

人肌の透過光表現  
リアルタイムレンダリングに関する研究

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

高峰

人肌の透過光表現  
リアルタイムレンダリングに関する研究

指導教員 渡辺 大地 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

高峰

## 論文の要旨

論文題目	人肌の透過光表現 リアルタイムレンダリングに関する研究
執筆者氏名	高峰
指導教員	渡辺 大地 教授
キーワード	リアルタイムレンダリング、シェーダー、キャラクター 3D モデル

### [要旨]

現実において、人体の皮膚構造は複雑であり、光が皮膚表面に当たると、非常に複雑な相互作用が生じる。映像内での写実的な CG による効果などの分野では、オフラインに基づくレンダリング方法で肌を潤す。現在、コンピュータのグラフィックスカードの出現に従って、ゲームの領域はレンダリングのシーンの中の人物の写実感はますます高くなっている。プロットベースのロールプレイングゲームの場合、リアルなスタイルではゲームキャラクターにより高い臨場感が要求される。ゲームの発展に伴い、ゲーム内のインタラクションに対する要求も高まっており、多くのゲームでは筋書きの展開を表現するためにリアルタイムレンダリング技術が徐々に採用されるようになってきている。キャラクターモデルを近距離から観察する必要がある場合、人間の肌が光とどのように相互作用するかをリアルにレンダリングするには、人間の肌は、現実世界では多くの種類の光の影響を受けることを考慮する必要がある。しかし、人肌のリアルタイムな描画は、物体内部で生じる表面下散乱現象のシミュレーションに膨大な計算が必要となるため、困難であると言える。

透過光は光を完全に透過する光と半透明の表面下で散乱する光に分けることで、本研究は表面下散乱を提案して実装した。ファイナルファンタジー 15 の中で、Pre-Integrated Skin Shading という方法使っている。本研究は Pre-Integrated Skin Shading の方法に基づいて、リアルタイムのレンダリング速度を維持しながら、異なる曲率の表面に対して異なる積分範囲を適用し、モデルの表面の各点からの散乱寄与を収集する。ルックアップテーブルテクスチャの修正により、リアルタイムのレンダリング中、鼻の輪郭の陰影が写真に近づくように改善される。しかし、全体的な表現の色があまりにも濃すぎ、まだ修正が必要な余地はまだある。

# A b s t r a c t

Title	Transmitted light rendering of human skin Research on real-time rendering
Author	Feng Gao
Advisor	Taichi Watanabe
Key Words	Real-time rendering, Shaders, Character 3D models

## [summary]

In reality, the structure of human skin is complex, and when light hits the skin surface, very intricate interactions occur. In fields such as realistic CG effects in visual media, skin is often rendered offline to achieve a realistic look. With the advent of computer graphics cards, the realism of characters within rendered scenes in the gaming industry has been increasing. In plot-based role-playing games, a high level of realism is demanded for game characters to enhance immersion. As games evolve, there is an increasing demand for real-time rendering technology to express the unfolding of the storyline in many games. When it is necessary to observe character models up close, rendering human skin realistically requires considering how human skin interacts with light, taking into account various types of light influences in the real world. However, real-time rendering of human skin is challenging due to the massive calculations required to simulate subsurface scattering phenomena that occur within objects.

By distinguishing between light that completely transmits and light that scatters beneath a semi-transparent surface, this study proposes and implements subsurface scattering. In Final Fantasy 15, a method called Pre-Integrated Skin Shading is employed. Based on this method, this research applies different integration ranges to surfaces with different curvatures, collecting the scattered contributions from each point on the model's surface while maintaining real-time rendering speed. The improvement in the shadow representation of the nose contour in real-time rendering is achieved by modifying the lookup table texture. However, there is still room for improvement as the overall color representation appears too dark.

# 目次

第1章	はじめに	1
1.1	研究の背景と目的	2
1.2	論文構成	6
第2章	提案手法の基盤として既存手法	7
2.1	前提	8
2.2	表面下散乱の計算	8
2.2.1	拡散理論	9
2.2.2	ガウス関数	10
2.2.3	積分計算	11
2.3	鏡面反射	12
2.4	マイクロファセット理論	13
第3章	提案手法	16
3.1	提案手法の概要	17
3.2	照明効果の分析	17
3.3	散乱計算	17
3.4	法線マップ上の凹凸ディテール	19
3.5	物理ベースのマイクロファセット反射モデル	20
3.6	LUT 図生成	22
第4章	実装および評価	24
4.1	実験のハードウェア構成	25
4.2	実装の速度	26
4.3	評価	29
第5章	まとめと展望	31

謝辞	33
参考文献	36
発表実績	40

# 目次

1.1	肌のレンダリングの比較 . . . . .	3
2.1	光を皮膚に当てる . . . . .	8
2.2	拡散実験 . . . . .	10
2.3	三層の皮膚モデルガウス関数 . . . . .	11
2.4	表面下散乱の計算 . . . . .	12
2.5	鏡面反射の見取り図 . . . . .	13
2.6	マイクロ表面 . . . . .	14
3.1	法線と頂点の位置の変化 . . . . .	18
3.2	Bent Normal 概略図 . . . . .	19
3.3	平滑化前 . . . . .	20
3.4	平滑化後 . . . . .	20
3.5	提案手法で生成した LUT . . . . .	22
3.6	LUT の比べること . . . . .	23
4.1	テクスチャー一覧表 . . . . .	27
4.2	3D モデルへの投影 . . . . .	27
4.3	複数のモデルをレンダリング . . . . .	28
4.4	既存手法との比較 . . . . .	29
4.5	写真との比較 . . . . .	29

# 第 1 章

## はじめに

## 1.1 研究の背景と目的

現実において、人体の皮膚構造は複雑であり、光が皮膚表面に当たると、非常に複雑な相互作用が生じる。映像内での写実的な CG による効果などの分野では、オフラインに基づくレンダリング方法で肌を潤す。現在、コンピュータのグラフィックスカードの出現に従って、ゲームの領域はレンダリングのシーンの中の人物の写実感はますます高くなっている。プロットベースのロールプレイングゲームの場合、リアルなスタイルではゲームキャラクターにより高い臨場感が要求される。ゲームの発展に伴い、ゲーム内のインタラクションに対する要求も高まっており、多くのゲームでは筋書きの展開を表現するためにリアルタイムレンダリング技術が徐々に採用されるようになってきている。キャラクターモデルを近距離から観察する必要がある場合、人間の肌が光とどのように相互作用するかをリアルにレンダリングするには、人間の肌は、現実世界では多くの種類の光の影響を受けることを考慮する必要がある。しかし、人肌のリアルタイムな描画は、物体内部で生じる表面下散乱現象のシミュレーションに膨大な計算が必要となるため、困難であると言える。

人体の皮膚は、複雑な相互作用を生む光と通常複雑なやり取りをする、属性の複雑な半透明な材質と見なされる。人体の皮膚の物理的な構造は、複数の層の組織で構成する。その表面にはしわや毛穴などの構造がある。皮膚の研究では、通常、皮膚表面の油脂層が皮膚の光の反射部分に主に寄与し、油脂層の下にある表皮層と真皮層がサブサーフェス散乱部分に寄与していると考えられている。したがって、コンピュータグラフィックスで人体の皮膚を実際にシミュレートすることは非常に難しい。人体の皮膚のシミュレーションが現実的でない場合、皮膚はプラスチックのように見え、それによってアプリケーションのユーザーエクスペリエンスが非常に低くなる可能性がある。

図 1.1 に示されている左側は、単純な光照射モデルを使用してレンダリングされた肌の効果になる。この光照モデルでは、環境光、拡散反射、鏡面反射の 3 つの要素のみを考慮しており、レンダリングした肌の最終的な効果は非常に粗く、現実味に欠けている。肌は半透明な材質に属し、光が肌の表面に当たると肌の内部に入り込む。光は肌の内部で一連の拡散、吸収、減衰を経て、最終的には入射位置と異なる位置から再び肌の表面に出射する。これをサブサーフェス散乱現象あるいは表面下散乱現象という。サブサーフェス散乱を考慮した光照モデルを使用すると、最終的

に肌はより柔らかい視覚効果を示している。図 1.1 の右側に実際の描画結果を示す。



図 1.1: 肌のレンダリングの比較

皮膚のレンダリングの現実感だけでなく、レンダリングの効率も非常に重要なトピックである。電子ゲーム、AR/VR、対話型映画インタラクティブ動画などのアプリケーションでは、ユーザーがレンダリングされたシーンとリアルタイムに対話する必要があるため、レンダリングの効率も光照モデルの設計で考慮される重要な要素となる。皮膚のリアルな効果を維持しながらメモリ使用量を減少し、レンダリング効率を向上する方法を研究することは、ゲームなどのリアルタイムレンダリング分野の発展に非常に重要な意味がある。

人体の皮膚のレンダリングに関する研究は、生理学的な分析、材質の特性の測定 [1]、物理的な装置の設計、そしてレンダリング方法の研究など、さまざまな側面がある。本研究では主にレンダリング方法の研究に焦点を当てているため、皮膚のレンダリングに関する総合的な分析を行う。Hanrahan ら [2] は多層媒質中の光線の反射と屈折をシミュレートする「H-K モデル」を提案した。Hanrahan らは皮膚を表皮層と真皮層の 2 つの層としてモデリングし、モンテカルロ法を使用して表面での光線の反射、屈折、および皮膚内部での散乱、吸収などをシミュレートした。その後、So-Ling ら [3] は Hanrahan の研究を基に、皮脂層を追加して三層モデルを使用して人体の皮膚をレンダリングした。これらの手法はいずれもモンテカルロのサンプリング手法を使用しており、比較的良好なレンダリング効果を達成しているが、実行効率は高くない。Stam ら [4] は、放射伝達方程式から出発し、離散座標モデルを使用して放射伝達方程式を解くことで、半透明な材料の間を伝播する光線の挙動を研究した。Stam の手法は角度を離散化し、フーリエ変換と固有値分析を使用して放射伝達方程式を解くため、モンテカルロに基づくサンプリング手法よりも効率

が高い。Stam の手法は、入射光線と出射光線が交差する表面上の同じ点を前提としている。この仮定は、皮膚などの半透明な材料には当てない。半透明な材料では、散乱現象によって一部の出射光線が入射光線と表面上の同じ位置にない場合がある。

表面下散乱をより正確にシミュレートするために、ほとんどの研究では、放射転送方程式の積分をサンプリングするためにモンテカルロ法を選択している。Krishnaswamy ら [5] が提案した BioSpec は、モンテカルロ法を使用して皮膚が異なる波長の光を吸収し、散乱する現象をシミュレーションする。このモデルは皮膚に関連する 20 以上のパラメータを使用し、五層の皮膚モデルを構築している。これらのモンテカルロ法を使用した研究は、表面下散乱を非常に正確にモデリングできるが、その明白な欠点は計算量が非常に大きい。特に、半透明な物体である皮膚の場合、光が半透明物体に入ると内部で何千回も散乱が発生するまで吸収されたり離れたりしないことが一般的である。

表面下散乱現象をより適切にモデリングするために、Jensen ら [6] は拡散プロファイル diffusion profile に基づく拡散理論を提案した。これは、光が半透明物体の内部でどのように拡散し分布するかを記述する関数である。拡散プロファイルは、異なるレンダリング手法が異なる近似を持つ拡散プロファイルに対応する。Jensen らの手法では、拡散プロファイルを計算するために Dipole 方程式を使用し、BSSRDF の解析的な表現を導き出した。Dipole モデルの手法では、半透明媒質が無限に厚く、内部が均一に分布していると仮定しているため、ある程度の厚さを持つ媒質や多層媒質には適用できない。Dipole による表面下散乱の計算は、一般的な拡散反射計算を各セグメントに対して行う第一部分と、拡散プロファイルと第一部分の結果に基づいて、周囲の複数のセグメントが現在のセグメントに対する表面下散乱の寄与を重み付けて計算する第二部分に分かれる。その問題を解決するため、まだレンダリング速度を向上させるため、PENNER ら [7] はあらかじめ組み込まれた Pre-Integrated 手法を提案した。

Jorge ら [8] は、2013 年の GDC での「Next-Generation Character Rendering」と題されたプレゼンテーションで、初めて Separable Subsurface Scattering SSSS のレンダリング画像を発表した。そして、2015 年に Jimenez らは正式に Separable Subsurface Scattering [9] アルゴリズムを提案し、これは一般的に SSSS と呼ばれてる。このアルゴリズムは、水平と垂直の畳み込みを使用して拡散プロファイルを近似し、効率をさらに向上させた。Jorge らと Jimenez らの研究で

は、散乱照明を計算するための主要パラメータとして表面曲率を利用する。しかし、異なる曲率の表面間の構造の違いによる散乱の違いを正確に区別することができない。

他にも、Deferred Single Scattering[10] のような遅延レンダリングを組み合わせた手法や、Mengting Yu ら [11] の研究など、既存の手法を基にプラットフォームのレンダリング技術を組み合わせて改良する手法がある。しかし、よりメモリを大量に消費する。伝統的なグラフィックス処理手法の他に、Cao Ying ら [12] は革新的に神経ネットワークを使用する手法を提案した。これは、既存のレンダリングアルゴリズムによって生成したサンプルデータを学習し、次表面散乱の計算を適合することで、皮膚のレンダリングを実現しつつ、レンダリング速度を向上した。この手法は、既存のレンダリングアルゴリズムによって生成されたサンプルデータを用いて分析されたものであり、新しい物理シミュレーション方法を提案するものではない。

PENNER らの既存手法である Pre-Integrated Skin Shading は人体をリアルタイムでレンダリングする際に、鼻の輪郭の影があまり自然に描画できない。リアルタイムで影を生成する主な手法として、イメージベスのシャドウマッピングとジオメトリベースのシャドウボリュームが挙げられる。シャドウマッピングはシャドウボリュームに対して計算量が比較的少なく、ジオメトリの複雑さに影響を受けにくい [13]。この研究では、マッピングの修正によって影の色をよりリアルにすることを目指す。

既存手法である Pre-Integrated Skin Shading アルゴリズムは、幾何学的曲面のプリインテグレーションを処理する際、異なる曲率の表面に対して同じ積分範囲を使用して曲率円環上の各点の散乱寄与を収集してた。これにより、光が人の顔に当たったときに比較的柔らかく、鼻翼などの急激な変化の位置には明確な輪郭線がなかった。

本研究と同様に物体の曲率に着目する点では Kolchin[14] の手法が挙げられる。しかし、Kolchin の手法では曲面の変化に伴う表面下散乱の影響を考察し、曲率に依存して変化する新たな反射関数を導出しているが、Kolchin らはこの反射関数を導出する過程で双極子モデルにより表面下散乱現象をモデル化している。双極子モデルは物体表面が無限大の平面であることを前提とした近似モデルであり、曲面を扱う Kolchin の手法において平面を仮定する双極子モデルを用いて導出した解は合理性に欠ける。

そこで、本研究では、Pre-Integrated Skin Shading の上、本研究では、異なる曲率の変化に対

応し、表面下散乱の結果が異なることを提案する。実際のテストにより、リアルタイムのレンダリング結果がより真実の写真に近づくようになる。全身の皮膚のレンダリング効果には、まだ自然でない部分があり、例えば色があまりにも濃いといった問題が残っている。

## 1.2 論文構成

第1章で本研究の背景について説明する。第2章で先行研究の手法を分析する。第3章で本研究の提案手法を述べる。第4章で提案手法による実験を行う。第5章でまとめを述べる。

## 第 2 章

# 提案手法の基盤として既存手法

## 2.1 前提

人間の皮膚は複雑な半透明の物質である。図 2.1 で光を皮膚に当てる原理を示す。リアルなレンダリングを実現するためには、鏡面反射 specular reflection、表面下散乱 subsurface scattering、透過光 Transmittance の組み合わせが必要である。

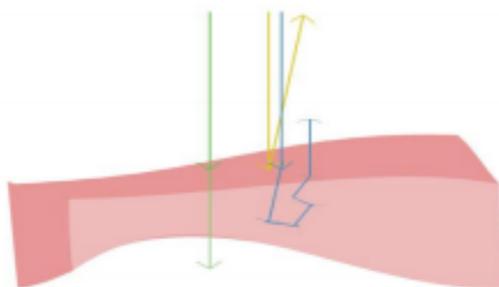


図 2.1: 光を皮膚に当てる

リアルタイムの皮膚レンダリングでは、鏡面反射、拡散反射、表面下散乱、および透過光の四つの方向を考慮する必要がある。以下に示すように、黄色の光線は直接反射を示し、青色は皮膚内に入り、多層半透明の特性により内部で複数回反射して最終的に皮膚から射出される漫反射を表す。緑色は光が皮膚を直接貫通し、皮膚に明白な透明感をもたらす。

透過光に取り込んでいる、表面下散乱と完全透過光を考慮する必要がある。表面下散乱は物体内で光が反射せずに散乱する現象を指し、皮膚のレンダリングでは漫反射とサブサーフェス反射の外観に影響する。完全透過光は光が物体を直接貫通し、反射や散乱が発生しないことを示す。これらの要素を考慮することは透明感と自然な光影効果を実現する上で重要である。

## 2.2 表面下散乱の計算

先行研究の方法が表面点の周りから他の点の散乱寄与を直接収集するのは異なり、Pre-Integrated Skin Shading アルゴリズムは、主に表面点の曲率リング上の各点の散乱寄与を収集して表面下散乱の効果を実現する。事前に計算された方法を使用して、特定の曲率ポイントの散乱光を事前に計算し、その結果をルックアップテーブルに保存する。レンダリンググループでは、皮膚表面のパラメータに基づいて直接ルックアップテーブルの値を読み取り、それを次表面散乱の結

果として使用する。この方法は、レンダリング時にガウス関数を再計算する必要がないため、計算負荷が非常に小さくなる。光の方向と法線間の角度と表面の曲率の2つの組み合わせによって、皮膚表面の曲率に応じた照明効果の変化を記述する。表面下の散乱の効果を2次元 LUT テーブルに事前計算することでレンダリング実行中にドット  $(N, L)$  と曲率が直接計算され、表面点での表面下散乱光を見つけることができる。散乱効果は、皮膚表面の曲率によって外光の吸収の能力や寄与の幅が異なる。既存手法は、曲率を考えていない。

## 2.2.1 拡散理論

散乱の程度が高い透光性材料では、散乱係数が高いほど散乱効果が強くなり、拡散理論 Diffusion Theory と呼ばれる。表面下散乱効果をシミュレートするために、jensen ら [15] は散乱性の高い透光性材料内部での光散乱効果をシミュレートする実験を行った。光源のない閉鎖空間で、平らな半透明面に白色レーザー光を照射すると、光柱の中心から白色光が反射し、中心付近の他の光がない部分に赤色光が現れ、中心から離れるほど光は弱くなる。

上記の実験に基づき、レンダリングするシーンの概要における3色の光 RGB の拡散プロファイルを計算するだけで、半透明材料の表面下散乱の効果をシミュレートすることが可能である。

中心点の周りの任意の点から透過する光の量は、その点と中心点との空間距離に関する関数であり、通常は拡散プロファイルで表され、一般的に  $R_d(r)$  と表記される。同じ均一な材質に対して、光の各方向での散乱効果は同じであり、入射角には依存しない。

各色の光には異なる拡散効果がある。GPU Gems 3 は nvidia によってオープンソース化されており、図 2.2 はチャプター 14 ページ 209 からのものである。先行研究で載せる図 2.2 は右側に示されているのは赤緑青の三原色の拡散曲線で、赤色の光が他の色よりも強い拡散能力を持っていることが分かる。これが、私たちが見るレーザーの中心点周りが赤くなる理由である。実際には、研究者は半透明な材料中でのさまざまな色の光の拡散曲線を測定しているが、GPU でグラフィックスをレンダリングする際には通常、赤緑青の三原色光のみを使用してモデリングする。したがって、グラフィックスのレンダリングでは、通常、これらの三原色光だけを使用して自然光と実世界の相互作用をシミュレートする。

前述の分析に基づき、シーンのレンダリング中に赤緑青の三原色光の拡散プロファイルを計算

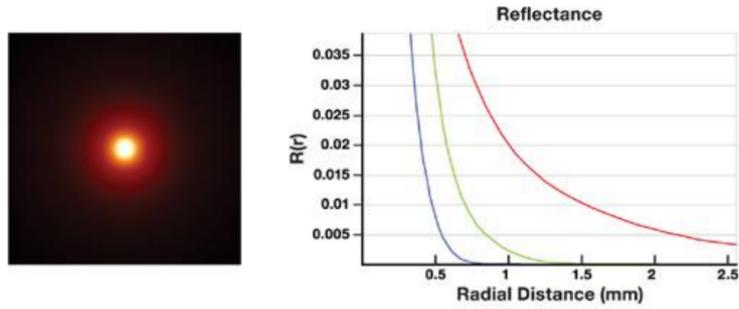


図 2.2: 拡散実験

できれば、半透明な材料の次表面散乱効果を近似的にモデリングすることができる。

## 2.2.2 ガウス関数

前述の分析からわかるように、拡散プロファイル  $R_d(r)$  は距離に関する関数であり、その関数の曲線は図 2.2 の右側に示されており、見た目はガウス関数の曲線に似ている。ガウス関数の式はいくつかの良い特性を持っており、それは分離可能で放射対称であり、また相互に畳み込んで新しいガウス関数を生成できるという点である。多くの応用では、ガウス関数の組み合わせを使用して他の関数を近似できる。単一のガウス関数は任意の拡散分布を正確に近似することはできませんが、実践的には複数のガウス関数の組み合わせが拡散プロファイルを非常にうまく近似できることが示されている。この結論に基づいて、d'Eon ら [16] は拡散プロファイル  $R_d$  を近似するためにガウシアン和 SoG を提案した。

SoG の近似式は式 (2.1) に示されており、ここで  $W_i$  は重みの部分を、 $G(\delta_i, r)$  は式 (2.2) に示すがガウス分布関数である。 $\delta$  はこの関数の標準偏差を表す。式に従って、 $\delta_1 \dots \delta_n$  および  $W_1 \dots W_n$  を取得するだけで、次表面散乱部分を近似計算できる。これらの具体的なパラメータは通常、曲線フィッティング機能を持つソフトウェア (MatLab など) を使用して解決できる。

$$R_d(r) \approx \sum_n^{i=1} W_i G(\delta_i, r) \quad (2.1)$$

$$G(\delta, r) = \frac{1}{2\pi\delta^2} e^{-\frac{r^2}{2\delta^2}} \quad (2.2)$$

三層の皮膚モデルを正確にシミュレートするには、3つのダイポールが必要であるが、d'Eon ら

```

inline asdx::Vector3 Scatter(float r)
{
    // GPU Pro 360 Guide to Rendering, "5. Pre-Integrated Skin Shading", Appendix A.

    return

        Gaussian(0.0064f * 1.414f, r) * asdx::Vector3(0.233f, 0.455f, 0.649f)
    + Gaussian(0.0484f * 1.414f, r) * asdx::Vector3(0.100f, 0.336f, 0.344f)
    + Gaussian(0.1870f * 1.414f, r) * asdx::Vector3(0.118f, 0.198f, 0.000f)
    + Gaussian(0.5670f * 1.414f, r) * asdx::Vector3(0.113f, 0.007f, 0.007f)
    + Gaussian(1.9900f * 1.414f, r) * asdx::Vector3(0.358f, 0.004f, 0.00001f)
    + Gaussian(7.4100f * 1.414f, r) * asdx::Vector3(0.078f, 0.00001f, 0.00001f);
}

```

図 2.3: 三層の皮膚モデルガウス関数

の研究では、6つのガウス関数の和を使用すると、3つのダイポールプロファイル (Dipole Profile) をうまく近似できることである。図 2.3 は、6つのガウス関数を使用して皮膚の3つのダイポールプロファイルに適合させたときの RGB に対応する減衰係数を示している。図 2.3 は、RGB 三原色に基づく距離に対するガウス拡散曲線になる。中心点から非常に近い場合、赤色光の拡散は緑色光と青色光よりも小さいことが分かる。目で見分けることのできる距離に増加すると、赤色光の拡散は緑色光と青色光の拡散よりも遙かに大きくなり、これが皮膚が逆光の場合に透光効果が艶紅になる原因である。

### 2.2.3 積分計算

模型の表面では、表面の法線と光の方向とのなす角度 ( $N \times L$ ) が点によって異なるため、点の入射光強度は各点で異なり、入射光強度は表面全体で変化するため、散乱効果が見える。拡散理論によれば、拡散プロファイルは距離の関数であり、ある定点までの距離を用いれば、任意の点からその定点までの散乱寄与を計算することが可能であり、円上のすべての点からその点までの散乱を積分すれば、その点からの表面下散乱効果が得られる。半径  $r = 1$  の円が例として使用され、リングに垂直な位置  $N$  における表面下散乱の結果を求めることが目的になる。表面下散乱の

みを考慮する場合、結果は正半球リング上のすべての点からの散乱光の合計となる [16][17]。図 2.4 は表面化散乱計算の模式図である。この図 2.4 の点  $p$  をを皮膚上の任意の点とする、皮膚が表面下散乱特性を有するため、点  $p$  は点  $p$  付近の一定範囲の他の各点の散乱の影響を受ける。L の光強度を 1 とすると、円上の任意の点における光強度は  $\cos(\theta + x)$  となり、点  $p$  からの距離は  $2r \sin(x/2)$  となる。p 点の最終的な明るさは、これらの点の p 点への散乱寄与を積分することで得られる。

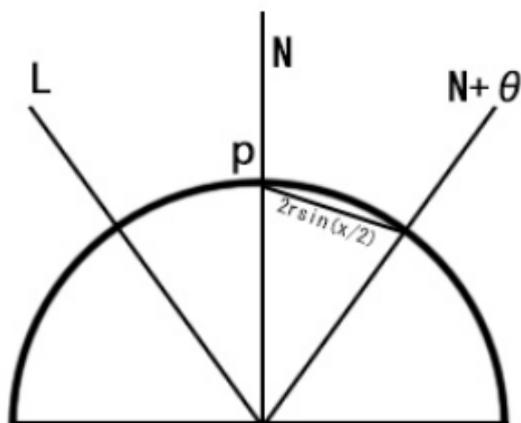


図 2.4: 表面下散乱の計算

## 2.3 鏡面反射

早期のレンダリングアプリケーションでは、ハードウェアの計算効率の制約により、光照りレンダリングにはしばしば Phong モデルを利用した。このモデルは、主に拡散反射と鏡面反射を記述している。Phong モデルは一定の程度で物体表面の特徴を再現し、光照の影響で物体表面の正しい効果を示すことができるが、物体の微視的な特徴を表現することはできず、現実世界のエネルギー保存の物理法則に合致しなかった。James F. Blinn[18][19] は 1977 年に Blinn-Phong 光照モデルを導入した。Phong モデルを鏡面反射の部分でわずかに改良したものである。反射ベクトルの使用を放棄し、代わりにハーフベクトル  $h$  と呼ばれるベクトルを導入した。ハーフベクトルは視線方向と光線方向の中間ベクトルであり、その計算方法は式 (2.3) で示されている。 $\vec{l}$  と  $\vec{v}$  はそれぞれ光照方向と視線方向である。

$$\vec{h} = \frac{\vec{l} + \vec{v}}{\|\vec{l} + \vec{v}\|} \quad (2.3)$$

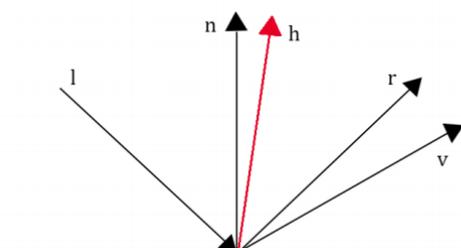


図 2.5: 鏡面反射の見取り図

物体表面的鏡面反射の概念は、図 2.5 で示す。ここで、 $l$  は光の方向、 $n$  は物体表面の法線方向、 $r$  は光の反射方向、 $v$  は視線の方向を表す。図からわかるように、Blinn-Phong のシェーディングモデルを使用すると、ハーフベクトルと表面法線が近づくほど、鏡面反射の寄与が増加する。ハーフベクトルと表面法線方向が一致すると、視線の方向がちょうど反射方向と一致するため、この時鏡面反射の寄与が最大となる。

伝統的な 2 つの光照モデルは、比較的初期のグラフィックスレンダリング手法であり、通常、固定されたレンダリングパイプラインに書き込まれている。ハードウェアの計算能力の向上とともに、各グラフィックスプラットフォームでプログラマブルなレンダリングパイプラインが導入され、従来の 2 つの着色モデルの不自然な効果に満足しなくなり、より現実的なレンダリング手法を求めようになった。その後、物理ベースのレンダリング技術 Physical Based Rendering、PBR が提案され [20]、その目的は、光線と物体表面の相互作用をより物理学の法則に準拠した方法でシミュレーションする。PBR の光照モデルは 3 つの条件を満たさなければならない :1. マイクロファセットベースの表面モデル。2. エネルギー保存の法則。3. 物理ベースの BRDF の適用。

## 2.4 マイクロファセット理論

マイクロファセット理論 [21] では、まず反射の複雑なふるまいは物体表面の微小な法線の分布によって起こると仮定している。そこで何かしら基準となる空間を設けたいところです。慣習的には、面積が 1 である幾何学平面 geometric surface を基準に、そこに凸凹したマイクロサーフェ

ス microsurface を配置したモデルを使う。マイクロファセット理論の原理を図 2.6 に示す。

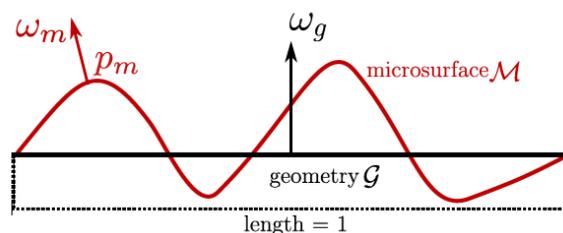


図 2.6: マイクロ表面

微小面モデル理論 [22] では、すべての平面は微視的な尺度での微平面から構成され、任意の物体表面は絶対的に滑らかではない。グラフィックスでは通常、平面の凹凸度を表すのに粗さ Roughness が使用され、物理計算では微平面同士の相互遮蔽関係を記述するために使用する。光照の計算時に粗さを得ると、統計学的手法を使用して微小面の凹凸度を推定し、すべての微小面の取向方向がハーフベクトル方向と一致する確率を計算し、最終的な微平面の反射効果を解決できる。

物理ベースの BRDF は、2つの側面から説明できる。最初の側面は、BRDF が入射光線が表面を反射した後の反射光線の異なる方向での分布を記述するものであり、2番目の側面は、BRDF が各光線束が表面を反射した後、最終的な反射される特定の光線に対する寄与を記述するものである。一般的な物理ベースの BRDF 計算モデルには、*cook - torrance*BRDF モデル [23] と Ward BRDF モデルがあり、*cook - torrance*BRDF モデルはほとんどの材質のレンダリングに適している。現在、多くのレンダリングパイプラインでこの BRDF モデルを使用する。一方で、Ward BRDF モデルは物体表面の異方性をより強調し、毛髪、布などの材質物体のレンダリングに適している。

$$f_r = K_d * f_{\text{lambert}} + K_s * f_{\text{cook-torrance}} \quad (2.4)$$

一般的 *cook - torrance*BRDF 光照モデルは、式 (2.4) で表され、ここで  $K_d$  は拡散反射係数であり、入射光線中の拡散部分のエネルギーの割合を示す。 $f_{\text{lambert}}$  は拡散反射の計算部分を表し、 $K_s$  は鏡面反射係数であり、入射光線中の鏡面反射のエネルギーの割合を示す。 $f_{\text{cook-torrance}}$  は鏡面反射の計算部分を示し、 $f_r$  は BRDF 計算モデルの最終的な出力色を表す。式からわかるよ

うに、この光照モデルも主に拡散反射と鏡面反射の2つの部分をシミュレーションする。

異なる着色モデルの主な違いは、鏡面反射部分の処理である。物体表面の最終的な外観はほとんどが鏡面反射部分の効果に依存するため、鏡面反射部分の模擬のリアリティは非常に重要となる。したがって、本研究では、物理ベースのBRDF光照モデルを使用して、皮膚表面の鏡面反射部分を計算する。

## 第 3 章

# 提案手法

### 3.1 提案手法の概要

人肌の照明効果の分析を行うため、先行研究の動くリズムに基づいて皮膚表面からの表面下散乱の計算過程の解析、表面下散乱効果のレンダリングアルゴリズムを拡張し、レンダリングのリアル感を向上する。

### 3.2 照明効果の分析

透過率は基本的に逆光時の肌の散乱効果であるため、肌のレンダリングモデルの計算では、肌の光に面した面と逆光の面を区別する必要がある。肌の光に面する面と逆光に面する面の区別は、肌の表面法線と照明の方向との間の角度によって直接判断することができる。表面法線と照明の方向との間の角度が90度未満の場合、その表面は光に面する。表面法線と光の方向とのなす角度が90度より大きい場合、表面は逆光である。光の直接作用を受ける皮膚の光に面した側については、皮膚の鏡面反射、表面下の散乱、影の有無などを十分に考慮する必要がある。光の直接作用を受けない肌の逆光側については、環境光と透過光の間接作用のみを考慮する。光対向面の場合、光の方向と背面に垂直な方向との間の角度は90度より大きいので、透過光成分は光対向面の計算から直接除外することができる。透過光部分は、光に面する面の計算から直接除外することができる。逆光面の場合、皮膚表面は完全に影になるため、以下のようなになる。表面下散乱と鏡面反射は、バックライト面の計算から直接除外することができる。

皮膚の透光効果は、皮膚を完全に透過して皮膚内部の血液線を見せる効果に分けられる。皮膚を完全に透過しない半透明効果とに分けられる。本研究の現段階では、鏡面反射効果と半透明の表面下散乱効果に着目した。完全な投影効果については、第5章「展望」で説明する。

### 3.3 散乱計算

曲面ジオメトリにおける事前積分法は比較的实际の光源効果を表現できますが、この計算方法自体が仮定に基づいている。先行の分析において、曲率の小さい領域と曲率の大きい領域では散乱効果に大きな差があり、周囲の光の寄与を吸収する能力や範囲にも異なりである。曲率が大きいほど、つまり曲面がより湾曲している場合、周囲の光の吸収寄与が増加する。逆に、曲率が小さ

いほど、つまり表面がより平坦な場合、光を吸収する寄与が減少する。まとめると、散乱効果は、表面の曲率が小さい部分と大きい部分で大きく異なり、外光の吸収の能力や寄与の幅が異なる。

図 3.1 は法線と頂点の位置変化に関する模式図である。この図のようにモデルの頂点の法線と頂点の位置の変化率 ( $1/r$ ) を計算し、等しい比率の類似した三角形に基づいて曲率円の半径  $r$  を計算する。平坦な皮膚表面での散乱効果は、より曲率を持つ皮膚表面ほど強くなく、また平らな皮膚表面の曲率は、表面の散乱効果を大きく支配している。本研究の提案手法では、曲率の変化に応じて円上の各点での散乱寄与を積分する。任意の法線  $N$  と光方向  $L$  の間の角度  $\theta$ 、および任意の大きさの曲率半径  $r$  に対して、関数  $D(\theta, r)$  の値 Diffuse Light は、水平座標  $\cos \theta(NL)$  および垂直座標  $1/r \in (0, 1)$  を持つ LUT にその値を保存した後、事前に計算する。

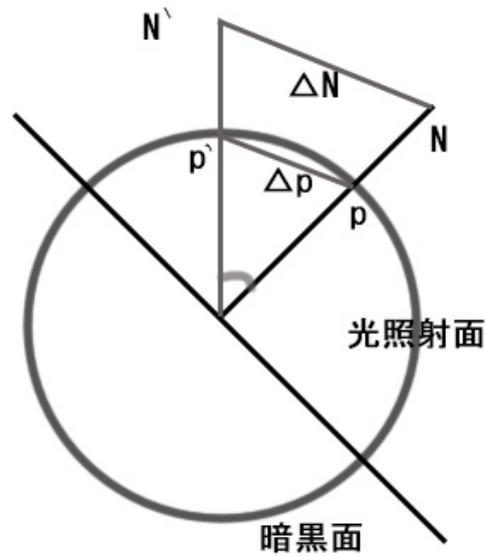


図 3.1: 法線と頂点の位置の変化

$$D(\theta, r) = \frac{\int_{-\pi \cdot \frac{r+1}{2r}}^{\pi \cdot \frac{r+1}{2r}} \cos(\theta + x) \cdot R(2r \sin \frac{x}{2}) dx}{\int_{-\pi \cdot \frac{r+1}{2r}}^{\pi \cdot \frac{r+1}{2r}} R(2r \sin \frac{x}{2}) dx} \quad (3.1)$$

本研究の提案手法では式 3.1 に表示し、曲率の変化に応じて円上の各点での散乱寄与を積分する。  $r$  は曲率半径で、  $r$  が少なくとも 1 に等しいとき、積分範囲は最大で  $2\pi$  となる。  $r$  が大きい場合、  $\frac{r+1}{2r}$  は最小  $\frac{1}{2}$ 、積分範囲は最小  $\pi$  となり、曲率半径に応じた積分範囲の自動調整が可能となる。

### 3.4 法線マップ上の凹凸ディテール

人体の皮膚表面のしわや毛穴も、表面下散乱に關与する。グラフィックのレンダリングでは、モデルの表面の微細な凹凸のディテールは、通常法線マップを使用して表現する。しかし、これらのディテールは幾何学的なモデリングによって生成したものではなく、これらの凹凸のディテールが示す曲率が非常に大きいか不連続であるため、曲率の計算を使用して散乱を行うと、不正確な効果が生じる可能性がある。そのため、曲率の計算を直接使用してこの表面下散乱の効果を完全にシミュレートすることはできない。これらのディテールが最終的な散乱に影響を与えないようにするために、法線をぼかし、微細な位置での法線の急激な変化を滑らかにする必要がある。

法線マップを単純にぼかし、それを表面下散乱の計算に適用することで、表面の凹凸のディテールをよく模倣できる散乱効果を得る。異なる波長の光は散乱の様子を異なる、そのため光の拡散プロファイルも波長のデータを用いて異なるぼかし処理を行う必要がある [24]。

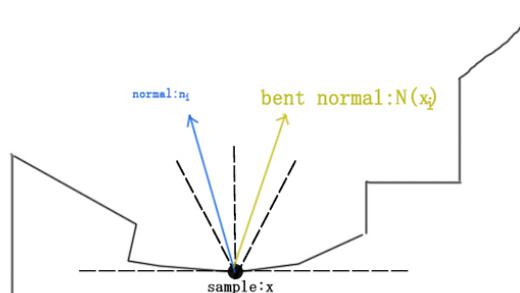


図 3.2: Bent Normal 概略図

原始の法線マップが正確な表面法線であると仮定し、各波長の光の法線を数回ぼかして、それぞれの色に対応する法線マップを得る。光照計算では、ぼかした法線マップと元の法線マップの線形補間の結果を最終的な法線として使用して光照計算を行う。法線マップをぼかした後も、得られるのは一種の表面法線である。

GPU Pro2[25] では、Bent Normal の手法を使用して法線のぼかし効果を模倣していた。Bent Normal とは、元の法線を変更した新しい法線を指し、それは現在のフラグメントが他のオブジェクトやジオメトリ要素に遮られていない平均方向、つまり光線が入射する主要な方向を指す。図

3.2 は BentNormal のサンプリングの概念図であり、青い Normal が表面の元の法線を示しており、周囲のジオメトリの分布を考慮した場合に右に調整された黄色の BentNormal を得る。本研究では、BentNormal に類似した手法を使用し、メッシュ表面のジオメトリ法線とディテール法線を各波長の光の拡散プロファイルに基づいて補間し、それぞれの法線を計算して最終的に表面下散乱計算に適用し、皮膚表面の散乱効果をより滑らかで自然にする。

図 3.3 と図 3.4 は、平滑化処理を行った後のレンダリング結果の比較である。

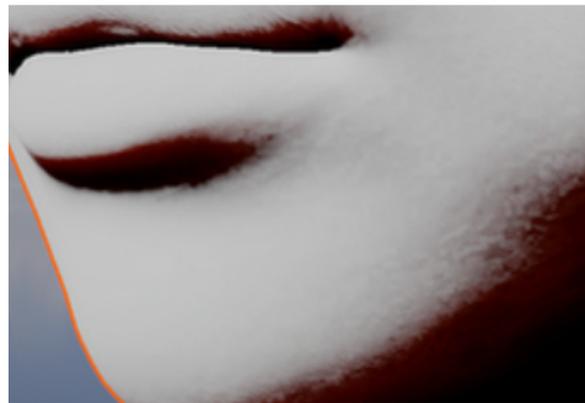


図 3.3: 平滑化前



図 3.4: 平滑化後

### 3.5 物理ベースのマイクロファセット反射モデル

人間の皮膚の表面反射効果をよりリアルにレンダリングするために、本研究では物理ベースのKS 反射モデルを使用して皮膚表面反射の照明効果を計算する。これは *cook - torrance* マイクロ

プレーン反射モデルの変形である。*cook - torrance* マイクロプレーン反射モデルは主に拡散反射部分と鏡面反射部分を記述しており、モデルの計算式は 2.4 の通りになる。レンダリングでは、マテリアル表面のある点に表示する色は、全方向の光の強度を収集し、その反射に応じて特定の方向の点の反射光の強度を計算する反射率式によって計算する。モデルを作成し、点の反射色を取得する。

本研究では、物理ベースのマイクロプレーン反射モデルを使用して鏡面反射部分の処理を主に説明するため、他の部分についてはあまり説明しない。他の照明計算モデルと区別する主な基礎は、クックトーランス反射モデルが鏡面反射照明を計算する際に *cook - torrance* 部分を導入する。これは、反射光の強度を表す鏡面双方向反射鏡面双方向反射率 2.4 として定義する。ある方向の光の他の方向の入射光の強度に対する。マイクロファセット理論を使って *cook - torrance* を説明すると、入射光が物体表面のマイクロファセットに照射されると、各マイクロファセットの方位分布が一定していないため、光に対して異なる鏡面反射方向が生じる。マイクロファセットの方向は次のとなる。半角ベクトル  $h$  の方向が同じである場合にのみ、マイクロプレーンの鏡面反射光が最終的な鏡面反射結果に寄与する。

KS 反射計算モデル [26] を使用して肌をレンダリングする際には、Fresnel 反射方程式  $F$  とマイクロファセット法線ベクトル分布関数  $D$  の部分のみを計算し、具体的な計算式は以下の式を示す。

$$f_{ks\_specular} = \max(n \cdot l) * rho\_s * \max\left(\frac{D_{BeckMann} * F_{Schlick}}{\|h\|^2}\right) \quad (3.2)$$

ここで、 $f_{ks\_specular}$  ペキュラーは KS モデルの鏡面反射値であり、 $n \cdot l$  は法線方向  $n$  と光線方向  $l$  の内積を表す。 $rho\_s$  は光線強度のスケーリングファクターであり、 $h$  は正規化されていないハーフベクトルで、 $\|h\|$  はそのハーフベクトル  $h$  の大きさである。

散乱部分の事前計算実装では、曲面散乱の事前積分結果は RGB 三色チャンネルの値のみを含み、 $A$  (アルファ) チャンネルの情報は含まれていない。一方で、鏡面反射部分の事前計算実装では、Beckmann 分布関数 [27] の事前計算結果は浮動小数点数を返し、1 つのチャンネルのみに有用な情報が含まれている。メモリ使用量を節約し、テクスチャの読み込み回数を減らすために、本研究では散乱と反射の事前計算のルックアップテーブルを同じテクスチャに結合して保存する提

案する。曲面散乱の自動的に調整事前積分結果は RGB チャンネルに保存され、A チャンネルには Beckmann 微平面分布関数の事前計算結果を保存する。

### 3.6 LUT 図生成

前述の式 3.1 に基づいて、曲率半径は自動的に適切な積分範囲に調整され、その後、円環上の積分範囲内の各点から表面点までの距離を計算し、各点の散乱寄与を求め、最後にこれらの散乱寄与を積分して最終的な散乱光とする。Beckmann 微平面法向量分布関数の計算時には、散乱と鏡面反射の結合されたルックアップテーブルから直接  $\alpha$  チャンネルの値を読み取り、計算に参加する。拡散プロファイルにガウス和を近似として散乱の自動調整プリインテグレーションのコードを実装する。

図 3.5 は、本研究の式に基づいて生成された LUT 図である。

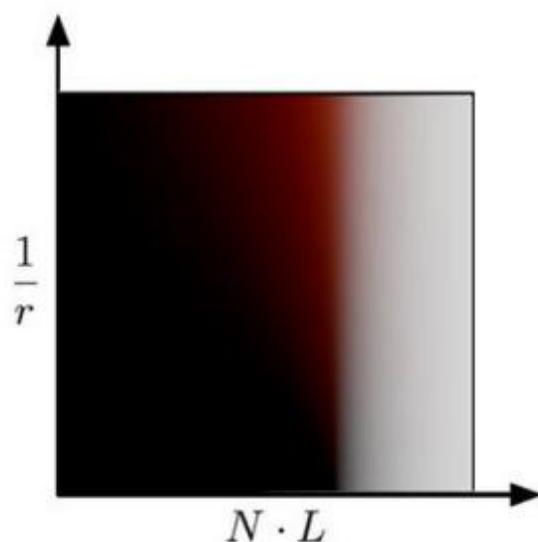


図 3.5: 提案手法で生成した LUT

本研究で作成した LUT と先行研究の LUT の比較を図 3.6 に示す。曲率が大きいほど積分範囲は広くなり、曲率が小さいほど積分範囲は狭くなる。先行研究の実験結果によると、皮膚表面に大きな変化がある場合、色が濃くなる。LUT 図の色分布を見ると、リアルタイムレンダリングでは、人の顔の鼻の輪郭線がかなり濃くなっている。

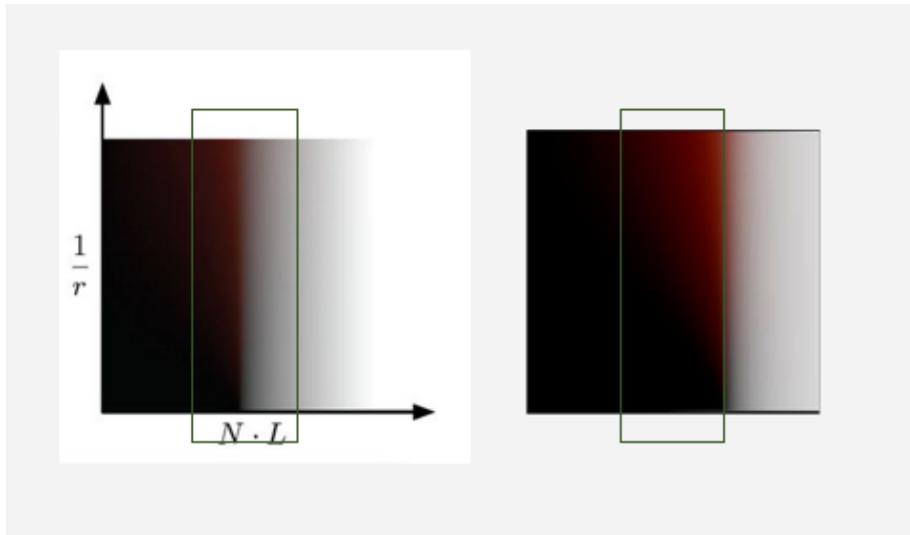


図 3.6: LUT の比べること

## 第 4 章

# 実装および評価

この章では、人体の皮膚のリアルタイムなレンダリングの実験結果と比較分析を主に紹介する。まず、実験のハードウェア構成パラメーターとモデルの選択を紹介し、次に提案された自己調整プリインテグレーションスキンスェーディング手法の実験結果と、本文の向光面照明モデルによる皮膚のレンダリング実験結果を示す。その後、予め計算された透過アルゴリズムを使用した実験結果を紹介し、最後に、本文で提案された様々な光照効果に基づく人体の皮膚のリアルなリアルタイムレンダリング光照モデルで複数のインスタンスをレンダリングした実験結果を示す。実験には各部分のレンダリング効果とレンダリング効率の比較分析が含まれている。

## 4.1 実験のハードウェア構成

この研究の研究目的は、人体の皮膚を実感的にレンダリングする基盤の上で、計算効率を向上させ、一般的な構成のハードウェアでも人体の皮膚をリアルタイムでレンダリングできるようにすることである。これは、ゲームシーンでの人体の皮膚の現実感の表現に利用することを意味している。したがって、この研究の実験では、比較的一般的なハードウェア構成が選択され、本文で提案された皮膚光照モデルの有効性を示すために使用された。具体的な実験のハードウェア構成は以下の表 4.1 の通りである。

表 4.1: ハードウェア構成

環境設定	配置
CPU	8AMD Ryzen 5 2600 Six-Core Processor
CPU クロック	33.40 GHz
GPU	NVIDIA GeForce GTX 1660
GPU メモリ	6GB
RAM	16GB
RAM クロック	2666MHz
オペレーティングシステム	Windows 10
R エンジン	Unity 2020.3.14f1

本研究の焦点は、人体の皮膚のレンダリングにあり、具体的な個々のキャラクターのレンダリングではない。そのため、日常の練習の一環として作成された一般的な人物 3d モデルが選択され

た。モデルの具体的な情報は以下表 4.2 の通して示す。

表 4.2: モデル情報

属性	データ
ポリゴン三角形	3636
頂点数	2431
法線数	2431
uv チャンネル	1
テクスチャ	4

## 4.2 実装の速度

UnityShader で本手法に基づいてリアルタイムレンダリングを行った。使用した 3D モデルのポリゴン (三角形) は 3636, 頂点数は 2431 である。

渲染をリアルな状態に保ちながら、計算速度を向上させ、一般的なデバイスでリアルタイムのレンダリングを達成するために、提案手法の光照レンダリングモデルは、表面下散乱の計算部分で事前計算の手法を採用し、一部の複雑な計算を事前に完了し、テクスチャに保存する。表現効果のため、人体の皮膚油脂層をシミュレートするための数値図を添加した。レンダリングランタイムで事前計算の結果を直接読み取り、複雑な計算とレンダリンググループを分離する。この方法は計算速度を大幅に向上させ、リアルタイムレンダリングを達成することができますが、一部の追加メモリを占有する可能性である。以下の図 4.1 は実験で使用されたテクスチャの具体的な情報である。

事前計算で生成されたルックアップテーブルのメモリ使用量は非常に少なく、実際の皮膚のレンダリングに必要な他のテクスチャのメモリよりも遥かに小さい。実際のアプリケーションでは、複数の皮膚のレンダリングがある場合、これらの事前計算済みのルックアップテーブルを 1 回だけインポートするだけで、複数のインスタンスのレンダリングが完了する。追加のメモリ占有は非常に小さく、合計で 1MB を超えないが、皮膚のレンダリングの実行効率を大幅に向上させることができる。

図 4.2 は 3D モデルへの投影を示す。

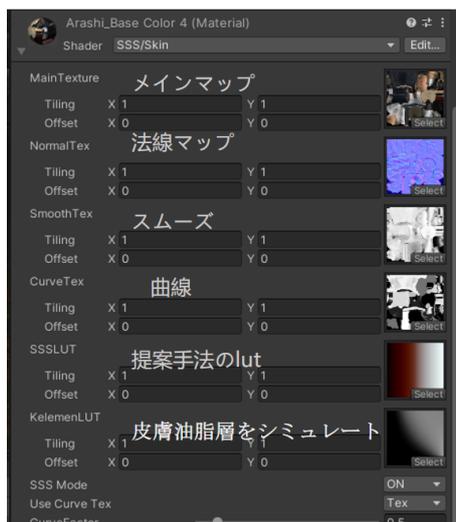


図 4.1: テクスチャ一覧表



図 4.2: 3D モデルへの投影

皮膚のレンダリングに適用されると、従来のプリインテグレーションスキンシェーディングアルゴリズムによる皮膚の全体的な効果は、図 4.4(a) に示されています。一方、提案手法による皮膚の全体的な効果は、図 4.4(b) に示されている。この研究の検証は、Unity のデフォルト 3D シーンを使用し、同じシーン、同じ光源、同じ角度で行われた。複数のモデルをレンダリングする検証

は、図 4.3 に示されている。3つのモデルを同時にレンダリングしてもスピードは落ちなかった。



図 4.3: 複数のモデルをレンダリング

先行研究のプログラムをクローンし、Unity エンジンにインポートしてレンダリングし、その結果を本研究の手法と比較する。速度測定は以下の表 4.3 に示す。

表 4.3: 描画速度

レンダリング方法	FPS
表面下散乱効果	79
先行研究	69
提案手法	66

実際の写真と本研究の実装結果の比較は図 4.5 で示す。a は実際の写真、b は先行研究の LUT を使った結果、c はこの手法のレンダリングスクリーンショットである。実際の写真の効果と比較して、鼻筋の部分ではより明確な境界線がある。皮膚の色から赤い境界線まで、そして影まで。急激な変化がある場合、散乱効果はより顕著になるはずである。

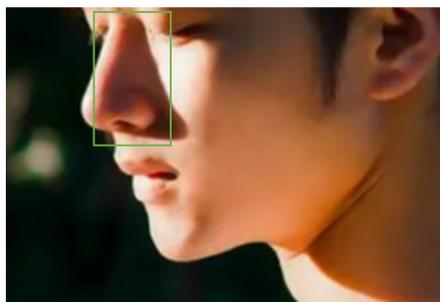


(a)既存手法



(b)提案手法

図 4.4: 既存手法との比較



(a)実例写真



(b) 先行研究 (c)提案手法

図 4.5: 写真との比較

### 4.3 評価

先行研究と比較して、本研究で提案された方法は、皮膚表面の曲率に基づいて散乱効果を調整するためにより妥当なルックアップテーブル画像を使用するものである。4.2 節より、本手法と従来手法の描画速度はほぼ同じであった。リアルタイムレンダリングの速度に対する悪影響は見られなかった。リアルタイムレンダリングの速度を確保した上で、皮膚表面の散乱効果を近距離で観察すると、鼻の輪郭が実際の写真に近づいていることが明らかになる。研究の目的は一定程度達成した。しかし、影の輪郭線はあまりにも硬直しており、色合いがあまりにも赤みがかって

る。現状では曲率を頂点のアトリビュートとして GPU に転送している。本研究では curve マッピングが使用されたが、curve マッピングの情報はキャラクターモデルの服地を区別するために使用した。曲率マップを作成することでピクセル単位で与えられる、より詳細な曲率を用いることも必要であると考えられる。本研究では他の肌の色合いの肌のレンダリングには触れておらず、異なる肌の色調の透過率を考慮していないため、レンダリング結果が実際の写真と大きく異なることがある。

実際の映像作品での使用を想定すると、必ずしも物理的に厳密な表現でなくても表面下散乱現象を誇張して表現することで、登場するキャラクターの個性に合わせて特徴的な肌の質感を表現することが求められる [28]。

本研究の実験を利用したモデルの精度に限界があるため、現時点の結果はまだ非現実感が強い。一部分表現を誇張する必要があるモデルでは、演出効果が得られるかもしれない。

## 第 5 章

### まとめと展望

本研究では、人肌リアリズムレンダリング技術について検討し、モデル表面の曲率変化に応じて表面下散乱結果を自動調整する手法を提案し、リアルタイムレンダリングの要求を満たす。研究の結果、本論文で提案した手法は、明瞭な結果を見ることができ、リアルタイムレンダリングを実現し、ゲームなどのリアルタイムレンダリングの要求に応えられることがわかった。

光にさらされたときの肌の色は、環境光、サブサーフェスからの散乱光、鏡面反射光、透過光が重なったものである。ただし、透過光の LUT は加算されない。そのため、モデルの薄い部分における光の透過効果を正しく表示することができない。計算方法はあらかじめ生成した LUT マップを変更するだけなので、計算効率に差はない。リアルタイムレンダリング速度を達成したのに、実行した結果はリアルでないよう部分があった。

今後は、透過光データを計算し、LUT マップを生成する [29]。まだ、重畳光効果を考慮した上で、提案手法を直してレンダリングプロセスを再設計、再構築を施していく。写真品質の画像をリアルタイムレンダリングすることを目指す。

曲率をリアルタイムで求めることによるデフォーマブルオブジェクトへの対応が挙げられる。描画時のデプスバッファに微分演算を用いることで高速に曲率を求める報告は既に存在する [30] が、物体の境界付近で生じる誤差の処理が難しいこと、処理にかかる計算コストが高いことが課題であると考えられる。シミュレーションを用いても、現実の照明性能を完全に再現することはできず、表面の曲率に影響される散乱光の現象は、今後も課題となる。

# 謝辭

本研究を進めるために多くのご指導やアドバイスをしてくださった先生方や研究室のメンバーの皆様のお力添えのおかげです。心より感謝申し上げます。

特に、研究生としての最初の一步からお世話になった渡辺先生には、深く感謝しています。

中国での学部時代、メディアの勉強をしていたが、学校では養成機関の講師を雇い、直接手を動かして3dモデリングを指導してもらい、実践的な知識を学ぶことに重点を置いていました。その頃からゲームモデリングにとっても興味を持つようになり、留学が決まった時はとても興奮しました。東京工科大学に入学した時は、ワクワク感と新鮮さと緊張感でいっぱいでした。最初に研究テーマに取り組んだ際、渡辺先生は熱心にサポートしてくださいました。初めての発表の際、渡辺先生が親身になって作成したプレゼンテーション資料を送ってください、その中で研究の意義や方向性について理解する助けになりました。その温かいサポートが、私の研究への理解を深め、自信を持って進む力となりました。渡辺先生のご指導のもと、研究の基礎を築き、着実にステップを進んでいくことができました。留学生としてわからないことも多く、学会発表のときには、渡辺先生と阿部先生が徹夜で論文の添削をして頂きました。このようなプロフェッショナルで親切な先生に出会えて本当に幸運でした。

研究生から修士にかけて、色々な授業や研究に関する助言や指摘をくださった三上先生に感謝いたします。授業ではCGやリアルタイムレンダリングに関する様々なことを教えていただき、研究に関しては審査にて多くの助言やご指摘をしていただいたことに感謝いたします。予備審査と最終審査にてご指摘をしていただいた菊池先生と副査先生に感謝いたします。

シュウアンさんに感謝しています。暗い日々にも光を与えてくれました。おかげで、自信を取り戻し、困難に立ち向かう勇気を持つことができました。

また、研究室の仲間たちにも心から感謝しています。お互いに励まし合い、知識を共有する中で、成長できたことに感謝しています。共に乗り越えた困難な瞬間が、絆をより強固なものにしました。研究生活では、同じ研究室の親友、李君にお世話になりました。陳君も一緒に熱心に研究問題について議論し、多くの刺激を与えてくれた。蘇君は、先輩のようにリアルタイムレンダリングのビデオチュートリアルを勧めてくれました。

暗い日々にも光を与えてくれました。あなたのおかげで、私は自信を取り戻し、困難に立ち向かう勇気を持つことができました。

学生時代も終わりに近づき、就職活動の慌ただしさに紛れて、自分を見失ってしまうこともあると思います。初心を忘れず、ずっと抱いていた夢を実現してほしいと考えています。ゲームサイエンス研究室で学び、渡辺先生から指導を受け、外国人の友人とゲームについて語り合うことが、私の夢に一番近いのかもしれない。

最後に、私を支えてくれた家族や友人たちへ。あなたたちの応援がなければ、この道のりを歩むことはできませんでした。心から感謝しています。これからも、学びの旅路は続きますが、これまでのご指導や助言を胸に、新たなステージに進んでいきたいと思います。どうもありがとうございます。

## 参考文献

- [1] Donner C and Jensen HW. Light diffusion in multi-layered translucent materials. *ACM Transactions on Graphics*, pp. 24–26, 2005.
- [2] Hanrahan P and Krueger W. Reflection from layered surfaces due to subsurface scattering. *ACM Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive technique*, pp. 165–174, 1993.
- [3] So-Ling C and Li L. A multi-layered reflection model of natural human skin. *IEEE Computer Graphics International 2001*, pp. 249–256, 2001.
- [4] Stam J. An illumination model for a skin layer bounded by rough surfaces. *Rendering Techniques 2001*, pp. 36–55, 2001.
- [5] Krishnaswamy A and Baranoski GVG. A biophysically-based spectral model of light interaction with human skin. *Computer Graphics Forum Blackwell Publishing*, Vol. 23, No. 3, pp. 331–340, 2004.
- [6] Jensen H W, Marschner SR, and Levoy M. A practical model for subsurface light transport. *ACM Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics interactive techniques*, pp. 511–518, 2001.
- [7] Eric Penner. Pre-integrated skin shadin. *SIGGRAPH advances in real-time rendering course*, 2011.
- [8] Jorge Jimenez and Javier von der Pahlen. Next generation character rendering. *GAME DEVELOPERS CONFERENCE*, 2013.
- [9] Jimenez J, Karoly Zsolnai, Adrian Jarabo, Christian Freude, and Thomas Auzinger. Separable subsurface scattering. *Computer Graphics to appear*, 2015.
- [10] Deferred Single Scattering. Rendering aaa-quality characters of project a1. *NDC NEXON DEVELOPERS CONFERENCE*, pp. 15–85, 2016.
- [11] Mengting Yu and Fuyan Liu. Real-time rendering for realistic human skin on web-side. *IEEE International Conference on Audio*, 2017.
- [12] Cao Ying, Liu Huiyi , and Qian Subin. Regression of face skin real-time rendering based on bssrdf model. *Computer and Modern Chemistry*, Vol. 96, No. 101, 2019.

- [13] 鄭中翔, 齋藤豪. 面光源照射におけるソフトシャドウのリアルタイム生成に関する研究. 第73回全国大会講演論文集, Vol. 3, No. 1, pp. 85–86, 2011.
- [14] Kolchin K. Curvature-based shading of translucent materials, such as human skin. *Proceedings of the 5th International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques in Australia and Southeast Asia*, pp. 239–242, 2007.
- [15] d'Eon and Eugene. Nvidia demo team secrets advanced skin rendering. *Presentation at Game Developer Conference*, 2007.
- [16] Jorge Jimenez and David Whelan. Real-time realistic skin translucency. *IEEE Computer Society*, 2010.
- [17] Eugene d'Eon and David Luebke. *Advanced Techniques for Realistic Real-Time Skin Rendering*. Addison-Wesley Professional, 2nd edition, 2007. Advanced Techniques for Realistic Real-Time Skin Rendering.
- [18] James F. Blinn. Models of light reflection for computer synthesized pictures. *SIG-GRAPH77*, pp. 192–198, 1977.
- [19] James F. Blinn. Texture and reflection in computer generated images. *CACM*, Vol. 19, No. 10, pp. 542–547, 1976.
- [20] Koenderink J and Pont S. The secret of velvety skin. *Machine Vision and Applications*, Vol. 14, No. 4, pp. 260–268, 2003.
- [21] Eric Heitz. Understanding the masking-shadowing function in microfacet-based brdfs. *Journal of Computer Graphics Techniques*, Vol. 3, No. 2, pp. 48–207, 2014.
- [22] B. Walter, S. R. Marschner, H. Li, and K. E. Torrance. Microfacet models for refraction through rough surfaces. *Rendering Techniques, 18th Eurographics Workshop on Rendering*, 2007.
- [23] ROBERT L. COOK and KENNETH E. TORRANCE. A reflectance model for computer graphics. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 1, No. 1, pp. 7–24, 1982.
- [24] Matt Pharr and Simon Green. *Programming Techniques, Tips and Tricks for Real-Time Graphics*. Addison-Wesley Professional, 2nd edition, 2004.

- [25] PENNER E and BORSHUKOV G. *Real-Time Approximation of Light Transport in Translucent Homogenous Media*. A K Peters/CRC Press, 2nd edition, 2011. GPU Pro: Advanced Rendering Techniques.
- [26] Christophe Schlick. An inexpensive brdf model for physically-based rendering. *Computer Graphics Forum*, pp. 233–246, 1994.
- [27] E. P. Beckmann and A. Spizzichino. The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces. *MacMillan*, pp. 70–98, 1963.
- [28] 久保尋之, 土橋宜典, 津田順平, 森島繁生. リアルタイムスキンシェーダとしての曲率に依存する反射関数の提案と実装. *IPSJ SIG Technical Report*, pp. 1–6, 2011.
- [29] Jimenez J, Whelan D, and Sundstedt V. Real-time realistic skin translucency. *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 30, No. 4, pp. 32–41, 2010.
- [30] Romain Vergne, Roland Pacanowski, Pierre Barla, Xavier Granier, and Christophe Schlick. Light warping for enhanced surface depiction. *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 2009)*, Vol. 28, No. 3, pp. 1–6, 2009.

# 発表実績

## ポスター発表

- 高峰, 阿部雅樹, 渡辺大地 人肌の透過光表現リアルタイムレンダリングに関する研究, 映像表現・芸術科学フォーラム, 2023

## 口頭発表

- 高峰, 阿部雅樹, 渡辺大地, 人肌の透過光表現リアルタイムレンダリングに関する研究, DiGRA JAPAN 2023 Summer, 2023