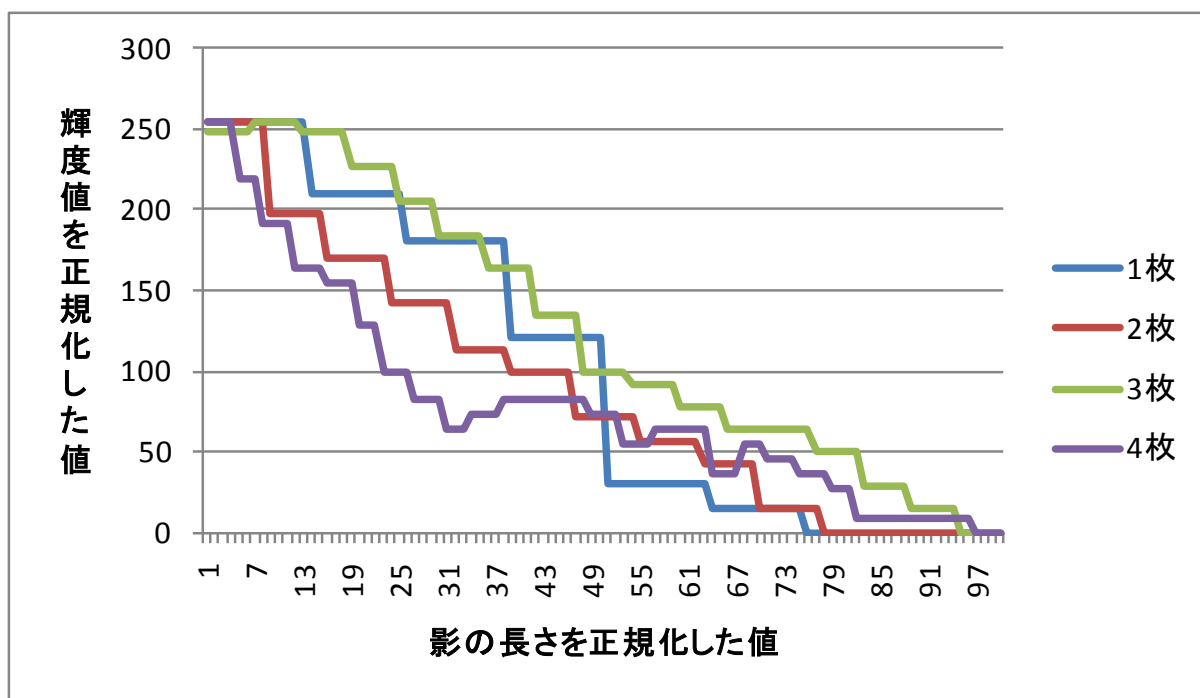


図 3.8 図 3.4 における左方向に落ちる影の部分について、縦軸と横軸を合わせ、正規化を行ったグラフ

図 3.8 の縦軸において、ある厚みを持つフェルトから生成される影の輝度値の変化を表すデータ群、最大値を MAX 、最小値を MIN とすると、正規化された値 V_s は次式にて算出される。

$$V_s = \frac{V - MIN}{MAX - MIN} \cdot 255 \quad \dots \dots \dots \text{式(1)}$$

ここで、 V はデータ群中のあるピクセルの輝度値である。

横軸は、影の長さを最大値 100 に正規化した値である。100 の値を、ある厚みを持つフェルトから生成される影の輝度値の変化を表すデータの個数で割り、その値を元に正規化を行う。例えば、異なる 10 個のデータが存在する場合、同一の値を示すデータの個数は 10 個となる。

同一色のフェルト素材にできる影の輝度値を調査し、フェルトの貼り絵の影がどのような特徴を持っているか観察した。また、フェルトの厚みを変えた時の輝度値の変化に法則性が見られるかどうか、フェルトの厚みをパラメータとして輝度値の減衰を

関数化できるか検討した。フェルト素材の厚みを高くするに従って、影の長さがより伸びるようになるなどの比例的な関係があるならば、関数化は容易である。

図 3.8 のように計測データを正規化した時、異なる厚さを持つフェルトから生成される影の輝度値の変化が、同一の減衰傾向を示す場合、関数化は容易であると考えられる。しかしながら、図 3.8 の結果から、同一の減衰傾向は見られなかったため、関数化は困難であると判断した。

また、図 3.4 の 1 枚から 4 枚のフェルト素材の下方方向に伸びる影の減衰傾向の拡大図を図 3.9 で見ると、減衰の勾配が一定ではなく緩急があることが確認できる。また、図 3.4 において、フェルト素材の下方方向に伸びる影と上方方向に伸びる影を比較すると、上方方向に伸びる影はフェルトの素材にさえぎられ、カメラの死角となり確認できず、影の長さが実際より短く見えるという特徴が見られた。この特徴から、フェルトの貼り絵の影を表現する際は、上方方向の影を短く表現する、あるいは上方方向の影は生成しないなどのアプローチがあると考えた。

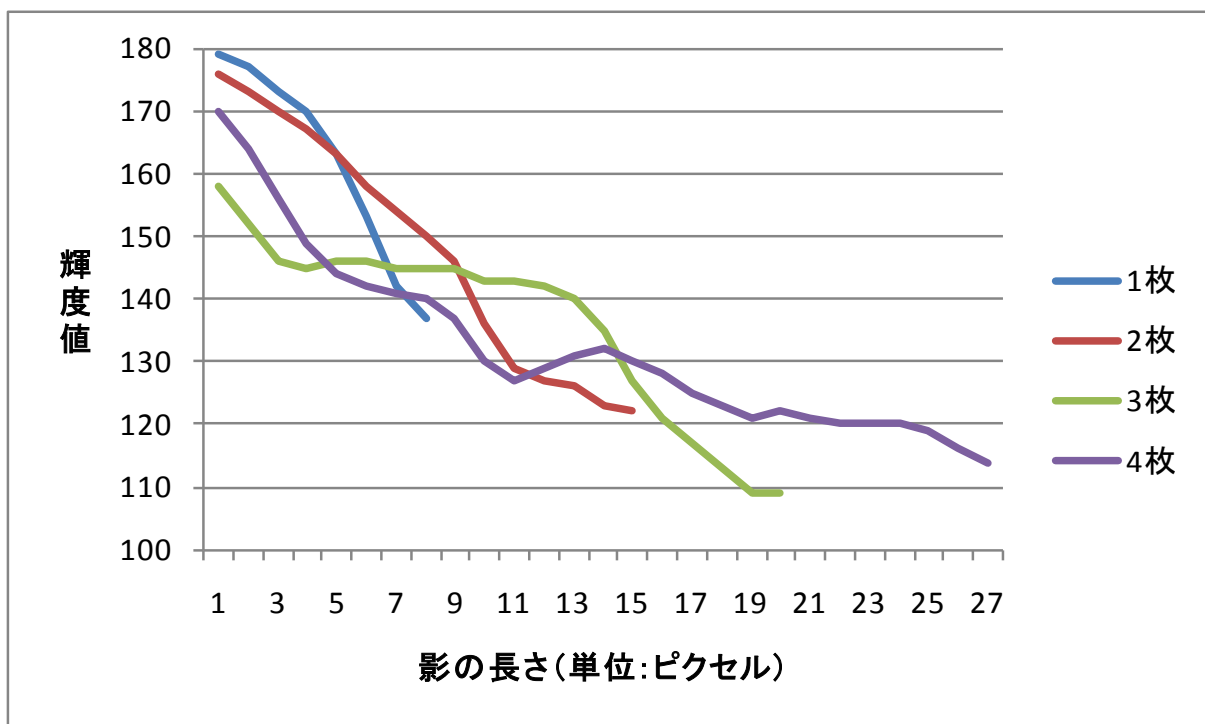


図 3.9 図 3.4 のフェルト素材の下方方向に伸びる影の減衰を示した図

一つの関数で輝度の減衰を表現できるならば，その得られた関数を用いて影付けを行えば実測データに基づく影付けを行うことが可能であるが，本観察では輝度値の減衰の関数化は困難であると考えた．

以上の分析結果より，厚みを考慮した関数化は困難であり，フェルトの貼り絵の影は図 3.9 に示すような減衰を示すことが分かった．図 3.9 に示すような減衰傾向を示す関数としてガウス関数がある．空間フィルタの一つとして，ガウス関数を元にして作られたガウシアンフィルタがある．ガウシアンフィルタはガウス関数の減衰する特徴を有しており，画像処理の平滑化処理に用いられている．エッジにガウシアンフィルタを適用させた場合，影の減衰傾向を表現することができると考えられる．

そこで本研究ではガウシアンフィルタを用いてフェルトの貼り絵の影の減衰を表現する．

第 4 章

アルゴリズム

本章では，フェルト調の貼り絵画像生成のアルゴリズムについて述べる．まずアルゴリズムの概要を示し，次に個々の処理について詳述する．

4.1 アルゴリズムの概要

本研究では 3D モデルの情報を元にフェルト調の貼り絵画像を生成する．3D モデルから表面の色の情報や深度情報を取得し，これらの情報を用いて貼り絵の色や貼り絵にできる影を表現する．

アルゴリズムの概要は以下の通りである．フェルト調の貼り絵を表現する際に必要となる画像情報は図 4.1 の①②③④である．①は立体的なモデルをシート状に表現するためと，最終的な出力画像への色付けに必要な画像情報である．②はパーツを重ね合わせた際に生じる影を表現するための画像情報であり，③は細かいパーツの影を表現するために必要な画像である．④はフェルト模様を付加するために必要な画像となる．本研究では 3D モデルからまず①②③の画像を生成し，次に，以下の順で処理を行うことにより，フェルト調の貼り絵風画像を生成する．

- 1) 深度マップを用いた影付け処理
- 2) 細かいパーツに対する影付け処理
- 3) 影の合成処理
- 4) 深度マップを用いて二値化画像生成処理
- 5) フェルトの模様付け処理
- 6) 合成処理による貼り絵画像の生成

このアルゴリズムの大まかな流れを図示したものを図 4.1 に示す．図の処理の詳細

については、以下 4.2 節～4.5 節で述べる。

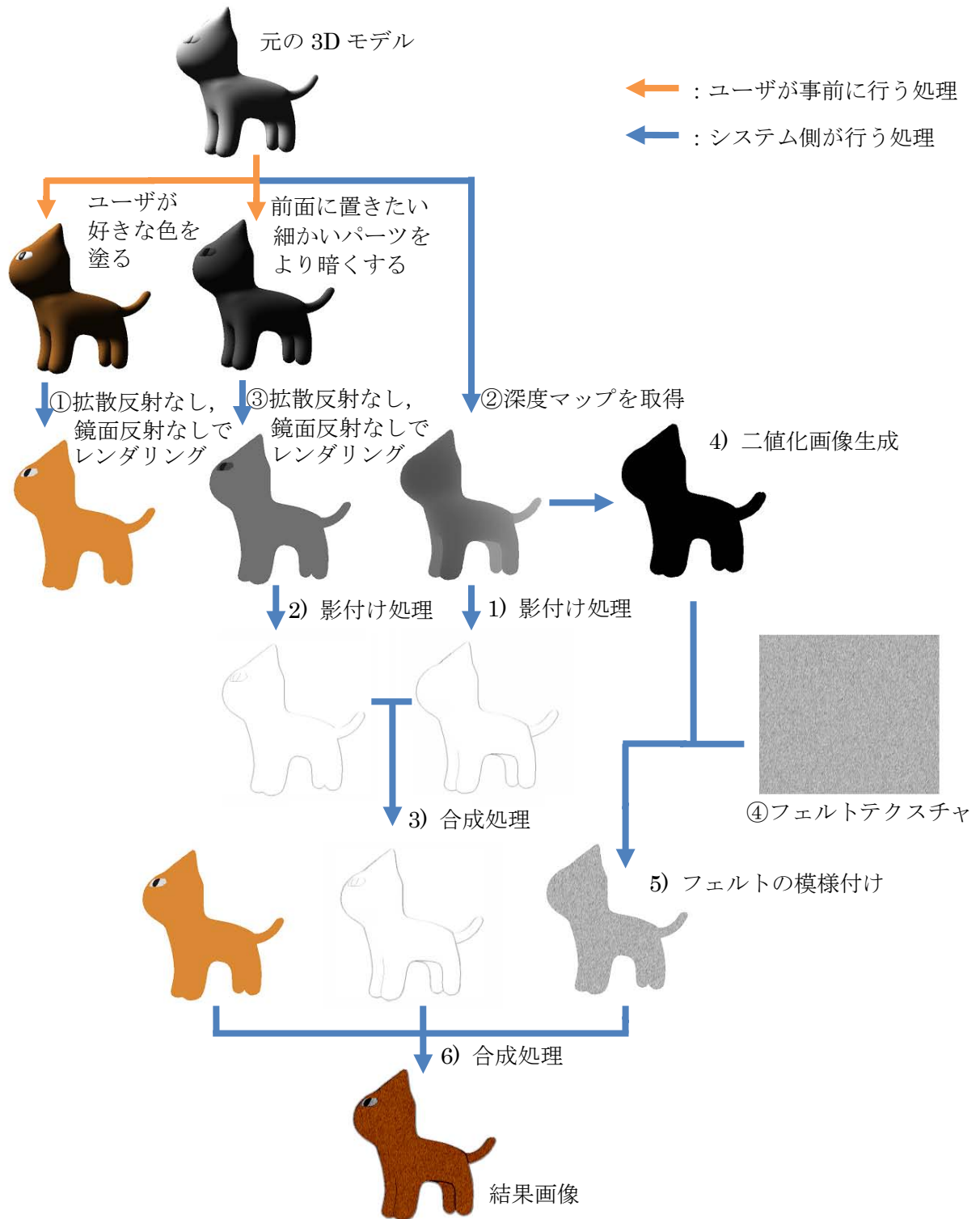
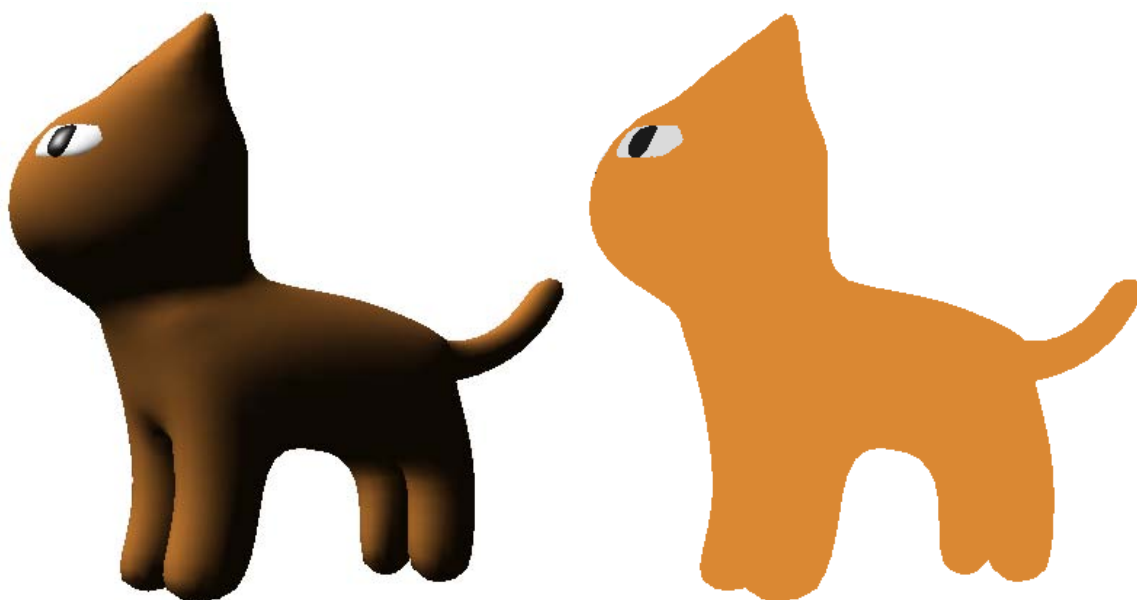


図 4.1 アルゴリズム全体の大まかな流れ

4.2 3D モデルの立体感除去

3D モデルをフェルトシートの重ね合わせの貼り絵として表現するために、まず元の 3D モデルの丸みや立体感を消し平面的に見せる処理を行う必要がある。3D モデルの立体感は、物体表面における拡散反射と鏡面反射の影響が大きい。ここで、拡散反射は、入射光が表面から全方向に同一の強度で放射される光であり、鏡面反射とは物体表面での直接反射によって生じるハイライトである。立体感の除去には、拡散反射と鏡面反射の反射成分を 0 に設定し、固定値で与えられる環境光 (アンビエント光) のみでレンダリングを施す。結果画像を図 4.2 に示す。この結果画像は 4.5 節の貼り絵風画像を生成する際に用いる。



(a) 拡散反射,鏡面反射ありの 3D モデル (b) 拡散反射,鏡面反射なしの 3D モデル

図 4.2 拡散反射, 鏡面反射処理について

4.3 影付け

4.3.1 深度マップを用いた影付け

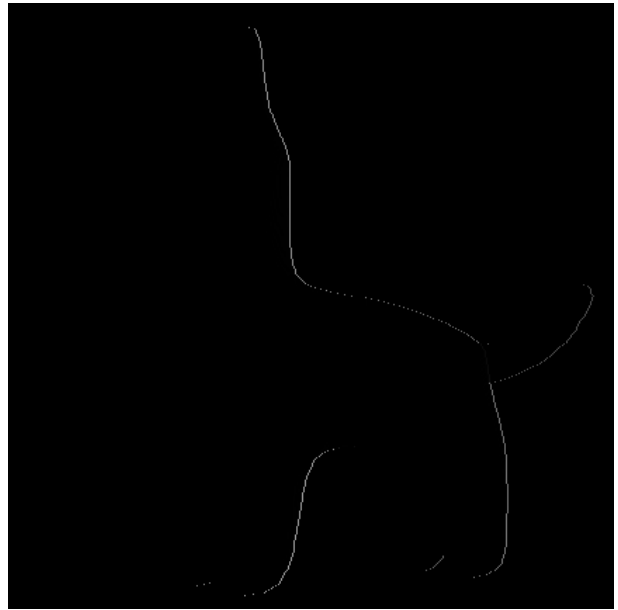
図 4.2(b)に示したように 3D モデルの立体感を除去しただけでは，右後足と左後足パーツの輪郭形状を区別できなくなり，さらにフェルトを貼り合わせた際の貼り絵の厚みも表現できない．そこで影付け処理が重要となる．影付け処理を行えば，影付け後の結果画像図 4.7(b)に示すように，影付け処理前は識別できなかった右後足と左後足パーツの輪郭形状を視認できるようになり，また，フェルト調の貼り絵の厚みも表現可能となる．

深度マップを用いた影付け処理は以下の手順で行う．

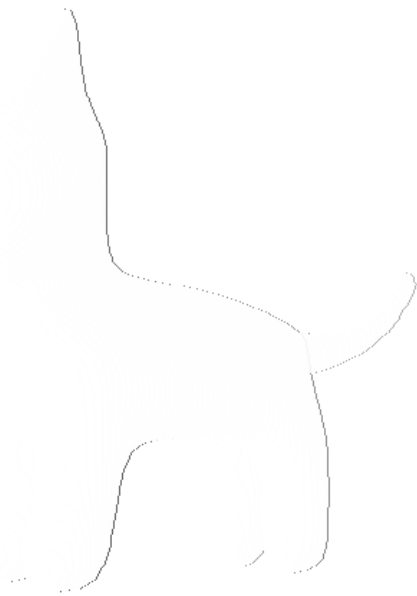
- 1) 入力した 3D モデルから深度マップを取得する
- 2) 1) に対して図 4.4(a)に示す微分フィルタをかけ，図 4.3(b)に示すような右方向のエッジ（物体の輪郭となりうる右側の縁）を検出する
- 3) 抽出したエッジを影として利用するために白黒反転処理を行う
- 4) 二値化処理をし，抽出したエッジを黒線として表示する
- 5) ガウシアンフィルタをかけ黒線を減衰させ，これを右方向に伸びる影とする
- 6) 2) ～5)の処理を下方向，左方向に対しても同様に行い，生成した影を合成する



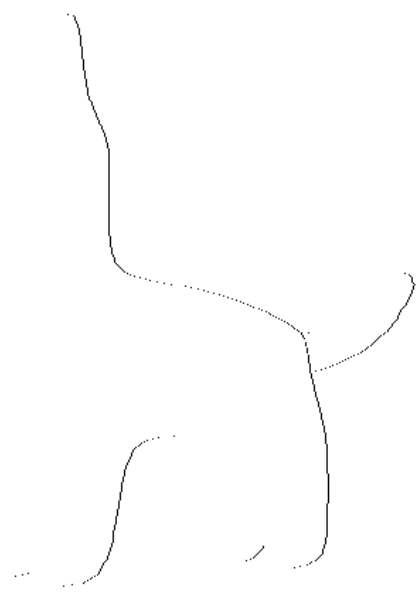
(a)深度マップ



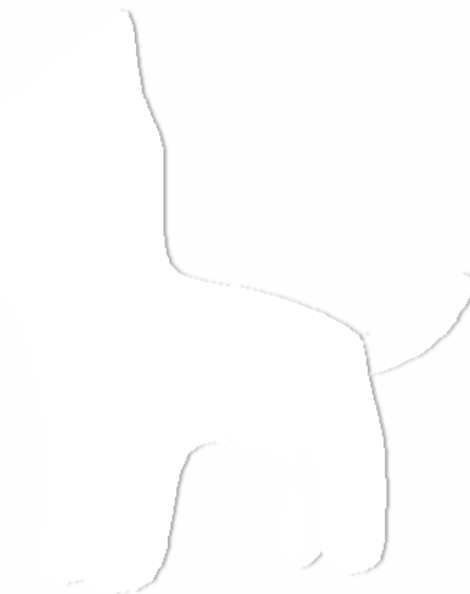
(b)微分フィルタをかけ検出したエッジ



(c)白黒反転処理後の画像



(d)二値化処理後の画像



(e) ガウシアン処理後の画像

図 4.3 深度マップを用いた影付け処理の手順を示した画像

深度マップとは、各ピクセルにおける深度値を射影のパラメータであるファークリップ面までの距離とニアクリップ面の距離の差で割り、グレースケールの濃淡画像として出力したものである。ここで、ファークリップ面とは描画範囲に設定した 3D 空間の視点から最も遠い面のことであり、ニアクリップ面とは視点から最も近い面のことを指す。深度マップに対してかける各微分フィルタを図 4.4 に示す。

0	0	0
-1	1	0
0	0	0

0	-1	0
0	1	0
0	0	0

0	0	0
0	1	-1
0	0	0

(a) 右方向微分フィルタ (b) 下方向微分フィルタ (c) 左方向微分フィルタ

図 4.4 エッジを検出する際に掛ける各微分フィルタ

また、微分フィルタをかけ反転処理した後の図 4.3(c)の画像には、抽出したエッジ

周辺のピクセルに、完全に輝度値が 255 の白色になっていないピクセルが散在する。それらのピクセルは白色の背景として表示し、抽出したエッジのみを黒線としたい。そこで、パーツとパーツの間のエッジを抽出するには経験則に基づき輝度値 245 以上の部分を輝度値 255 に変換する必要がある。次に、それ以外の部分を輝度値 0 とすることで抽出したエッジを黒線に変換して二値化処理を行う。

抽出した黒線に上記 5) の処理を行うことで影を表現する。ここで、5) のフィルタ処理で生成したいのは右方向に伸びる影である。しかし黒線に対して単純にガウシアンフィルタを掛けただけでは、ガウシアンフィルタが対照的な空間フィルタであるために、右方向だけでなく左方向にも影が伸びてしまう。

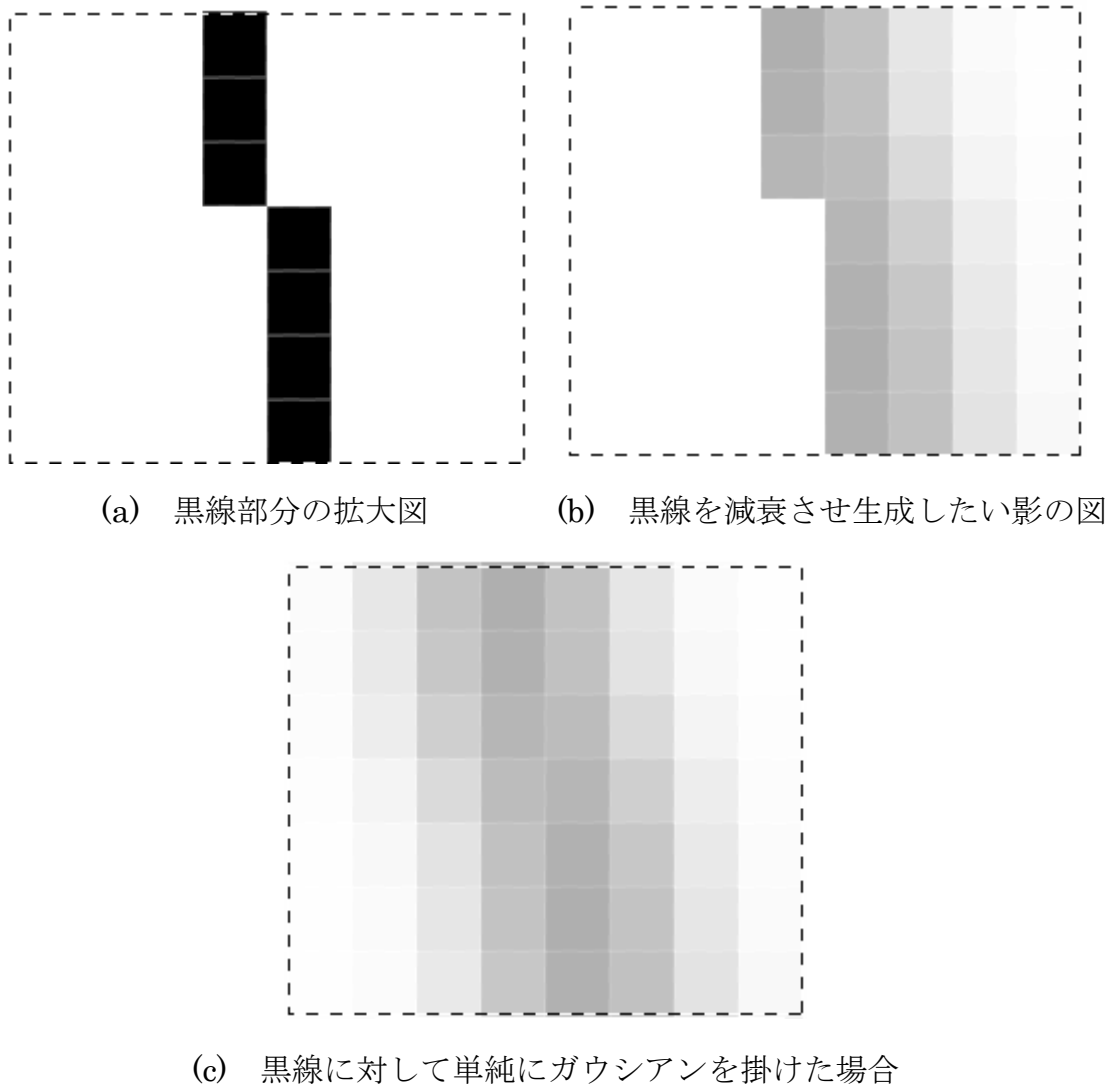
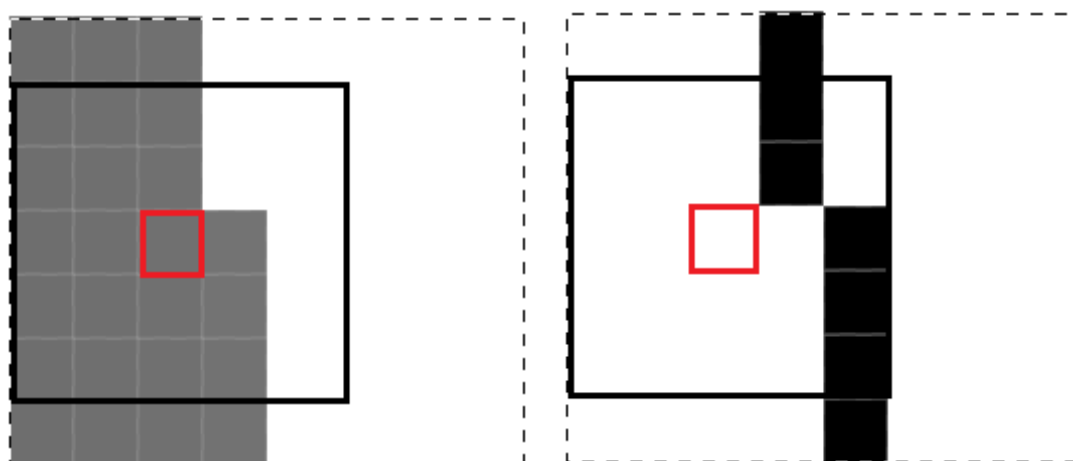


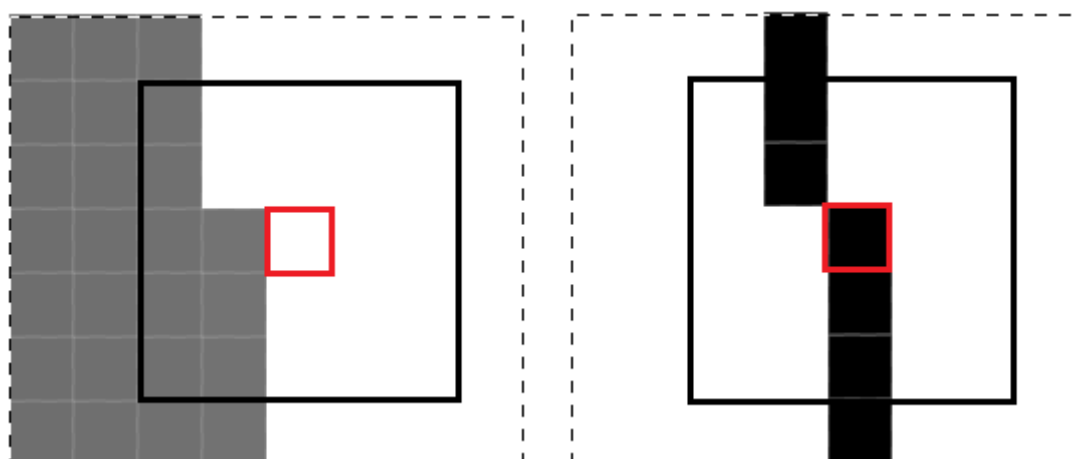
図 4.5 黒線全体がぼやけ、左方向にも影が伸びてしまうイメージ図

そこで、フィルタをかける黒線の画像とは別に、深度マップを保存しておく。深度マップの画素値が低い場所ほど、貼り絵パーツとしては上層部分になりえる場所であるという条件から、以下のような処理を施す。

フィルタ処理の過程で深度マップを参照し、深度マップの画素値が低い場所では、黒線をぼかす（影を落とす）処理を行わない。深度マップの画素値が高い場合、あるいは深度マップの画素値が 255 で物体の存在しない背景部分である場合は、影を落とすべき台紙とみなし、その場所にもみガウシアンフィルタをかけ黒線をぼかす処理を行うことによって、図 4.5(b)に示すような右方向にのみ伸びる影を表現する。



(a)別メモリに保存した深度マップ (b)黒線をぼかす処理を行わないケース



(c) 深度マップの画素値が背景色である例 (d) 黒線をぼかす処理を行うケース

図 4.6 フィルタ処理をしていく過程で同時に深度マップを参照するイメージ図

このような処理を右方向，左方向，下方向の3方向行う．一方向ずつ順に影を生成し，生成された影を順に合成していくことにより，フェルトを貼り合わせた際の影を表現する．生成された影の合成は，節 4.3.3 で後述するように，より輝度値の低いほうの画素値をとることにより合成する．

また，本研究では以下に示す2つの理由から，上方向の影生成の処理は行わないこととする．1つは，左方向と右方向の影生成処理（ぼかし処理）のみで，図 4.7(b)に示すように十分に上方向の影を表現できるため，処理を軽減するためである．2つ目の理由として，第3章の図 3.4 に示されるように，水平方向に置いたフェルト作品を下斜め（6時方向）から見た場合，フェルト自身によって視線が遮蔽され，フェルトを重ねた領域の上方向の影が視認できない部分がある．この部分を表現するために，上方向の影を生成しないこととする．

上記のような手順で，実際に生成された影を図 4.7(b)に示す．

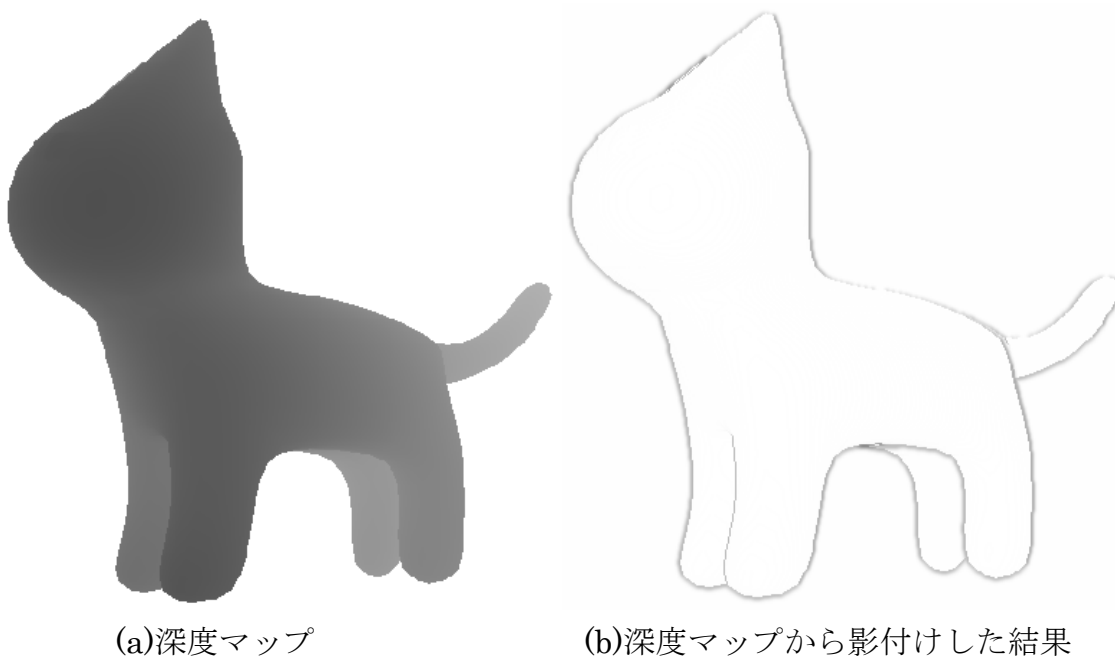
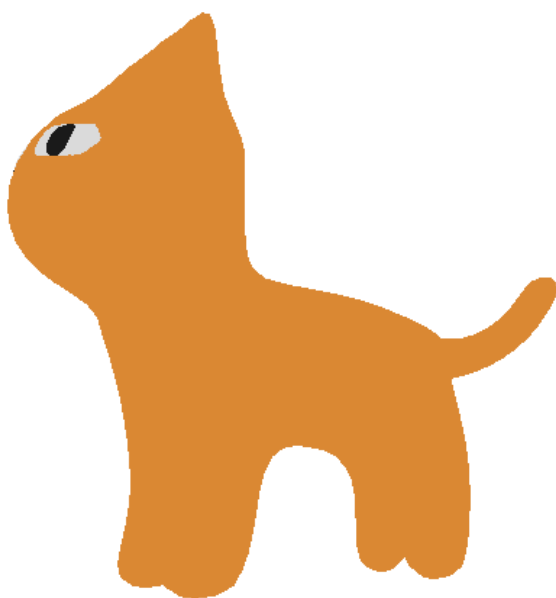


図 4.7 深度マップを用いた影付け

4.3.2 細かいパーツに対する影付け

4.3.1 節の深度マップを用いた影付け手法では、図 4.7(b)に示すように、動物モデルの目などの細かいパーツに対する影付けは実現できない。その理由として、深度マップは視点とオブジェクトまでの距離をグレースケールの 256 階調の濃淡画像に変換し出力しているため、目と顔の部分の微妙な起伏の差異は消えてしまうからである。したがって、図 4.7(a)に示すように、目と顔の部分の差異が消えている場合は、微分フィルタで影の元となるエッジを検出できなくなる。

また、図 4.8(a)に示すような、3D モデルが元々保持している色に対してそのまま微分フィルタをかけても、目などの細かいパーツに対する影付けを適切に表現できない。例えば下方方向に伸びる影を表現するために、下方方向の微分フィルタを図 4.8(a)にかけた際、結果は図 4.8(b)のようになり、本来影がかかるべきではない目の上部分、胴体パーツから白目パーツの方向に影が表現されてしまう。



(a) 3D モデルが元々保持している色

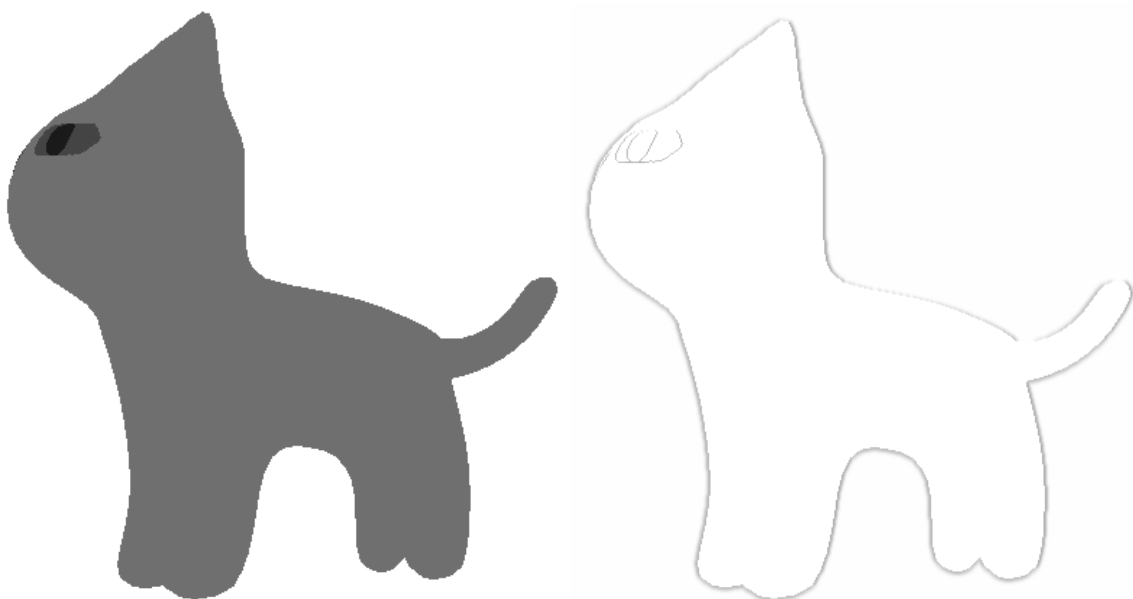
(b) (a)に下方方向の微分フィルタをかけた例

図 4.8 胴体パーツから白目パーツの方向に影が表現されてしまう

目などの細かいパーツにも影付け処理を行うためには、図 4.9(a)に示すように、前面に置きたいパーツを事前処理としてより暗くする。その方法として、あらかじめユーザが 3D モデリングソフトを用いて、対象となる 3D モデルの各パーツを前面に置きたいパーツ順に、図 4.9(a)のようにグレースケール階調が順に明るくなる色づけをする。図 4.9(a)の図を出力する際は、節 4.2 と同様の処理を行う。

ここでは、パーツの輝度値を前面に置きたい順に、黒目部分：30，白目部分：80，体の部分：130 と設定した。この処理により、目などの細かいパーツ部分のエッジを微分フィルタで検出可能となり、フェルトを重ね合わせた際の細かいパーツに対する影を表現することが可能となる。

このような事前処理を行い、4.3.1 節の処理手順と同様に影付け処理を行う。生成された結果を図 4.9(b)に示す。



(a)色付けしたモデル

(b)色付けしたモデルを用いて影付けした結果

図 4.9 細かいパーツに対する影付け

4.3.3 影の合成

4.3.1 節で生成した深度マップを用いた影はパーツとパーツを重ね合わせた際の影を表現しており，また，4.3.2 節で生成した影は 4.3.1 節で表現できなかった細かいパーツに対する影を表現している．これら 2 つの影を合成する際は，より輝度値の低い画素値を取ることで合成する．合成した結果を図 4.10 に示す．

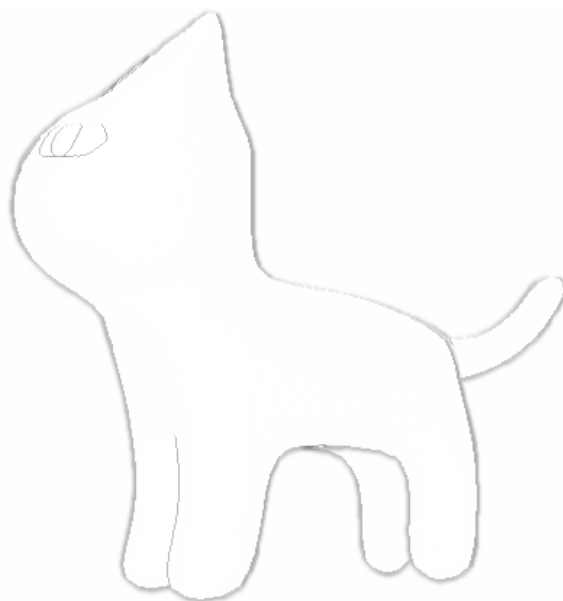
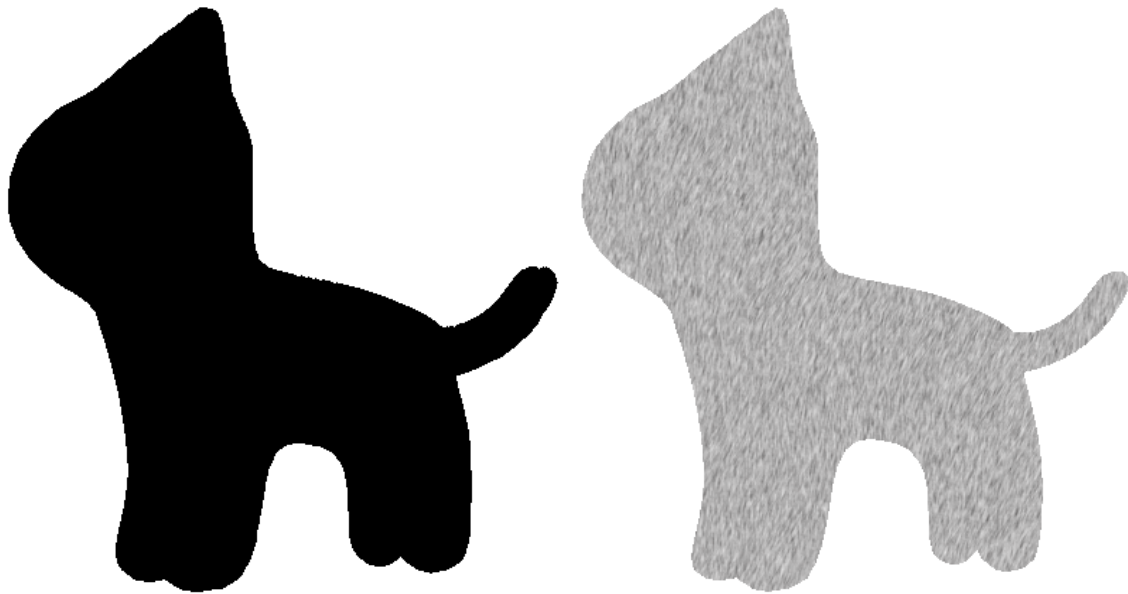


図 4.10 図 4.7(b)の影と図 4.9(b)の影の合成

4.4 フェルトの模様付け

最終的な出力結果であるフェルト調の画像を得るために，フェルトテクスチャを二値化画像でマスク処理し，フェルトの模様付けを行う．二値化画像は図 4.7(a)に示す深度マップから生成する．深度マップの背景は白色であり，輝度値は 255 となっているため，背景の輝度値 255 以外の部分を輝度値 0 とすることで二値化画像を生成する．生成した二値化画像を図 4.11(a)に示す．フェルトテクスチャは生成する画像と同じサイズである 800×600 のものをユーザが指定する．元の 3D モデルの色を最終的な出力画像の色として用いるため，フェルトテクスチャは無彩色のものを用いる．出力結果を図 4.11(b)に示す．



(a)二値化画像

(b)フェルトの模様付け

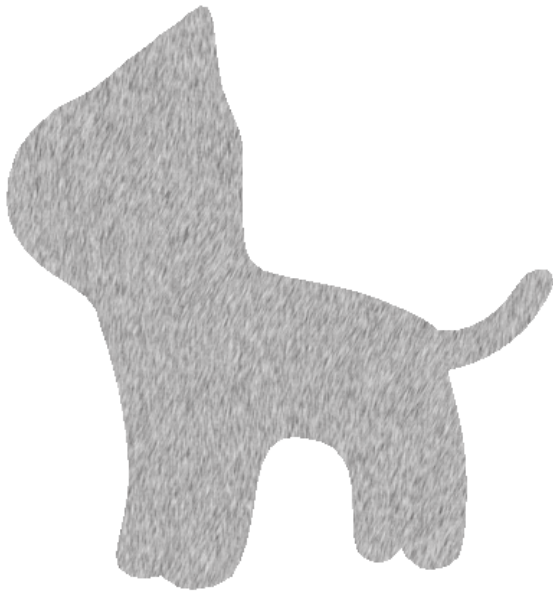
図 4.11 二値化画像を用いてフェルトテクスチャをマスクした結果

4.5 フェルト調の貼り絵画像の生成

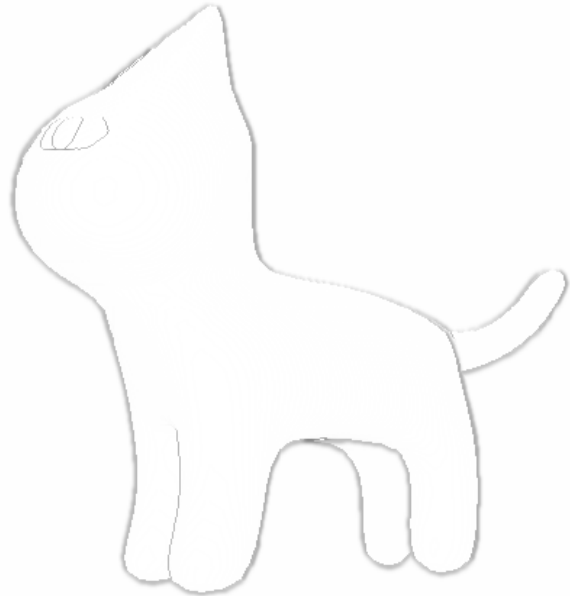
最後に、4.4 節で生成したフェルトの模様画像と、4.3.3 節で生成した影の合成画像、4.2 節で生成した立体感を除去した画像を合成し、フェルト調の貼り絵画像を生成する。合成の際は焼き込み合成を行っている。まず、図 4.12(a)(b)に対して焼き込み合成処理を行い、図 4.12(c)の画像を得る。次に、得られた画像と図 4.12(d)に対してまた同じ焼き込み合成処理を行い、図 4.12(e)を最終出力とする。用いた焼き込み合成の式を以下に示す。ここで、合成する画像の画素値をそれぞれ c_1, c_2 とし、 c_{\max} は画素値の最大値、 $value$ は出力する画像の画素値を示す。ここで、 c_1, c_2 は可換である。

$$value = \begin{cases} 0 & \text{if } c_1 + c_2 < c_{\max} \\ c_1 + c_2 - c_{\max} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \dots \dots \dots \text{式(2)}$$

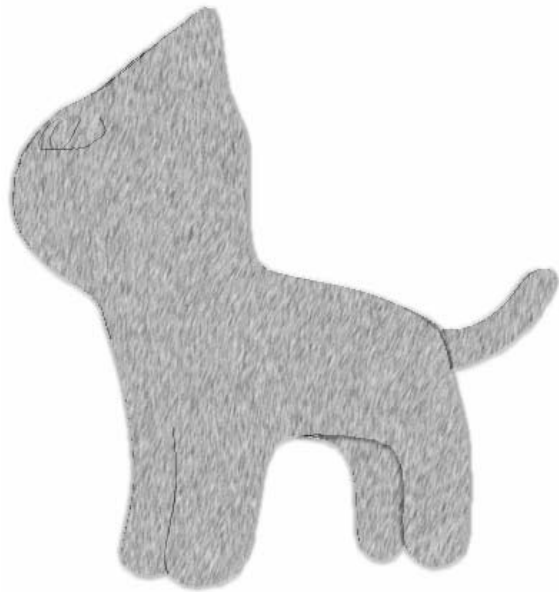
合成した画像を図 4.12(e)に示す。



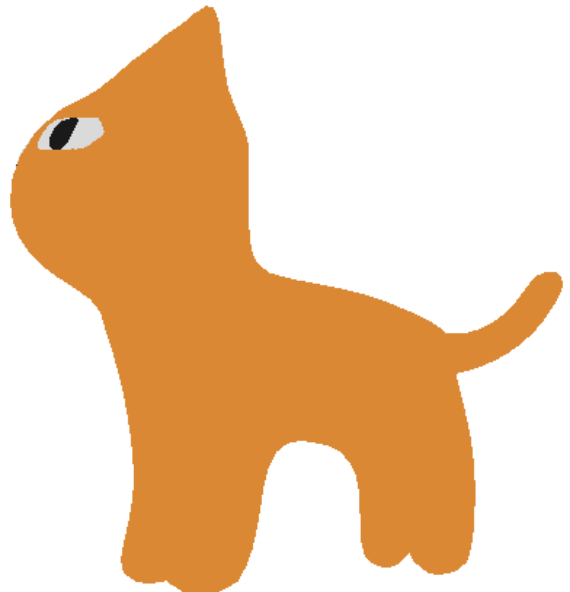
(a) フェルトの模様画像



(b) 影の画像



(c) (a)と(b)を合成した画像



(d) 立体感を除去した画像



(e) (c)と(d)を合成した結果画像

図 4.12 フェルト調の貼り絵画像の生成

第 5 章

結果と考察

本章では，生成したフェルト調の貼り絵画像を例示するとともに，本アルゴリズムについて考察する．

5.1 結果

入力データとして使用した 3D モデルを図 5.1 に示す．生成する画像のサイズは 800×600 とした．3D モデルを様々な視点から見た図を図 5.2 に示し，図 5.2 と同じ視点から生成したフェルト調の貼り絵画像の例を図 5.3 に示す．



図 5.1 入力データとして使用した 3D モデル

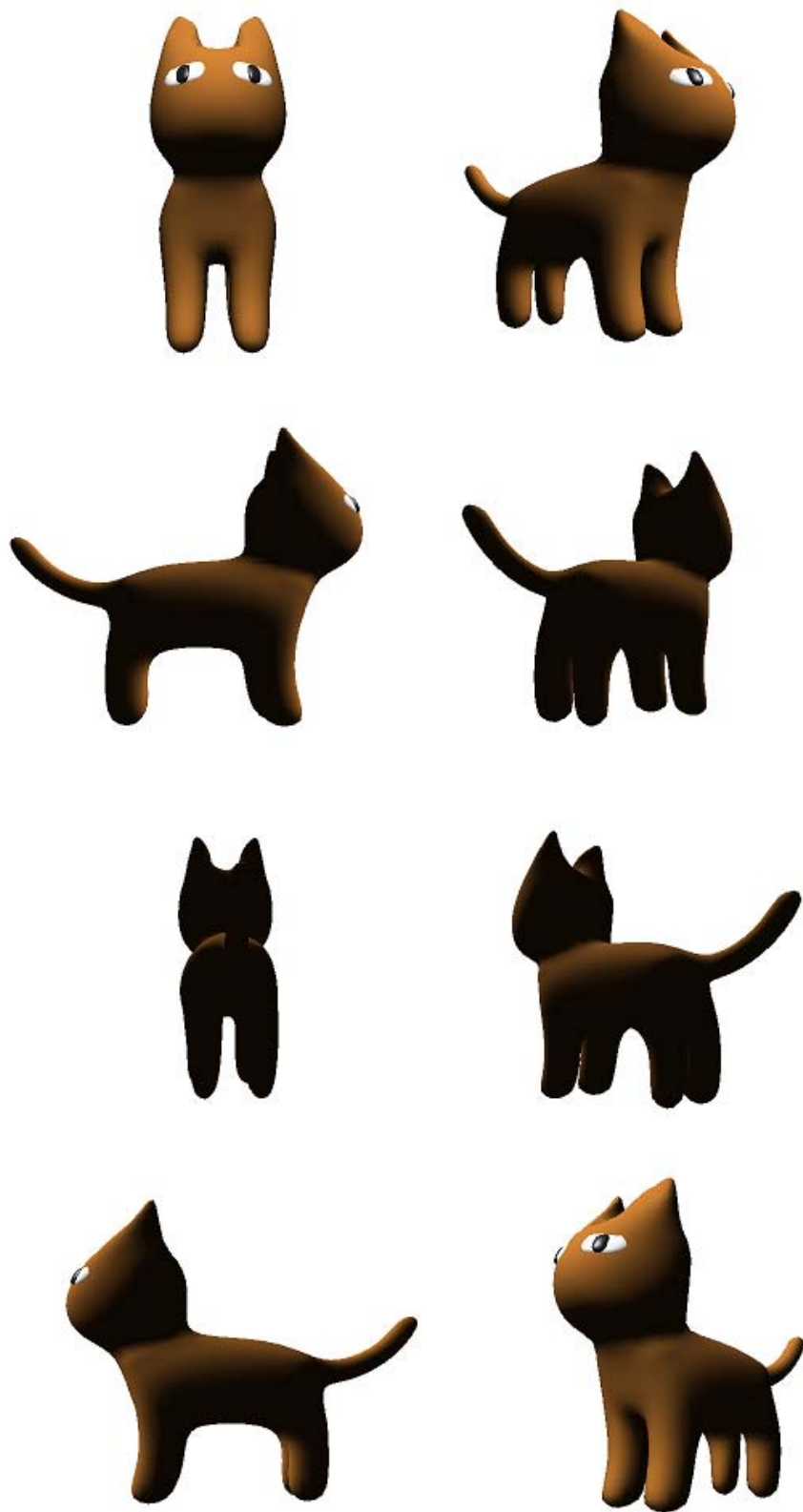


図 5.2 3D モデルを様々な視点から見た図

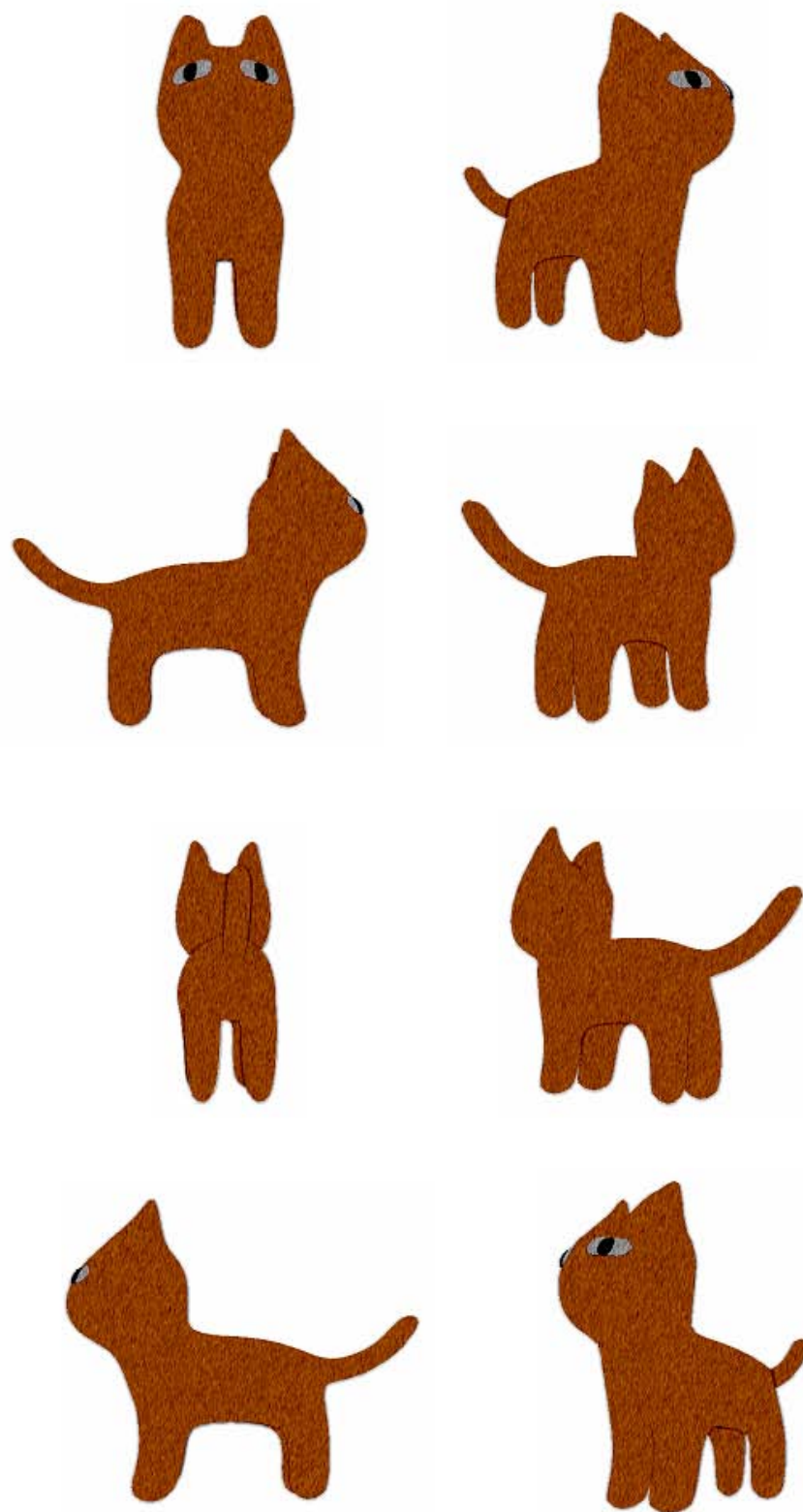
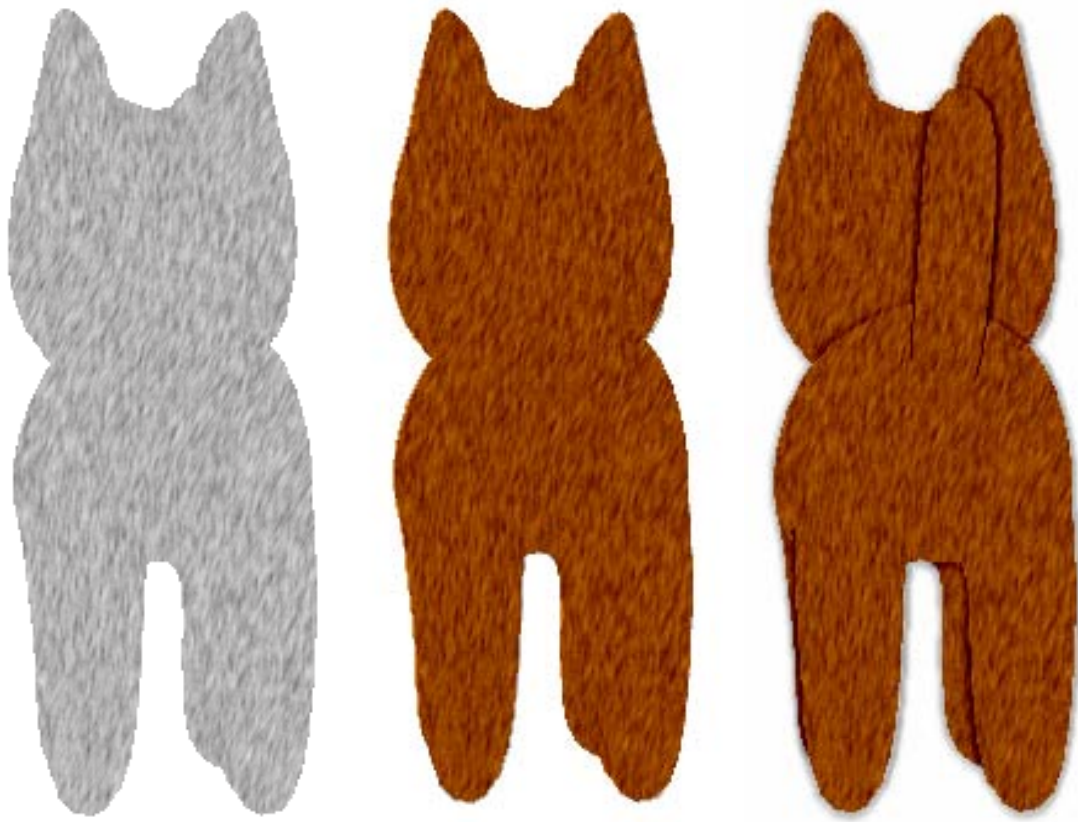
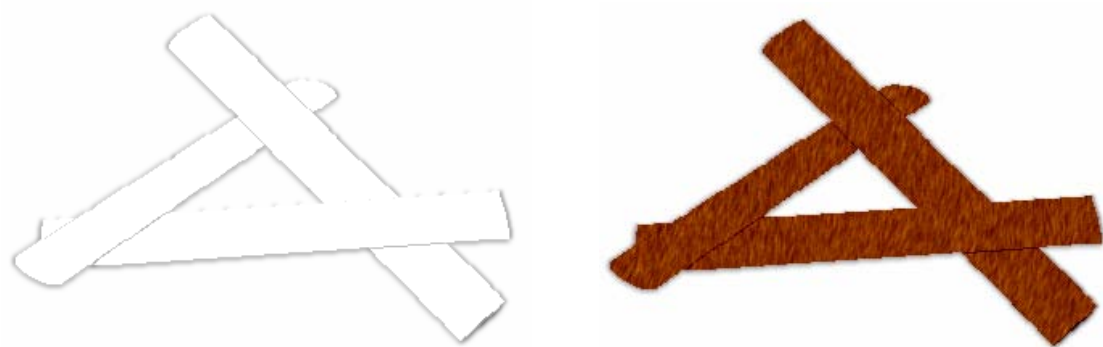


図 5.3 図 5.2 の図と同じ視点から生成したフェルト調の貼り絵画像の例



(a)フェルト模様画像 (b)色付き画像合成後の画像 (c)影合成後の画像

図 5.4 合成過程の画像



(a)交差の影

(b)(a)にフェルトテクスチャを合成した結果

図 5.5 交差表現の画像

5.2 考察

本手法では、3D モデルの深度情報を参照しつつガウシアンフィルタをかけることにより、上に重ねた貼り絵パーツから、下の貼り絵パーツの方向に落ちる影を表現した。図 5.4(c)を見ると、下の貼り絵パーツ方向にのみ影を減衰させることによって、適切にパーツの重ね合わせ順を表現していることが確認できる。

また、立体感を除去した色付き画像とフェルト模様の画像、ならびに影の画像に対して逐次焼き込み合成処理を行うことでフェルト調の貼り絵風画像を生成した。図 5.3 や図 5.4(c)などの結果画像を見ると、生成した影をそのまま合成しただけでは影が薄く表示され、フェルトから背景にかかる影があまり視認できない結果となった。しかし、図 5.4(c)に示すように、パーツからパーツにかかる影部分は焼き込み合成処理によって影の濃さが強調され、パーツとパーツの重なり表現が比較的強調して表示される結果となった。合成したフェルト模様に関しては、図 5.4 の(a)(b)を比較すると、合成前と比べて模様が潰れる、変化するといったことはなく、適切に表現されているといえる。

しかしこの合成処理により本来白色だった目の色や、橙色だった胴体や顔部分の色が暗く変化する結果となった。その原因として、焼き込み合成の処理の際に、グレースケールで与えたフェルトテクスチャの輝度値が合成されるため、その輝度値分だけ暗くなってしまったと考えられる。今回は動物の猫のモデルであったため茶色で表現されること自体に違和感はないが、元の入力の 3D モデルが例えば白い車のモデルだった場合、生成結果が暗く出力されると違和感を覚えることは容易に想像できる。今後の課題として、合成処理の際に色の変化を抑える処理を加える必要がある。

また、フェルトテクスチャは、本手法で生成する画像のサイズと同じ 800×600 のサイズのものを用意しマスク処理したが、それにより、アニメーションにした際はフェルトの模様が 800×600 の画面に固定され全く動かないといった現象が起こってしまう。したがって、キャラクターは動いているがフェルト模様が全く動かないといったアニメーション表現になるため、本手法のマスク処理の改善が必要である。

第 6 章

まとめ

本章では、本研究のまとめと今後の課題について述べる。

6.1 まとめ

本論文では、3D モデルからフェルト調の貼り絵画像を生成する手法を提案した。本手法では、3D モデルから深度マップや立体感を除去した画像を取得し、深度情報などから貼り絵を重ね合わせた際に生じる影を表現した。影を表現する際には、3D モデルの深度情報を参照しつつガウシアンフィルタをかけることにより、上から下の貼り絵パーツの方向に落ちる影を再現した。生成した影の画像と、フェルトの模様付けがなされた画像、立体感を除去した画像をそれぞれ焼き込み合成することで、フェルト調の貼り絵画像を表現した。さらに、様々な視点から 3D モデルをフェルト調の貼り絵風に表現することが可能であると分かった。視点が変わり、貼り絵の重ね合わせ順が変化しても、図 5.3 に示すように、その変化に対応できることを確認した。本手法を用いれば、フェルト調の貼り絵アニメーションの制作も可能となると考えられる。

6.2 今後の課題

本研究では 3D モデルの目などの細かいパーツの影となるエッジを取得する際に、4.3.2 節の図 4.9(a)のような輝度値の重み付け処理をあらかじめ行った。この輝度値の重み付け画像に対して微分フィルタをかけることによって、深度マップに対する微分フィルタ処理では取得できなかった目のパーツのエッジを取得することに成功し

た。しかしこのようなパーツの色付け処理は自動化されるとさらにユーザの利便性が増すため、自動化されることが望ましい。このような処理を自動で行う研究として 3D mesh segmentation の研究がある[18][19]。今後の課題として、この 3D mesh segmentation の研究手法を取り入れた貼り絵生成のアルゴリズムを開発したい。また、5.2 節に記載したように、本研究では生成した影をそのまま合成したため影が薄く表示され、フェルトから背景にかかる影があまり視認できない結果となった。影の視認性を高めるため、生成した影の部分の輝度値を下げ、影をより濃くする処理を加える必要がある。また、焼き込み合成処理の際に、本来白色だった目の色や、橙色だった胴体や顔部分の色が暗く変化する結果となった。これはフェルト模様の画像の、グレースケールの輝度値が影響したためと考えられるが、合成処理の際には色の変化を抑える処理を加える必要がある。

他にも、貼り絵で表現されたキャラクターは、正面を向いている時と横を向いている時とで形状が変わる場合がある。このような、形状が視点によってデフォルメ・変形されるデフォメーションの問題や、フェルトの貼り絵表面の、フェルトの毛羽立ちの表現問題など、貼り絵表現には様々な課題があり、今後はそれらの課題に対する解決手法を開発したい。

謝 辞

本研究を進めるにあたり，北陸先端科学技術大学院大学 知識科学研究科 宮田一乗教授には，時に優しく，時に熱意のこもった的確なアドバイスをいただきました．職務にお忙しい中，昼夜を問わず多くのご指導やご助言をいただきました．宮田一乗教授には，心から感謝を込めてお礼を申し上げます．本当に有難うございました．研究室の先輩である杜暁冬さん，櫻井快勢さん，溝口敦士さんにはプログラミングやコンピュータグラフィックスに関する技術のみならず，研究への姿勢など多くのことを学ばせていただき，公私にわたってお世話になりました．同期の石橋賢氏，北直樹氏，寺田圭佑氏には良き相談者として様々なことでアドバイスをもらいました．本研究を進めることができたのは皆様方のおかげであり，重ねて，心より深く感謝いたします．

参 考 文 献

- [1] Barbara J. Meier, “Painterly Rendering for Animation”, SIGGRAPH 96 Conference Proceedings, 1996.
- [2] 佐藤陽悦, 藤本忠博, 村岡一信, 千葉則茂, “ポリゴンベース幾何モデルの水墨画調レンダリング法”, グラフィクスと CAD, 103-007, pp.37-42, 2001
- [3] Amy Gooch, Bruce Gooch, Peter Shirley, Elaine Cohen, “A Non-Photorealistic Lighting Model For Automatic Technical Illustration”, pp.447-452, SIGGRAPH 1998.
- [4] Lena Petrović Brian Fujito, Lance Williams, Adam Finkelstein, “Shadows for cel animation”, pp.511-516 , SIGGRAPH '00,
- [5] Cassidy J. Curtis, Sean E. Anderson, Joshua E. Seims, Kurt W. Fleischer, David Salesin “Computer-generated watercolor” SIGGRAPH 1997,pp421-430.
- [6] Victor Ostromoukhov, “Digital Facial Engraving”, In Proceedings of SIGGRAPH'99, in Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pp. 417-424, 1999.
- [7] ヘンリージョハン, 松井一, 芳賀俊之, 土橋宜典, 西田友是, “領域ベースストロークベースのアート風画像生成法”, 電子情報通信学会, pp.358-367, 2005.
- [8] 井上光平, 浦浜喜一, “カラー楕円板近似に基づく貼り絵風画像の生成”, 電子情報通信学会論文誌, Vol J88-A, No. 11, 2005.
- [9] すまいるママ：ヤッピーのふしぎなおもちゃ, 教育画劇, 2010.
- [10] 新しい保育サポートマガジン「ポット」,
<http://www.childbook.co.jp/pot/index.html>
- [11] ちいさな絵画チロルチョコパッケージギャラリー本館,
<http://www.geocities.co.jp/Hollywood-Stage/6105/10en13a.htm>
- [12] Yan Li, Jinhui Yu, Kwan-liu Ma, Jiaoying Shi, “3D paper-cut modeling and

- animation”, CASA 2007, Volume 18 Issue 4-5, 2007.
- [13] Akira Yoshida, “A Study for Decorative Mosaic-like Animation Rendering”, 2008.
- [14] 杉田純一, 島影佳範, 田鎖由莉, 高橋時市郎, “階層的 Poisson disk sampling 法を用いた様々な絵画風画像の生成法”, 電機情報通信学会, 2008.
- [15] 牧野大輔, 井上光平, 原健二, 浦浜喜一, “紙の厚みとテクスチャを考慮した貼り絵風画像の生成”, 映像情報メディア学会誌 Vol. 60, No.12, pp 2038-2041, 2006.
- [16] フリー素材の Photo Chips, <http://photo-chips.com/>
- [17] すまいるママ: サーカスへようこそ, PHP 研究所, 2008.
- [18] Sagi Katz, Ayellet Tal "Hierarchical mesh decomposition using fuzzy clustering and cuts". ACM Trans. Graph. 2003.
- [19] Evangelos Kalogerakis, Aaron Hertzmann, Karan Singh, “Learning 3D mesh segmentation and labeling” ACM Trans. Graph. 2010.

研究業績

- [1] Ken Ishibashi, Toni Da Luz, Remy Eynard, Naoki Kita, Nan Jiang, Hiroshi Segi, Keisuke Terada, Kyohei Fujita and Kazunori Miyata: Spider Hero: A VR application using pulling force feedback system, In Proceedings of the 8th International Conference on Virtual Reality Continuum and its Application in Industry, pp.197--202, Japan, 2009.
- [2] 石橋賢, Toni Da Luz, Remy Eynard, 北直樹, 姜南, 瀬木宏, 寺田圭佑, 藤田恭平, 宮田一乗, スパイダーヒーロー: 張力提示システムを導入した VR アプリケーション, インタラクション 2010 インタラクティブ発表 (プレミアム) , 2010.
- [3] 石橋賢, Toni Da Luz, Remy Eynard, 北直樹, 姜南, 瀬木宏, 寺田圭佑, 藤田恭平, 宮田一乗, スパイダーヒーロー, インタラクティブ東京 2009, IVRC (バーチャルリアリティテスト) 参加作品プレゼンテーション, 2009.
- [4] 石橋賢, Toni Da Luz, Remy Eynard, 北直樹, 姜南, 瀬木宏, 寺田圭佑, 藤田恭平, 宮田一乗, スパイダーヒーロー: 張力提示システムによる VR アプリケーション, 第 7 回知識創造支援システムシンポジウム, 2010.
- [5] 石橋賢, Toni Da Luz, Remy Eynard, 北直樹, 姜南, 瀬木宏, 寺田圭佑, 藤田恭平: Spider Hero, 第 17 回国際学生対抗バーチャルリアリティコンテスト (IVRC2009), 日本科学未来館, 2009 年 10 月 22 日--25 日.
- [6] 石橋賢, Toni Da Luz, Remy Eynard, 北直樹, 姜南, 瀬木宏, 寺田圭佑, 藤田恭平: Spider Hero, いしかわ夢未来博 2009, 石川県産業展示館, 2009 年 10 月 30 日--11 月 1 日.
- [7] 石橋賢, Toni Da Luz, Remy Eynard, 北直樹, 姜南, 瀬木宏, 寺田圭佑, 藤田恭平: Spider Hero, 第 15 回学生 CG コンテスト (ビデオ展示), 国立新美術館, 2010 年 2 月 3 日--14 日.
- [8] 石橋賢, Toni Da Luz, Remy Eynard, 北直樹, 姜南, 瀬木宏, 寺田圭佑, 藤田

恭平: Spider Hero, Laval Virtual 2010, Place de Herce (France), 2010年4月7日--11日.