

修士論文

平成 26 年度 (2014)

# ハイブリッドサリエンスを用いた メッシュ簡略化に関する研究

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

安 光明

修士論文

平成 26 年度 (2014)

# ハイブリッドサリエンスを用いた メッシュ簡略化に関する研究

指導教員 渡辺 大地

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

安 光明

## 論文の要旨

論文題目	ハイブリッドサリエンシーを用いた メッシュ簡略化に関する研究
執筆者氏名	安 光明
指導教員	渡辺 大地
キーワード	メッシュ簡略化, LOD, CAD, サリエンシー
[要旨] 近年、3DCG のゲーム分野ではゲームコンテンツのマルチプラットフォーム化が進んでいる。しかし、プラットフォームによって処理能力は大きく異なる。3D ゲームなど処理能力に依存するコンテンツを処理能力の高いプラットフォームからそのまま処理能力の低いプラットフォームに利用することは難しい。このような問題を解決するために、メッシュ簡略化という手法が存在している。メッシュ簡略化は、3DCG の重要な研究テーマの1つである。メッシュ簡略化はポリゴンメッシュの形を出来るだけ変えないようにして、ポリゴンの数を減らす事でデータサイズが大きいオブジェクトをデータサイズが小さいオブジェクトにすることが出来る。データサイズが小さいメッシュは処理能力に対する要求が低いため、処理能力が低いプラットフォームでも早く処理できる。本研究は色情報と形状情報を両方考慮した、効果が視点に依存しないハイブリッドサリエンシーを提案する。そして、本手法を用いることで、注目度の高い箇所を保護した上で注目度の低い箇所を優先的にメッシュを簡略することを実現できた。同じポリゴン数までメッシュモデルを簡略化したとき、本研究の手法は他の既存手法よりメッシュモデルの注目度の高い箇所の特徴を保護した良い結果を得られることを確認した。	

# A b s t r a c t

Title	ハイブリッドサリエンシーを用いた メッシュ簡略化に関する研究
Author	An Guangming
Advisor	Taichi Watanabe
Key Words	Mesh Simplification, LOD, CAD, Saliency
<b>[summary]</b> In recent years, the multi-platform game content is becoming a trend in the gaming field of 3DCG. However, processing capacity of platform is very different. Content on high processing capacity platform is difficult to run smoothly on the platform of lower processing capacity. To solve this problem it emerges a technique called Mesh Simplification, which is one of the most important research themes in 3DCG. Mesh Simplification requires you to not change as much as possible the shape of polygon mesh, while to reduce the object data size to a small one. Since smaller data size requests lower processing capacity, simplified mesh can be processed faster even in low processing capacity platform. This research presents a saliency map, which considers the effect of both color information and shape information view-independent. Also, it 's possible to simplify a mesh from low attentioned point while protecting the high attentioned places. When simplified the mesh model to the same number of polygons, this research method has been confirmed to produce a good result. Characteristics of high attentioned parts in mesh model are better proceed than other existing methods.	

# 目次

第1章	はじめに	1
1.1	研究背景と目的	2
1.2	論文構成	5
第2章	メッシュ簡略化の簡略操作	6
第3章	メッシュ簡略化基準	12
3.1	幾何的なメッシュ簡略化基準	13
3.2	イメージサリエンシー	16
3.2.1	ガウシアンフィルター操作	17
3.2.2	輝度、色成分、方向成分の算出	17
3.2.3	center-surround 操作	18
3.2.4	イメージサリエンシーの算出	19
3.3	メッシュサリエンシー	21
3.3.1	平均ガウス曲率の算出	21
3.3.2	center-surround 操作	22
3.3.3	非線形縮小操作	23
3.4	ハイブリッドサリエンシー	24
3.4.1	頂点の各特性値算出	25
3.4.2	仮ハイブリッドサリエンシーの確定	27
3.4.3	ハイブリッドサリエンシーの算出	28
第4章	ハイブリッドサリエンシーを用いたメッシュ簡略化	30
第5章	評価と検証	35
5.1	既存研究との比較	36
5.2	アンケート評価	38
5.3	Metro を用いた結果評価	40
5.4	処理速度の検証	42
第6章	まとめ	43
	謝辞	45



# 目 次

1.1	Surface Simplification Using Quadric Error Metrics . . . . .	3
1.2	Perceptually Driven Interactive Rendering - 簡略化結果メッシュ . . .	3
1.3	メッシュサリエンスを用いたメッシュ簡略化 . . . . .	4
2.1	エッジ削除メッシュ簡略化操作 . . . . .	7
2.2	頂点ペア削除メッシュ簡略化操作 1 . . . . .	7
2.3	頂点ペア削除メッシュ簡略化操作 2 . . . . .	8
2.4	三角形ポリゴン削除メッシュ簡略化操作 . . . . .	8
2.5	セル削除メッシュ簡略化操作 . . . . .	9
2.6	頂点除去メッシュ簡略化操作 . . . . .	9
2.7	ポリゴン融合メッシュ簡略化操作 . . . . .	10
2.8	ポリゴンセット切替メッシュ簡略化操作 . . . . .	10
3.1	頂点と頂点の距離メッシュ簡略化操作 1 . . . . .	14
3.2	頂点と頂点の距離メッシュ簡略化操作 2 . . . . .	14
3.3	頂点と平面の距離 - 誤差 . . . . .	15
3.4	イメージサリエンス . . . . .	20
3.5	Luebke らのメッシュ簡略化実験結果 . . . . .	20
3.6	Lee らが生成したメッシュサリエンス . . . . .	24
3.7	各頂点の仮ハイブリッドサリエンスを其々指定しているハイブリッ ドサリエンス範囲まで数値変換する . . . . .	28
3.8	ハイブリッドサリエンスの色表示 (正面) . . . . .	29
3.9	ハイブリッドサリエンスの色表示 (背面) . . . . .	29
4.1	ハイブリッドサリエンスを用いたメッシュ簡略化結果 1 (正面) . . . . .	33
4.2	ハイブリッドサリエンスを用いたメッシュ簡略化結果 1 (背面) . . . . .	33
4.3	ハイブリッドサリエンスを用いたメッシュ簡略化結果 2 (正面) . . . . .	34
4.4	ハイブリッドサリエンスを用いたメッシュ簡略化結果 2 (背面) . . . . .	34
5.1	Garland らの手法と本研究手法の簡略化結果比較 (正面) . . . . .	37
5.2	Garland らの手法と本研究手法の簡略化結果比較 (背面) . . . . .	37
5.3	Lee らの手法と本研究手法の簡略化結果比較 (正面) . . . . .	38

5.4	Lee らの手法と本研究手法の簡略化結果比較（背面）	38
5.5	アンケート用の図（正面）	39
5.6	アンケート用の図（背面）	40
5.7	アンケート回答の割合	40
5.8	Metro で算出した誤差の分布（正面）	41
5.9	Metro で算出した誤差の分布（背面）	42
5.10	処理速度の検証	42

# 第 1 章

## はじめに

## 1.1 研究背景と目的

コンピュータグラフィックスの三次元世界ではメッシュモデルは複雑であれば複雑であるほど、より現実に近い表現ができる。しかし、複雑なメッシュモデルを高速に表示するには、高い計算能力を持つ機器が必要となる。低い計算能力を持つ機器によって複雑なメッシュモデルを表示する場合、遅延が発生する恐れがある。一方、近年では三次元コンピュータグラフィックスの特にゲーム分野ではゲームコンテンツのマルチプラットフォーム化が進んでいる。しかし、プラットフォームによって処理能力は大きく異なる。高い処理能力を持っているPCでスムーズにレンダリングできる高解像度の3Dゲームはスマートフォンなどでもスムーズにレンダリングできるとは言えない。また、メッシュモデルを表示する際には、必ずしも常に高詳細度を持つ必要はない。メッシュモデルはユーザーの観察視点から離れているときや注意しにくい場所にある場合など、より少ないメッシュポリゴン数で簡単にしたモデルでも物足りる。これらの問題を解決するために、メッシュ簡略化という手法が存在している。図1.1は1つのメッシュ簡略化の例を表す。

メッシュ簡略化は、3DCGの重要な研究テーマの1つである。メッシュ簡略化はポリゴンメッシュが持つ形状特徴を出来るだけ変えないようにして、ポリゴンの数を減らす事でデータサイズが大きいオブジェクトをデータサイズが小さいオブジェクトにすることが出来る。データサイズが小さいメッシュは処理能力への要求が低いため、処理能力が低いプラットフォームでも早く処理できる。メッシュ簡略化に関して、「どうやって簡単にしたメッシュモデルを作るか」、「どうやって簡単にしたメッシュモデルとオリジナルメッシュモデルとの差異をコントロールするか」、「どうやってメッシュ簡略化操作を管理するか」、「どうやって簡単にしたメッシュモデルとオリジナルメッシュモデルとの視覚上の差異を評価するか」の4つの問題がある。この4つの問題は「メッシュ簡略化の簡略操作」、「メッシュ簡略化の簡略化基準」、「メッシュ簡略化のフレームワーク」、「メッシュ簡略化の評価」の4つのキーワードにまとめることができる。本論文はこの4つのキーワー

ドからハイブリッドサリエンシーを用いたメッシュ簡略化について説明する。

簡略化前後の誤差基準は幾何的特徴を用いたものと感覚的特徴を用いたものに分けられる。これまでも様々な簡略化手法の開発が行われており、主に幾何的特徴を用いたものが多かった。幾何的特徴を用いた簡略化前後の誤差基準の代表的な例として、Garlandら [1] の手法を用いた QEM メッシュ簡略化が挙げられる。図 1.1 にその手法を用いたメッシュ簡略化の例を示す。



図 1.1: Surface Simplification Using Quadric Error Metrics

近年では、感覚的特徴を用いた簡略化前後の誤差基準は注目されている。代表的な例として、Luebkeら [2] の手法を用いたメッシュ簡略化と Leeら [3] の手法を用いたメッシュ簡略化が挙げられる。

図 1.2 は Luebke らの手法でメッシュ簡略化前後のメッシュを示す。

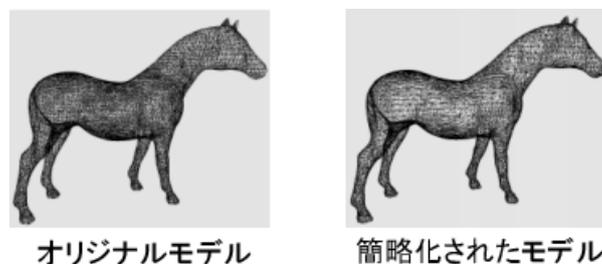


図 1.2: Perceptually Driven Interactive Rendering - 簡略化結果メッシュ

図 1.3 は Lee らのメッシュサリエンシーを用いたメッシュ簡略化実験結果を示す。



図 1.3: メッシュサリエンシーを用いたメッシュ簡略化

Luebke らの簡略化手法はイメージサリエンシーを利用している。イメージサリエンシーは入力画像に対応する注目度の重みを表したマップのことである。その注目度は入力画像の輝度、色成分、方向を分析して求めたもので、注目度の重みが高い箇所はよく注目される。しかし、イメージサリエンシーはある視角で得たモデルのレンダリングから計算したもののため、すべての視角に応用できない欠点がある。

Lee らの簡略化手法はメッシュサリエンシーを利用している。メッシュサリエンシーは入力モデルの曲率から計算した入力モデルに対応する注目度の重みを表したマップのことである。注目度の重みが小さい箇所は曲率が小さいか周りの頂点の曲率と比べて変化が少ないため、余り注目されないが、注目度の重みが高い箇所は曲率が大きく周りの頂点の曲率と比べて変化が大きい。

そこで、本研究で Luebke らと Lee らの定義に加え、「色情報から得た注目度の重みが小さい箇所に曲率から得た注目度の重みを小さくする」「色情報から得た注目度の重みが高い箇所に曲率から得た注目度の重みを高くする」というハイブリッドサリエンシーの定義を追加する。具体的には、光源など色情報から分析した注目度にも曲率など位相情報から分析した注目度にも考慮した、視角の制限がない簡略化手法を提案する。まず、各視角からモデルを観察し、各観察視角で獲得したレンダリング画像から複数のイメージサリエンシーを作る。モデルに所属する頂点は複数のイメージサリエンシーの値に対応する。頂点ごとにその複数のイメージサリエンシーの値から最大値と平均値を計算する。その後、計算で得たイメー

ジサリエンスの最大値でモデルメッシュの頂点を分類し、メッシュモデルの各頂点のイメージサリエンス特徴値をメッシュサリエンスと加算し、ハイブリッドサリエンスを求める。最後にハイブリッドサリエンスで表した注目度の強みを参照し、メッシュ簡略化を行う。提案した手法を実装し、他のメッシュ簡略化手法との比較検証をすることにより本研究の有効性を確認した。これにより、光源など色情報から分析した注目度にも曲率など位相情報から分析した注目度にも考慮したメッシュ簡略化を可能とした。

## 1.2 論文構成

本論文は全6章で構成する。第2章ではメッシュ簡略化操作について述べる。第3章ではメッシュ簡略化基準であるハイブリッドサリエンスについて述べる。第4章ではハイブリッドサリエンスを用いたメッシュ簡略化について述べる。第5章では提案手法の実装結果の評価と検証について述べる。第6章ではまとめと今後の展望について述べる。

## 第 2 章

### メッシュ簡略化の簡略操作

本章は、メッシュ簡略化操作の先行研究について紹介する。その後、本研究の簡略化操作に利用する「エッジ削除」と「頂点ペア削除」について説明する。

Hoppe ら [4] は初めてエッジ削除というメッシュ簡略化操作を提案した。エッジ削除は頂点  $V_1$  と頂点  $V_2$  を端点としたエッジをと一つの新たな頂点に融合する。図 2.1 はエッジ削除前のメッシュとエッジ削除後のメッシュを表す。

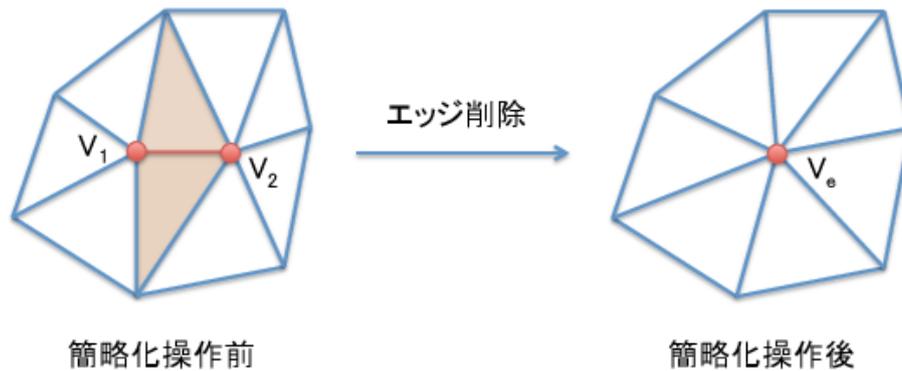


図 2.1: エッジ削除メッシュ簡略化操作

Schroeder ら [5]、Garland ら [1]、Popovic ら [6]、El-Sana ら [7] は頂点ペア削除というメッシュ簡略化操作を提案した。頂点ペア削除は繋がっていない2つ頂点  $V_1$  と  $V_2$  を一つ新たな頂点  $V_p$  に融合する手法である。図 2.2 と図 2.3 は頂点ペア削除メッシュ簡略化操作前後のメッシュを表す。

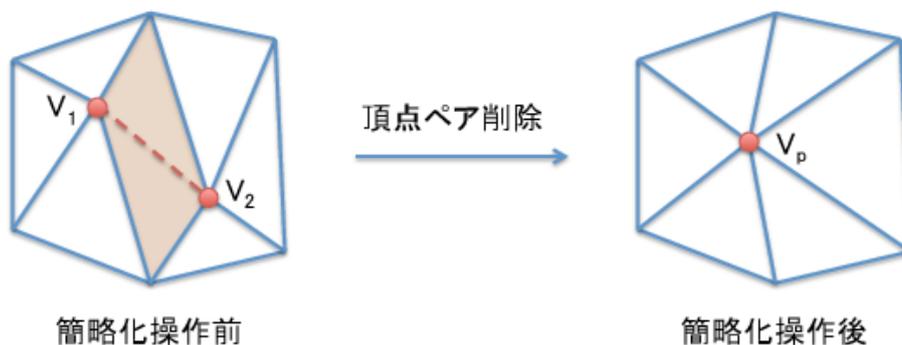


図 2.2: 頂点ペア削除メッシュ簡略化操作 1

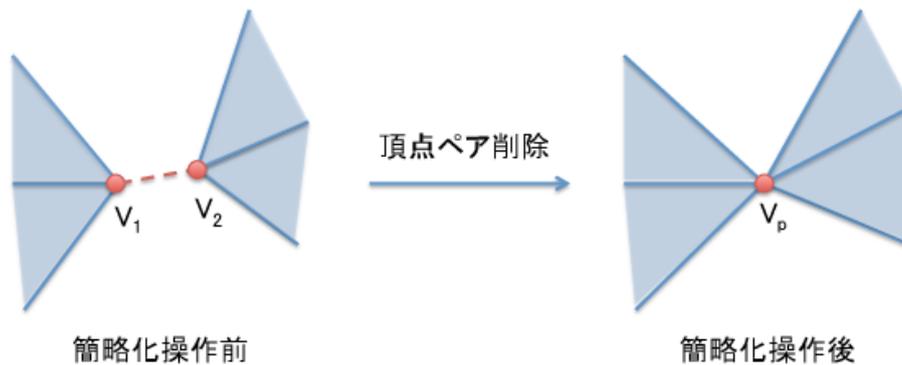


図 2.3: 頂点ペア削除メッシュ簡略化操作 2

Hamann ら [8]、Gieng98 ら [9] は三角形ポリゴン削除という簡略化操作を提案した。三角形ポリゴン削除は三角形ポリゴンの3つ頂点を一つの頂点に融合する操作である。その操作は2つのエッジ削除と同じ結果を得られる。図 2.4 は三角形ポリゴン削除メッシュ簡略化操作前後のメッシュを表す。



図 2.4: 三角形ポリゴン削除メッシュ簡略化操作

[Rossignac93][10] はセル削除というメッシュ簡略化操作を提案した。モデルはいくつかの目が見えないセルに分割される。セル削除は、一つのセルの範囲内にある全ての頂点を一つ頂点に融合する手法である。図 2.5 は二次元空間でセル削除メッシュ簡略化操作前後のイメージを表す。

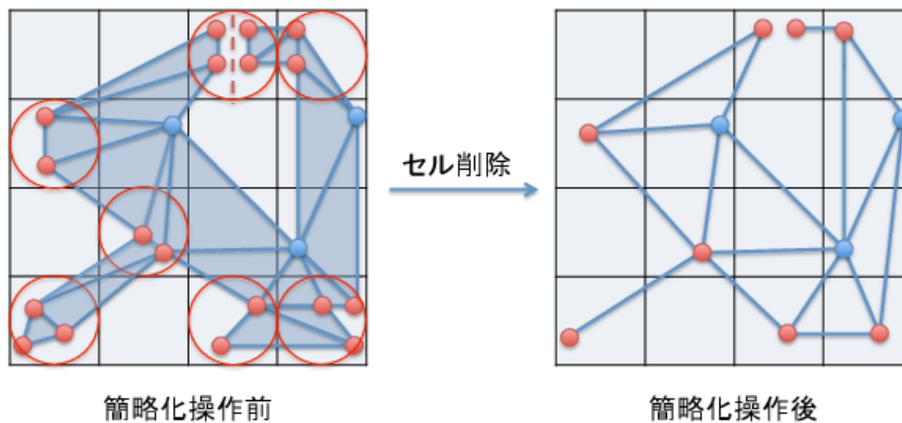


図 2.5: セル削除メッシュ簡略化操作

Schroeder ら [11] は頂点除去というメッシュ簡略化操作を提案した。頂点除去メッシュ簡略化操作はまず頂点と、その頂点の隣接エッジやポリゴン面と共に削除する。そのあと、削除操作で得た穴を三角形ポリゴンで細分割する。図 2.6 は頂点除去メッシュ簡略化操作の手順と頂点除去メッシュ簡略化操作によるメッシュの変化を表す。

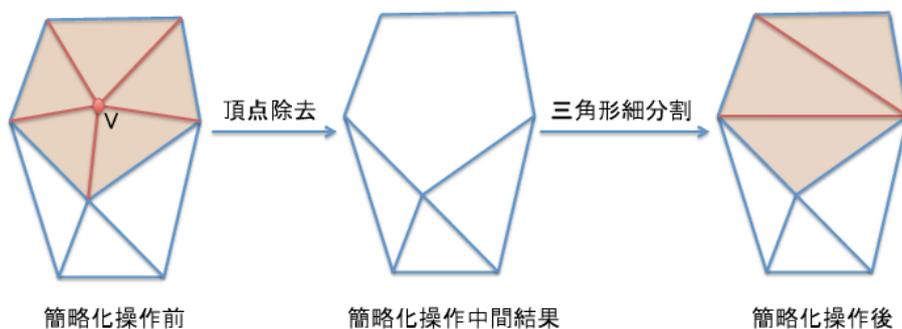


図 2.6: 頂点除去メッシュ簡略化操作

[Hinker93] ら [12] はポリゴン融合というメッシュ簡略化操作を提案した。ポリゴン融合メッシュ簡略化操作は頂点除去メッシュ簡略化操作と似ている。ポリゴン融合メッシュ簡略化操作はまず一つの頂点を共有するポリゴン群を一つの大きなポリゴンとして融合する。その後、その大きいポリゴンを三角形ポリゴンで細分割する。図 2.7 はポリゴン融合メッシュ簡略化操作の手順とポリゴン融合メッシュ

簡略化操作によるメッシュの変化を表す。

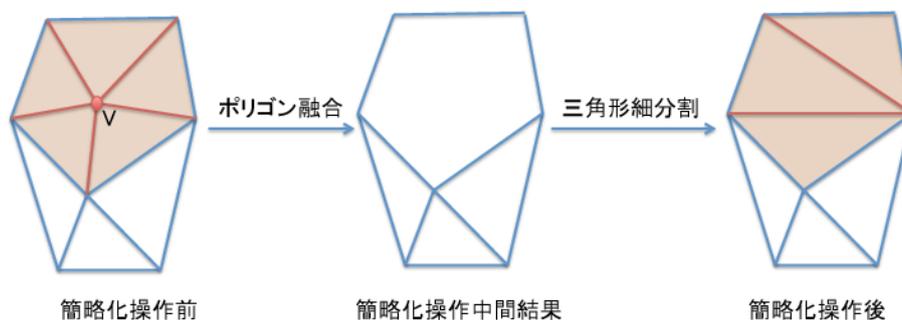


図 2.7: ポリゴン融合メッシュ簡略化操作

Floriani ら [13][14] はポリゴンセット切替というメッシュ簡略化操作を提案した。ポリゴンセット切替はポリゴンセット A をポリゴンセット B で切り替える手法である。ポリゴンセット A とポリゴンセット B は同じ境界線を持つ。図 2.8 はポリゴンセット切替メッシュ簡略化操作前後のメッシュを指す。

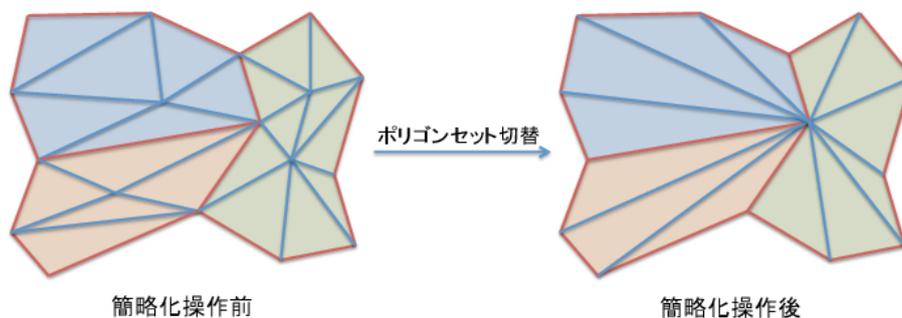


図 2.8: ポリゴンセット切替メッシュ簡略化操作

これらのメッシュ簡略化操作はそれぞれ異なる特性を持っている。例えば、「頂点除去」と「ポリゴン融合」のメッシュ簡略化操作後のメッシュは三角形細分割アルゴリズムによって異なる結果メッシュを出す場合がある。また、「エッジ削除」、「三角形ポリゴン削除」、「セル削除」、「頂点除去」、「ポリゴン融合」、「ポリゴンセットの切り替え」などメッシュ簡略化操作はメッシュの繋がっていない箇所を接続することができないが、「頂点ペア削除」メッシュ簡略化操作はメッシュの繋

がっていない箇所を接続することでメッシュモデルの接続性を変えることができる。メッシュモデルの接続性は応用事例によって重要性が変わるが、ゲームなどのインタラクティブビジュアライゼーションアプリケーションの場合、メッシュ簡略化するとき、メッシュモデルの接続性を維持するより、メッシュモデルの接続性を変えたほうが良い結果を獲得することが多い。また、「三角形ポリゴン削除」、「セル削除」のメッシュ簡略化操作の操作対象は連続している広い範囲のポリゴンセットとなる。そして、複数の「エッジ削除」によって実現できる。そのため、簡略化基準に対して、それらの操作で起こした誤差は「エッジ削除」より大きい。

本研究は簡略化基準に対する誤差が少ない「エッジ削除」とメッシュの接続性を変えられる「頂点ペア削除」をハイブリッドしたメッシュ簡略化操作を利用する。「エッジ削除」と「頂点ペア削除」をハイブリッドしたメッシュ簡略化操作はメッシュモデルの接続性を変えることだけではなく、メッシュモデルのトポロジーも変えることができる。トポロジーを変えられるメッシュ簡略化操作は他のトポロジーを変えられないメッシュ簡略化操作よりポリゴン数の少ないメッシュモデルまで簡略化することができる。メッシュモデルの応用事例によっては、トポロジーの重要性が大きい場合がある。例えば、CAD分野のモデル解析、医学分野CT(Computer-aided Tomography) やMRI(Magnetic Resonance Imaging) のスキャン、化学分野のタンパク質の構造分析などトポロジー情報はとても重要になる。しかし、インタラクティブビジュアライゼーションアプリケーションなどに応用する場合にはトポロジーの重要性が低い。例えば、ゲームを遊ぶとき、ユーザーからとても遠い所に車があり、その車の車輪は透かし彫りの穴が沢山あるとする。しかし、ユーザーは車からすごく離れた場所では車輪の透かし彫りの穴はほぼ見られない。このような、車輪のトポロジー性を維持するより、トポロジーの維持を考慮せずに簡略化した方が効率的だと思われる。

## 第 3 章

### メッシュ簡略化基準

本章はまず幾何的なメッシュ簡略化基準について述べる。その後、感性要素を重視した「イメージサリエンシー」と「メッシュサリエンシー」について紹介する。最後に、本研究で利用する「ハイブリッドサリエンシー」について説明する。

### 3.1 幾何的なメッシュ簡略化基準

「頂点と頂点の距離」、「頂点と平面の距離」、「ポリゴンとポリゴンの距離」など幾何的なメッシュ簡略化基準はメッシュ簡略化ではよく利用される。Rossignacら [10] は提案したセル崩壊簡略化操作ではセル範囲内にある全ての頂点を一つの頂点に融合する。その操作の簡略化基準はセルの大きさだが、簡略化対象となるセル範囲内の頂点間の距離は何れもセルの対角線より小さいため、その簡略化操作の簡略化基準は「頂点と頂点の距離」に分類される。

Cohen97ら [15] はメッシュ簡略化前の頂点とメッシュ簡略化後の頂点の間でマッピング関係を作る。一つの簡略化操作に対して、マッピング関係がある簡略化前後の頂点对の中で頂点对の距離の変化が一番大きいものはこの操作のコストになる。

Luebke97ら [16] はオクトリーの形で三次元空間を階層的にいくつかのセルに分割した。オクトリーの一つのノードは一つのセル（セル範囲内の全ての頂点は簡略化対象となる）と一つの頂点（簡略化操作の結果頂点）と関連する。このアルゴリズムはオクトリーで動的に簡略化操作基準となる「頂点と頂点の距離」（セルの対角線）を変えることで、階層的な簡略化結果メッシュモデルを生成することができる。図 3.1 の一つ例を表す。

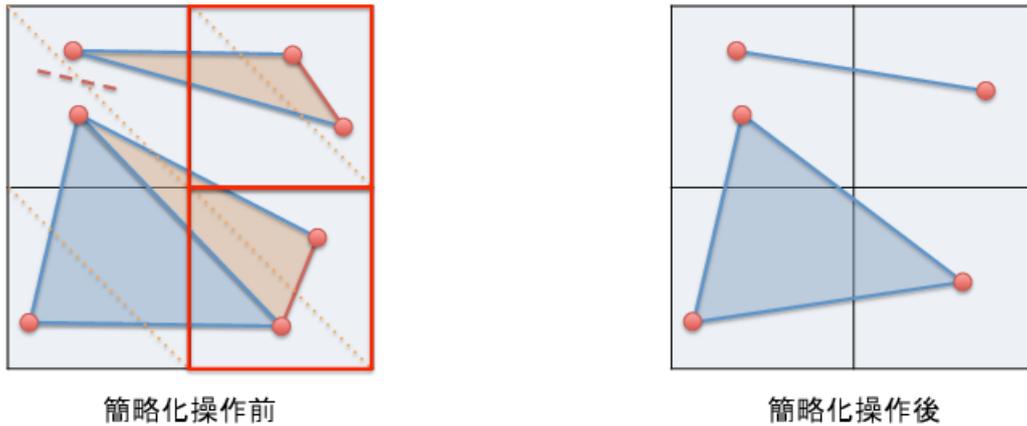


図 3.1: 頂点と頂点の距離メッシュ簡略化操作 1

確かに、「頂点と頂点の距離」という簡略化基準は理解しやすく実現も簡単などの長所がある。しかし、この簡略化基準はいつでも正確にメッシュの変化を表すことができない。例えば、図 3.2 の様に、左側と右側のメッシュモデル、それぞれ頂点間の距離は同じだが、異なるメッシュモデルであることが明らかに分かる。

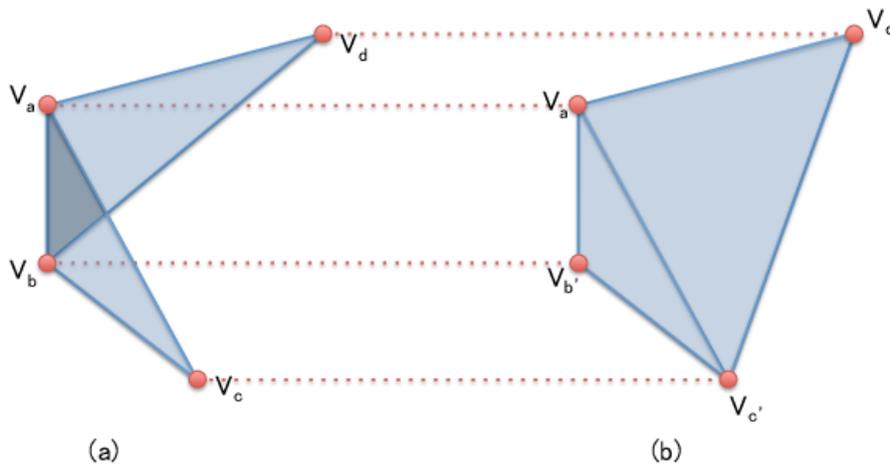


図 3.2: 頂点と頂点の距離メッシュ簡略化操作 2

Cohen らは [17] は「ポリゴン面とポリゴン面の距離」メッシュ簡略化基準を用いたメッシュ簡略化手法「Simplification Envelopes」を提案した。「ポリゴン面とポリゴン面の距離」メッシュ簡略化基準を用いたメッシュ簡略化アルゴリズムは

トポロジーを保護した簡略化結果モデルを取得することができる。しかし、トポロジーを保護した簡略化結果よりユーザー側から感覚的にオリジナルメッシュモデルと近い簡略化結果の方が重要なゲームなどインタラクティブビジュアルライザーションアプリケーションの場合には適応していない。

Ronfard ら [18] はエッジ崩壊簡略化操作後に生成した新たな頂点と、その新たな頂点に融合したオリジナルメッシュモデル頂点らの隣接ポリゴンが所属しているサポート平面らとの最大距離をメッシュ簡略化基準にした。ただし、このメッシュ簡略化基準は誤差をやや小さく評価する短所がある。図 3.3 の (a) では頂点と平面の距離の最大値  $d_b$  は丁度頂点とポリゴンの最短距離になる。図 3.3 の (b) では頂点と平面の距離の最大値  $d_c$  は大きく頂点とポリゴンの最短距離を評価した。図 3.3 の (c) では頂点と平面の距離の最大値  $d_b$  は小さく頂点とポリゴンの最短距離を評価した。

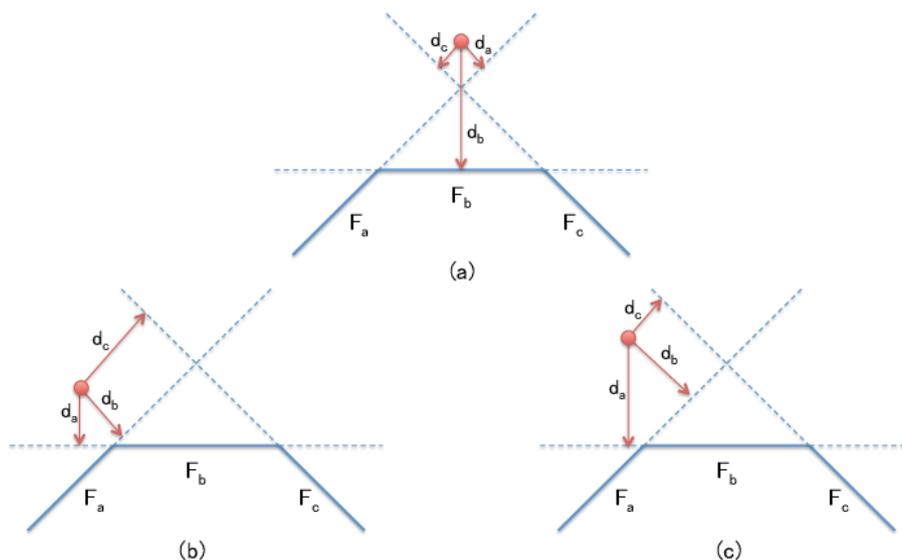


図 3.3: 頂点と平面の距離 - 誤差

Garland ら [1] は Ronfard らのアルゴリズムの上で、Error Quadrics というメッシュ簡略化基準を提案した。このメッシュ簡略化基準は新たな頂点とオリジナルモデルにあるポリゴン面をサポートする平面の距離の最大値の代わりに、新たな

頂点とオリジナルモデルにあるポリゴン面をサポートする平面の距離を足した結果にしている。このアルゴリズムは操作基準となるコストを計算するとき、簡単にエッジ崩壊操作対象となるエッジの両端頂点とマッピングする2つセットのサポート平面を代表するマトリックスを足すことだけで、簡略化操作で生成した新たな頂点とマッピングしているサポート平面を算出することができる。

$$E_v = \sum_{p \in \text{plane}(v)} (p \cdot v)^2 = \sum_p (v^T p)(p^T v) = v^T \left[ \sum_p (pp^T) \right] v = v^T \sum_p Q_p v = v^T Q_v v \quad (3.1)$$

本研究が用いたメッシュ簡略化基準はハイブリッドサリエンシーの重みを付けた Error Quadrics となる。

## 3.2 イメージサリエンシー

静止画像やビデオから、人が興味を引く領域を抽出する手法が注目されている。この技術はサリエンシーディテクション [19] と呼ばれ、ビデオの解析やビデオ圧縮などさまざまな分野に応用できるため、近年盛んに研究が行われている。本研究はサリエンシーディテクションをメッシュ簡略化での応用に着目した。

本論文では画像情報の RGB 値を利用し求めたサリエンシーマップをイメージサリエンシーと呼ぶ。イメージサリエンシーは入力画像に対する注目度の度合いを表すことができる。イメージサリエンシーを求める手法は数多く提案されている。その中でも Itti ら [20] が提案した入力画像の色情報から色相成分、輝度、方向成分を分析してイメージサリエンシーを作る手法がよく知られている。

これからイメージサリエンシーの求め方について述べる。イメージサリエンシーを求めには「ガウシアンフィルター操作」、「輝度色成分方向成分を求める」、「center-surround 操作」、「イメージサリエンシーを求める」の4つのステップが必要となる。

### 3.2.1 ガウシアンフィルタ操作

イメージサリエンシーの求めるには、先ず入力画像をガウシアンフィルタで異なる周波数の画像に分解する。本論文では  $\sigma$  を周波数とする。そして、入力画像からガウシアンフィルタで周波数  $\sigma = 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$  となる画像を求める。

### 3.2.2 輝度、色成分、方向成分の算出

イメージサリエンシーの求めるには、入力画像から生成した異なる周波数画像の各ピクセルの輝度、色成分、方向成分を計算する必要がある。本研究では周波数  $\sigma = 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$  となる各画像の輝度、色成分、方向成分を計算する。

周波数が  $\sigma$  となる画像のピクセルの RGB 成分を、赤成分  $r(\sigma)$  緑成分  $g(\sigma)$  青成分  $b(\sigma)$  としたとき、その画像に対する各ピクセルの輝度  $i(\sigma)$  の数値は式 (3.2) のように計算する。

$$i(\sigma) = \frac{r(\sigma) + g(\sigma) + b(\sigma)}{3} \quad (3.2)$$

周波数が  $\sigma$  となる画像のピクセルに対して、そのピクセルの正規化した RGB 成分を使って、色相成分として赤  $R(\sigma)$ ・緑  $G(\sigma)$ ・青  $B(\sigma)$ ・黄  $Y(\sigma)$  各値を式 (3.2) で求める。本論文は周波数  $\sigma$  となる画像の各ピクセルを式 (3.3) で数値変換で生成した結果画像を  $C_R(\sigma)$  とする。周波数  $\sigma$  となる画像の各ピクセルを式 (3.4) で数値変換で生成した結果画像を  $C_G(\sigma)$  とする。周波数  $\sigma$  となる画像の各ピクセルを式 (3.5) で数値変換で生成した結果画像を  $C_B(\sigma)$  とする。周波数  $\sigma$  となる画像の各ピクセルを式 (3.6) で数値変換で生成した結果画像を  $C_Y(\sigma)$  とする。

$$R(\sigma) = r(\sigma) - \frac{g(\sigma) + b(\sigma)}{2} \quad (3.3)$$

$$G(\sigma) = g(\sigma) - \frac{r(\sigma) + b(\sigma)}{2} \quad (3.4)$$

$$B(\sigma) = b(\sigma) - \frac{r(\sigma) + g(\sigma)}{2} \quad (3.5)$$

$$Y(\sigma) = \frac{r(\sigma) + g(\sigma)}{2} - \frac{|r(\sigma) - g(\sigma)|}{2} - b(\sigma) \quad (3.6)$$

周波数が  $\sigma$  となる画像の方向成分  $O(\sigma, \theta)$  は式 (3.7) で計算する。本論文は周波数  $\sigma$  となる画像の各ピクセルを式 (3.2) で数値変換で生成した結果画像を  $I(\sigma)$  とする。そして、 $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$  の四方向に対してその方向成分を求める。

$$o(\sigma, \theta) = \sum_{x=-h_n}^{h_m} \sum_{y=-h_n}^{h_m} (I(\sigma, m, n)\psi(\theta, x - m, y - n)) \quad (3.7)$$

$I(\sigma, m, n)$  は  $I(\sigma)$  における  $(m, n)$  座標の数値を指す。 $\psi(\theta)$  を周波数が  $\sigma$  となる画像のガボール・フィルタとすると、 $h_m$  と  $h_n$  はそれぞれガボール・フィルタの  $x$  方向と  $y$  方向のサイズを指す。 $\psi(\theta, x - m, y - n)$  は周波数が  $\sigma$  となる画像のガボール・フィルタ  $\psi(\theta)$  の  $(x - m, y - n)$  座標の成分を表す。

### 3.2.3 center-surround 操作

本節の center-surround 操作は 2 つの異なる周波数画像の各ピクセルの輝度色成分方向成分の差異を求める操作を指す。本研究では

「周波数  $(\sigma_1, \sigma_2) = (2, 5), (2, 6), (3, 6), (3, 7), (4, 7), (4, 8)$ 」の 6 ペアの画像に対して center-surround 操作を行う。

周波数画像  $\sigma_1$  となる画像と周波数画像  $\sigma_2$  となる画像のピクセル間の輝度の差異は (3.8) で求める。

$$i(\sigma_1, \sigma_2) = |i(\sigma_1) - i(\sigma_2)| \quad (3.8)$$

周波数画像  $\sigma_1$  となる画像と周波数画像  $\sigma_2$  となる画像のピクセル間の色成分の差異は (3.9) と (3.10) で求める。

$$RG(c, s) = |(R(c) - G(c)) - (G(s) - R(s))| \quad (3.9)$$

$$BY(c, s) = |(B(c) - Y(c)) - (Y(s) - B(s))| \quad (3.10)$$

周波数画像  $\sigma_1$  となる画像と周波数画像  $\sigma_2$  となる画像の方向成分の差異は (3.11) で求める。本研究は  $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$  の四方向に対してその差異を求める。

$$O(c, s, \theta) = |O(c, \theta) - O(s, \theta)| \quad (3.11)$$

### 3.2.4 イメージサリエンスの算出

最後に入力画像からガウシアンフィルタで得たすべての周波数領域画像に対する center-surround 操作の結果のシングルピークを強調、マルチピークを抑制、積算で一つの図にまとめる。そして、まとめた結果図のピクセルの最大数値  $M$  を計算し、各ピクセルの数値を  $M$  で割り算することで、各ピクセルの数値を 0 から 1 までの範囲にさせて正規化する。その正規化した画像はイメージサリエンスとなる。図 3.4 はスタンフォードバニーのイメージサリエンスの入力画像とイメージサリエンスの出力画像となる。



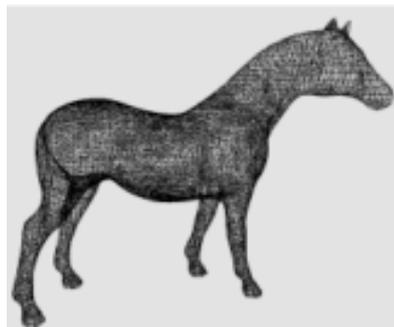
レンダリング画像



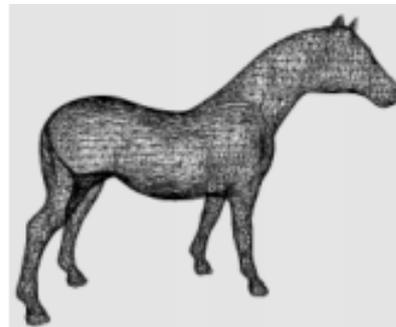
イメージサリエンス

図 3.4: イメージサリエンス

Luebke ら [2] はイメージサリエンスを利用し、メッシュ簡略化手法を提案した。しかし、この手法は特定した視点だけに応用できる。視点が不自由という短所がある。図 3.5 は Luebke らが提案した手法の実験結果を表す。



オリジナルモデル



簡略化されたモデル

図 3.5: Luebke らのメッシュ簡略化実験結果

イメージサリエンスは輝度、色相成分、方向成分など色情報に対する分析と計算で輝度、色相成分、方向成分など色情報を考慮した注目度の度合いを表すことができる。イメージサリエンスはメッシュ簡略化にも応用できるが、観察視点が特定されているため、効果を反映できる視点は限られているという欠点がある。本研究はイメージサリエンスの輝度、色相成分、方向成分など色情報を考

慮した注目度の度合いを表すことができるという特徴を持つうえで、視点の制限がないという特徴も持つハイブリッドサリエンシーを提案する。具体的には3.4節で述べる。

### 3.3 メッシュサリエンシー

Itti らはある範囲内の画素がすべて同じ輝度を持つとき、その範囲内の画素に対応するサリエンシーの値をゼロにした。それに対して、Lee ら [3] は三次元の場合のサリエンシーがメッシュの形状のみからサリエンシーを算出した。Lee らの提案によると、どんな場合でも変わったりしない曲率を持つ球のメッシュのすべての頂点に対応するサリエンシーはゼロになる。そして、一般的な三次元メッシュモデルのサリエンシーは曲率から求める。Lee らが提案した曲率のみから求めるサリエンシーを本研究ではメッシュサリエンシーと呼ぶ。

本節では Lee らが提案したメッシュサリエンシーの求め方について述べる。メッシュサリエンシーを求めるには「平均ガウス曲率を求める」、「center-surround 操作」、「非線形縮小操作」の三つのステップが必要となる。

#### 3.3.1 平均ガウス曲率の算出

メッシュサリエンシーを求めるには、まずメッシュの各頂点の近似曲率を求める。以下、本論文では近似曲率のことを単に「曲率」と呼称するものとする。メッシュの曲率の求め方は複数ある。Schneider ら [21]、Moreton ら [22] は四次元 PDE を用いた曲率の求め方を提案した。Taubin ら [23]、Mayer ら [24]、Desbrun ら [25] は Laplace-Beltrami 演算子を用いた曲率の求め方を提案した。Meyer ら [26] はボロノイ有限要素法を用いた曲率の求め方を提案した。Dyn ら [27]、Cohen-Steiner ら [28]、Alliez ら [29] は Normal cycle を用いた曲率の求め方を提案した。Taubin ら [30] はテンソル分析とマトリックスの特徴ベクトル分析を用いた曲率の求め方を提案した。Lee らは Taubin らの提出した曲率を求める手法を利用して各頂点の

曲率を求めた。各頂点は一つの曲率値を持つから、頂点と曲率は写像関係を構築できる。そのマッピング関係を  $c$  とすると、頂点  $v$  での曲率を  $c(v)$  とする。

その後、メッシュ各頂点の曲率から平均ガウス曲率を求める。平均ガウス曲率を求めるには、頂点の曲率の他、周囲にある頂点セットの曲率も必要となる。頂点  $v$  から  $\sigma$  距離範囲内の頂点セットを  $N(v, \sigma)$  で表示すると、 $N(v, \sigma) = \{x \mid \|x - v\| < \sigma\}$  が成立する。 $x$  はメッシュに所属する頂点である。 $G(c(v), \sigma)$  で平均ガウス曲率を表示すると、

$$G(c(v), \sigma) = \frac{\sum_{x \in N(v, 2\sigma)} c(x) \exp[-\|x - v\|^2 / (2\sigma^2)]}{\sum_{x \in N(v, 2\sigma)} \exp[-\|x - v\|^2 / (2\sigma^2)]} \quad (3.12)$$

が成立する。

### 3.3.2 center-surround 操作

center-surround 操作は受容野で行われている視覚情報の特徴信号を抽出する操作の原理と同じである。Lee らは式 (3.13) に異なる閾値  $\sigma$  で算出した平均ガウス曲率を入力データとして、「仮メッシュサリエンシー」を取得した。頂点  $v$  の仮メッシュサリエンシーは大きい閾値で算出した平均ガウス曲率と小さい閾値で算出した平均ガウス曲率の差となる。

$$c_i(v) = |G(c(v), \sigma) - G(c(v), 2\sigma)| \quad (3.13)$$

特定な閾値  $\sigma$  で特定の「仮メッシュサリエンシー」を算出できるが、異なる閾値  $\sigma$  で取得した「仮メッシュサリエンシー」は異なる特徴信号を持つ。閾値  $\sigma$  を調節することで異なる特徴を持つ「仮メッシュサリエンシー」を算出することができる。同じメッシュモデルから異なる閾値  $\sigma$  で取得した「仮メッシュサリエンシー」が異なる。そのため、単一の「仮メッシュサリエンシー」は局所的なサリエンシー特徴しか表示できない。全面的なサリエンシー結果を取得するには、異なる閾値で算出した「仮メッシュサリエンシー」を一つにまとめる必要がある。Lee

らは五つの閾値  $\sigma_i \in 2\varepsilon, 3\varepsilon, 4\varepsilon, 5\varepsilon, 6\varepsilon$  で算出した「仮メッシュサリエンシー」をまとめた。 $\varepsilon$  はメッシュモデルの境界ボックスの対角線の長さの 0.3% となる。

### 3.3.3 非線形縮小操作

Lee らは異なる閾値で算出した「仮メッシュサリエンシー」を一つにまとめるとき、非線形縮小操作を利用した。非線形縮小操作は少数な大きい極大値を持つ「仮メッシュサリエンシー」を促進し、多数な小さい極大値を持つ「仮メッシュサリエンシー」を抑制することで高いサリエンシー数値を持つ頂点数を減少させることができる。非線形縮小操作するにはまずまとめ対象となる「仮メッシュサリエンシー」セットを全部正規化する。その後、正規化した「仮メッシュサリエンシー」の各数値を (3.14) で計算する。

$$\mathcal{M}_s(v) = \mathcal{M}(v)(\mathcal{M}_M - \mathcal{M}_{\bar{m}}) \quad (3.14)$$

$\mathcal{M}$  は非線形縮小操作前の仮メッシュサリエンシーを指す。 $\mathcal{M}_{\bar{m}}$  は仮メッシュサリエンシーの全てのピック値 ( 特定な範囲内の最大値 ) の平均値を指す。 $\mathcal{M}_M$  は仮メッシュサリエンシーの最大値を指す。 $\mathcal{M}_s$  は非線形縮小操作後の仮メッシュサリエンシーを指す。

最終的なメッシュサリエンシー結果は式 (3.15) のように非線形縮小操作  $S$  で処理した各「仮メッシュサリエンシー」を積算で一つにまとめる。

$$\mathcal{M} = \sum_i S(\mathcal{M}(v_i)) \quad (3.15)$$

図 3.6 は Lee らが生成したメッシュサリエンシーを表した図である。(a)(b)(c)(d)(e) は異なる閾値で算出した仮メッシュサリエンシーである。(f) は (a)(b)(c)(d)(e) から非線形縮小操作で一つにまとめたメッシュサリエンシーである。

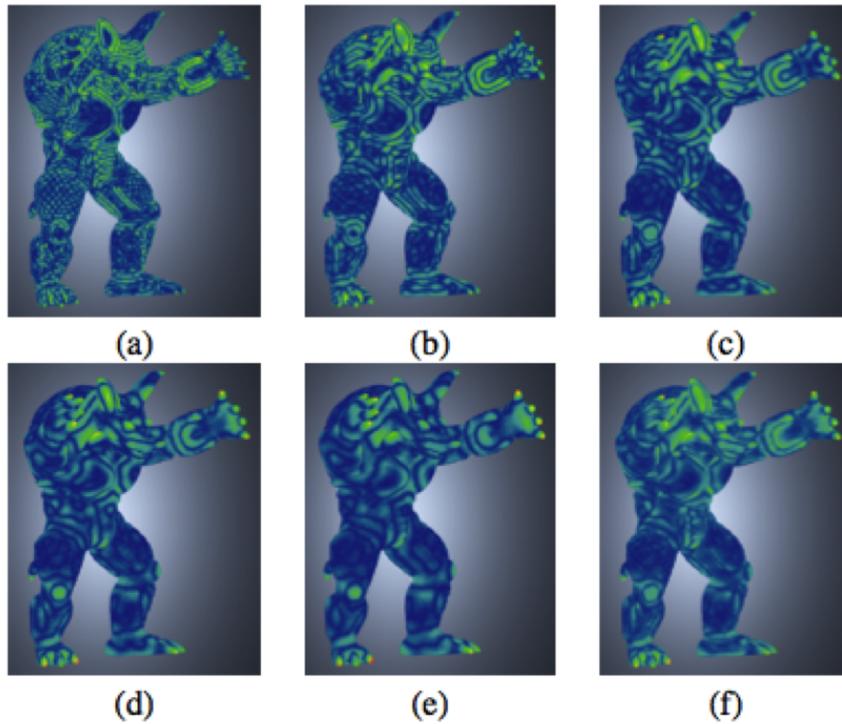


図 3.6: Lee らが生成したメッシュサリエンシー

### 3.4 ハイブリッドサリエンシー

レンダリング画像の色情報から求めたイメージサリエンシーは輝度、色相成分、方向の特徴を考慮した注意度の度合いを表すものである。しかし、メッシュモデルのレンダリング画像はユーザー側の観察視点と共に変化していく。一つの視点で取得したメッシュモデルのレンダリング画像はその視点で観察したメッシュモデルの特徴だけを表現することができる。他の視点で観察したメッシュモデルの特徴を表現することができない。そのため、ある視点のレンダリング画像の色情報から求めたイメージサリエンシーはその視点の場合しか使用できない。三次元の世界に応用する場合、観察視点が制限されるという短所がある。また、曲率から求めたメッシュは観察視点の制限がないが、色情報など考慮していないため、実際のユーザーがメッシュモデルを観察するときの注意度の度合いを表現すること

ができない。例えばあるメッシュモデルは左側が良く光に照明されているから良く観察できるが、右側が余り光に照明されていないため、殆ど詳細部が見えない。しかし、メッシュサリエンシーは色情報など考慮していないため、良く照明されていない観察しにくい箇所でもサリエンシー数値が高い場合がある。その場合のサリエンシーは実際のユーザーがメッシュモデルを観察するときの注意度の度合いを反映することができない。

本研究はそれらの問題を解決するために、ハイブリッドサリエンシーを提案する。これからはハイブリッドサリエンシーの求め方について述べる。ハイブリッドサリエンシーを求めには「各頂点の曲率とメッシュサリエンシーと多視点イメージサリエンシー特徴値を算出する」、「算出した各頂点の属性を分析し分類し仮ハイブリッドサリエンシーを確定する」、「各頂点の仮ハイブリッドサリエンシーを其々指定しているハイブリッドサリエンシー範囲まで数値変換する」の三つのステップが必要となる。

### 3.4.1 頂点の各特性値算出

本研究はハイブリッドサリエンシーを用いたメッシュ簡略化手法を提案する。ハイブリッドサリエンシーは曲率とメッシュサリエンシーと多視点イメージサリエンシー特徴値から求める。本研究は視点イメージサリエンシー最大値と多視点イメージサリエンシー最小値と多視点イメージサリエンシー平均値を視点イメージサリエンシー特徴値とする。ハイブリッドサリエンシーを求めるには、本研究はまず Taubin らの手法で各頂点の曲率を求める。そして、求めた各頂点の曲率を利用して第 3.3 節で紹介したメッシュサリエンシーの求め方で各頂点のメッシュサリエンシーを求める。その後、多数な観察視点で取得したイメージから第 3.2 節で紹介したイメージサリエンシーの求め方で各頂点の多視点イメージサリエンシー最大値最小値平均値の三つの特徴値を抽出する。イメージサリエンシーの特徴値を求めるには、まず対象メッシュモデルの中央点  $C$  を球心としてモデルを観察するための球型ボリュームを作る。本研究は対象メッシュの境界ボックスの中心点を

球型ボリュームの球心とする。対象メッシュの境界ボックスの対角線の長さの1.4倍を観察球型ボリュームの半径とする。そのあと、カメラを観察球型ボリュームに置き、カメラの向きを球型ボリュームの球心向きに設定し、レンダリング画像を取得する。本研究はカメラの置く位置を式 (3.16) で計算する。

$$\begin{cases} x = x_{\bar{m}} + R \sin(\alpha_i) \cos(\beta_i) \\ y = y_{\bar{m}} + R \sin(\alpha_i) \sin(\beta_i) \\ z = z_{\bar{m}} + R \cos(\alpha_i) \\ \alpha_i \in \left\{ \frac{2n_1\pi}{N_1}; n_1 = 0, 1, 2, \dots, N_1 - 1 \right\} \\ \beta_i \in \left\{ \frac{2n_2\pi}{N_2}; n_2 = 0, 1, 2, \dots, N_2 - 1 \right\} \end{cases} \quad (3.16)$$

座標  $(x_{\bar{m}}, y_{\bar{m}}, z_{\bar{m}})$  はメッシュモデルの境界ボックスの中心である。メッシュモデルの境界ボックスはメッシュモデルの各頂点の座標  $x$  座標  $y$  座標  $z$  の最大値と最小値から構成したボックスのことである。  $N_1$  と  $N_2$  はカメラサンプリングポイントの数を決めるパラメータである。本研究では  $N_1$  と  $N_2$  を 36 に設定することでカメラサンプリングポイントを  $36 \times 36$  個を算出する。算出したカメラサンプリングポイントセットから同じ座標を持つポイントを削除し、異なるポイントのみを保留する。保留したポイントセットはカメラサンプリングするためのポイントとなる。

その後、これらのカメラサンプリングポイントで撮ったレンダリング画像から第 3.2 節で紹介した手法でイメージサリエンスを求める。その後、メッシュの各頂点と全部のイメージサリエンスとのマッピング関係を作る。一つの頂点に対して、マッピングしたイメージサリエンスと対応できる数値がない場合がある。例えば、20 枚のサンプリングしたレンダリング画像では頂点 A を見えるのは 5 枚がある場合、頂点 A とマッピングできるイメージサリエンス数値は 5 つがある。その他の 15 枚イメージサリエンスは頂点 A と対応できる数値はないため、その対応値をゼロにする。一つのイメージサリエンスに対して、マッピングできない頂点がある場合がある。例えば、サンプリングしたレンダリング画像では頂点 B を見えない場合、そのサンプリングしたレンダリング画像から生成したイメージサリエンスは頂点 B とマッピングすることができない。そのとき、頂点 B はそのイメージサリエンスとの対応値をゼロにする。以上の方法で各頂点は複数

のイメージサリエンス対応値を持つ。その対応値は各頂点の異なる視点でのイメージサリエンスを表す。本研究は各頂点の複数のイメージサリエンス対応値から最大値と最小値と平均値を求める。求めた最大値と最小値と平均値は各頂点の多視点イメージサリエンス最大値と多視点イメージサリエンス最小値と多視点イメージサリエンス平均値となる。

### 3.4.2 仮ハイブリッドサリエンスの確定

第3.4.1節により各頂点は曲率、メッシュサリエンス、多視点イメージサリエンス最大値、多視点イメージサリエンス最小値、多視点イメージサリエンス平均値の五つの属性を算出した。本研究では各頂点の属性により頂点を五種類に分類する。そして、異なる種類の頂点は異なる属性を仮ハイブリッドサリエンスとする。具体的には、曲率が大きい頂点はその周辺の形状の変化が大きいため、それらの頂点をピックアップして分類Aとする。それらの頂点の「曲率」は各頂点の仮ハイブリッドサリエンスとする。そして、メッシュサリエンスが大きい頂点はその頂点の周辺が形状から求めた注目度の度合いが大きいため、それらの頂点をピックアップして分類Bとする。それらの頂点の「メッシュサリエンス」は各頂点の仮ハイブリッドサリエンスとする。多視点イメージサリエンスの最小値が大きい頂点はどんな視点でも色情報から求めた注目度の度合いが大きいため、それらの頂点をピックアップして分類Cとする。それらの頂点の「多視点イメージサリエンス最小値」は各頂点の仮ハイブリッドサリエンスとする。多視点イメージサリエンスの最大値が小さい頂点はどんな視点でも色情報から求めた注目度の度合いが小さいから、それらの頂点をピックアップして分類Dとする。それらの頂点の「多視点イメージサリエンス最大値」は各頂点の仮ハイブリッドサリエンスとする。残りの他の頂点は分類Eとする。それらの頂点の「多視点イメージサリエンス平均値」と「メッシュサリエンス」の平均値を各頂点の仮ハイブリッドサリエンスとする。

### 3.4.3 ハイブリッドサリエンシーの算出

第 3.4.1 項によりメッシュモデルの各頂点を五種類に分類した。そして、五種類の頂点の仮ハイブリッドサリエンシーを確定できた。本研究では各種類の頂点の仮ハイブリッドサリエンシーを図 3.7 のようにハイブリッドサリエンシーに数値変換する。変換された数値は本研究が提案した各頂点のハイブリッドサリエンシーとなる。



図 3.7: 各頂点の仮ハイブリッドサリエンシーを其々指定しているハイブリッドサリエンシー範囲まで数値変換する

以上の方法で、各頂点のハイブリッドサリエンシーを算出する。図 3.8 と図 3.9 は本研究の手法で算出したハイブリッドサリエンシーである。

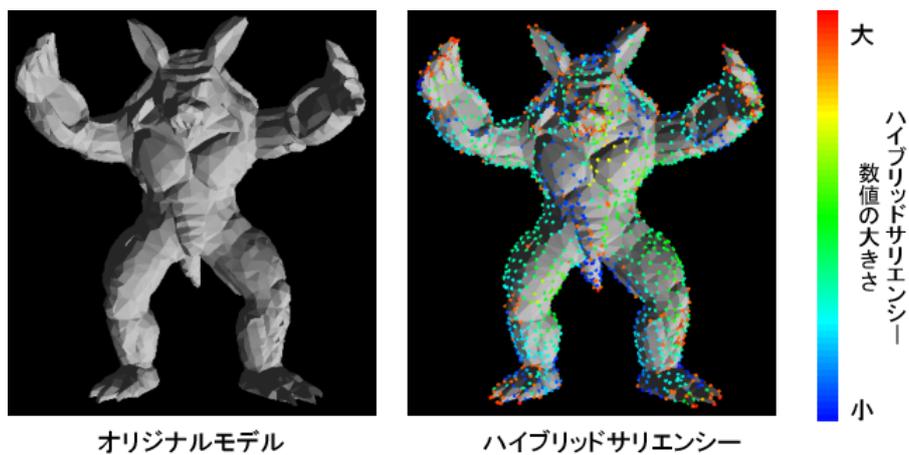


図 3.8: ハイブリッドサリエンスーの色表示 (正面)

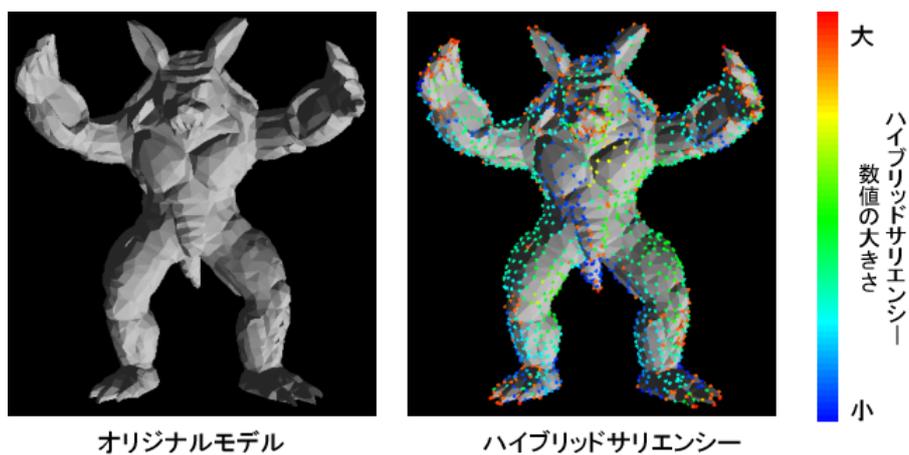


図 3.9: ハイブリッドサリエンスーの色表示 (背面)

## 第 4 章

# ハイブリッドサリエンシーを用いた メッシュ簡略化

本章はハイブリッドサリエンシーを用いたメッシュ簡略化について述べる。本研究はハイブリッドサリエンシーを用いてメッシュ簡略化する。本研究のメッシュ簡略化操作は第2章で述べた「エッジ削除」と「頂点ペア削除」になる。本研究のメッシュ簡略化基準は第3章で述べたQEMをハイブリッドサリエンシーで重み付けたものとする。QEMは頂点と頂点周囲の平面の二乗和を表すものである。

メッシュ簡略化の際は色々な操作が行われる。それらの操作を管理するアルゴリズムをメッシュ簡略化フレームワークと呼ぶ。メッシュ簡略化フレームワークは大体「外部最適化」と「内部最適化」との二種類から構成される。外部最適化は位相操作を行う前に「どんな位相操作を行うか」と「どんな順番で位相操作を行うか」を決める。例えばGarlandらはQEMによって全てのエッジや頂点ペアに簡略化操作のコストを算出する。そして、このコストで位相操作（簡略化操作）の順番を決める。内部最適化は位相操作を行う際に位相操作内部でこの位相操作の結果を最適化することを決める。例えば、一つのエッジ削除操作に対して、どうやって新たな頂点を一番適切な位置にするかを決める。メッシュ簡略化は「外部最適化」と「内部最適化」によって最適化した位相操作からメッシュ簡略化結果を生成する。Luebkeら[31]はメッシュ簡略化フレームワークを「非最適化フレームワーク」、「最大限最適化フレームワーク」、「軽量最適化フレームワーク」、「見積もり最適化フレームワーク」、「独立最適化フレームワーク」、「インターリーブ最適化フレームワーク」の6種類に分類した。本研究は「最大限最適化フレームワーク」を利用する。「最大限最適化フレームワーク」はコスト算出関数を利用して外部最適化を行う。本研究ではコスト算出関数は式(4.1)となる。

$$C(e) = Q(e) \times \mathcal{H}(e); \quad (4.1)$$

$C(e)$ はエッジ $e$ のコストを指す。 $Q(e)$ はエッジ $e$ のQEM簡略化誤差を指す。 $\mathcal{H}(e)$ はエッジ $e$ のハイブリッドサリエンシーを指す。エッジ $e$ のコストはエッジ $e$ のQEM簡略化誤差とエッジ $e$ のハイブリッドサリエンシーの掛け算結果になる。

本研究は先ず全ての簡略化操作可能であるエッジのコストを算出する。その後、

全てのエッジをコストの大きいものからコストの小さいものまで一列に並ぶ。その一列の最後尾は一番コストの小さいエッジとなる。この一番コストの小さいエッジは簡略化操作の対象となる。このエッジを対象にした簡略化操作を行う前に、一列からこのエッジを削除する。そして、このエッジを対象にした簡略化操作を行った後に、エッジ削除や頂点ペア削除簡略化操作の結果頂点を式 (4.2) と式 (4.3) で更新する。そして、この簡略化操作対象となったエッジと隣接した全てのエッジのコストを更新して、一列をもう一回エッジのコストの大きいものからコストの小さいものまで並ぶ。それにより次の簡略化操作の際に、一連の最後尾にあるエッジは一番コストが小さいものを保証できる。以上の一連な操作を繰り返し、目標頂点数までメッシュ簡略化操作を続ける。

$$\mathcal{H}(V_r) = (\mathcal{H}(V_1) + \mathcal{H}(V_2))/2.0 \quad (4.2)$$

$$Q(V_r) = (Q(V_1) + Q(V_2))/2.0 \quad (4.3)$$

$V_r$  は簡略化操作の結果頂点を指す。 $V_1$  と  $V_2$  は簡略化操作の対象となるエッジの 2 つ端点を指す。 $\mathcal{H}(V_r)$  は簡略化操作の結果頂点のハイブリッドサリエンスを指す。 $\mathcal{H}(V_1)$  と  $\mathcal{H}(V_2)$  は簡略化操作の対象となるエッジの 2 つ端点のハイブリッドサリエンスを指す。 $Q(V_r)$  は簡略化操作の結果頂点の QEM 算出用のマトリックスを指す。 $Q(V_1)$  と  $Q(V_2)$  は簡略化操作の対象となるエッジの 2 つ端点の QEM 算出用のマトリックスを指す。

以上の方法でハイブリッドサリエンスを用いたメッシュ簡略化を行う。グラフィクス API は OpenGL[32] をもとにした 3DCG ツールキットである Fine Kernel Toolkit System[33][34] を利用した。

図 4.1,4.2,4.3,4.4 は 5000 ポリゴンの Armadillo モデルからハイブリッドサリエンスを用いたメッシュ簡略化手法で獲得した簡略化結果メッシュモデルの正面と背面の観察図である。



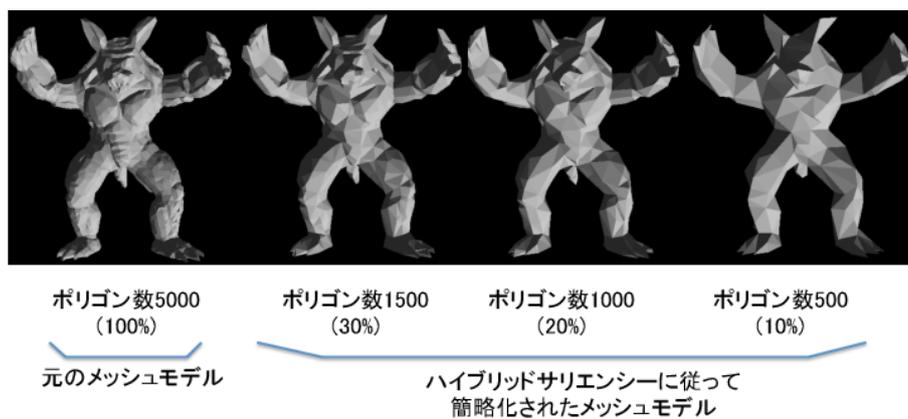


図 4.3: ハイブリッドサリエンシーを用いたメッシュ簡略化結果 2 (正面)

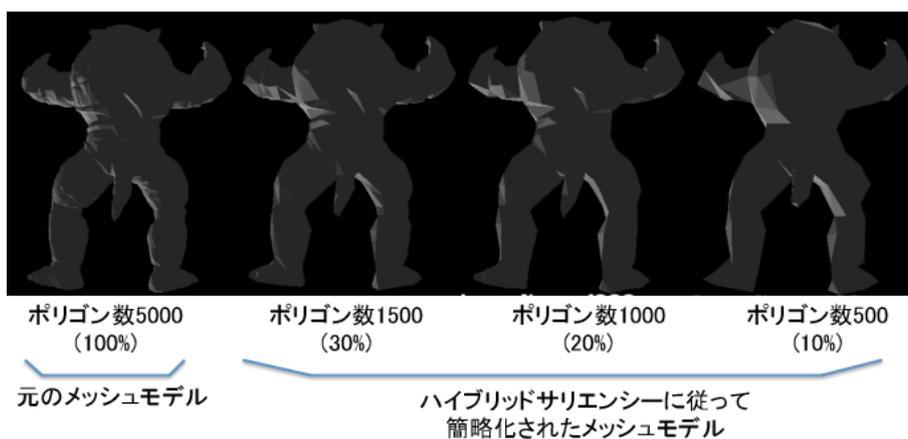


図 4.4: ハイブリッドサリエンシーを用いたメッシュ簡略化結果 2 (背面)

# 第 5 章

## 評価と検証

本章は「既存研究との比較」と「Metro を用いた結果評価」と「アンケート評価」の3つの方面から本研究が提案した手法を評価する。そして、処理速度について実験を検証する。

## 5.1 既存研究との比較

本節は「Garland らが提案した簡略化操作前後の頂点と隣接ポリゴン面の距離の変化という基準を用いたメッシュ簡略化」と「本研究が提案したハイブリッドサリエンシーを用いたメッシュ簡略化」、そして「Lee らが提案したメッシュサリエンシーを用いたメッシュ簡略化」と「本研究が提案したハイブリッドサリエンシーを用いたメッシュ簡略化」について述べる。

図 5.1 と図 5.2 は Garland らの手法と本研究の手法のメッシュ簡略化結果の比較である。ポリゴン数 5000 のメッシュモデルからポリゴン数 500 に簡略化するとき、Garland らの手法で得た簡略化結果モデルは指や耳など注意度の度合いが高い箇所の特徴が失っているが、本研究が提案した手法で得た簡略化結果モデルはそれらの注目度の度合いが高い箇所の特徴が失っていないことを確認できる。そして、図 5.3 と図 5.4 は Lee らの手法と本研究の手法のメッシュ簡略化結果の比較である。ポリゴン数 5000 のメッシュモデルからポリゴン数 1000 に簡略化するとき、Lee らの手法で得た簡略化結果モデルは正面の左耳と右手の指や背面の背中など陰影の特徴が失っていないが、本研究はそれらの特徴が失っていないことを確認できる。以上の既存研究の手法と比較することで本研究が提案した手法で得た簡略化結果モデルの品質は既存研究の手法より向上したことを確認できる。

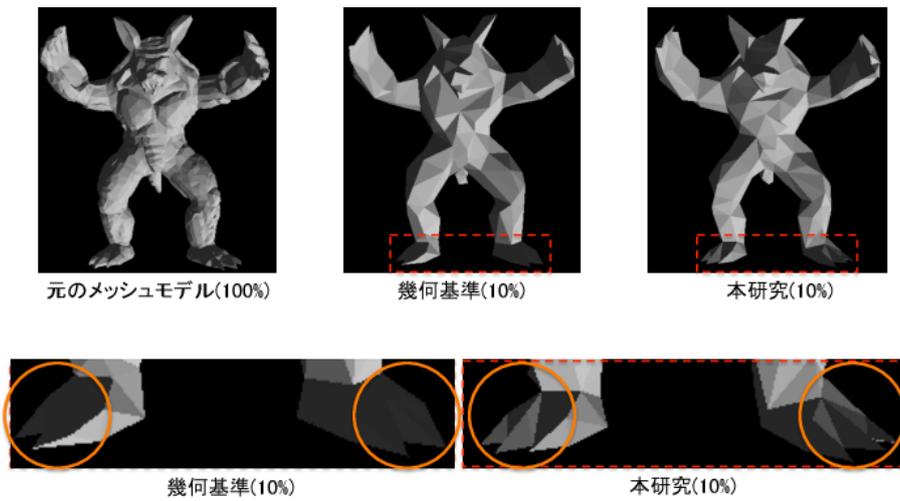


図 5.1: Garland らの手法と本研究手法の簡略化結果比較 (正面)

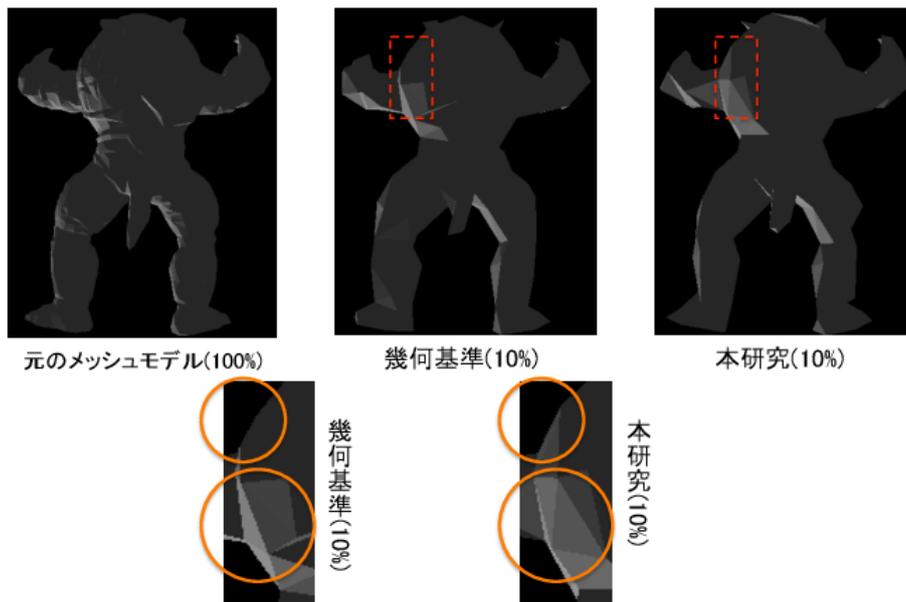


図 5.2: Garland らの手法と本研究手法の簡略化結果比較 (背面)

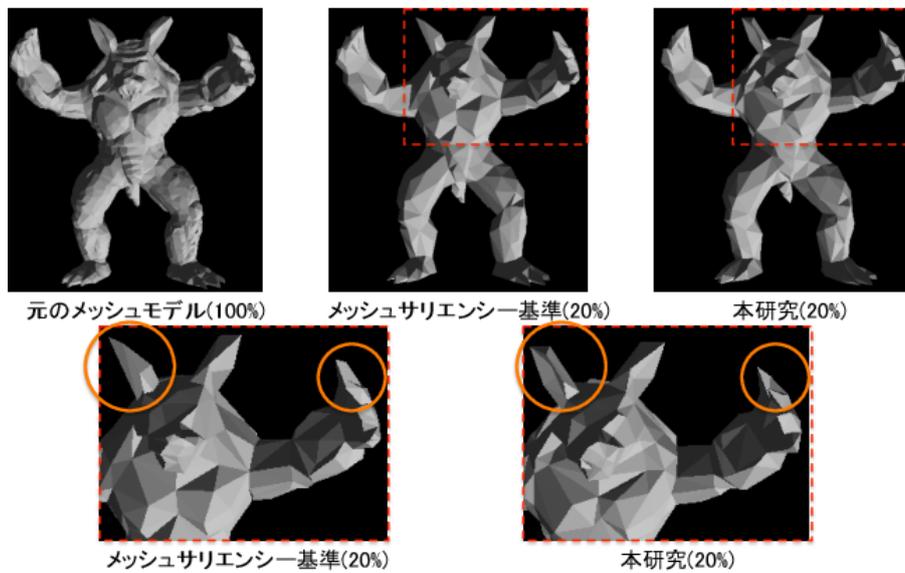


図 5.3: Lee らの手法と本研究手法の簡略化結果比較 (正面)

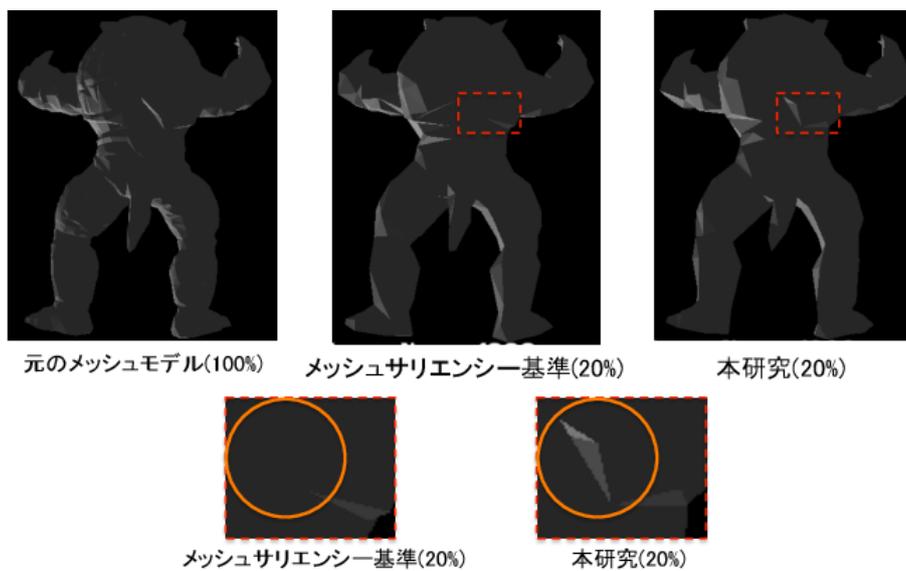


図 5.4: Lee らの手法と本研究手法の簡略化結果比較 (背面)

## 5.2 アンケート評価

本研究が提案したハイブリットサリエンシーを検証するために、アンケートを行った。図 5.5 と 5.6 はアンケート用の図となる。「図の表したメッシュモデルの

形状と色情報からの注意度の度合いの分布に賛成するか？」はアンケートの質問となる。18人がアンケートに参加した。その中7人が「賛成する」と答えた。5人が「ある程度賛成した」と答えた。2人が「どちらも言えない」と答えた。4人が「あまり賛成しない」と答えた。「あまり賛成しない」と答えた人から「輪郭のほうがもっと注意度の度合いが高いのではないか？」と「明るい箇所の注意度の度合いが気になる」との意見を貰った。図5.7はアンケート回答の割合を示したものである。結果から見れば、大半のアンケート参加者は本研究が提案したハイブリッドサリエンシーの有効性を認めたことが分かる。

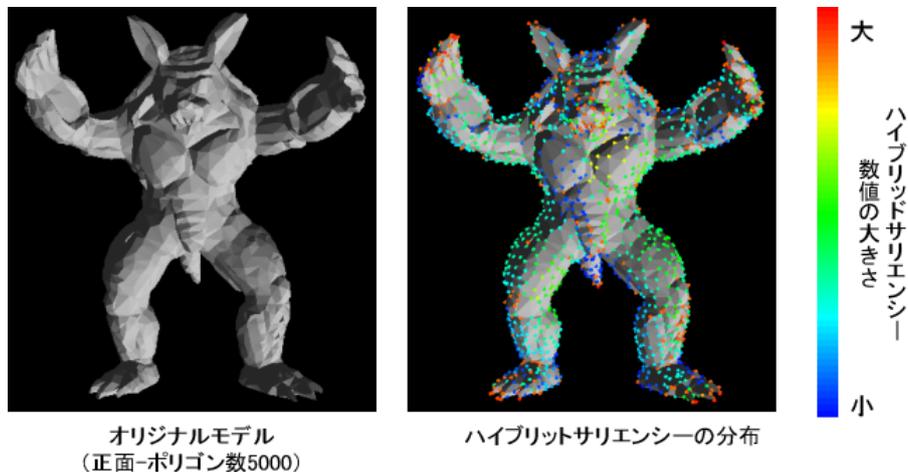


図 5.5: アンケート用の図 (正面)

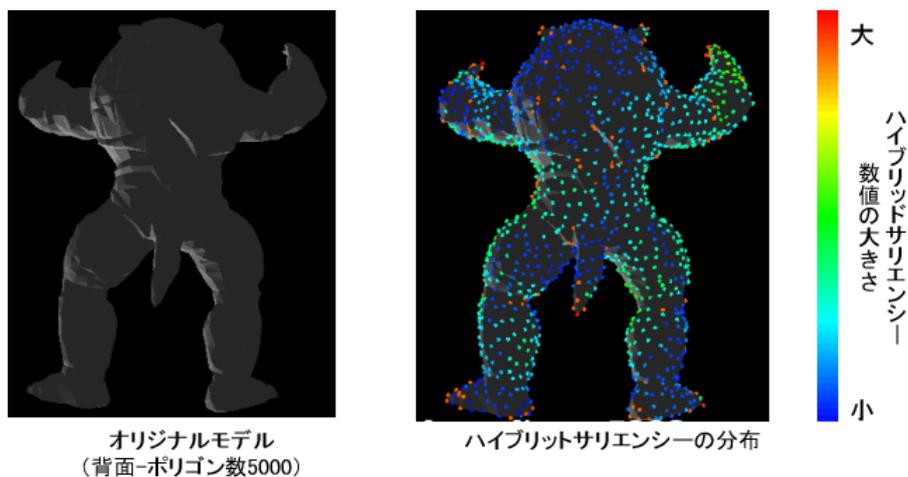


図 5.6: アンケート用の図 (背面)

問題: 図の表したメッシュモデルの形状と色情報からの注意度の度合いの分布に賛成するか?

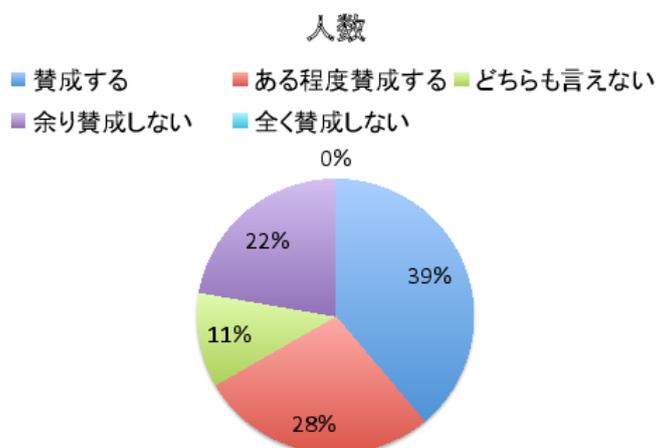


図 5.7: アンケート回答の割合

### 5.3 Metro を用いた結果評価

本節はハイブリッドサリエンシーを用いたメッシュ簡略化の結果モデルを metro というツールで評価する。metro は2つ三角形ポリゴンで構成したメッシュモデル

の差異を評価するツールである。図 5.8 と図 5.9 はハイブリッドサリエンシーを用いたメッシュ簡略化の結果モデルを metro で評価した結果となる。結果から見れば、ハイブリッドサリエンシーの高い箇所の誤差が少ないでハイブリッドサリエンシーの小さい箇所の誤差が大きいことが分かる。その結果は第 5.2 節のアンケートで有効性を確認したハイブリッドサリエンシーの分布図と一致する。要するに、本研究が提案した手法はよく注目度される箇所をあまり簡略しないで、あまり注目度されない箇所を簡略化することで効率よくメッシュモデルを簡略化したということを確認できる。

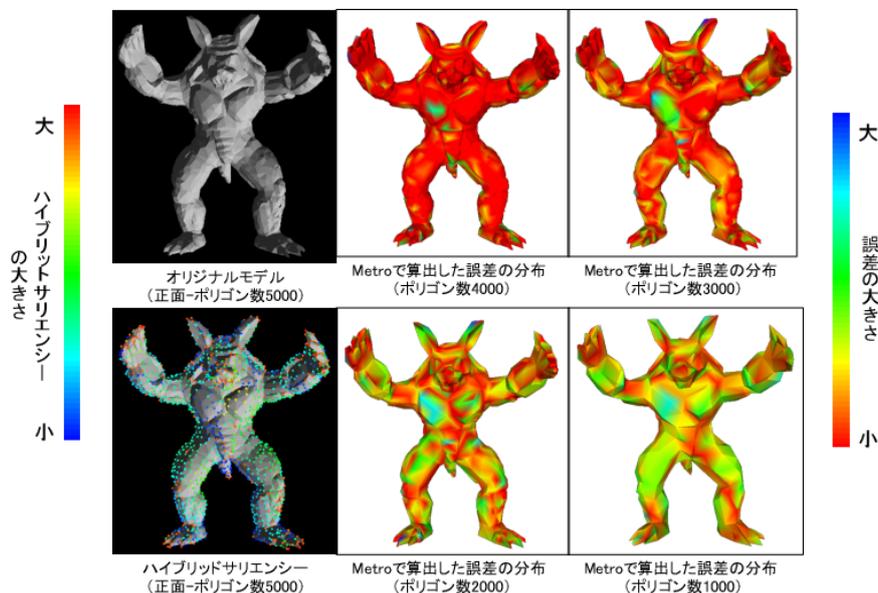


図 5.8: Metro で算出した誤差の分布 (正面)

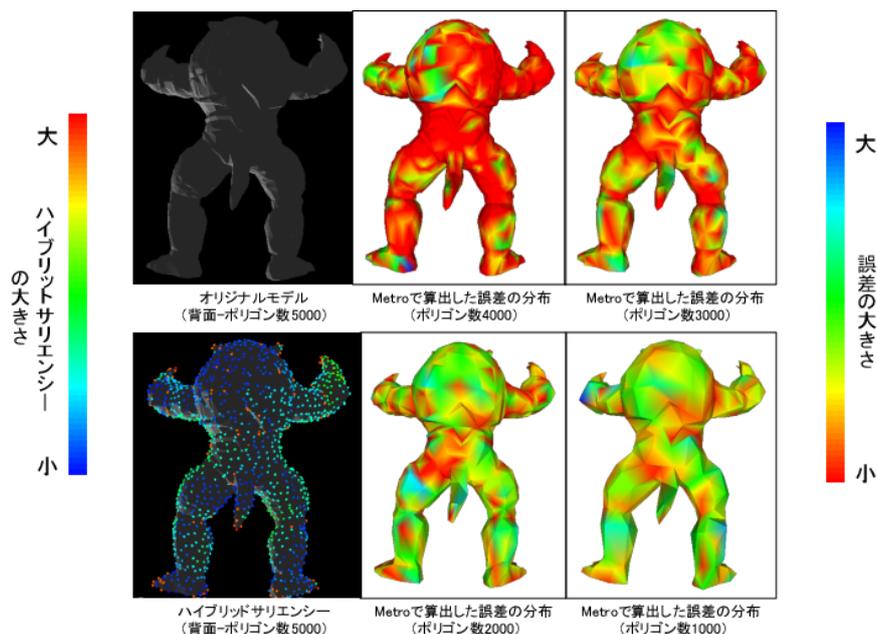


図 5.9: Metro で算出した誤差の分布 (背面)

## 5.4 処理速度の検証

異なるポリゴン数を持つ簡略化対象メッシュに対して、「メッシュサリエンスの計算時間」と「多視点イメージサリエンス特徴値の計算時間」と「ハイブリッドサリエンスの計算時間」と「メッシュ簡略化操作ごとの処理時間」を計測した。計測した結果は図 5.10 に示す。

	メッシュサリエンスの計算時間	多視点イメージサリエンス特徴値の計算時間	ハイブリッドサリエンスの計算時間	簡略化操作ごとの処理時間
ケース1 (ポリゴン数5000)	6.802032s	14.933299s	0.000709s	0.002390s
ケース2 (ポリゴン数4000)	4.235964s	14.884688s	0.000703s	0.002282s
ケース3 (ポリゴン数3000)	2.460558s	14.889437s	0.000337s	0.001630s
ケース4 (ポリゴン数2000)	1.106009s	14.673430s	0.000224s	0.001141s

図 5.10: 処理速度の検証

# 第 6 章

## まとめ

本研究は色情報と形状情報を両方考慮した、効果が視点に依存しないハイブリッドサリエンスを提案した。そして、注目度高い箇所を保護した上で注目度低い箇所からメッシュを簡略することを実現できた。同じポリゴン数までメッシュモデルを簡略化するとき、本研究の手法は他の既存手法よりメッシュモデルの注目度の高い箇所の特徴を保護した良い結果を得られることを確認できた。

本研究は「簡略化対象メッシュモデルが固定している」と「光源が固定している」の2つ前提条件がある。今後の課題として、オブジェクトの移動やライトに移動などに伴うライティングの変更への対応がある。そして、処理対象メッシュモデルがアニメーションした場合への対応がある。これらの課題を解決し、少ないポリゴン数まで簡略化されたメッシュモデルはどんな場合にも高い表現力を持つことができるだろう。

# 謝辭

修士課程の二年間、先生方や先輩達に大変支えられました。ご指導やご協力、ご助言を頂き深く感謝いたします。東京工科大学に入学できて本当に良かったと思っています。これからの博士課程も引き継ぎ一杯楽しんだり苦しんだり人生と研究を共に色々体験しながら成長していきたいと思います。

## 参考文献

- [1] Michael Garland and Paul S. Heckbert. Surface simplification using quadric error metrics. In *SIGGRAPH*, pp. 209–216, 1997.
- [2] David P. Luebke and Benjamin Hallen. Perceptually-driven simplification for interactive rendering. In Steven J. Gortler and Karol Myszkowski, editors, *Proceedings of the 12th Eurographics Workshop on Rendering Techniques, London, UK, June 25-27, 2001*, pp. 223–234. Springer, 2001.
- [3] Chang Ha Lee, Amitabh Varshney, and David W. Jacobs. Mesh saliency. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 24, No. 3, pp. 659–666, 2005.
- [4] Hugues Hoppe, Tony DeRose, Tom Duchamp, John Alan McDonald, and Werner Stuetzle. Mesh optimization. In *Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 1993*, pp. 19–26. ACM, 1993.
- [5] William J. Schroeder. A topology modifying progressive decimation algorithm. In *IEEE Visualization*, pp. 205–212, 1997.
- [6] Jovan Popovic and Hugues Hoppe. Progressive simplicial complexes. In *SIGGRAPH*, pp. 217–224, 1997.
- [7] Jihad El-Sana and Amitabh Varshney. Generalized view-dependent simplification. *Comput. Graph. Forum*, Vol. 18, No. 3, pp. 83–94, 1999.
- [8] Bernd Hamann. A data reduction scheme for triangulated surfaces. *Computer Aided Geometric Design*, Vol. 11, No. 2, pp. 197–214, 1994.
- [9] Tran S. Gieng, Bernd Hamann, Kenneth I. Joy, Gregory L. Schussman, and Issac J. Trotts. Constructing hierarchies for triangle meshes. *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, Vol. 4, No. 2, pp. 145–161, 1998.

- [10] Jarek Rossignac and Paul Borrel. Multi-resolution 3d approximations for rendering complex scenes. In Bianca Falcidieno and Tosiyasu L. Kunii, editors, *Modeling in Computer Graphics, Methods and Applications [selection of papers from the conference held at Genoa, Italy, on June 28-July 1, 1993]*, IFIP Series on Computer Graphics, pp. 455–465. Springer, 1993.
- [11] William J. Schroeder, Jonathan A. Zarge, and William E. Lorensen. Decimation of triangle meshes. In James J. Thomas, editor, *Proceedings of the 19th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 1992*, pp. 65–70. ACM, 1992.
- [12] Paul A. Hinker and Charles D. Hansen. Geometric optimization. In Gregory M. Nielson and R. Daniel Bergeron, editors, *Proceedings IEEE Visualization '93, San Jose, California, USA, October 25-29, 1993*, pp. 189–195. IEEE Computer Society, 1993.
- [13] Leila De Floriani, Paola Magillo, and Enrico Puppo. Building and traversing a surface at variable resolution. In *IEEE Visualization*, pp. 103–110, 1997.
- [14] Leila De Floriani, Paola Magillo, and Enrico Puppo. Efficient implementation of multi-triangulations. In *IEEE Visualization*, pp. 43–50, 1998.
- [15] Jonathan D. Cohen, Dinesh Manocha, and Marc Olano. Simplifying polygonal models using successive mappings. In *IEEE Visualization*, pp. 395–402, 1997.
- [16] David P. Luebke and Carl Erikson. View-dependent simplification of arbitrary polygonal environments. In *SIGGRAPH*, pp. 199–208, 1997.
- [17] Jonathan D. Cohen, Amitabh Varshney, Dinesh Manocha, Greg Turk, Hans Weber, Pankaj K. Agarwal, Frederick P. Brooks Jr., and William V. Wright. Simplification envelopes. In *SIGGRAPH*, pp. 119–128, 1996.

- [18] Rémi Ronfard and Jarek Rossignac. Full-range approximation of triangulated polyhedra. *Comput. Graph. Forum*, Vol. 15, No. 3, pp. 67–76, 1996.
- [19] 中澤篤志. サリエンスーディテクション. 映像情報メディア学会誌 : 映像情報メディア, Vol. 64, No. 12, pp. 1830–1832, 2010.
- [20] Laurent Itti, Christof Koch, and Ernst Niebur. A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, Vol. 20, No. 11, pp. 1254–1259, 1998.
- [21] Robert Schneider and Leif Kobbelt. Geometric fairing of irregular meshes for free-form surface design. *Computer Aided Geometric Design*, Vol. 18, No. 4, pp. 359–379, 2001.
- [22] Henry P. Moreton and Carlo H. Séquin. Functional optimization for fair surface design. In James J. Thomas, editor, *Proceedings of the 19th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 1992*, pp. 167–176. ACM, 1992.
- [23] G. Taubin. Geometric Signal Processing on Polygonal Meshes. In *Eurographics*, 2000.
- [24] Uwe F. Mayer. Numerical solutions for the surface diffusion flow in three space dimensions, 2001.
- [25] Mathieu Desbrun, Mark Meyer, Peter Schröder, and Alan H. Barr. Implicit fairing of irregular meshes using diffusion and curvature flow. In *SIGGRAPH*, pp. 317–324, 1999.
- [26] Mark Meyer, Mathieu Desbrun, Peter Schröder, and Alan H. Barr. Discrete differential-geometry operators for triangulated 2-manifolds, 2002.

- [27] Nira Dyn, Kai Hormann, Sun jeong Kim, and David Levin. Optimizing 3d triangulations using discrete curvature analysis. In *in Mathematical Methods in CAGD: Oslo 2000, T. Lyche and*, pp. 135–146. Vanderbilt University Press, 2001.
- [28] David Cohen-Steiner and Jean-Marie Morvan. Restricted delaunay triangulations and normal cycle. In Steven Fortune, editor, *Proceedings of the 19th ACM Symposium on Computational Geometry, San Diego, CA, USA, June 8-10, 2003*, pp. 312–321. ACM, 2003.
- [29] Pierre Alliez, David Cohen-Steiner, Olivier Devillers, Bruno Lévy, and Mathieu Desbrun. Anisotropic polygonal remeshing. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 22, No. 3, pp. 485–493, 2003.
- [30] Gabriel Taubin. Estimating the tensor of curvature of a surface from a polyhedral approximation. In *ICCV*, pp. 902–907, 1995.
- [31] D.P. Luebke. *Level of Detail for 3D Graphics*. The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics Series. Morgan Kaufmann Publishers, 2003.
- [32] OpenGL.org. OpenGL. <http://www.opengl.org/>. 参照: 2015-2-16.
- [33] Fine Kernel Project. Fine Kernel ToolKit System. <http://fktoolkit.sourceforge.jp/>. 参照: 2015-2-16.
- [34] 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. 慶應義塾大学 政策・メディア研究科 修士論文, 1996.