

NVIDIA

高度なスキン レンダリング

Bryan Dudash デベロッパー テクノロジ エンジニア

2007年9月

- デモ：人間の頭部
- 皮膚の外観
- システムの概要
- 鏡面の反射率
- 散乱理論
- 高度な皮下散乱

デモ



皮膚の外観



- シミュレートするのが困難



皮膚の外観



- シミュレートするのが困難
 - ディテール化



皮膚の外観



- シミュレートするのが困難
 - ディテール化
 - 最新のスキャン



皮膚の外観



- シミュレートするのが困難
 - ディテール化
 - 最新のスキャン
 - 半透明性



皮膚の外観



- シミュレートするのが困難
 - ディテール化
 - 最新のスキャン
 - 半透明性
 - 皮下散乱



2つの構成要素の反射率モデル



- 大半のマテリアルは2つの構成要素を使用

2つの構成要素の反射率モデル



- 大半のマテリアルは2つの構成要素を使用
 - 表面反射率(スペキュラー)

2つの構成要素の反射率モデル



- 大半のマテリアルは2つの構成要素を使用
 - 表面反射率(スペキュラー)
 - 表面反射率(ディフューズ)

2つの構成要素の反射率モデル



- 大半のマテリアルは2つの構成要素を使用
 - 表面反射率(スペキュラー)
 - 表面反射率(ディフューズ)
- 物理ベースのモデルを使用

2つの構成要素の反射率モデル



- 大半のマテリアルは2つの構成要素を使用
 - 表面反射率(スペキュラー)
 - 表面反射率(ディフューズ)
- 物理ベースのモデルを使用
 - スペキュラーBRDF(双方向反射率分布関数)

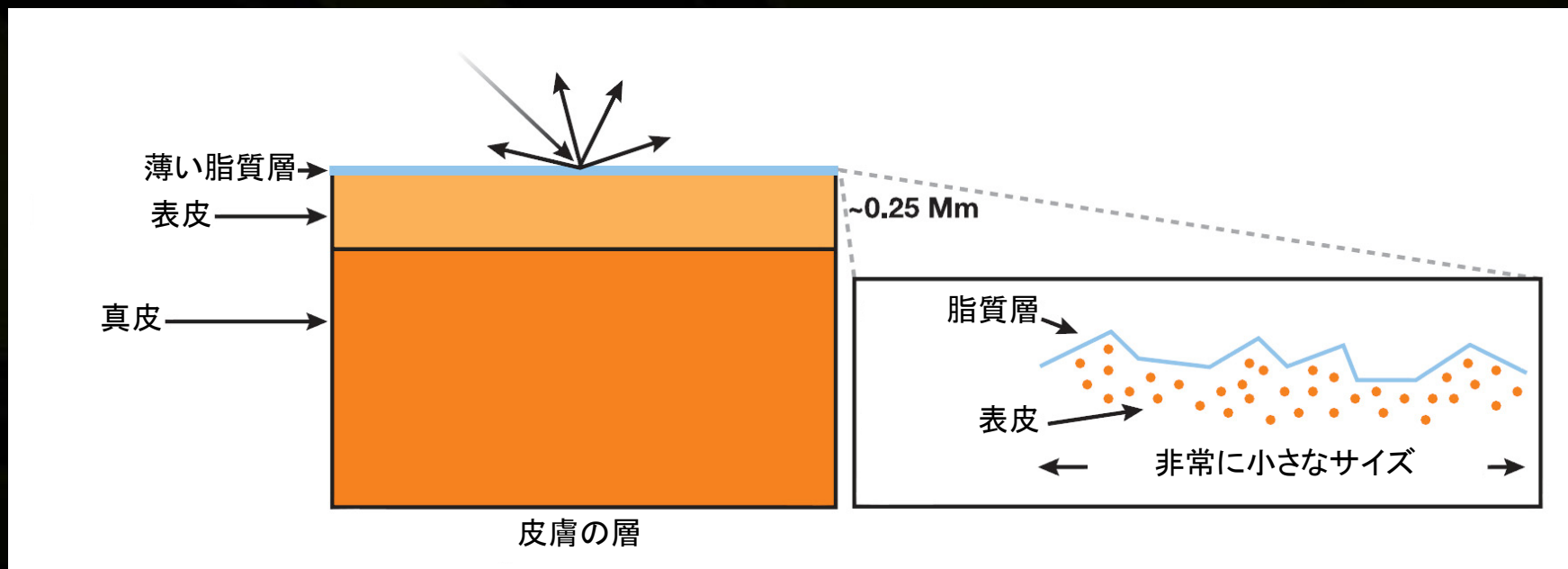
2つの構成要素の反射率モデル



- 大半のマテリアルは2つの構成要素を使用
 - 表面反射率(スペキュラー)
 - 表面反射率(ディフューズ)
- 物理ベースのモデルを使用
 - スペキュラーBRDF(双方向反射率分布関数)
 - 効果的な皮下散乱の近似式

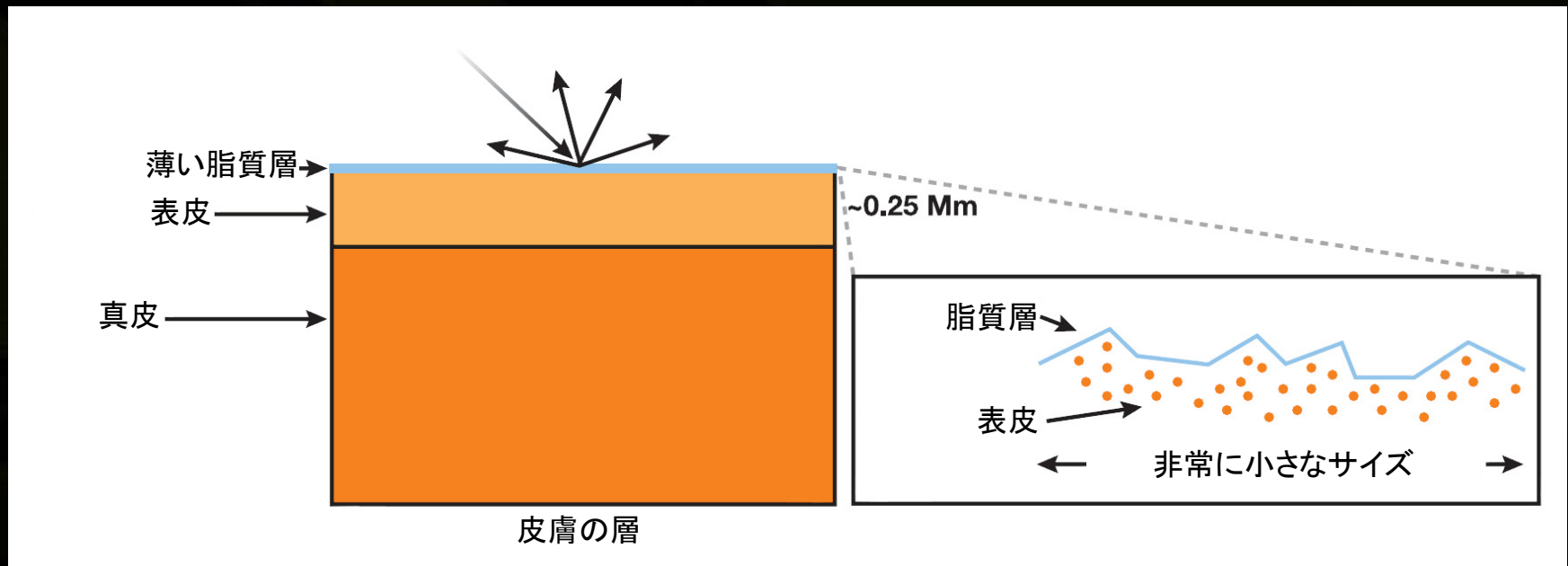
皮膚表面の反射

- スキン[DJ2006]の物理ベースのモデルから開始する



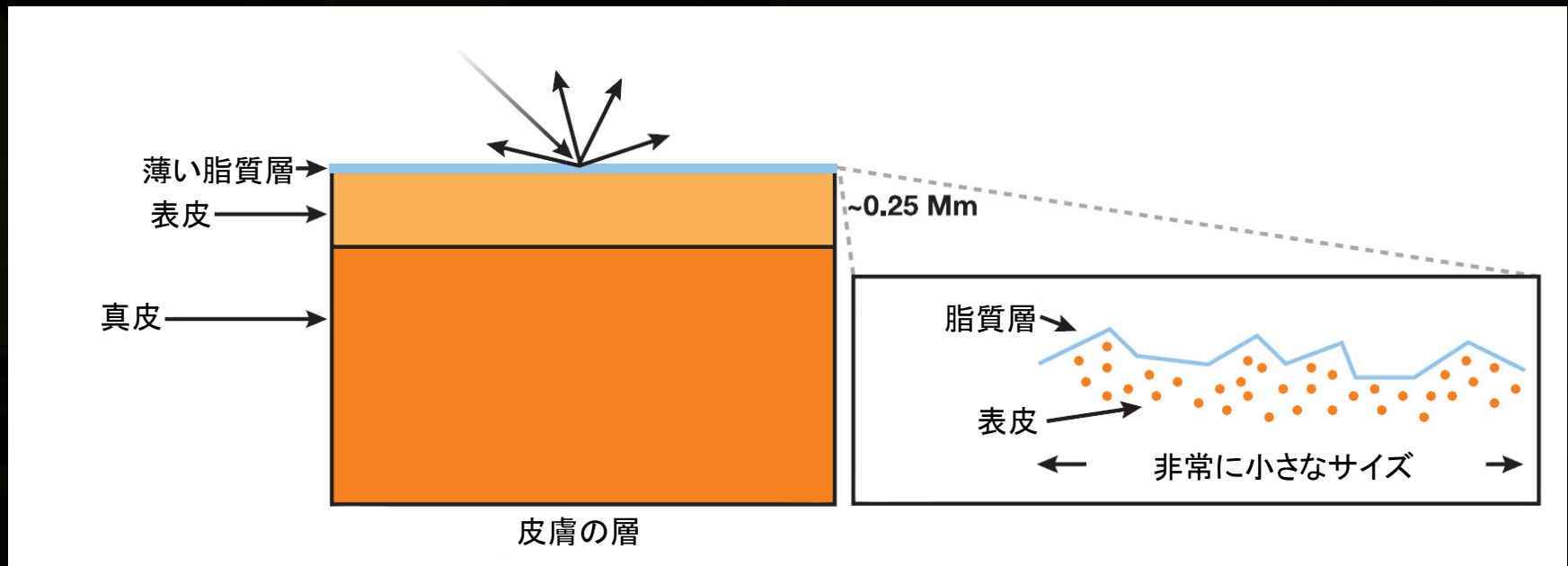
皮膚表面の反射

- スキン[DJ2006]の物理ベースのモデルから開始する
- 最上位のインタラクションを検討



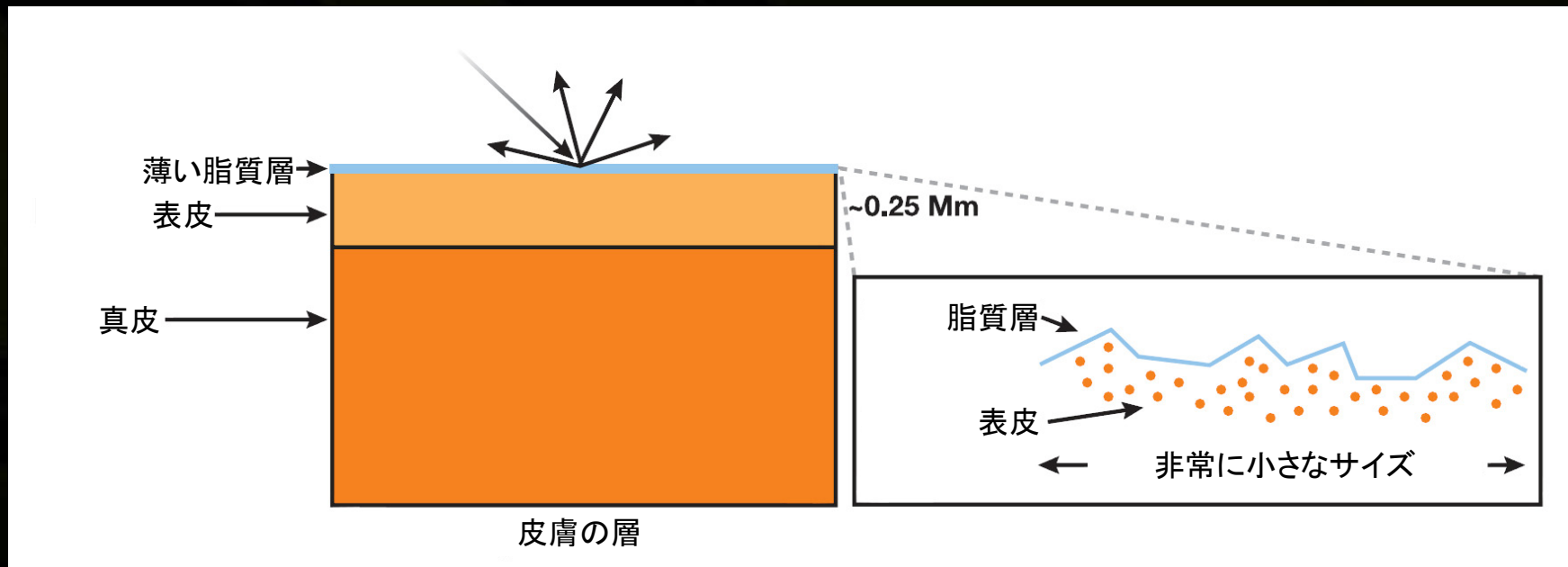
皮膚表面の反射

- スキン[DJ2006]の物理ベースのモデルから開始する
- 最上位のインタラクションを検討
 - 光りが反射する量



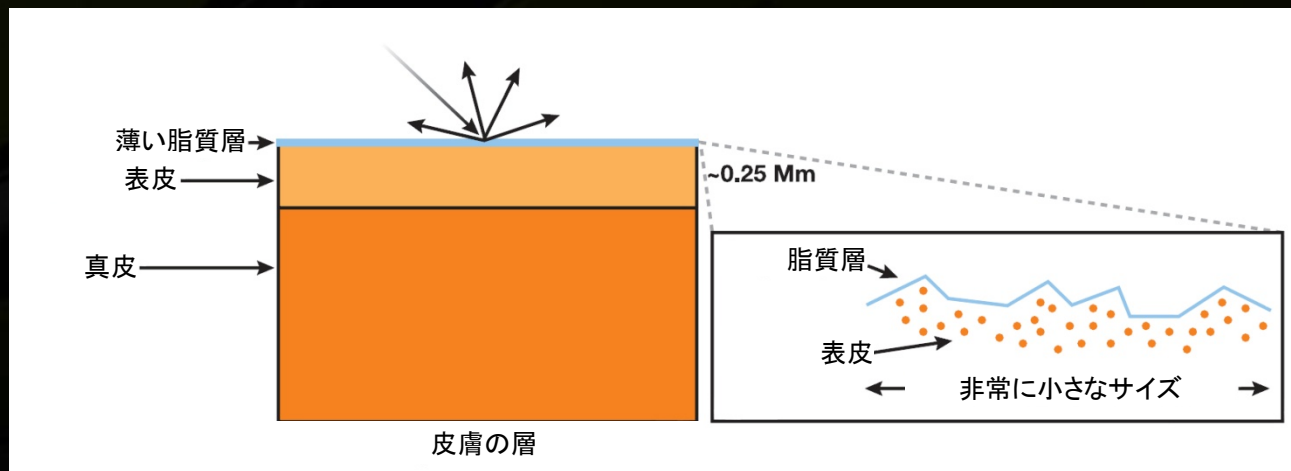
皮膚表面の反射

- スキン[DJ2006]の物理ベースのモデルから開始する
- 最上位のインタラクションを検討
 - 光りが反射する量
 - 光りの向き



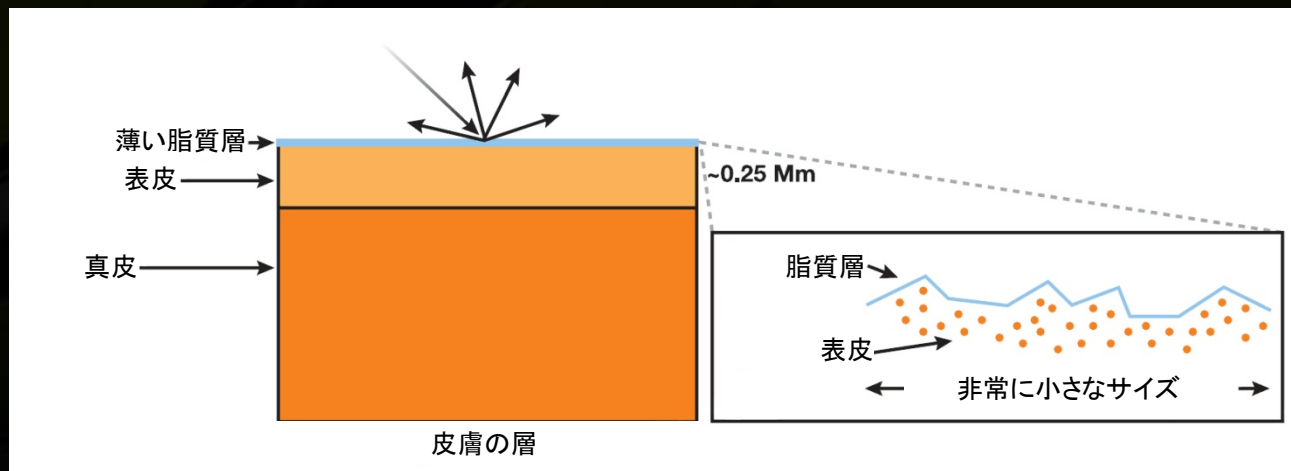
皮膚表面の反射

- 平均で入射光線の最大6%だけが直接反射する
[Tuchin 2000]



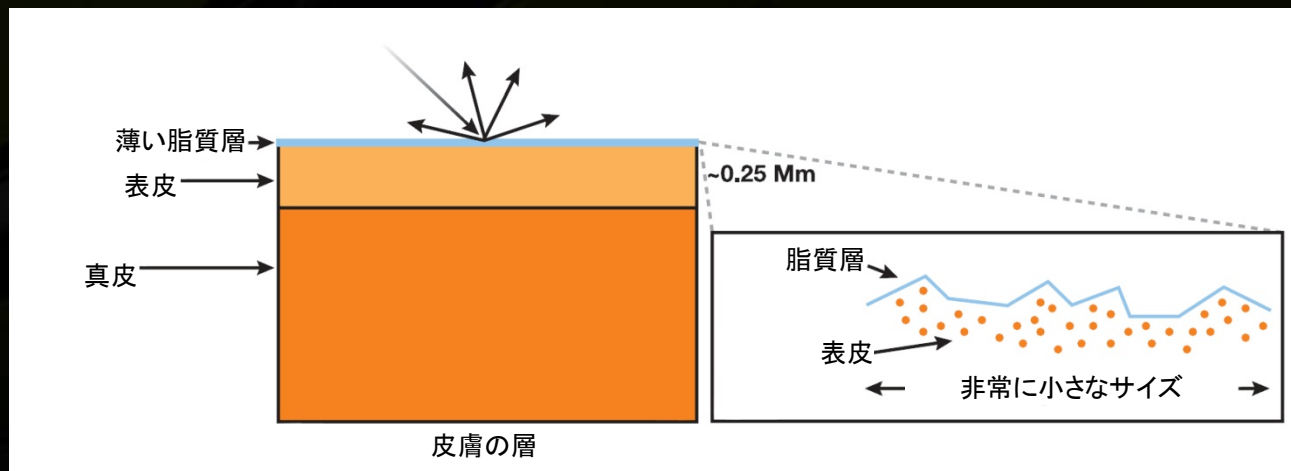
皮膚表面の反射

- 平均で入射光線の最大6%だけが直接反射する
[Tuchin 2000]
- これはフレネル反射によるものである
 - 皮膚によって色は決まらない



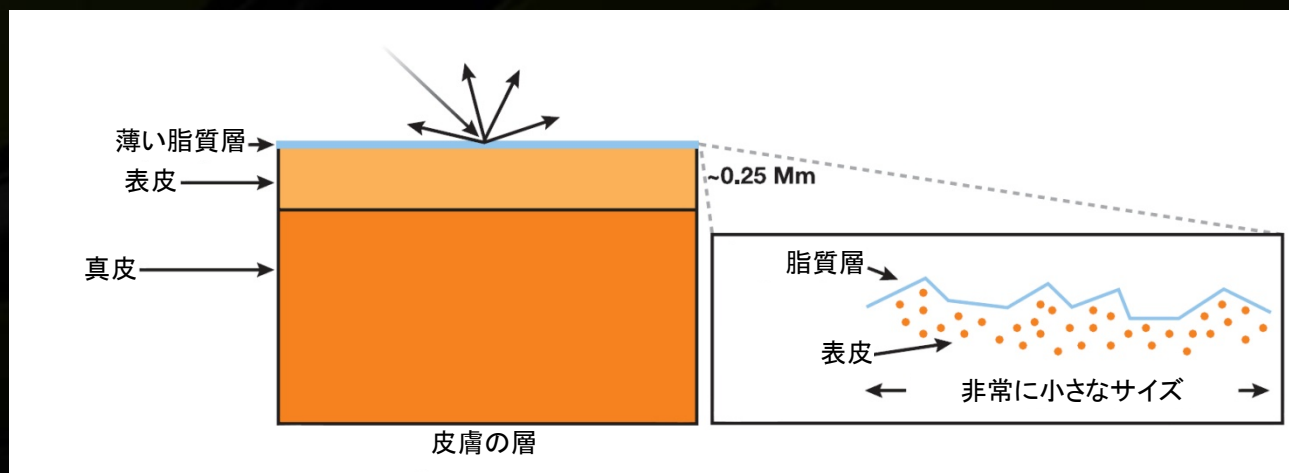
皮膚表面の反射

- 平均で入射光線の最大6%だけが直接反射する
[Tuchin 2000]
- これはフレネル反射によるものである
 - 皮膚によって色は決まらない
- 最上位の皮膚表面が粗い
 - 入射角度は1つ：出射角度は様々



皮膚表面の反射

- 平均で入射光線の最大6%だけが直接反射する
[Tuchin 2000]
- これはフレネル反射によるものである
 - 皮膚によって色は決まらない
- 最上位の皮膚表面が粗い
 - 入射角度は1つ: 出射角度は様々
 - スペキュラーBRDF機能を使用



皮膚表面の反射



● どのBRDFを使用すべきか

皮膚表面の反射



- どのBRDFを使用すべきか
- PhongとBlinn-Phong
 - 物理ベースではない
 - もっと改良できる

皮膚表面の反射



- どのBRDFを使用すべきか
- PhongとBlinn-Phong
 - 物理ベースではない
 - もっと改良できる
- 物理ベースのモデルに変更

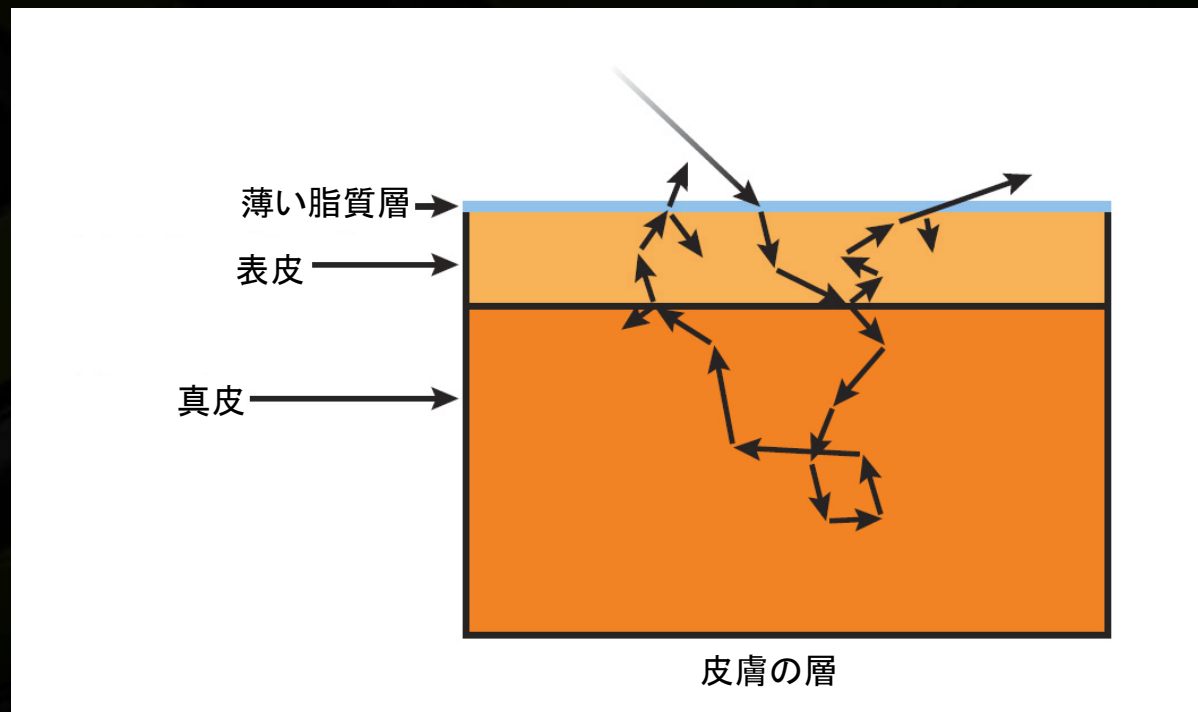
皮下の反射率



● 残りの94%については？

皮下の反射率

- 残りの94%については？
- 皮下散乱を計算する必要がある



皮下の反射率



- 皮下散乱

- 皮膚にソフトな外観と色を与える

皮下の反射率



● 皮下散乱

- 皮膚にソフトな外観と色を与える
- 計算コストが高い

皮下の反射率



● 皮下散乱

- 皮膚にソフトな外観と色を与える
- 計算コストが高い
- 実際の外観に不可欠



皮下散乱なし



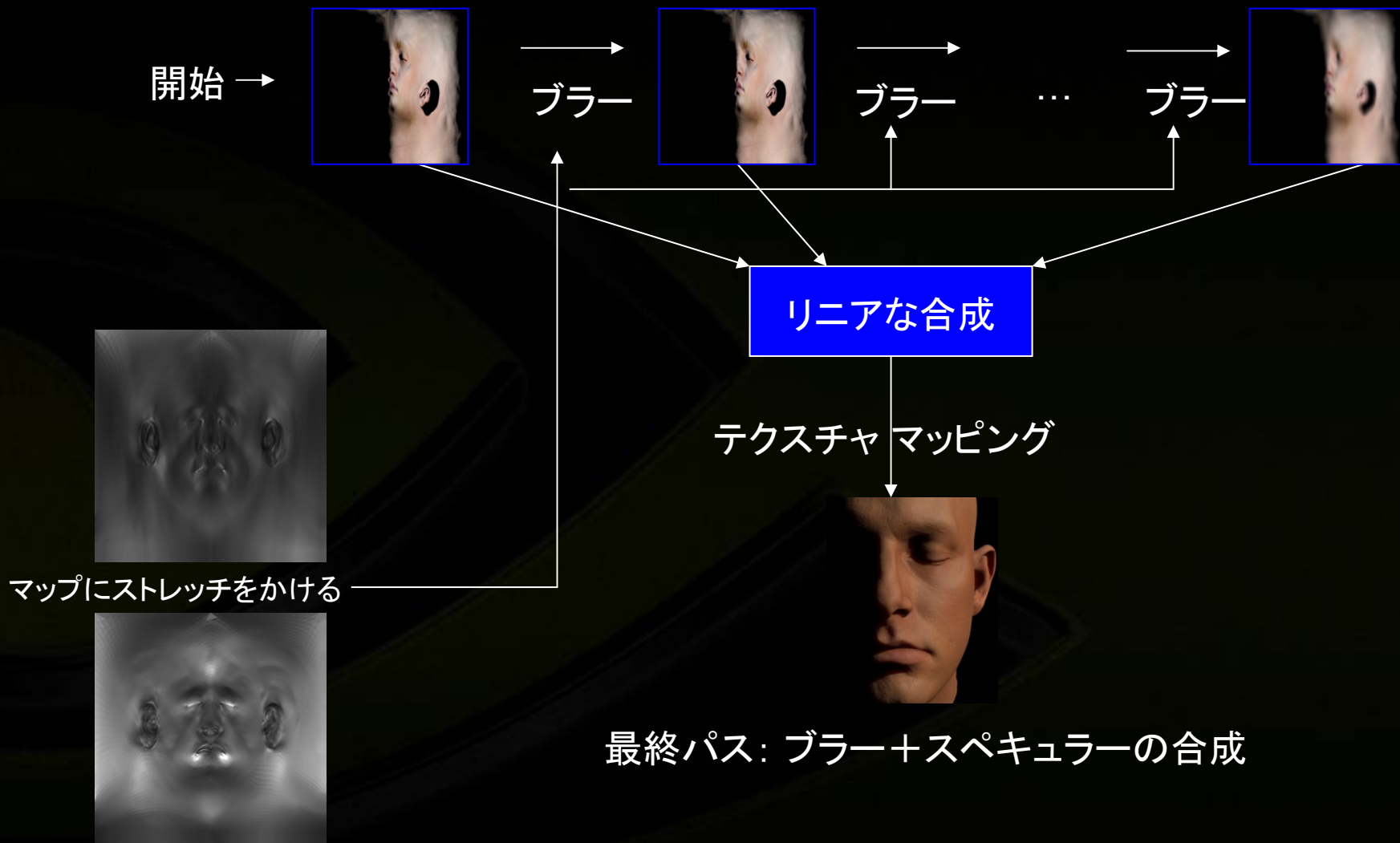
皮下散乱あり

- 2つの構成要素の反射率
 - スペキュラーBRDF(双方向反射率分布関数)
 - 皮下散乱の近似式

- 2つの構成要素の反射率
 - スペキュラーBRDF(双方向反射率分布関数)
 - 皮下散乱の近似式
- スペキュラー
 - Kelemen Szirmay-Kalos 2001 BRDF
 - Schlickの高速フレネル
 - 「Weyrich et al. 2006」の測定パラメータ

- 2つの構成要素の反射率
 - スペキュラーBRDF(双方向反射率分布関数)
 - 皮下散乱の近似式
- スペキュラー
 - Kelemen Szirmay-Kalos 2001 BRDF
 - Schlickの高速フレネル
 - 「Weyrich et al. 2006」の測定パラメータ
- 皮下
 - 高度なテクスチャ空間の拡散
 - マップ補正にストレッチをかける
 - 何回かガウスぼかしをかけ、合成する

概要図



鏡面の反射率



- 物理ベースのBRDFを使用

鏡面の反射率



- 物理ベースのBRDFを使用
- PhongとBlinn-Phongを改良可能

鏡面の反射率



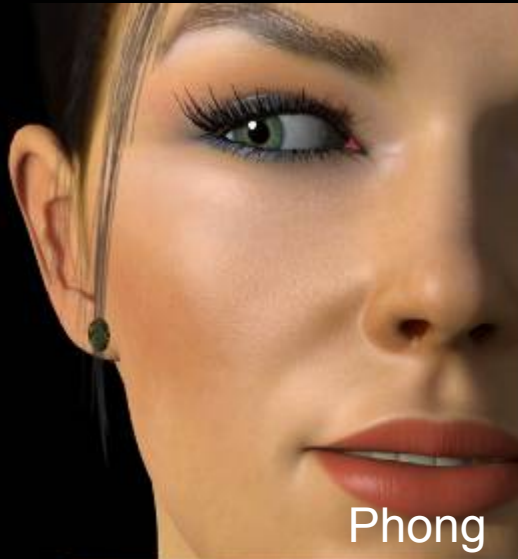
- 物理ベースのBRDFを使用
- PhongとBlinn-Phongを改良可能
- Torrance-Sparrowは現実性を証明した
 - 正確に計算すると長時間かかる

鏡面の反射率



- 物理ベースのBRDFを使用
- PhongとBlinn-Phongを改良可能
- Torrance-Sparrowは実用性を証明した
 - 正確に計算すると長時間かかる
- Kelemen Szirmay-Kalos 2001
 - TSより高速
 - Schlickのフレネル項でより高速に

Phong vs. 物理ベースのBRDF



*[Kelemen and Szirmay-Kalos 2001]

Phong vs. 物理ベースのBRDF



- グレージング角でのスペキュラーの増加
- ここでは、Kelemen-Szirmay-Kalos 2001を使用する



BRDFを使用したレンダリング



● BRDF

- 複数の分析項目
- フレネル

BRDFを使用したレンダリング



- BRDF
 - 複数の分析項目
 - フレネル
- パラメータ
 - ρ_s
 - ベクトル N 、 V 、 L
 - 粗さ(m)
 - 屈折率(η)

BRDFを使用したレンダリング



● BRDF

- 複数の分析項目
- フレネル

● パラメータ

- rho_s
- ベクトルN、V、L
- 粗さ(m)
- 屈折率(eta)

```
specularLight += lightColor[i] * lightShadow[i] * rho_s *  
    specBRDF( N, V, L[i], eta, m) * saturate( dot( N, L[i] ) );
```

BRDFを使用したレンダリング



- dot(N, L)が重要
- 点光/スポット光に対してのみ動作する
 - 環境光では高額でとなる
 - 光沢反射
 - 「Kautz and McCool 2000」を参照

```
specularLight += lightColor[i] * lightShadow[i] * rho_s *  
    specBRDF( N, V, L[i], eta, m ) * saturate( dot( N, L[i] ) );
```

スキンをレンダリングするための フレネル反射率



- すべての物理ベースのBRDFには
フレネル項「F」が含まれる

スキンをレンダリングするための フレネル反射率

- すべての物理ベースのBRDFには
フレネル項「F」が含まれる
 - 屈折率(η)を理解する必要がある
 - 皮膚研究を確認: 1.4 [DJ2006]を使用

スキンをレンダリングするための フレネル反射率

- すべての物理ベースのBRDFには
フレネル項「F」が含まれる
 - 屈折率(η)を理解する必要がある
 - 皮膚研究を確認: 1.4 [DJ2006]を使用
- 誘電体、非偏極のフレネル反射

スキンをレンダリングするための フレネル反射率

- すべての物理ベースのBRDFには
フレネル項「F」が含まれる
 - 屈折率(eta)を理解する必要がある
 - 皮膚研究を確認: 1.4 [DJ2006]を使用
- 誘電体、非偏極のフレネル反射
- Schlickの高速フレネル近似式を使用

*// Hは標準的な半角ベクトルである。F0は法線入射での反射率を示す
(皮膚の場合、0.028を使用)。*

```
float fresnelReflectance( float3 H, float3 V, float F0 )  
{  
    float base = 1.0 - dot( V, H );  
    float exponential = pow( base, 5.0 );  
    return exponential + F0 * ( 1.0 - exponential );  
}
```


スキンをレンダリングするためのフレネル反射率 NVIDIA.



テキストとしてフレネル式を使用



Schlickのフレネル式を使用

粗さのパラメータ



● 粗さのパラメータ「 m 」の設定方法とは？

*[Donner and Jensen 2005]

粗さのパラメータ



- 粗さのパラメータ「 m 」の設定方法とは？
- 顔[DJ2005]の場合、0.3が良い平均値となる

*[Donner and Jensen 2005]

粗さのパラメータ

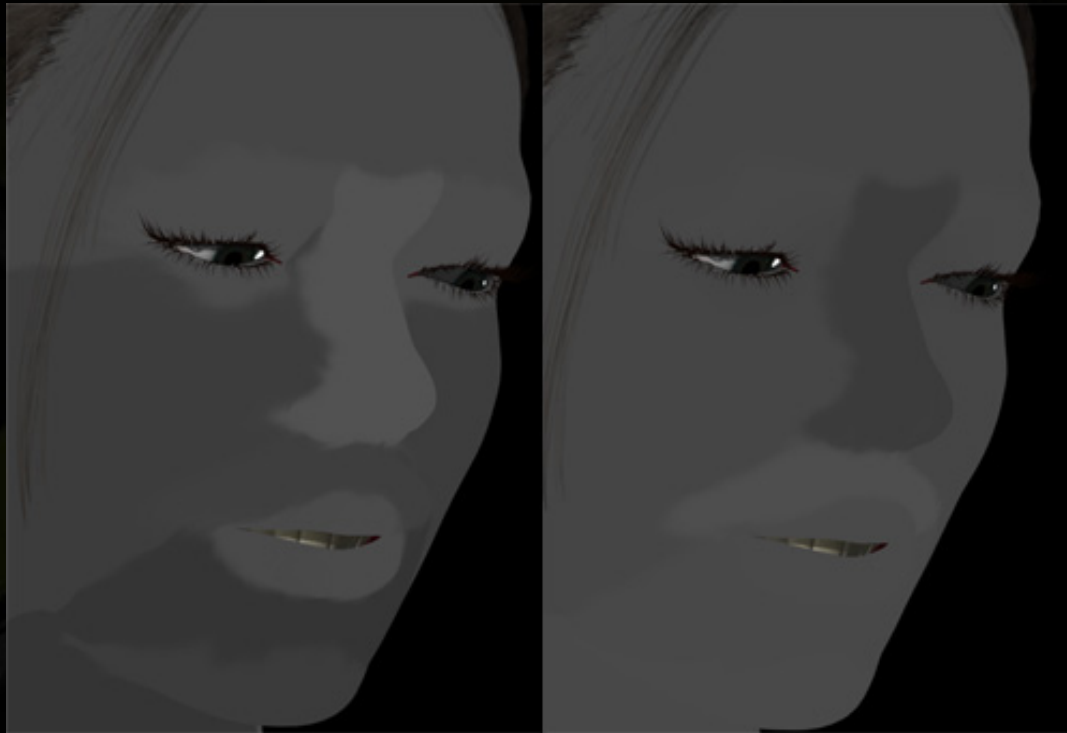


- 粗さのパラメータ「 m 」の設定方法とは？
- 顔[DJ2005]の場合、0.3が良い平均値となる
- 現在の研究を確認 (Weyrich et al. 2006)
 - 顔の10の領域で m と ρ_s を測定する
 - Torrance Sparrowモデルを前提する
 - Kelemen Szirmay-Kalos 2001の調整に効果がある

*[Donner and Jensen 2005]

粗さのパラメータ

- 実際に多くの顔から測定した平均値 – Weyrich et al. 2006 (SIGGRAPH)



スペキュラー量

粗さ、m

粗さのパラメータ



一定の粗さ、 $m = 0.3$



「Weyrich et al. 2006」から測定した値

粗さのパラメータ



- 代案:
 - アーチストによる手書きのマップ
 - USC ICT Graphics研究所による最近の研究
 - ピクセル単位でrho_sを取得
 - 一定の粗さ、mを前提
 - 素晴らしい光偏光アプリケーション
 - <http://gl.ict.usc.edu/research/FaceScanning/>

スペキュラー カラー



- 皮膚のフレネル反射は白色である

スペキュラー カラー



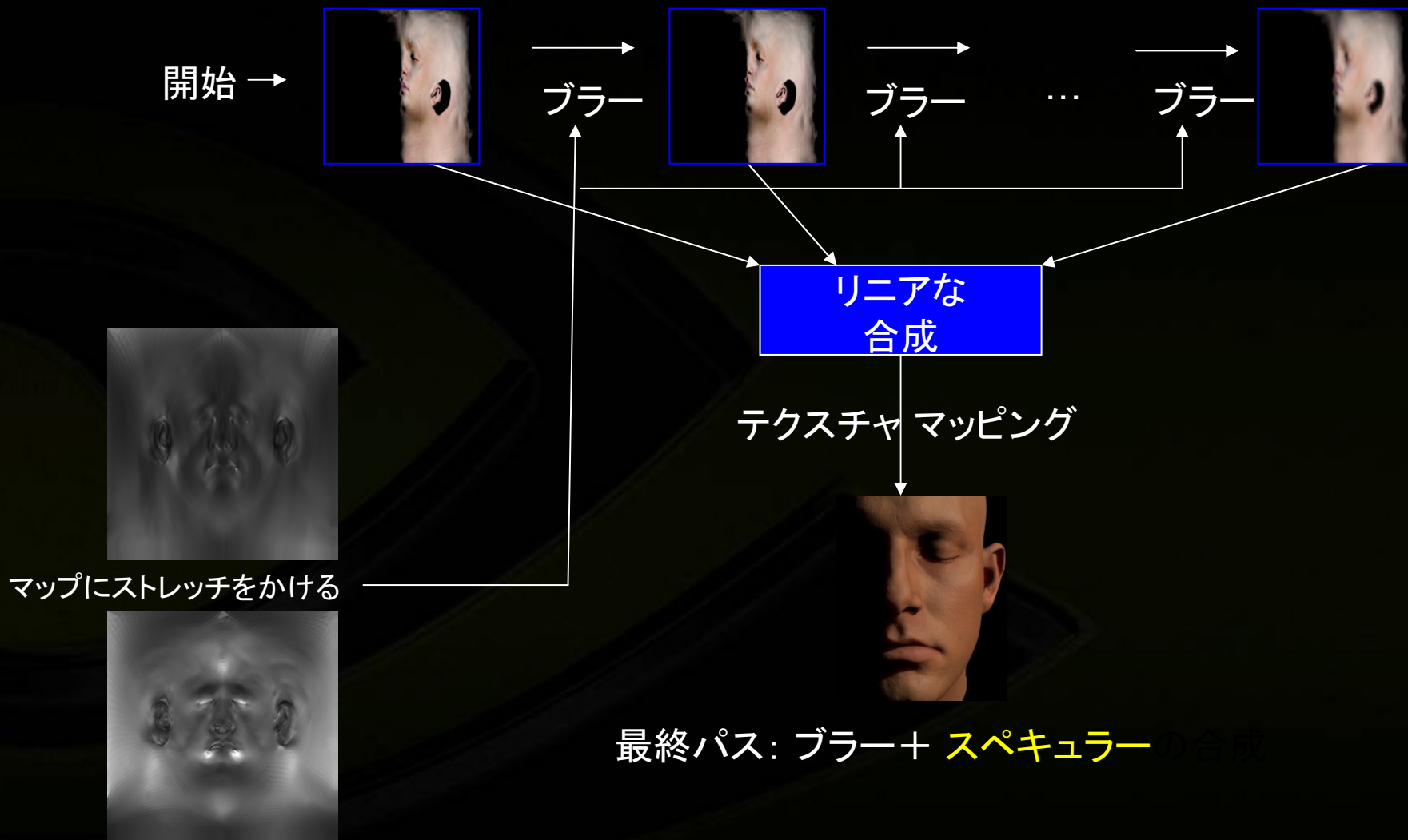
- 皮膚のフレネル反射は白色である
- スペキュラー項とカラーを乗算する必要はない
 - rho_sマップはスカラー マップである

スペキュラー カラー



- 皮膚のフレネル反射は白色である
- スペキュラー項とカラーを乗算する必要はない
 - rho_sマップはスカラー マップである
- 不適切なガンマの兆候
 - 黄色に見えるディフューズ項に追加されると、白いスペキュラーになる。

概要図



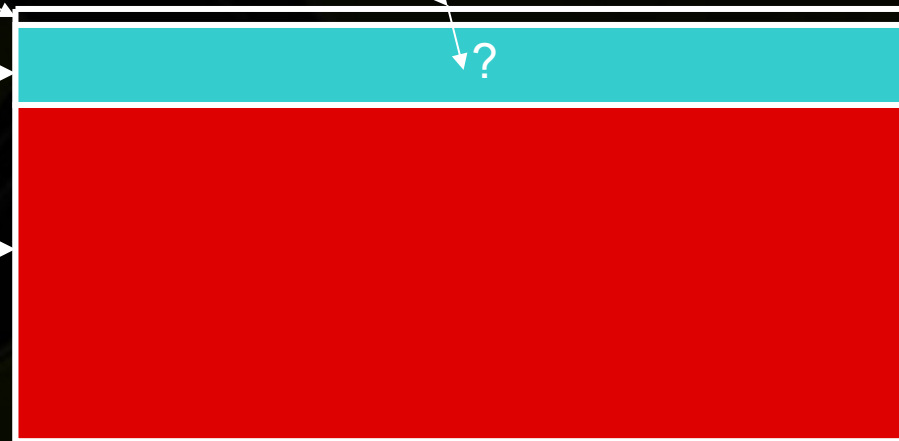
残りの光については？

● 皮下光の処理方法は？

薄い脂質層

表皮

血管が通る皮膚

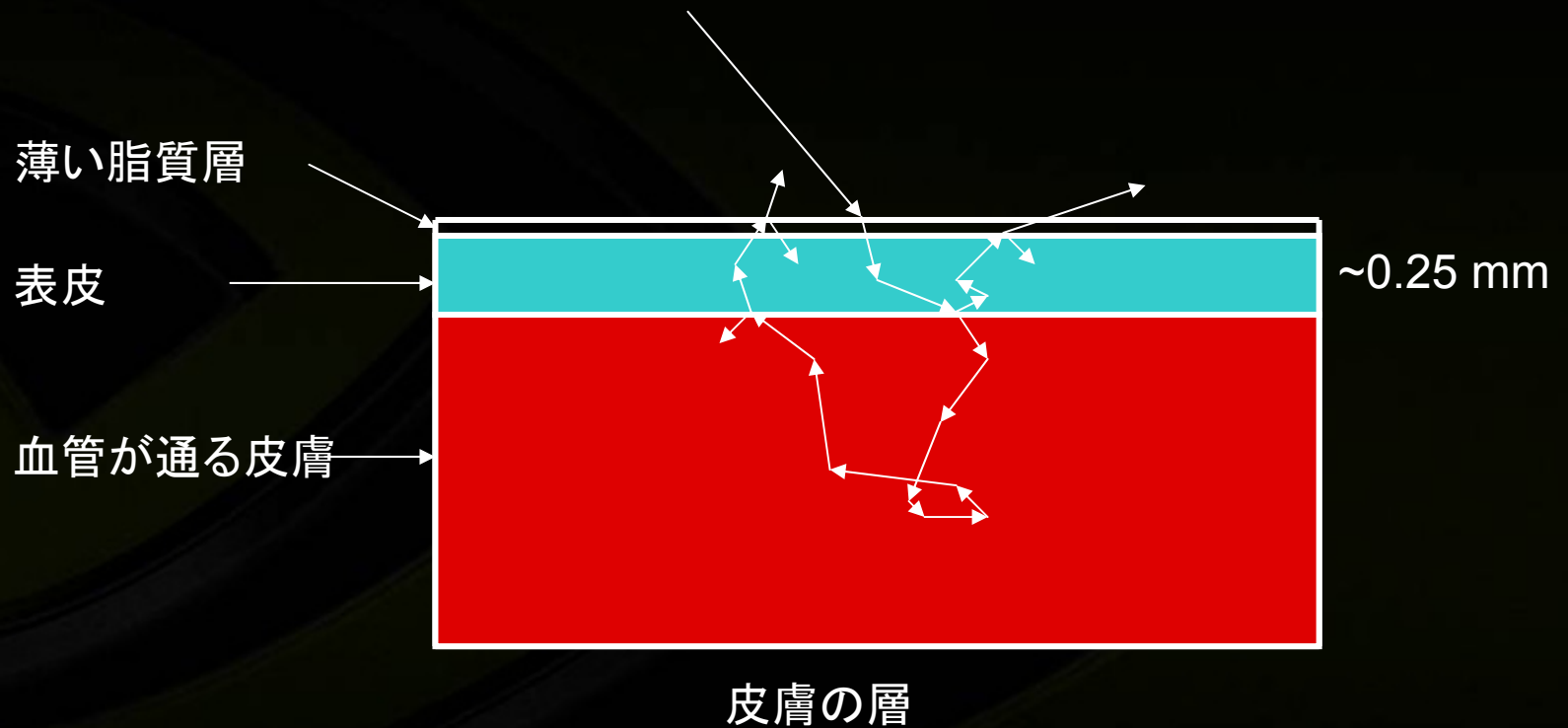


~0.25 mm

皮膚の層

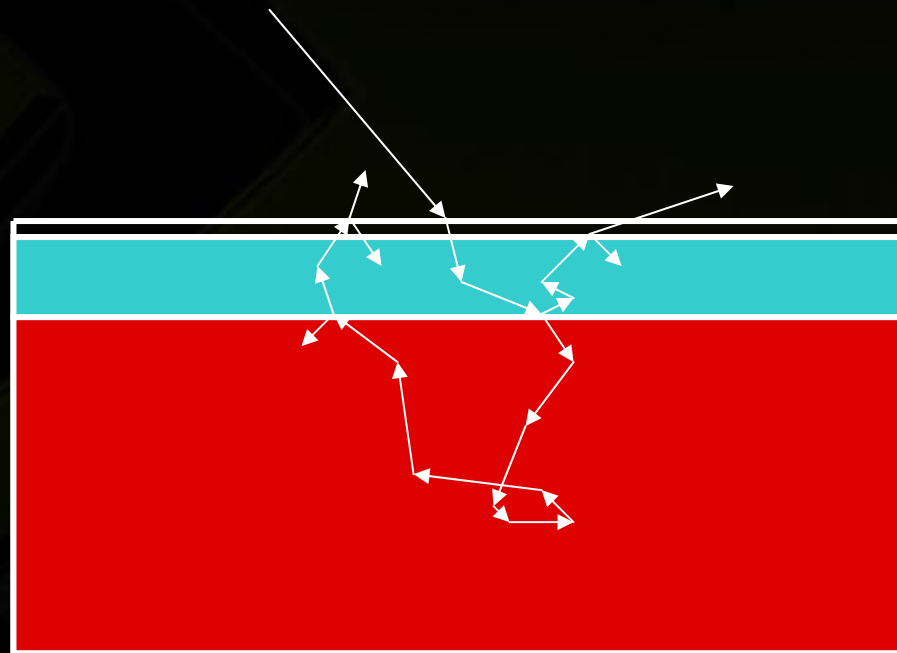
皮下散乱

● 皮下散乱に支配される皮膚の下層



皮下散乱

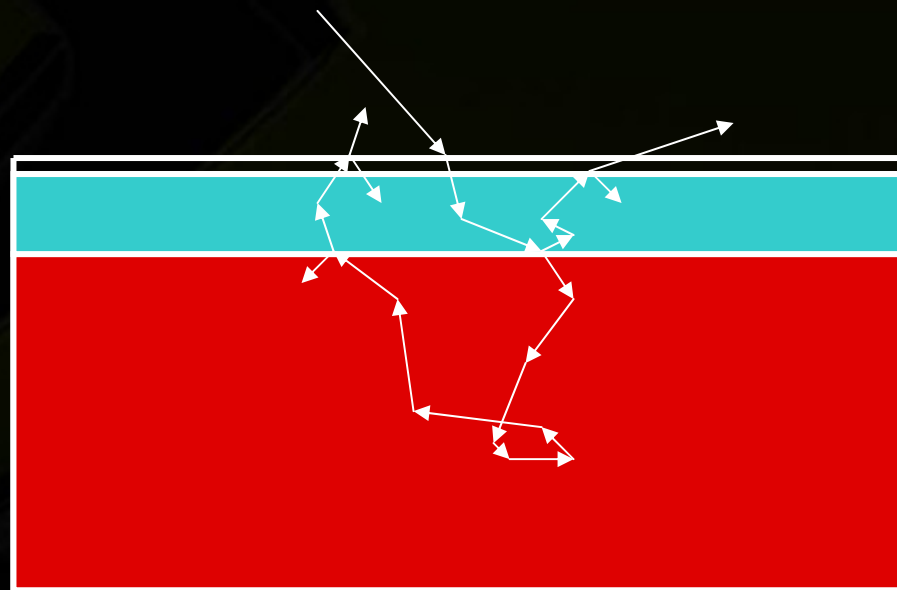
- 光は他の場所から出射する
- 光は通過場所に応じて色が決まる



皮膚の層

この対処法とは？

- 一見、不可能な作業：
 - 考えられるパス数が無限大
 - 方向による影響はどうなるのか？



皮膚の層

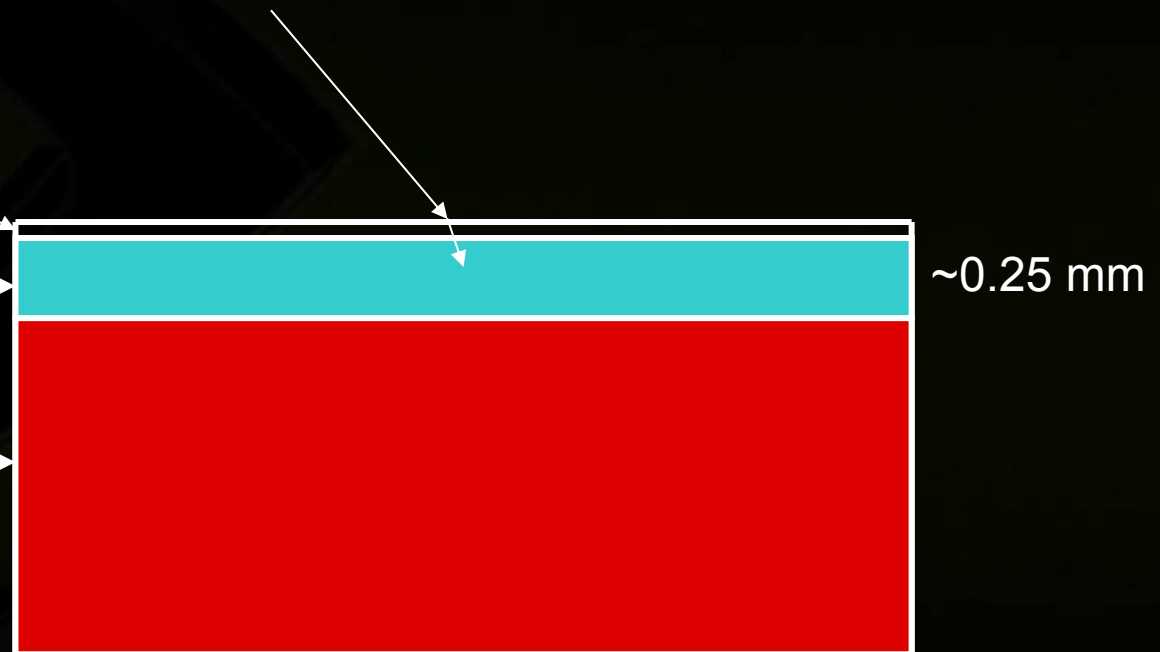
- 物理的過程による散乱モデル
 - 散乱現象の間隔
 - 吸収事象の間隔
- 多くの散乱現象により、光が拡散する
 - 発生するまでの時間はどれくらいか

- 皮膚の場合、この距離は非常に短い:
 - 0.02083mm (redの波長) *

薄い脂質層

表皮

血管が通る皮膚



皮膚の層

* [Donner and Jensen 2005]の三層スキン パラメータを使用して計算

輸送理論



- 10分の1が最初の層を通過ー拡散している！
- すべての光を追跡ー方向は無視
- 光の後方反射は拡散である(全方向で等しい)

実行する方法



- 光ごとに(N・L)を実行し、ディフューズ カラーを乗算する
- その後、スペキュラーを追加する
- 簡単、でしょ？

不正解

- 皮膚は乾燥して固くなっているように見える

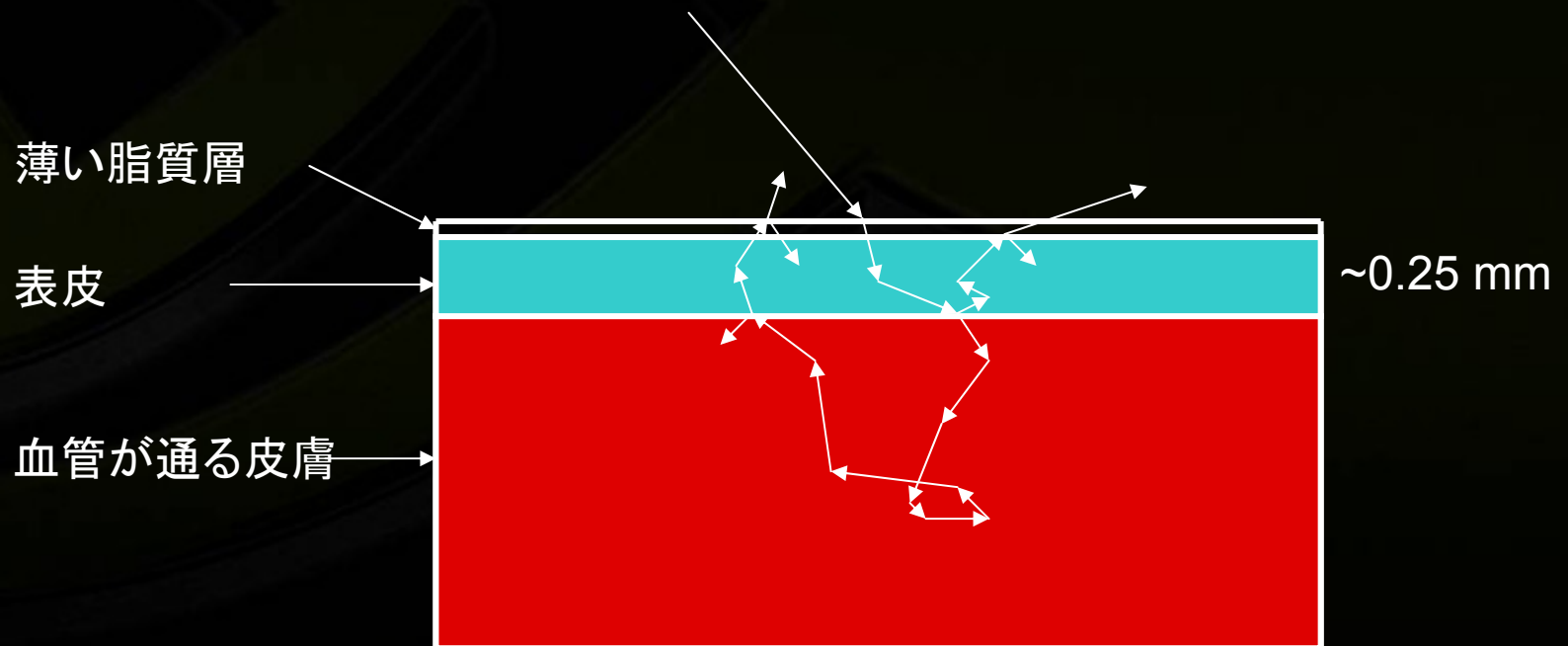


上手いかなかった理由



● 2つのことを忘れていた

- ある場所に光が入射し、別の場所から出射する方法に対処していなかった(重要！)
- 脂質のある粗い表面の透過率は均一ではない(わずかに)



現在ではどうか？



- より複雑な方法を採用する必要がある
- 拡散近似式に強く依存する

従来の技術



- オフライン レンダリング:
 - 多層化された マテリアルのモンテカルロ レンダリング
- リアルタイム
 - テクスチャ空間の拡散

マルチレイヤ2005



*Craig DonnerとHenrik Wann Jensenからの無料提供の画像

マルチレイヤ2005



- 2005 SIGGRAPH文書 (Craig DonnerおよびHenrik Wann Jensen著)
 - 三層の皮膚モデル
 - 医療および光学コミュニティで測定された散乱パラメータ
 - 高品質のヘッド スキャン(XYZRGB)
 - 最大5分のレンダリング時間

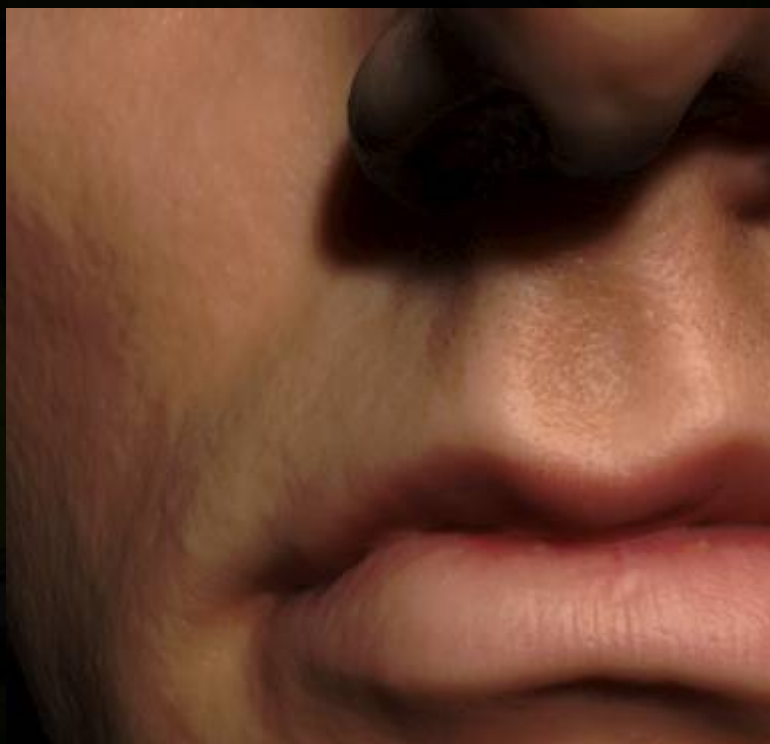


*Craig DonnerとHenrik Wann Jensenからの無料提供の画像

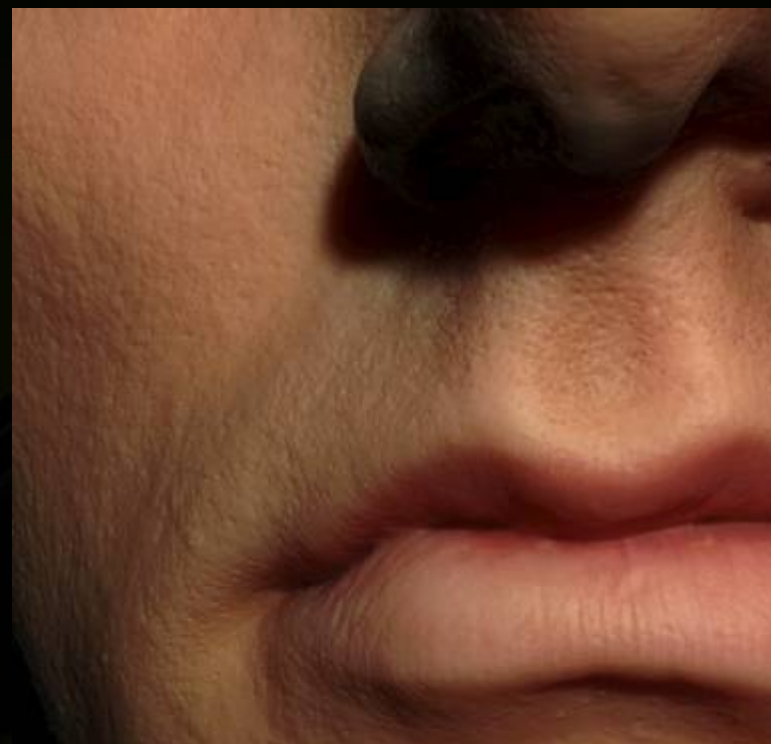
三層vs.ダイポール



- 特に、これらは多層化された皮膚モデルの重要性を示す



一層の皮膚モデル



三層の皮膚モデル

*Craig DonnerとHenrik Wann Jensenからの無料提供画像

ここで何が起きているのか？



- 一層の皮膚モデルでは青白く見える
- 表皮
 - 散乱が狭い
- 下位層
 - 散乱が広い
 - ほとんどが赤い
- 一層は機能していないものと想定する

多層拡散の概算

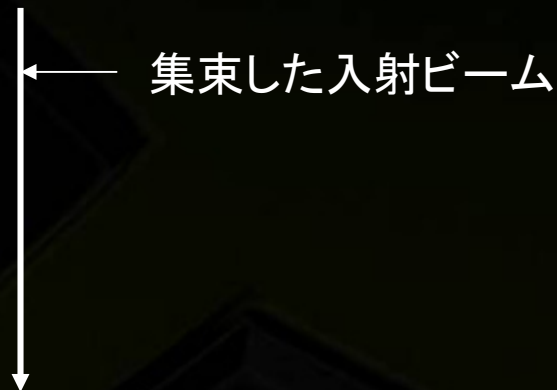


- この拡散を概算できる
- 入射光から開始する
- 表面上でブラーする
- ブラーを重ねる
- 合成する(リニアの合成)

ブラーする理由

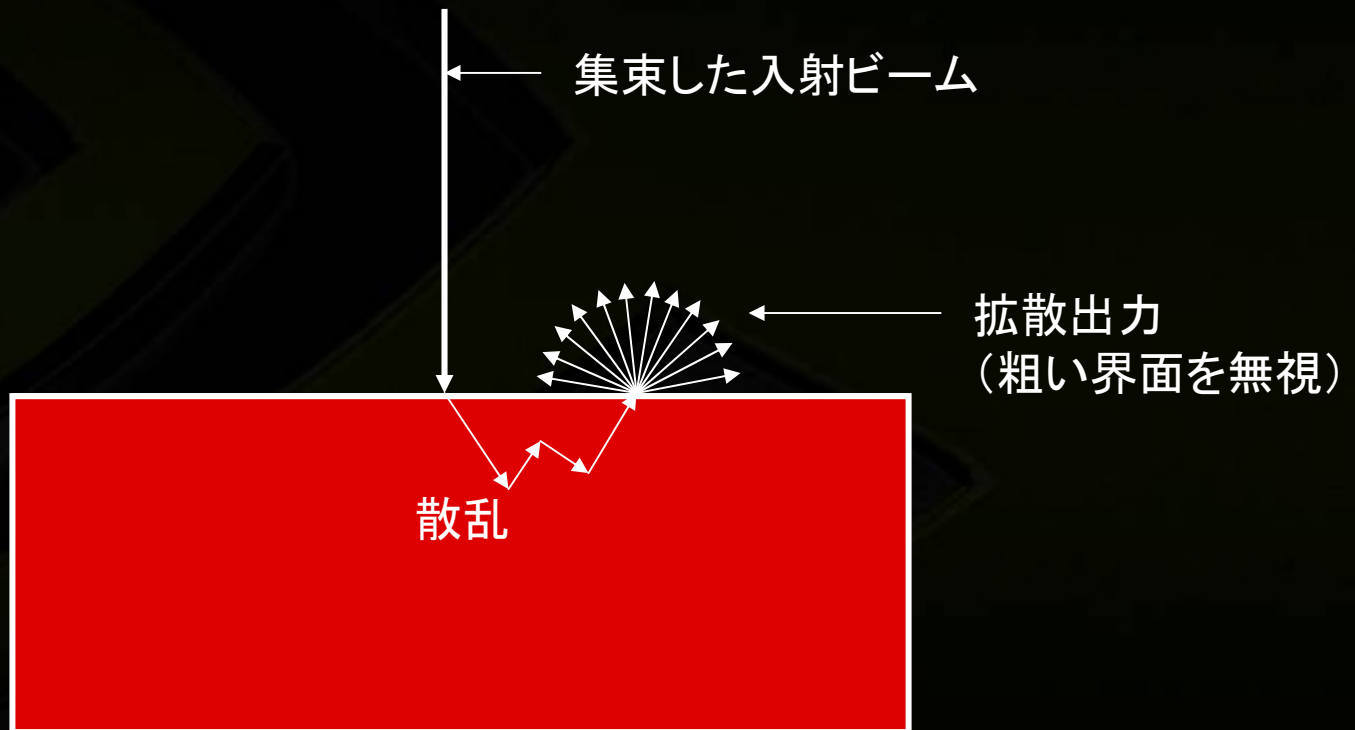


- 平面で光の散乱の多い面に当たる狭い白の集束ビームを検討する



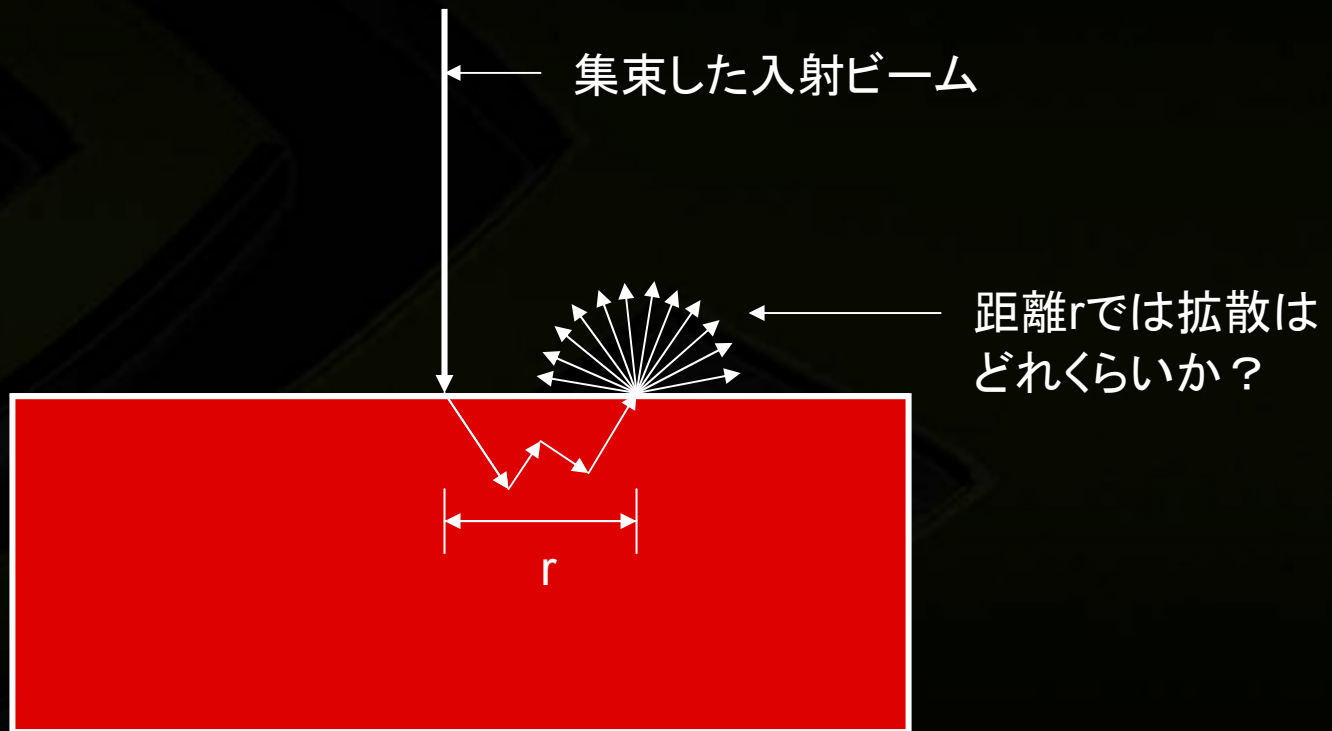
ブラーする理由

- 「散乱が多い」ことは拡散を意味する



拡散プロファイル

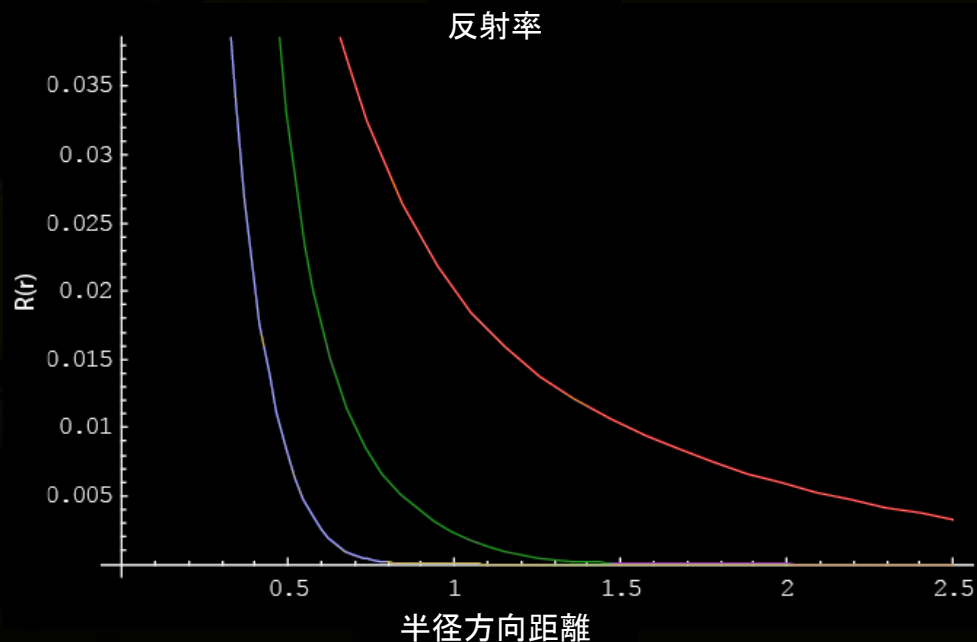
- 距離ではどれくらいの光量があるか？
- マテリアルの拡散プロファイル



拡散プロファイル



- この[DJ2005]は計算可能
- 皮膚にとって一番重要なものは何？
 - R、G、Bではっきりと異なる
 - これらのプロファイルの形状は「青白い皮膚vs.本物の皮膚」を意味する



主要な散乱の見解



- 各表面ポイントで、以下を行う
 - 入射光を収集する(カラー値)
 - 拡散近似式 方向無視を合計する
 - 隣接の表面ポイントに散乱する

主要な散乱の考え方－2D平面



● 2D平面

主要な散乱の考え方ー2D平面



- 2D平面
- 各ポイント
 - 最初の光を収集

主要な散乱の考え方ー2D平面



- 2D平面
- 各ポイント
 - 最初の光を収集
 - 隣接するピクセルに散乱

主要な散乱の考え方ー2D平面



- 2D平面
- 各ポイント
 - 最初の光を収集
 - 隣接するピクセルに散乱
 - 距離に依存

主要な散乱の考え方ー2D平面



- 2D平面
- 各ポイント
 - 最初の光を収集
 - 隣接するピクセルに散乱
 - 距離に依存
 - これがブラーである！



主要な散乱の考え方ー2D平面



- 2D平面
- 各ポイント
 - 最初の光を収集
 - 隣接するピクセルに散乱
 - 距離 r に依存
 - これがブラーである！
- ロケーションごとに入射光のローカル パッチを実行する

主要な散乱の考え方ー2D平面



- 2D平面
- 各ポイント
 - 最初の光を収集
 - 隣接するピクセルに散乱
 - 距離 r に依存
 - これがブラーである！
- ロケーションごとに入射光のローカル パッチを実行する
- 出射光の幅広い、カラー付けされたパッチを生成する



主要な散乱の考え方ー2D平面



- 2D平面
- 各ポイント
 - 最初の光を収集
 - 隣接するピクセルに散乱
 - 距離 r に依存
 - これがブラーである！
- ロケーションごとに入射光のローカル パッチを実行する
- 出射光の幅広い、カラー付けされたパッチを生成する
- これらのパッチをすべてオーバーラップすると、ソフトな外観を作成する

曲面上の拡散

- 実際により複雑な表面を必要とする



耳に反射する垂直のレーザー線

テクスチャ空間の拡散



- 3D面を展開するーテクスチャ座標
- このレイアウトを使用してブラーを行う
- テクスチャ マッピングを使用した後、元にマッピングする
- これをテクスチャ空間の拡散と呼ぶ

* 2003年、George BorshukovとJ.P. Lewisによって考案

テクスチャ空間の拡散



- これは、以前にリアルタイムで行われた
(Simon Green: GPU Gems 1)
- この技術をいくつかの方法で改良する
 - 歪みを補正する
 - いくつかのブラーを保ち、リニアに合成する
 - ディフューズ カラーを使用する方法

* 2003年、George BorshukovとJ.P. Lewisによって考案

概要図



開始

ブラー



ブラー

...

ブラー

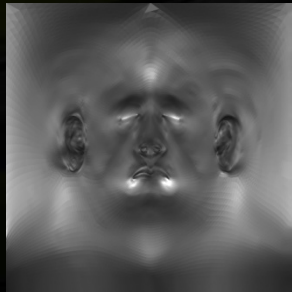


リニアな合成

テクスチャ マッピング



マップにストレッチをかける



最終パス: ブラー+スペキュラーの合成

テクスチャ座標を使用したレンダリング



- テクスチャ座標を使用して、バーテックスシェーダの projCoord を修正する
- ライティングのため、正確な worldCoord と worldNormal をフラグメントシェーダに渡す

```
v2f.projCoord = float4( texCoord.x * 2.0 - 1.0,  
                        texCoord.y * 2.0 - 1.0, 0.0, 1.0 );
```

テクスチャ座標を使用したレンダリング



- フラグメントシェーダは、皮下の放射照度を計算する
- オフスクリーン テクスチャに保存する



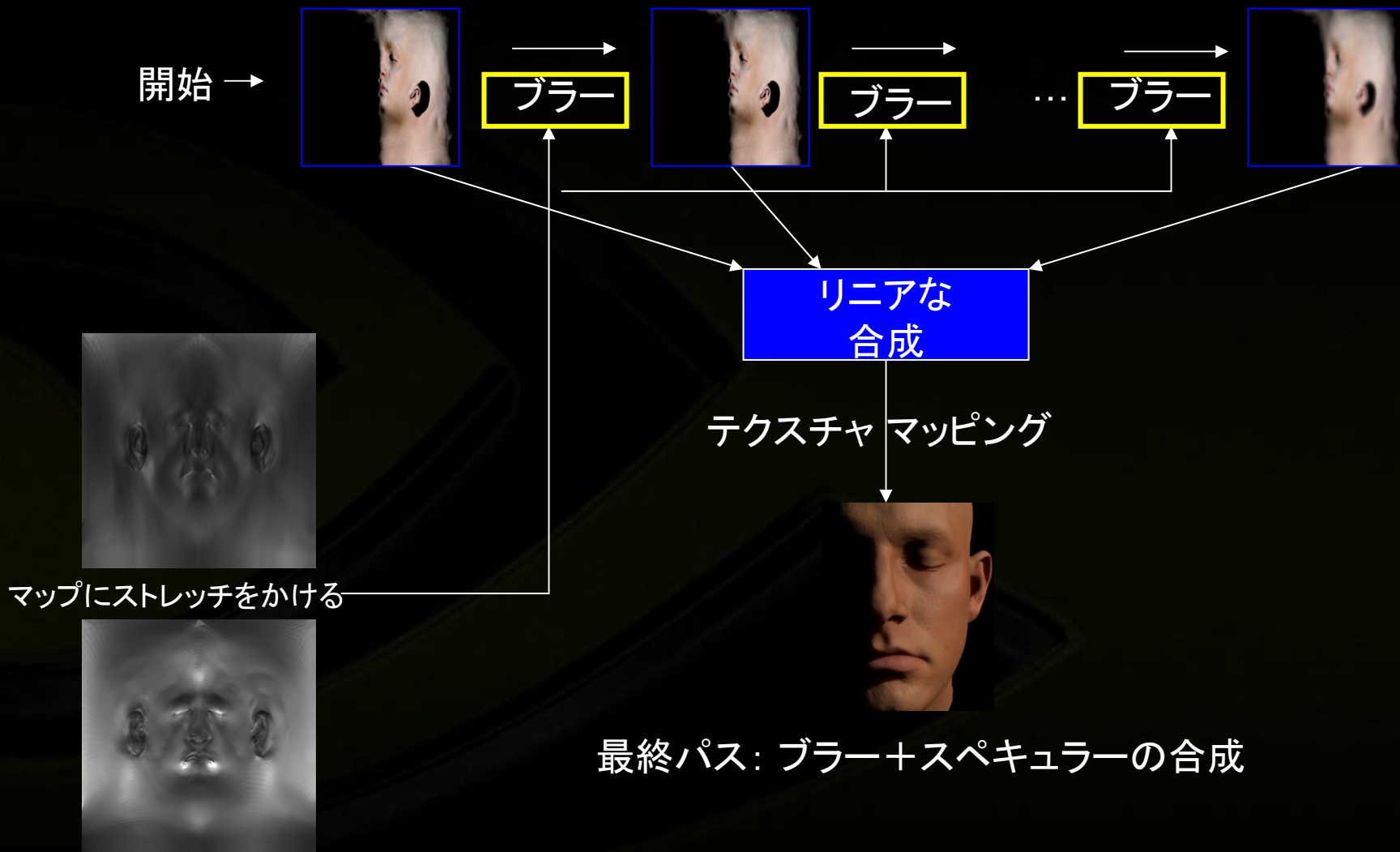
テクスチャ座標を使用したレンダリング



- 現在では、効果的にブラーできない



概要図



ブラー操作ごとに2つのパス



ブラーの重み付け

.006	.061	.242	.383	.242	.061	.006
------	------	------	------	------	------	------

左右方向の
ブラー



異なるブラー セットの構築を
何回か繰り返す



一時的なバッファ



上下方向の
ブラー



最終パスで使用した
テクスチャ

階層的なガウスぼかし



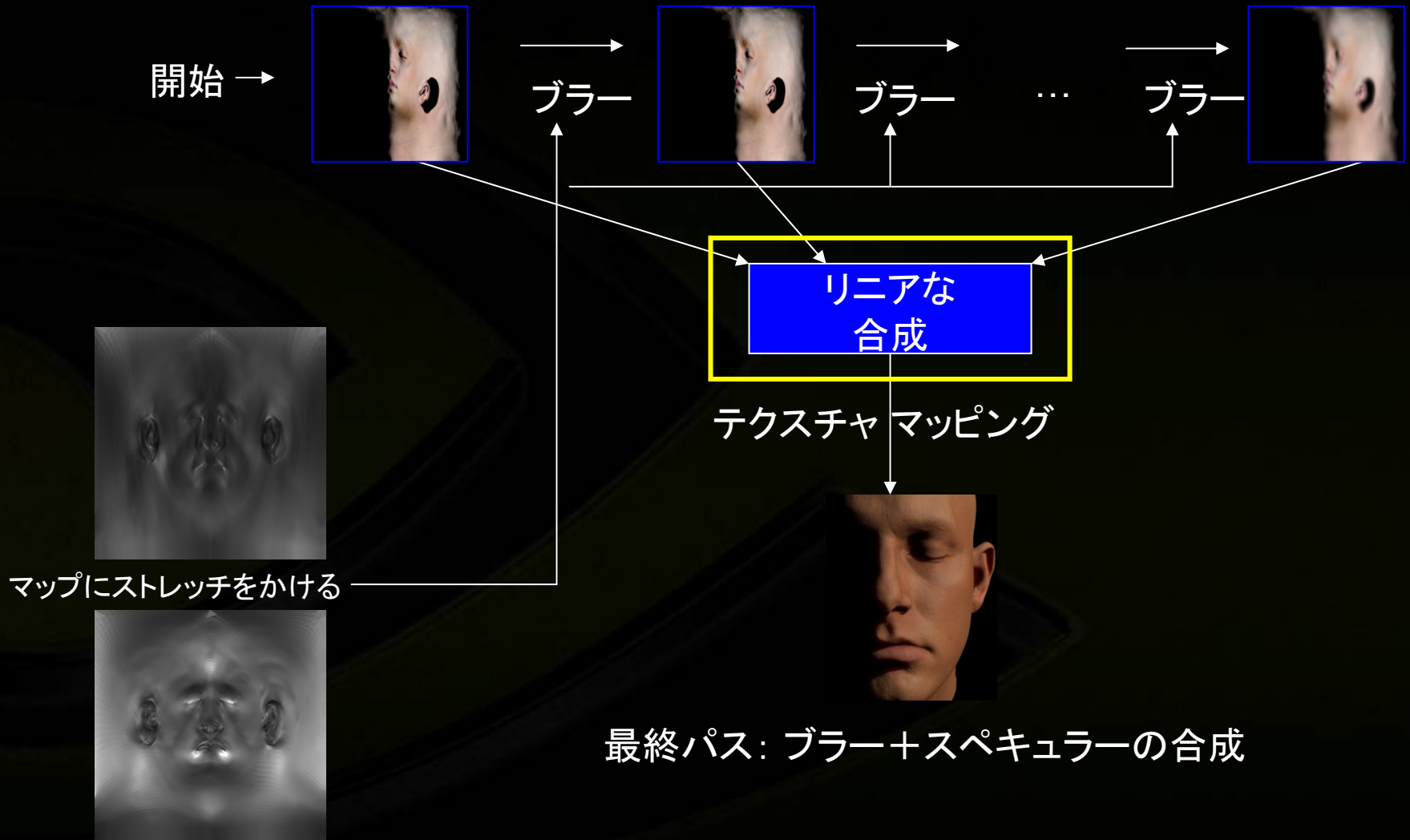
- 各ブラー操作はガウスぼかしである
 - 分離して計算可能
 - 非常に効率的

階層的なガウスぼかし



- 各ブラー操作はガウスぼかしである
 - 分離して計算可能
 - 非常に効率的
- ブラーされたテクスチャの階層を構築
 - 最後から開始する
 - 少ないガウスぼかしを何回も行う = 大きなガウスぼかしを1回行う
 - 幅広くブラーするために、より薄くサンプリングできる

ブラーの合成



個別のGaussian Convolution



- 個々のガウスぼかしを1回も使用できない



個別のGaussian Convolution



- 予想/測定したプロファイルと実際の皮膚を一致させる
- いくつかのガウス ブロブをリニアに合成して、既存のプロファイルと一致させる

個別のGaussian Convolution



● 人間の皮膚の場合、以下を推奨する

	ブラー 幅(mm)	ブラーの重み付け		
		レッド	グリーン	ブルー
	0.042 *	0.233	0.455	0.649
	0.220	0.100	0.336	0.344
	0.433	0.118	0.198	0
	0.753	0.113	0.007	0.007
	1.412	0.358	0.004	0
	2.722	0.078	0	0

最終のリニアな
合成

* 最小のブラー レベルは、最終レンダリング パスで直接、再計算されたライティングである(ブラーされなかった)。

リニアに合成されたGaussian Convolution



ブラーの合成—重み付けの選択



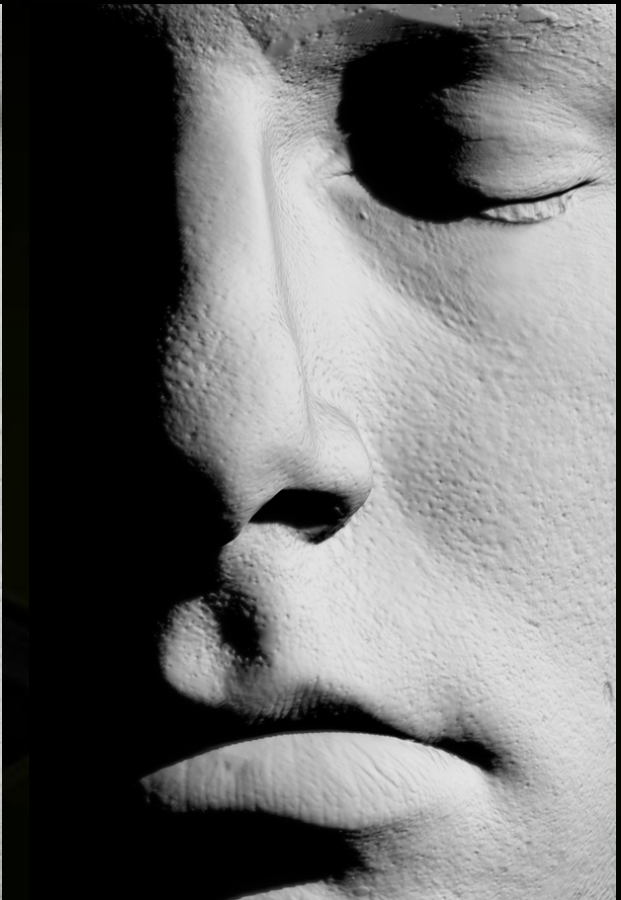
- 一度に1つのカラー



レッド



グリーン



ブルー

歪みの問題

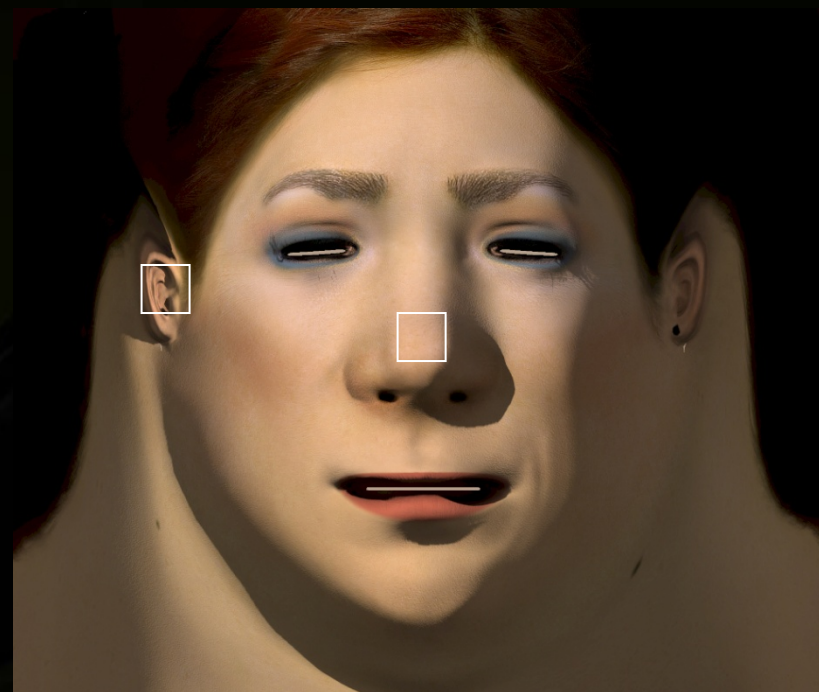
- テクスチャ空間では、均一なブラーは避ける
- テクスチャ空間の1つのピクセル = 実空間で一定の距離



均一なブラー



歪みを補正した
ブラー



UV歪み

- 入射光の一定のパターンを投影する
- テクスチャ空間でブラーする
- 結果：
 - アーチファクトの拡大



正確な歪み補正



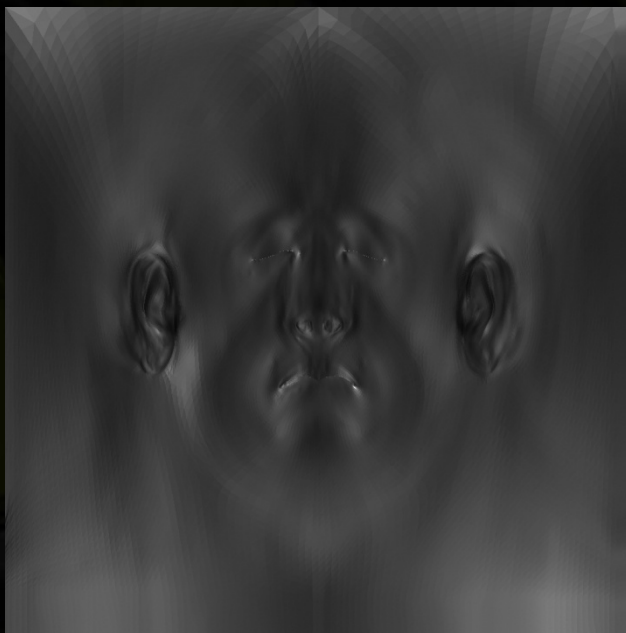
- 歪みは簡単に推測可能
- マップを計算し、ブラーを逆にストレッチする

```
float3 derivu = ddx( v2f.worldCoord );  
float3 derivv = ddy( v2f.worldCoord );  
  
// 0.001 scales the values to map into [0,1]  
// this depends on the model  
float stretchU = 0.001 * 1.0 / length( derivu );  
float stretchV = 0.001 * 1.0 / length( derivv );
```

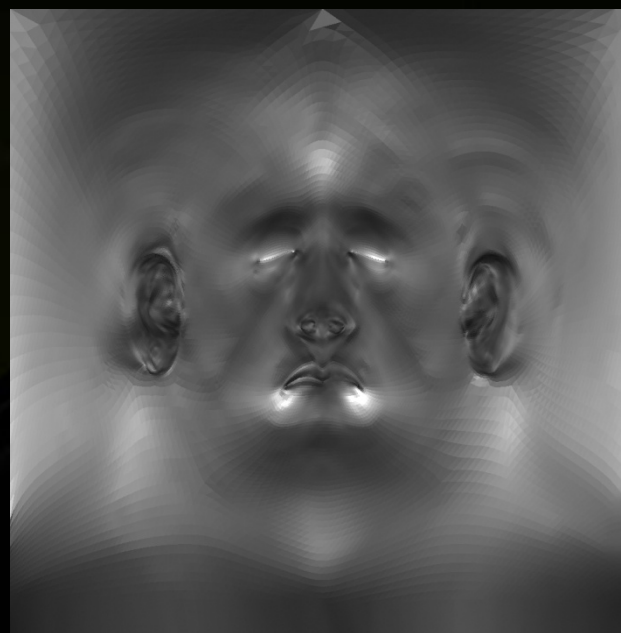
正確な歪み補正



- これらの値を使用して、ブラー(方向)にスケールをかける



X軸でのブラー半径



Y軸でのブラー半径

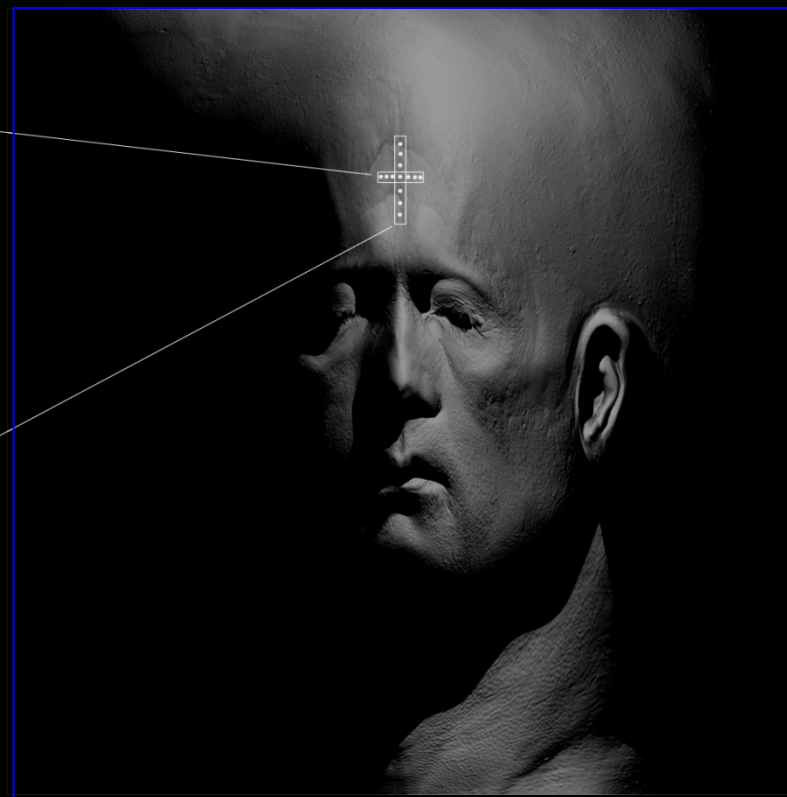
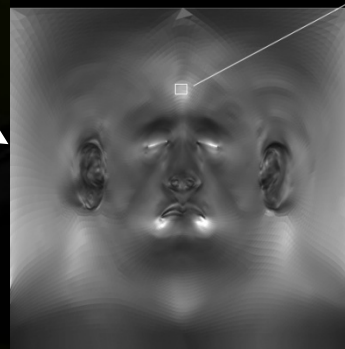
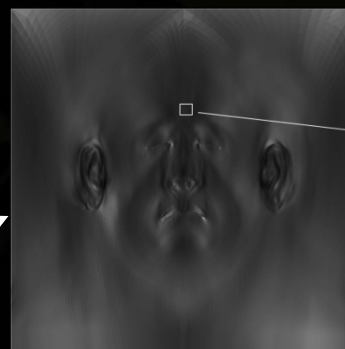
ストレッチ補正



● 解決方法:

- 別々の畳み込みステップそれぞれをローカルに補正する
- UとVで単独に補正する

テクスチャに
ストレッチをかける



ストレッチ補正



ストレッチ補正なし

ストレッチ補正あり

継ぎ目の処理

- UVレイアウトによって継ぎ目が発生する
- 継ぎ目のエッジの周囲は黒に囲まれている
 - 黒の領域と隣接するピクセルの色が混じり、暗い継ぎ目となっている



継ぎ目の処理



継ぎ目の処理

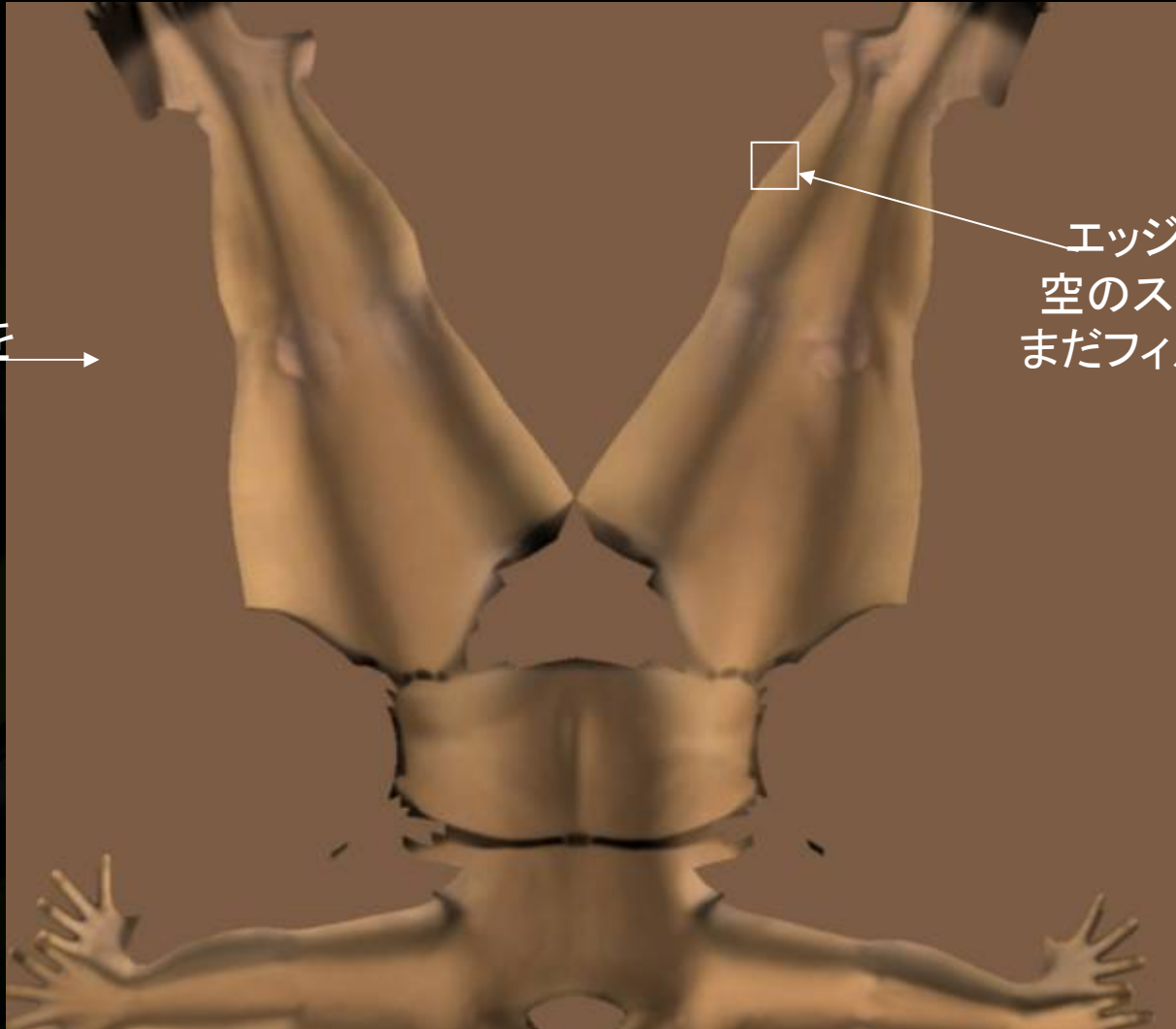


- 回避策：
 - クリアなカラーを変更する
 - 歪みマップを編集する
 - オブジェクトあり/なしのアルファ マップ
 - 複数のUVセット(低速)

継ぎ目の処理

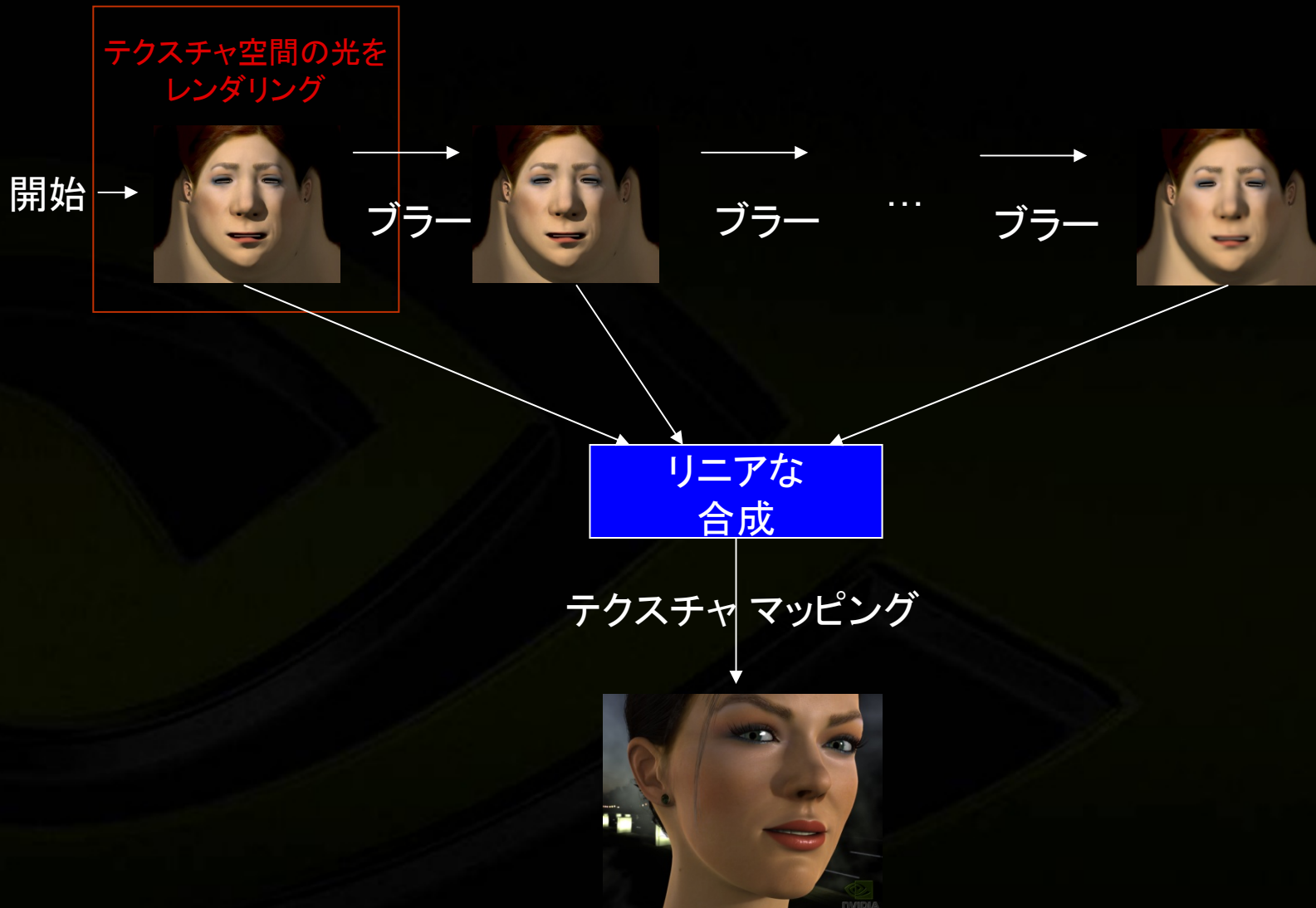


クリアなカラーを
変更する →



エッジのピクセル：
空のスペース部分は
まだフィルタリング可能

皮下の放射照度の計算



最終パス: ブラー+スペキュラーの合成

皮下の放射照度の計算



- ここで書き込むカラーは？
- ディフューズ カラーを使用する方法とは？
- 最初に行うこと: $\text{dot}(N, L) * \text{diffuseCol}$
- その後
 - ブラーを何重にもかける
 - リニアにブラーを合成する
 - スペキュラーを追加する

皮下の放射照度の計算



● 最初に行うこと: $\text{dot}(N, L) * \text{diffuseCol}$



皮下の放射照度の計算

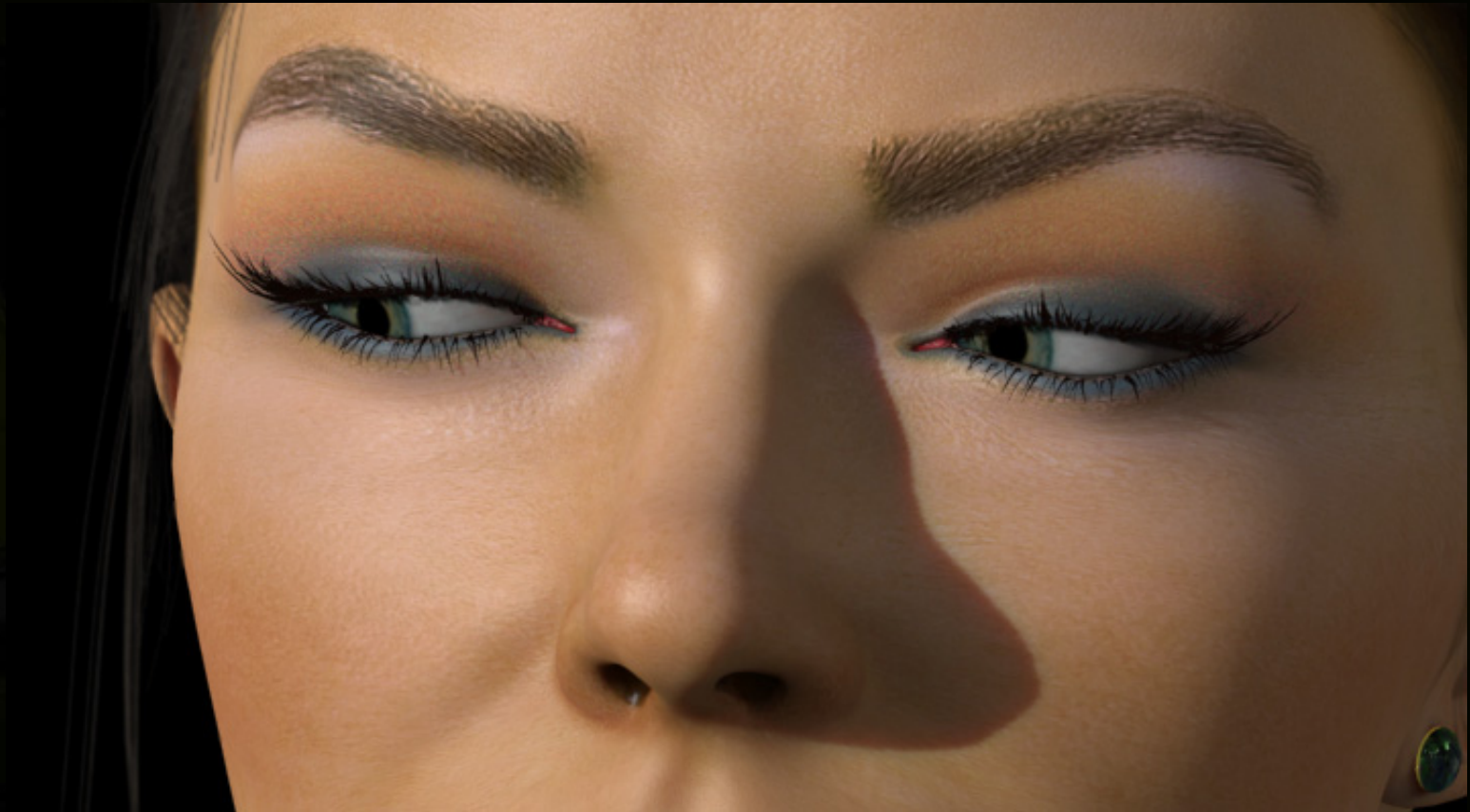


- これはOKのように見える
- 高周波成分を削減可能
- 2番目に行うこと:
 - $N \cdot L$ 項のみを保存する
 - ブラーを何重にもかける
 - リニアにブラーを合成する
 - DiffuseColを乗算する
 - スペキュラーを追加する

皮下の放射照度の計算



- 2番目に行うこと: ドット(N,L)をブラーし、合成してから diffuseCol を乗算する



皮下の放射照度の計算



- これはOKのように見える
- 写真ベースのマップならば、おそらくOKである
- 色のにじみがないー残されている高周波コンテンツが多すぎる
- 高周波のディテールは、下層の上に「位置する」

- 3番目に行うこと：両方を実行することができるか？

皮下の放射照度の計算



- ブラーの前後にカラーリングを行う
- その都度、乗算する必要がある
- DiffuseColを2回、乗算することはできない

皮下の放射照度の計算



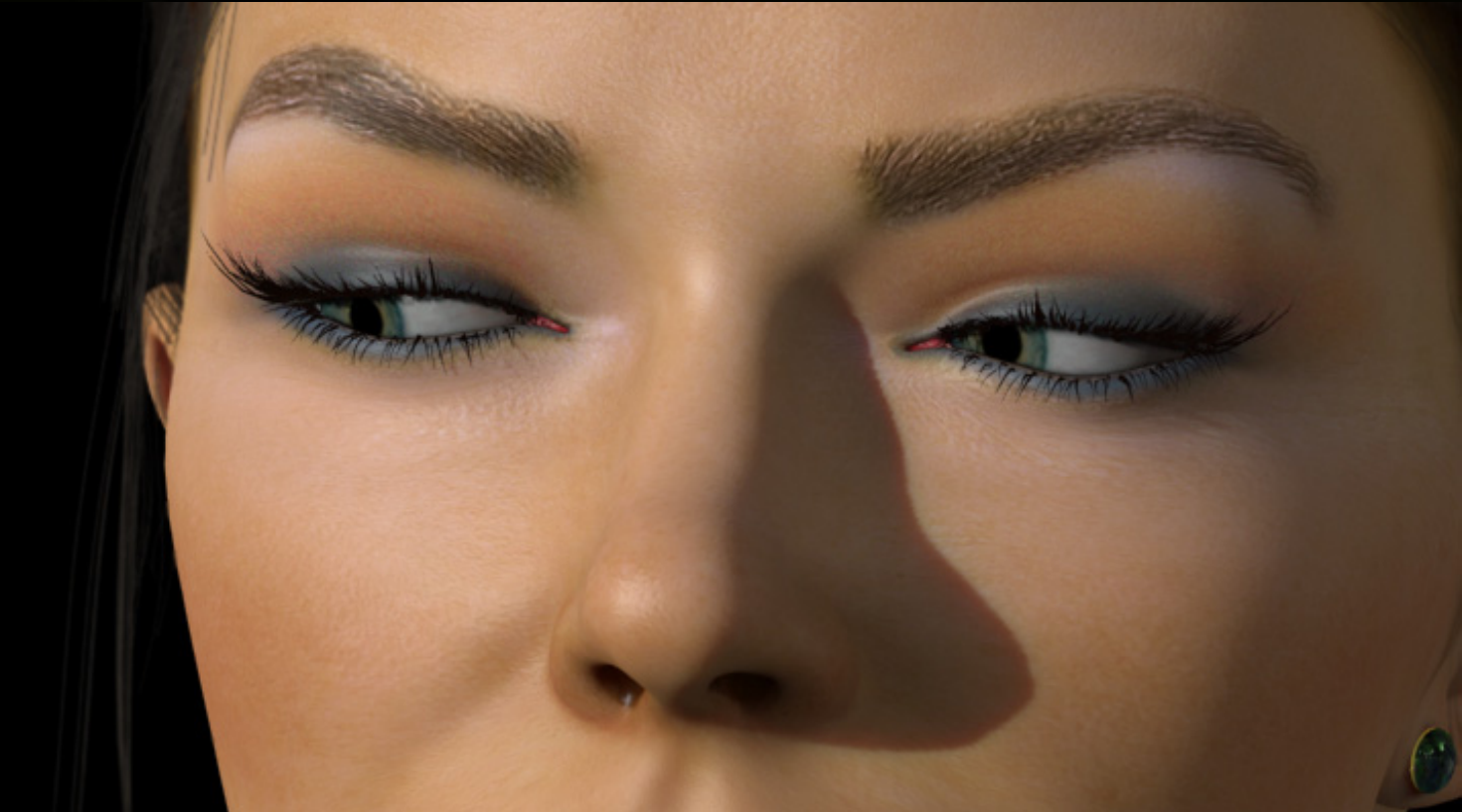
- ブラーの前後にカラーリングを行う
- その都度、乗算する必要がある
- DiffuseColを2回、乗算することはできない

- $\text{sqrt}(\text{DiffuseCol})$ を2回、乗算する
 - 1回はブラーの前に
 - もう1回はブレンドの後に

皮下の放射照度の計算

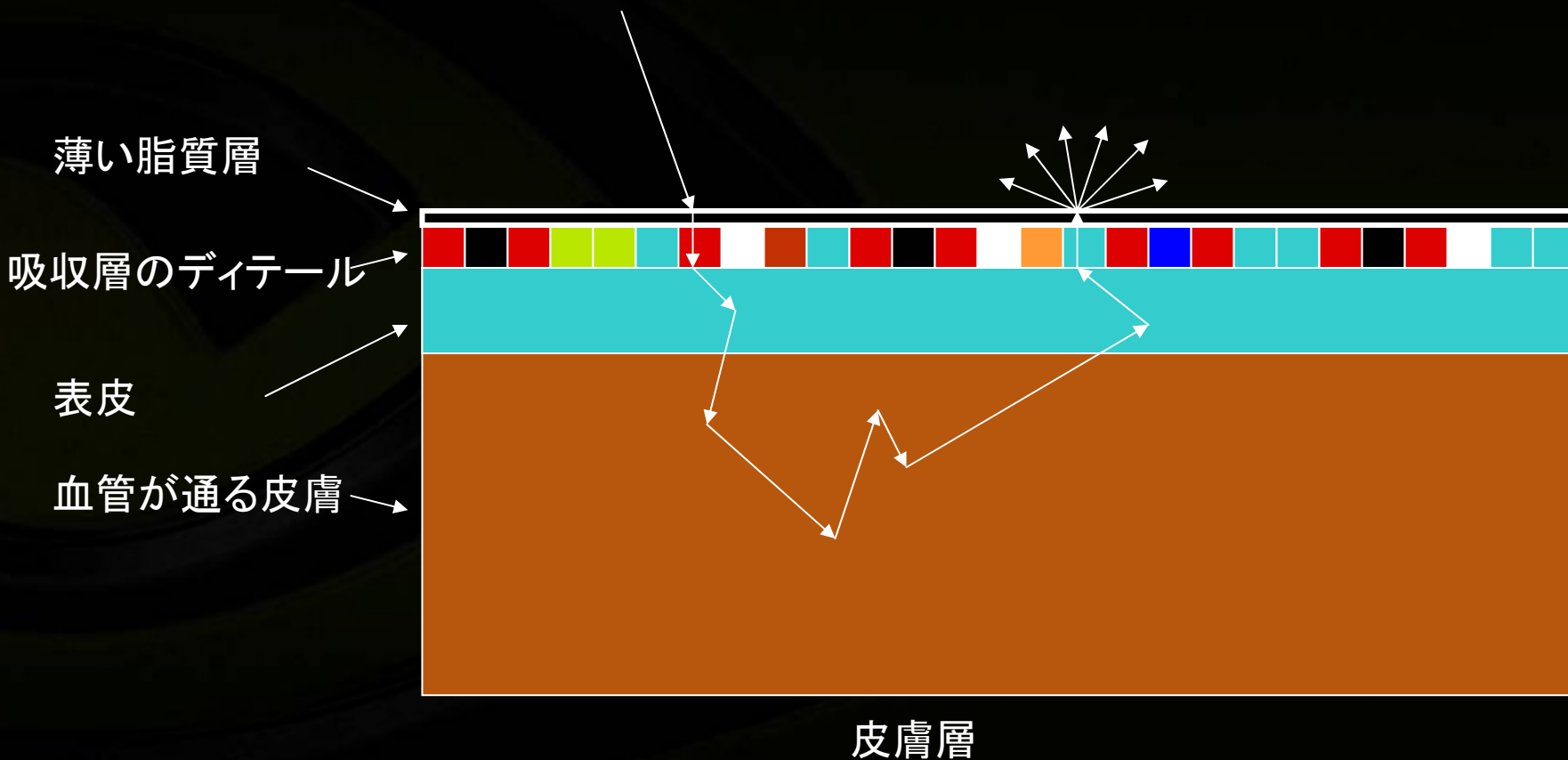


- 半々 : $\sqrt{\text{diffuseCol}}$ を適用し、ブラーし、合成してから $\sqrt{\text{diffuseCol}}$ を適用する



皮下の放射照度の計算

- 次に、光を散乱しない皮膚面上の非常に薄い吸収層をシミュレートする



皮下の放射照度の計算



- 次の点で現実的である
 - 光はこのディテール層と2回接触する必要がある
 - 1回は入射する
 - 1回は出射する
- 前提
 - 皮膚のバリエーションは最上部の薄い層に現れる

皮下の放射照度の計算



- アートの自由
 - 一般化する
 - 以下の代わりに
 - 前に* $\text{sqrt}(\text{diffuseCol})$
 - 後に* $\text{sqrt}(\text{diffuseCol})$
- 以下を使用する
 - 前に* $\text{pow}(\text{diffuseCol}, \text{mix})$
 - 後に* $\text{pow}(\text{diffuseCol}, 1.0 - \text{mix})$
- Adrienneでは、 $\text{mix} = 0.82$ を使用する

ブラーの合成



```
float3 diffuseLight = nonBlur * E1 * pow( diffuseCol, 0.5 );

float3 blur2tap = f3tex2D( blur2Tex, v2f.c_texCoord.xy );
float3 blur4tap = f3tex2D( blur4Tex, v2f.c_texCoord.xy );
float3 blur8tap = f3tex2D( blur8Tex, v2f.c_texCoord.xy );
float3 blur16tap = f3tex2D( blur16Tex, v2f.c_texCoord.xy );
float3 blur32tap = f3tex2D( blur32Tex, v2f.c_texCoord.xy );

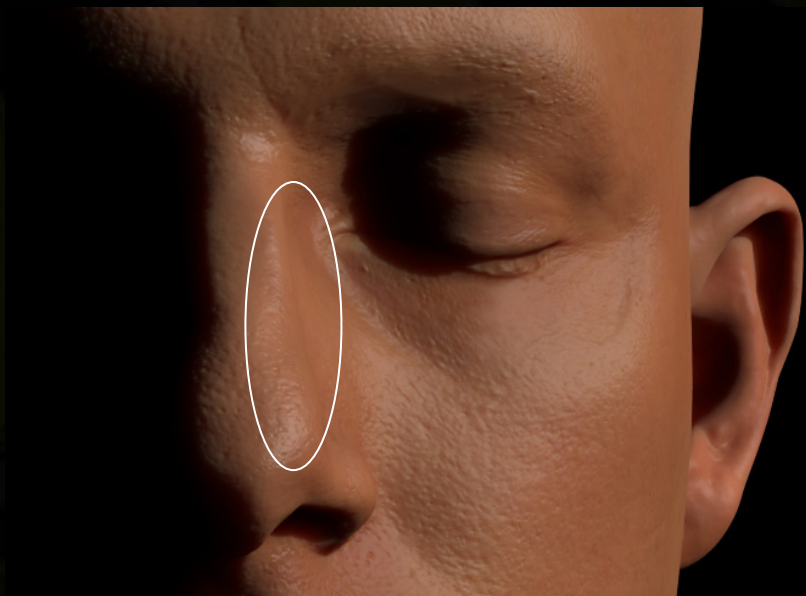
diffuseLight += blur2 * blur2tap.xyz;
diffuseLight += blur4 * blur4tap.xyz;
diffuseLight += blur8 * blur8tap.xyz;
diffuseLight += blur16 * blur16tap.xyz;
diffuseLight += blur32 * blur32tap.xyz;

// renormalize weights so they sum to 1.0
float3 norm2 = nonBlur + blur2 + blur4 + blur8 + blur16 + blur32;
diffuseLight /= norm2;
diffuseLight *= pow( diffuseCol, 0.5 );
```

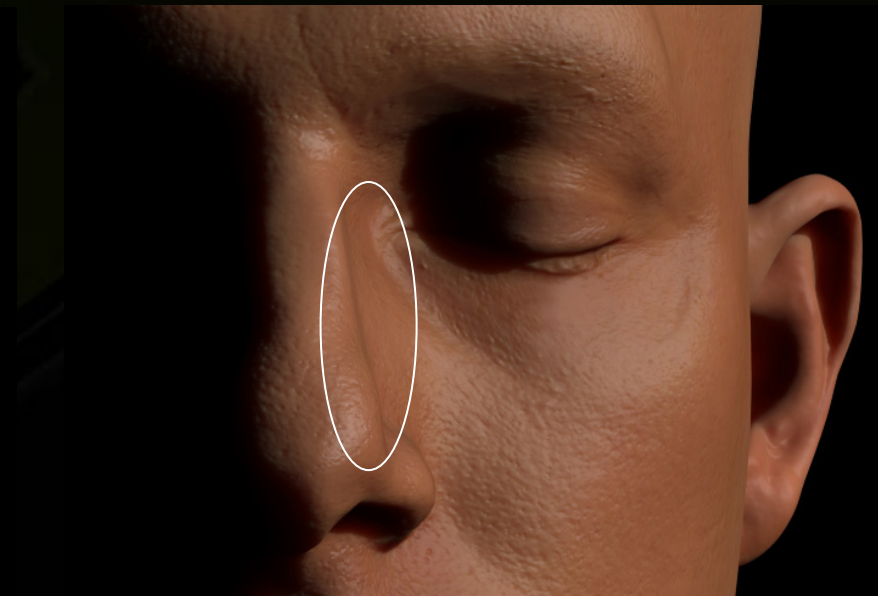
エネルギー節約



- N・Lのみを使用する問題
 - エネルギーを節約していなかった
 - 粗くて脂質のある表面の方向エフェクトを無視
- 皮膚の場合、差はわずかである



dot(N,L)



慎重なエネルギー節約

ガンマ補正



- あなたのモニタは真実を伝えていない！
- 表示された輝度 = $\text{pixelValue}^{2.2}$
- すべてのディスプレイはこの点を実行する
- デジタル カメラはこの点を認識している
 - カメラはこれを補正する
 - われわれもそうすべき

ガンマ補正の比較



ガンマ補正なし



ガンマ補正あり

参考文献



- BORSHUKOV G., AND LEWIS, J. 2003.『Realistic human face rendering for “the matrix reloaded”』 *ACM SIGGRAPH 2003 Conference Abstracts and Applications (Technical Sketch)*
- DEBEVEC, P., HAWKINS, T., TCHOU, C., DUIKER, H.-P., SAROKIN, W., AND SAGAR, M. 2000.『Acquiring the reflectance field of a human face』 *Computer Graphics, SIGGRAPH 2000 Proceedings*, 145–156.,
- DONNER C., AND JENSEN, H.W. 2005.『Light diffusion in multi-layered translucent materials』 *Proceedings of SIGGRAPH 2005*, 1032-1039.
- GREEN, S. 2004. 『Real-time approximations to subsurface scattering』 *GPU Gems*, R. Fernando, Ed. Addison Wesley, Mar., ch. 16, 263–278.
- JENSEN, H. W., AND BUHLER, J. 2002.『A rapid hierarchical rendering technique for translucent materials』 *ACM Trans. Graph.* 21, 3, 576–581.
- JENSEN, H. W., MARSCHNER, S. R., LEVOY, M., AND HANRAHAN, P. 2001. 『A practical model for subsurface light transport』 *Proceedings of SIGGRAPH 2001*, 511-518.
- KRISHNASWAMY, A., AND BARONOSKI, G. V. G. 2004.『A biophysically-based spectral model of light interaction with human skin』 *Proceedings of EUROGRAPHICS 2004*, vol. 23.
- PHARR, M., AND HUMPHREYS, G. 2004.『*Physically Based Rendering: From Theory to Implementation*』 Morgan Kaufmann Publishers Inc.
- WEYRICH, T., MATUSIK, W., PFISTER, H., BICKEL, B., DONNER, C., TU, C., MCANDLESS, J., LEE, J., NGAN, A., JENSEN, H. W., AND GROSS, M. 2006. 『Analysis of human faces using a measurement-based skin reflectance model』 *ACM Transactions on Graphics* 25, 3 (July), 1013–1024.

ご質問は？

