

SGGXマイクロフレーク分布

Eric Heitz^{1,2} Jonathan Dupuy³ Cyril Crassin² Carsten Dachsbaucher¹

概要：我々は、異方性マイクロフレーク関数と媒質の空間的に変化する特性を表現する対称 GGX (SGGX) 分布を提案します。我々の主要な理論的側面は、マイクロフレークの投影面積によってマイクロフレークの分布を表すことです。私たちは、法線の分布の復元に橢円体の形状をパラメータ化する投影面積を使用します。投影面積に基づいた表現は、堅固な線形補間およびプリフィルタリングを可能にし、その幾何学的な解釈のおかげで、マイクロフレークのフレームワークで使用される全ての演算を閉じた形の式で導出します。

また、我々の理論的枠組みの中に拡散反射のマイクロフレークを組み込みます。これにより、粗い鏡面材料に加えて粗い拡散マテリアルをモデル化することができます。最後に、私たちは SGGX マイクロフレーク位相関数のための完全なインポーティンスサンプリングの設計のために、可視法線の分布をサンプリングするアイデアを用います。これは、解析的で、決定論的で、実装が簡単で、従来研究よりも一桁高速です。

1. はじめに

ボリュームトリックモデルのレンダリングの重要性は近年劇的に増しています。表面ジオメトリは何十年もの間、標準的なレンダリングプリミティブとして使われていますが、髪、毛皮、もしくは布等の材料を表面形状として表現することは困難です。代わりに、空間的に変化する微細構造を記述するためにボリュームデータを使用することが有望な代替策として実績を残してきました [21]。また、ボリューム表現は、その外観をよりコンパクトで効率的に表現できることから、複雑なビジュアルデータ（例えば遠くの細かいジオメトリ）を置き換えるレベル・オブ・ディテール (LOD) 技術に適しています。プロダクションレベルのレンダリングで用いられるシーンの複雑さに対する重要なかつ差し迫った挑戦は、前例のない高さに達しています。

任意の微細構造を持ったボリュームトリックな散乱の物理ベースの定義、「マイクロフレーク理論」は、近年、Jakob ら [8] によって導入されました。表面材料（の BRDF）のために定式化されたマイクロファセット理論と同様に、この理論的枠組みは、ボリュームトリックな散乱の記述に使用されます。これは、統計的に分布したマイクロフレークの集合から推定された位相関数を提供し、エネルギーの保存則と相反性の制約により、物理的な正確性を保証します。この新しいフレームワークは、レンダリングに対する新し

い可能性を開いているが、今まででは、例えば、位相関数とインポーティンスサンプリングサンプリングに対する評価に関する閉じた形の演算を欠いている既存のマイクロフレーク表現によって制限されます。

本稿では、これらの欠点を解決し、マイクロフレークフレームワークの実用的な利点を一般的な形で増加させた新規マイクロフレーク分布を導入します。

我々の SGGX 分布は、微細構造を表現し、パラメータの線形補間が可能で、解析的な評価とインポーティンスサンプリングに対応した軽量なストレージで提供できる最初のものです。SGGX パラメータは、他のマイクロフレークのモデル [21]、ポリゴンジオメトリや、フィルタリングされたボリューム的な LOD 表現といった既存のデータから変換して生成することができます。

特に、私たちの貢献は次のとおりです。

- 新しいマイクロフレーク表現は、等方性および異方性微細構造を表現します。そのパラメータは、初期化が容易で、従来の表現から簡単に変換できて、確実に補間できます。
- マイクロフレークの枠組みの拡張は、鏡面反射だけでなく、拡散マイクロフレークも組み込みます。
- 位相関数のための解析決定論的インポーティンスサンプリング技術は、従来研究よりも一桁高速です。

また SGGX 分布が、将来のマルチスケールレンダリング用途で使用できるのかという点を探ります。このようなフレームワークは、マイクロフレーク表現と細部の統合から来る詳細の粗いレベルで新たに出現する複雑な可視性の

¹ Karlsruhe Institute of Technology.

² NVIDIA

³ Univ. Montréal; LIRIS, Univ. Lyon 1

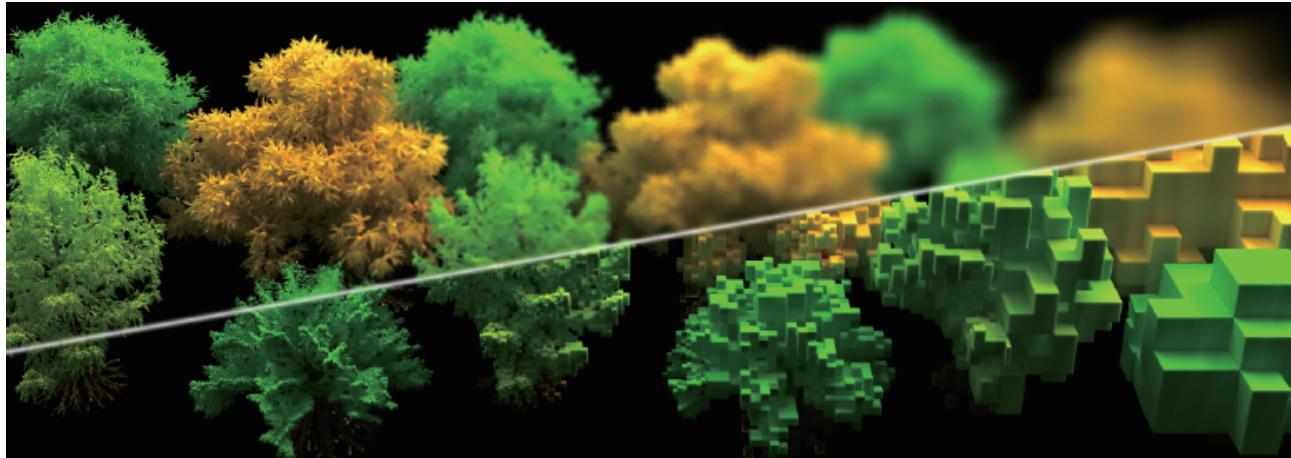


図 1 左上：詳細のレベルを（左から右へ）減少させたボクセル化された森のレンダリング。右下：マッチング解像度でのボクセル構造の可視化。私たちは、ポリューム異方性マテリアルを表現するために SGGX マイクロフレーク分布を使用。我々の表現は、ダウンスケーリングと補間をサポートしており、その結果、複数のスケールで滑らかでアンチエイリアスされたレンダリング結果となる。

効果の両方のフィルタリングを必要とします。我々の方法はマイクロフレーク表現を正確にプレフィルタすることが可能であることを示し、今後のチャレンジについて議論します。

2. 関連研究

我々のアプローチは、マイクロフレーク定式化の物理ベースレンダリングフレームワークをポリュームトリックフィルタリング技術につなげています。我々のマルチスケールフレームワークの実現は、表面詳細に関する近年のLOD技術に触発されています。

マイクロフレークフレームワーク

Jakob ら [8] は、異方性関与媒質への物理ベースの放射輝度伝達の枠組みを始めて導入した。これは、マイクロファセット表面反射モデルに類似したポリューム散乱モデルに基づいているが、ポリューム内で指向性をもつ非球形粒子を使用しています。彼らはまた、位相関数の相反性とエネルギー保存の制約を導出します。このフレームワークは、ミクロンスケールの分解能で設計された織物の外観を再現するために使用されています [21], [22]。

Schroder ら [15] は、織布中の纖維の統計的分布から計算された仮想的な散乱イベント利用した、異なるポリュームアプローチを提案しました。最近の SIGGRAPH のコース [16] では、布の外観の再現にまつわる総合的な概要が紹介されました。現在のマイクロフレークのフレームワークは、特に現実的な髪のレンダリングで重要な透過散乱効果 [10] が、組み込まれていないことに注意してください。したがって、我々のモデルも、この制限の対象となります。

マイクロフレークレンダリングの複雑性

残念ながら、モンテカルロパストレーシングは、適度に

複雑なシーンと解像度であっても数百時間の計算時間を必要とします [22]。Zhao ら [20] は、多くのポリュームマテリアル（例えば布地）を表現する繰り返し構造に関して、事前計算と放射輝度の伝播の保存で、レンダリングを高速化する手法を提案しています。この技術はかなりの高速化を果たしますが、用途は制限され、一般的な非反復アセットに適用できません。

レンダリングを高速化するための別の戦略は、データの解像度を画像の解像度（もしくはピクセルフットプリント）へ適応させることができるマルチスケール表現を設計することです。残念ながら、既存の表現 [8], [21] は、この場合には適切ではありません：（マイクロフレークの集まりを表すために使用される）法線の分布には、異なるスケール間を横断する分布のパラメータを得るために必要なフィルタリング演算がありません。他の制限として、それらは纖維状または表面的なマテリアルのどちらかを表現するだけで、両方を同時に表現することはできません異なるマテリアルを補間し、フィルタリングすることはできません。対照的に、我々のフレームワークは、統一的な方法で両者を記述と演算することができます。

最後に、例えば解析的なインポータンスサンプリングが不可能であったり、コスト高な光跡棄却ベースのアルゴリズムを必要とするように、それらは実用性も欠いています。また、レイマーチング中の各ステップで評価される必要がある投影面積は、解析的にも効率的にも計算されません。これらのモデルのためのマルチスケール表現を作成することは重要な課題と考えられてきました [1]。本稿では、マイクロフレーク表現に関連する前述の問題に対する解決策を提示します。

GGX 分布

(マイクロファセットまたはマイクロフレークの) 法線の分布を表すのに橢円形状を使用するというアイデアは、物理学の分野で Trowbridge と Reitz [17] によって最初に導入された。Neyret は、ボリュームトリックなマテリアルを表すために同等の分布を導出しました [11], [12]。彼は、 Q を 3×3 対称正定値行列として、(テンソル橢円体とも呼ばれる) $P^T Q P = 1$ を満たす点 P の集合として関連する橢円体を定義しました。Neyret は、 Q^{-1} の係数で補間とフィルタリングすることを提案しました。残念ながら、これらの演算は、入力分布の粗さを維持せず、しばし、明らかに間違った結果になります (図 10 参照)。その後、同様の分布が独立して提案され [18]、GGX と名付けられました；これは、今日ではマイクロファセットの BRDF で広く利用されています [6]。しかしながら、GGX 分布は、各局所座標系での橢円体の上部のみしか使用せず、同じ座標系で定義されていない異なる入力分布では、フィルタリングや補間ができません。

フィルタ可能な法線分布

法線や変位マップに対する LEAN 表現 [3], [13] は、フィルタリングおよび補間を可能にし、私たちにインスピレーションを与えました。LEAN の核となるアイデアは、マイクロファセット法線の異方性分布を小さなパラメータ集合で十分によく表現する空間を見つけることがあります。LEAN データは、傾きの分布の共分散行列が対称 2×2 行列として表現されているため線形に補間できる。我々の表現のキーとなる発想は、この分布への「ボリュームへの類推」がマイクロフレークの投影面積であることであり、これも対称行列でコンパクトに表せることです。

3. 背景: マイクロフレーク理論

このセクションでは、マイクロフレーク理論 [8] の実用的な側面を手短に要約します。表 1 は、私たちの表記を示しています。マイクロフレークマテリアルは、法線の分布 (従来研究に従って、法線分布関数を NDF と省略する) によって定義され、モデルはレンダリング時にボリュームトリックな減衰と位相関数を計算するために使用されます。積分器 (例えば、バストレーシング) の選択と実装とは独立した問題であり、本論文の範囲外です。読者には、[14] の参考文献を薦めます。

3.1 マイクロフレークボリューム

異方性 RTE

異方性関与媒質中の光輸送は、異方性放射輸送方程式 (RTE) で記述されます [8] :

$$(\omega_i \cdot \nabla) L(\omega_i) + \sigma_t(\omega_i) L(\omega_i) = \sigma_s(\omega_i) \int_{\Omega} f_p(\omega_i \rightarrow \omega_o) L(\omega_o) d\omega_o + Q(\omega_i). \quad (1)$$

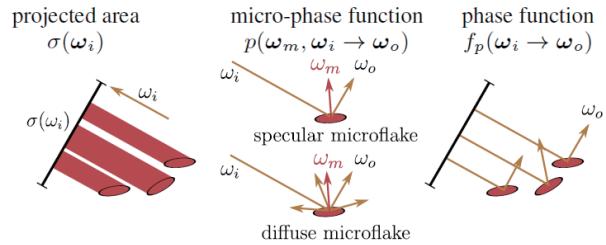


図 2 マイクロフレーク理論で使われる表記の図示

ω_i, ω_o	入射と出射方向
ω_m	マイクロフレーク法線
$D(\omega_m)$	法線分布 (NDF)
$D_{\omega_i}(\omega_m)$	可視法線分布 (VNDF)
α	マイクロフレークの方向非依存のアルベド
$p(\omega_m, \omega_i \rightarrow \omega_o)$	マイクロフレークの位相関数
$f_p(\omega_i \rightarrow \omega_o)$	全てのマイクロフレークの位相関数
ρ	ボリューム密度
$\sigma(\omega_i)$	マイクロフレーク投影面積
$\sigma_t(\omega_i)$	ボリューム減衰係数
$\sigma_s(\omega_i)$	ボリューム散乱係数
S	SGGX パラメータ (3×3 行列)
$(-, -)$	内積
$\langle -, - \rangle$	クランプされた内積

表 1 この論文での表記。読みやすさのために省略しているが、全ての量は空間的に変化することに注意。

表 1 でも説明していますが、この式で生じる空間パラメータを省略していることに注意してください。

マイクロフレーク分布

マイクロフレークの統計的な向きは、法線の分布 (NDF) D によって定義されます。従来研究 [8], [21] では、正規化 NDF、すなわち $\int_{\Omega} D(\omega_m) d\omega_m = 1$ を利用していました。しかし、我々は 4.2 節で示すように、この正規化条件は、フレームワークに必須ではありません。

マイクロフレーク投影領域

ボリューム的な減衰 $\sigma_t(\omega_i)$ と散乱 $\sigma_s(\omega_i)$ 係数は、体積内の距離をサンプリングする積分器で使われ、視界が評価されます。マイクロフレークボリュームでは、私達は次の式を持ちます :

$$\sigma_t(\omega_i) = \rho \sigma(\omega_i), \quad (2)$$

$$\sigma_s(\omega_i) = \alpha \rho \sigma(\omega_i), \quad (3)$$

ここで、 ρ は、ボリュームの密度で、 α は、方向に依存しないアルベド (我々はボリューム内の各点で、すべてのマイクロフレークが、同じマテリアルであることを仮定しています) で、 $\sigma(\omega_i)$ は、 ω_i 方向のマイクロフレークの投影面積です :

$$\sigma(\omega_i) = \int_{\Omega} \langle \omega_i, \omega_m \rangle D(\omega_m) d\omega_m. \quad (4)$$

投影面積の評価は、私たちの表現で重要であり、第 4 章でさらに議論します。

マイクロフレーク反射率

マイクロフレークの位相関数 $f_p(\omega_i \rightarrow \omega_o)$ は、ボリュームに存在するマイクロフレークの集合による光の相互作用を表します。個々のマイクロフレークは、それ自身のBRDFによる両面を持つ小さなパッチのように見ることができます。この入射方向の余弦で重み付けされたBRDFは、マイクロフレークの位相関数 $p(\cdot, \cdot)$ です。我々は、 $p(\cdot, \cdot)$ が、散乱時の出射方向を計算するために使われる確率分布関数(PDF)であることから位相関数と名付けます。表記を簡単にするために、本稿では単一のマイクロフレークの位相関数 $p(\cdot, \cdot)$ が、方向に依存しないアルベド α をもつ純粹な拡散または鏡面BRDFに基づいていると仮定します。しかし、拡散と鏡面マイクロフレークのブレンドや方向依存アルベドの利用を妨げるものは何もありません。

マイクロフレーク位相関数

マイクロフレークの集合のための位相関数は

$$f_p(\omega_i \rightarrow \omega_o) = \frac{1}{\sigma(\omega_i)} \int_{\Omega} p(\omega_m, \omega_i \rightarrow \omega_o) \langle \omega_i, \omega_m \rangle D(\omega_m) d\omega_m. \quad (5)$$

位相関数は、媒質中の一点の光散乱の評価に使用されます

$$L(\omega_i) = \alpha \int_{\Omega} f_p(\omega_i \rightarrow \omega_o) L(\omega_o) d\omega_o. \quad (6)$$

マイクロフレークマテリアルの実装には、2つの追加機能を提供する必要があります： $f_p(\omega_i \rightarrow \omega_o)$ の評価とサンプリング。我々は、第5章でSGGX分布による、これらの演算を定義します

3.2 マイクロフレーク制約

物理的なマイクロフレークマテリアルは、エネルギーの保存則と相反性を持ちます。エネルギーの保存則は、正規化位相関数を要求します。すなわち、与えられた入射方向 ω_i に対する出射方向 ω_o に関する分布は、PDFです：

$$\int_{\Omega} f_p(\omega_i \rightarrow \omega_o) d\omega_o = 1. \quad (7)$$

相反性の制約は、投影面積 σ と（方向に依存しないマイクロフレークアルベド α を持つ）位相関数 f_p に関係します。

$$\sigma(\omega_i) f_p(\omega_i \rightarrow \omega_o) = \sigma(\omega_o) f_p(\omega_o \rightarrow \omega_i) \quad (8)$$

4. SGGXマイクロフレーク分布

このセクションでは、SGGX分布という新しい表現を導入し、パラメータの初期化について議論します。

4.1 予備的検討事項

SGGX分布の私たちの新しい表現は、3つの重要な観察によって動機づけられます。

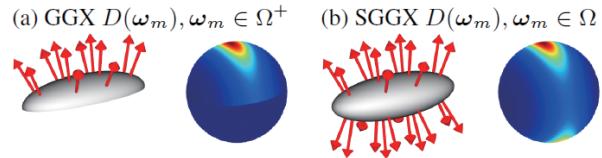


図3 横円体分布。SGGX分布は、対称GGX。すなわち、非クラシック横円体の表面の法線の分布です。色分けされた球体は、法線の分布を示しています。

1) 横円体NDF 図3に示すようにGGX分布は、半球にクランプされる横円体の法線分布(NDF)です。SGGX分布は単純にドメイン全体にわたった横円体のNDFです(Sは対称の略)

2) 法線分布の正規化は必要ない 5章で、マイクロフレークの位相関数 f_p は、 D が正規化されないとしても、常に正規化される可視マイクロフレークの分布 D_{ω_i} に依存することを示します。直感的には、任意の係数で D をスケーリングすることは、ボリューム内のマイクロフレークの数、またはサイズを、スケーリングすることと同じです。両方とも意味のある媒質を表現しています。したがって、 D の正規化および/またはそのノルムの評価は、マイクロフレークのモデルの導出には不要です。

3) 投影面積は保存されるべき 投影面積は、それから得られるBRDFと位相関数の正規化係数となるため、マイクロファセットおよびマイクロフレーク理論の両方に重要な特徴量です。また、マイクロフレーク理論では、光と物質の相互作用の確率、すなわちマテリアルの不透明度に影響します。いずれのフィルタリング演算も、この量を保存する必要があります。

これらの観察から、我々は、その投影面積でマイクロフレークの集合を表現すべきと結論付けます。すなわち、法線分布ではなく、すべてのマイクロフレークにわたる投影面積の和が、補間やフィルタリングなどの演算に有益です。しかし、我々は、投影面積からNDFを復元できるようにする必要があります。

4.2 SGGX分布の新規定義

我々は、NDFを復元できる、投影面積によって定義されるSGGX分布を導入します。

投影面積に基づくSGGX分布の定義

我々のSGGX分布はその固有空間で見るときに最高の可視化がされます。これを、次のような 3×3 の正定値対称行列 S として定義します。

$$S = (\omega_1, \omega_2, \omega_3) \begin{pmatrix} S_{11} & 0 & 0 \\ 0 & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{33} \end{pmatrix} (\omega_1, \omega_2, \omega_3)^T, \quad (9)$$

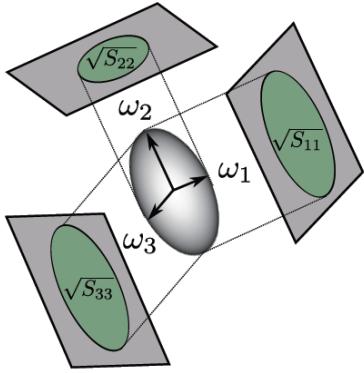


図 4 行列 S の固有ベクトルと固有値。投影面積（グリーンの面の面積）は行列の固有値の平方根です。

ここで、 $S_{11} = \sigma^2(\omega_1)$, $S_{22} = \sigma^2(\omega_2)$, $S_{33} = \sigma^2(\omega_3)$ は、図 4 に見られるように、正規直交固有ベクトル (ω_1 , ω_2 と ω_3) で与えられる各方向に関する楕円体の二乗投影面積に等しい正の固有値です。固有ベクトルはまた、楕円体の主軸です。

カノニカル基底での SGGX 分布の定義

我々は、カノニカル基底での SGGX 行列の表現を得るために、式 9 を展開します。

$$S = \begin{pmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{xy} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{xz} & S_{yz} & S_{zz} \end{pmatrix} \quad (10)$$

ここで、6 個の係数 $S_{xx}, S_{yy}, S_{zz}, S_{xy}, S_{xz}$ と S_{yz} は、4.4 節に示すように、計算に使用するパラメータである。

投影面積

与えられた S (式 9) による投影面積は、次のように計算することができます。

$$\sigma(\omega_i) = \int_{\Omega} \langle \omega_i, \omega_m \rangle D(\omega_m) d\omega_m = \sqrt{\omega_i^T S \omega_i} \quad (11)$$

このことから、我々は行列 S の補間は、二乗投影面積 $\sigma(\omega_i)^2$ の補間と等価であるとわかる。これは、4.4 節で議論するように、凸性と投影面積の堅牢な補間を保証します。

法線の分布

与えられた S (式 9) による楕円体の定義により、法線の分布は次のように得られる（導出には補足資料を参照してください）：

$$D(\omega_m) = \frac{1}{\pi \sqrt{|S|} (\omega_m^T S^{-1} \omega_m)^2} \quad (12)$$

D の評価は、 S が 3×3 正値対称行列ということと解析的に可逆なことから、効率的に実装することができます。ここで、一般的な D は正規化されていません。すなわち $\int_{\Omega} D(\omega_m) d\omega_m \neq 1$ で、ノルムには閉形式表現が存在しません。しかし、これは我々が前に説明したようにマイクロフレークモデルには問題ではありません

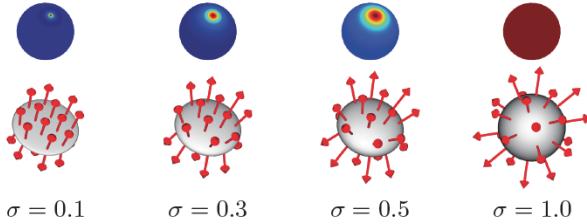


図 5 SGGX 初期化。粗さ σ をもつ面状 SGGX 分布の初期化（上の行：法線分布、下の行：楕円体）

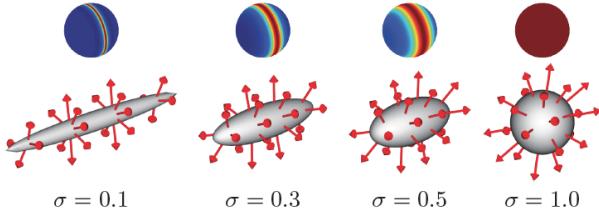


図 6 SGGX 初期化。粗さ σ の纖維状の SGGX 分布の初期化（上の行：法線分布、下の行：楕円体）

4.3 SGGX 表現の初期化

一般的方法

主方向 ω_1 , ω_2 と、対応する投影面積 $\sigma(\omega_1)$, $\sigma(\omega_2)$, $\sigma(\omega_3)$ が有効である限り、式 9 の形で SGGX 行列 S は簡単に初期化できます。存在するデータを SGGX に変換して、任意の入力分布に関するパラメータ推定手順を設計することで、面状と纖維状の両方のマテリアルについて、この初期化アプローチが使えます。

面状の分布

面状 SGGX 分布は、その法線方向 ω_3 と、直交する接方向 ω_1 , ω_2 の投影面積である粗さのパラメータ $\sigma \in [0, 1]$ によって定義されます。慣例により ω_3 の投影面積を 1 とします。固有値は、次のようにになります。

$$\sigma^2(\omega_1) = \sigma^2, \sigma^2(\omega_2) = \sigma^2, \sigma^2(\omega_3) = 1. \quad (13)$$

式 9 を展開すると、 $\omega_3 = (x, y, z)$ として、次を得ます

$$S = \begin{pmatrix} x^2 & xy & xz \\ xy & y^2 & yz \\ xz & yz & z^2 \end{pmatrix} + \sigma^2 \begin{pmatrix} y^2 + z^2 & -xy & -xz \\ -xy & x^2 + z^2 & -yz \\ -xz & -yz & x^2 + y^2 \end{pmatrix}. \quad (14)$$

ここで、パラメータ σ が、マイクロファセット BRDF [18] で使われる半球 GGX 分布の粗さパラメータ（通常、 α で表記）と一致することに注意してください。図 5 に示すように、楕円体の形状は、 D がディラック分布のデルタになる円盤 ($\sigma = 0$) から、法線が均一な分布をする球 ($\sigma = 1$) まで変化します。

纖維状分布

纖維状の SGGX 分布は、その接方向 ω_3 と、 ω_3 の投影

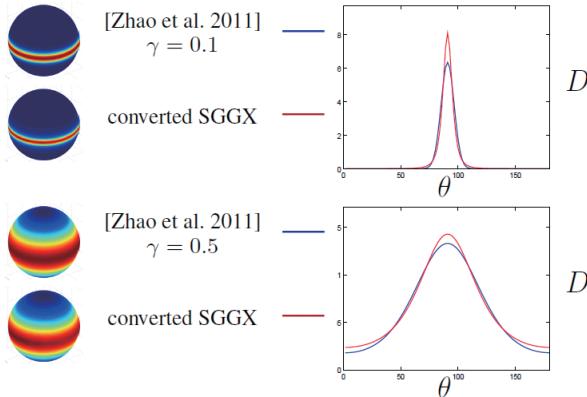


図 7 SGGX 変換。私たちは、Zhao らの分布から主方向での投影面積を計算することによって SGGX に高速に変換します。

面積にあたる粗さパラメータ $\sigma \in [0, 1]$ によって定義されます。直交する法線方向 ω_1, ω_2 の投影面積は、慣例により 1 とします。この固有値は、次のようにになります。

$$\sigma^2(\omega_1) = 1, \sigma^2(\omega_2) = 1, \sigma^2(\omega_3) = \sigma^2. \quad (15)$$

式 9 を展開すると、 $\omega_3 = (x, y, z)$ として、次を得ます

$$S = \sigma^2 \begin{pmatrix} x^2 & xy & xz \\ xy & y^2 & yz \\ xz & yz & z^2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} y^2 + z^2 & -xy & -xz \\ -xy & x^2 + z^2 & -yz \\ -xz & -yz & x^2 + y^2 \end{pmatrix}. \quad (16)$$

図 6 に示すように、橢円体の形状は、円柱 ($\sigma = 0$) から、球 ($\sigma = 1$) まで変わります。

既存の分布の変換

Zhao ら [21] は、角度ガウス分布 D^{zhao} を持つ纖維状マテリアルを接方向 $\omega_3 = (x, y, z)$ と粗さ係数 γ で表現しました。我々はこのようなデータを簡単に SGGX 分布に変換できます。この目的のために、我々は最初に式 4 を使って、接方向 ω_3 と直交する方向 $(\omega_1, \omega_2) \perp \omega_3$ への D^{zhao} の投影面積を評価します。

$$\begin{aligned} \sigma(\omega_3) &= \int_{\Omega} \langle \omega_3, \omega_m \rangle D^{zhao}(\omega_m) d\omega_m, \\ \sigma(\omega_1) &= \sigma(\omega_2) = \int_{\Omega} \langle \omega_1, \omega_m \rangle D^{zhao}(\omega_m) d\omega_m. \end{aligned} \quad (17)$$

その後、式 9 を使用して SGGX 分布を得ます。図 7 に 2 つの変換の結果を示します。SGGX 分布が角度ガウス分布よりもシャープなピークとより広い尾を持っていることに注意してください。これは、GGX 分布のよく知られた特性です [18]。

任意の分布に対するパラメータ推定

一般的には、球状分布のパラメータの推定には、パラメータ空間の探査を含むコストが高い非線形最適化手順

が必要なことに注意してください [19]。対照的に、SGGX 分布の幾何学的特性に基づく我々のパラメータ推定手順は、効率的で、決定論的、かつ簡単な実装です。パラメータ推定手順の目標は、入力球状分布 D から 3 固有ベクトル $(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$ と関連する投影面積 $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ を計算することになります。有効なマイクロフレーク分布 D は、対称でなければならないことを思い出しましょう。すなわち $D(\omega_m) = D(-\omega_m)$ です。

まず、固有ベクトルを抽出します。橢円対称性により、SGGX 分布の固有ベクトルは、その 3 次元共分散行列^{*1} の固有ベクトルと等しくなります。

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \mathbf{E}[x^2] & \mathbf{E}[xy] & \mathbf{E}[xz] \\ \mathbf{E}[xy] & \mathbf{E}[y^2] & \mathbf{E}[yz] \\ \mathbf{E}[xz] & \mathbf{E}[yz] & \mathbf{E}[z^2] \end{pmatrix}, \quad (18)$$

ここで、期待値は座標 $\omega_m = (x, y, z)$ の二次モーメントです。例えば、 $\mathbf{E}[x^2] = \int_{\Omega} x^2 D(\omega_m) d\omega_m$ や、 $\mathbf{E}[xy] = \int_{\Omega} xy D(\omega_m) d\omega_m$ です。我々は数値的に共分散行列 Σ を計算し、その固有ベクトル $(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$ を抽出します。行列のサイズが 3 であり、対称正定値であるため、この最後の演算は簡単です。次に、式 4 を用いて、これらの三方向の分布の投影面積 $\sigma(\omega_1), \sigma(\omega_2)$ と $\sigma(\omega_3)$ を計算することによって、関連する固有値を得ます。最後に、式 9 に従って固有ベクトルと固有値を組み合わせます。推定された SGGX 分布は、これらの 3 方向に関して厳密な入力のデータの投影面積を持ちます。しかし、他の方向には必ずしもそうではありません。

我々のパラメータ推定手順の重要な特性は、入力分布が SGGX 分布（図 8）ならば、組み立て方によって推定が正確になるということです。実際、入力が SGGX 分布で、すなわち 3 固有ベクトルと 3 固有値で、正確に表現することができますれば、これら固有ベクトルと固有値を読み出すので、我々のプレフィルタアルゴリズムの出力は正確です。この特性は、堅牢かつ正確なパラメトリック推定を保証します。図 9 に示すように、このアルゴリズムは、入力分布のスケーリングや異方性をキャプチャします。対照的に、Neyret のフィルタリング手順 [12] は、両方の点について上手くいきません。

4.4 SGGX パラメータのメモリ表現

コンパクトなストレージ

ボリュームデータは、簡単に使用可能なメモリを超える可能性があります。それゆえ、格納（やレンダリングでの利用）にはコンパクトな表現望まれます。式 10 から行列

^{*1} SGGX 行列では、共分散行列が同じ固有ベクトルを持ちますが、一般的には同じではないことに注意してください： $S \neq \Sigma$ 。例えば、完全な球体や完全な円盤状の橢円のような特殊なケースでだけ等しくなります。

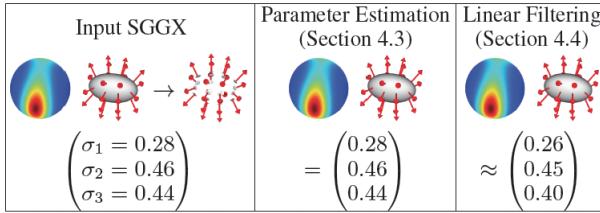


図 8 パラメータ推定の検証。入力分布が SGGX 分布によって表すことができる場合には、私たちのパラメータ推定手順は、まさにこの SGGX 分布を出力します。対照的に、入力データの線形なフィルタリングは、最良のパラメータ推定とはなりませんが、公正で簡単な近似値のままです。 σ 値は、固有ベクトルへの投影領域です。

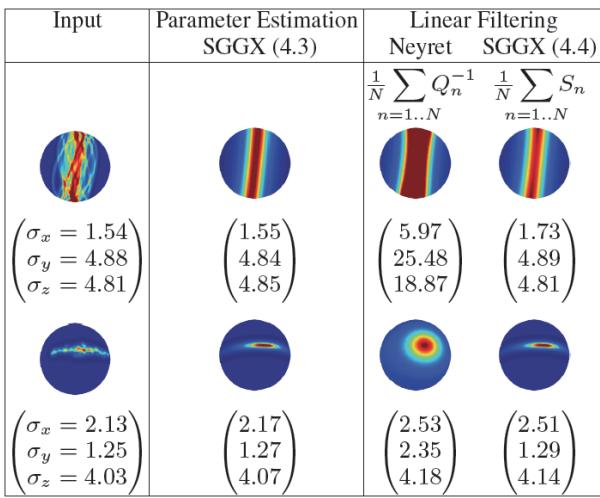


図 9 任意の分布からのパラメータ推定。我々は様々な入力分布のパラメータを確実に推定します。 σ 値は、正準方向 x 、 y および z への投影面積です。

S の 6 係数は二乗値を表すので、線形量子化は破壊的です。我々は、次の変換で SGGX パラメータを格納するのによく適したパラメータの集合が得られることがわかりました：

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sqrt{S_{xx}} & \sigma_y &= \sqrt{S_{yy}} & \sigma_z &= \sqrt{S_{zz}} \\ r_{xy} &= \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx}S_{yy}}}, & r_{xz} &= \frac{S_{xz}}{\sqrt{S_{xx}S_{zz}}}, & r_{yz} &= \frac{S_{yz}}{\sqrt{S_{yy}S_{zz}}} \end{aligned} \quad (19)$$

ここで、 σ 値が $[0, 1]$ に線形に分布しており、 r パラメータは $[-1, 1]$ に線形に分布していることに注意してください。我々の実装では、1 バイトで各パラメータを格納します。したがって、我々の SGGX 表現はボクセル毎に 6 バイト必要です。

線形補間

式 19 によるコンパクトな表現は、結果の SGGX 行列が必ずしも正定値ではないので、線形補間できません。しかし、式 10 の 6 つのパラメータ S_{xx} , S_{yy} , S_{zz} , S_{xy} , S_{xz} と S_{yz} は、線形補間できます。レンダリング時に値を読み込む場合は、まず、 S の 6 つのパラメータを再構築します：

$$S_{xx} = \sigma_x^2, \quad S_{yy} = \sigma_y^2, \quad S_{zz} = \sigma_z^2$$

$$S_{xy} = r_{xy}\sigma_x\sigma_y, \quad S_{xz} = r_{xz}\sigma_x\sigma_z, \quad S_{yz} = r_{yz}\sigma_y\sigma_z \quad (20)$$

これらにより、我々は安全に補間できます：対称正定値行列の凸結合は、常に対称正定値行列です。このようにして SGGX 行列を線形補間すると、常に（数学的に）有効な結果が得られます。また、4.2 節で、SGGX 行列の係数の平均は、二乗投影面積の平均に等しいことを示しました。補間された分布の投影面積は、入力の凸結合です。この特性から、補間された分布は、常に良く定義されていて、視覚的によい挙動を見せ、正確であることが保証されます。図 10 は、Neyret のものと我々の手法の比較の視覚化です。彼の方法は、投影面積（マテリアルの粗さ）を保存しないため、繊維状マテリアルの補間で上手くいきません。この例では、繊維状橋円体を極端に鏡面な表面のマテリアルのような、ほぼ平坦な面状の橋円体へとブレンドしています。対照的に、我々の線形補間は、平均投影面積と主方向を保存します。我々の補間スキームは平均的な外観を保持しながら、若干平滑化した結果になります。なお、同様のアイデアに基づく LEAN/LEADR [3], [13] 補間スキームも、この制限を共有しています。

線形事前フィルタリング

複数の分布をブレンドすることで新しい SGGX 分布を初期化する機能は、ボリュームデータのダウンサンプリングに必要なキーとなる演算です。これを得るために、我々は、セクション 4.3 で導入された手順を用いたブレンドされた分布のパラメータの推定をします。しかし、実際には、我々は、行列 S を線形フィルタリングし、LOD 階層を構築するデータのダウンサンプリングを行う 3D MIP マッピングを実行します。図 8 に示すように、線形フィルタリングは理論的には最適なパラメータ推定を保証するものではないことに注意してください。しかし、図 9 に示すように、実装は非常に簡単で、実用的な目的であればリーズナブルな範囲で正確です。詳細比較は、補足資料にあります。

5. SGGX 位相関数

このセクションでは、可視法線の分布に基づいて、マイクロフレーク位相関数を展開しています（5.1 節）。この概念は、マイクロファセット BRDF [5] の文脈で最初に導入されました。この論文に基づき、我々は Jakob ら [8] の結果から、鏡面マイクロフレークの位相関数を追導出します。また、拡散マイクロフレークのための新たな位相関数を導出します（5.2 節）。Heitz の構築の 1 つの利点は、可視法線の分布と位相関数との間の関係が確立できることです。これは、SGGX 位相関数のための効率的なインポーテンスサンプリング技術の発展に活用できます（5.3 節）。

5.1 可視法線の分布

マイクロフレークの堆積による可視法線の分布 (VNDF)

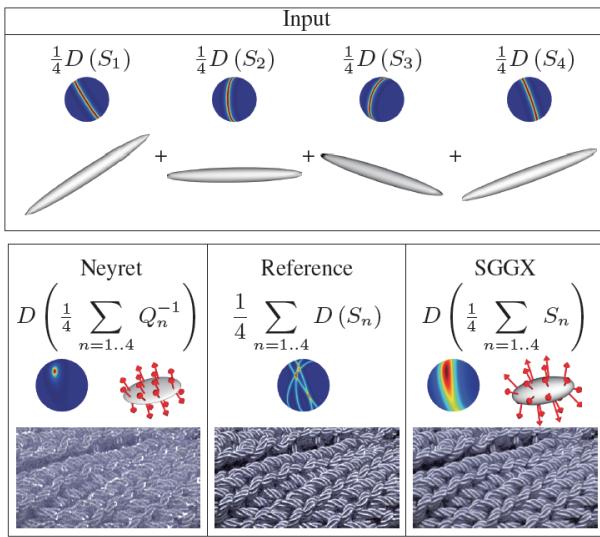


図 10 補間。Neyret の補間と SGGX 補間に関するリファレンスとの比較。

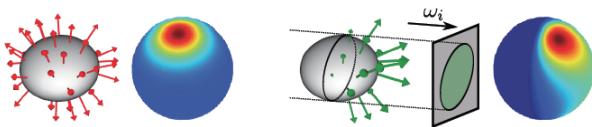


図 11 SGGX 分布の法線分布 D (左) および可視法線の分布 D_{ω_i} (右)

は、

$$D_{\omega_i}(\omega_m) = \frac{\langle \omega_i, \omega_m \rangle D(\omega_m)}{\int_{\Omega} \langle \omega_i, \omega_m \rangle D(\omega_m) d\omega_m} = \frac{\langle \omega_i, \omega_m \rangle D(\omega_m)}{\sigma(\omega_i)}, \quad (21)$$

ここで、投影面積 $\sigma(\omega_i)$ は、分布の正規化因子^{*2}であり、正規化されることを保証する(すなわち、それは PDF です):

$$\int_{\Omega} D_{\omega_i}(\omega_m) d\omega_m = 1. \quad (22)$$

図 11 は、SGGX 分布の NDF と VNDF を示しています。

5.2 位相関数の構築

このセクションでは、VNDF から SGGX 位相関数を導出します。 ω_i 方向の光線がマイクロフレークと交差する場合、マイクロフレークの法線 ω_m は、PDF $D_{\omega_i}(\omega_m)$ に応じて選択される。個々のマイクロフレークの位相関数 $p(\omega_m, \omega_i \rightarrow \omega_o)$ は、(入射方向 ω_i と ω_m に依存する) 光線の反射方向 ω_o を決定するために使用される PDF である。我々は、式 5 を可視法線の分布で書き換えます。

$$f_p(\omega_i \rightarrow \omega_o) = \int_{\Omega} p(\omega_m, \omega_i \rightarrow \omega_o) D_{\omega_i}(\omega_m) d\omega_m. \quad (23)$$

直感的には、次に導出する、鏡面と拡散 SGGX 位相関数

^{*2} この正規化係数は、マイクロファセット BRDF における Smith のマスキング関数と同じ役割を果たし、同種の仮定のもとに定義されています：可視性と法線の向きは独立していることを仮定しています [5]。

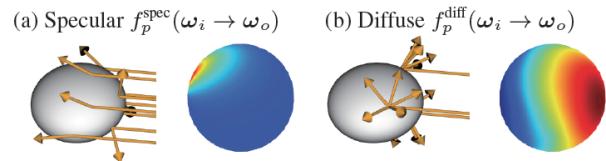


図 12 SGGX 位相関数 $f_p(\omega_i \rightarrow \omega_o)$ は、楕円体の表面で反射された光線の分布によって与えられます。

は、鏡面反射とそれぞれの拡散反射が、楕円体がどのくらい入射光を反射するかを記述しています(図 12 を見よ)。

鏡面位相関数

鏡面マイクロフレークの SGGX 位相関数は、鏡面表面をもつ楕円体の反射方向の分布です(図 12(a))。鏡面マイクロフレークに対して、マイクロ位相関数は、 $p^{spec}(\omega_m, \omega_i \rightarrow \omega_o) = \frac{\delta\omega_h(\omega_m)}{4|\omega_m \cdot \omega_h|}$ となります。ここで、 ω_h はハーフベクトルです。これを式 23 に代入することで、Jakob ら [8] と同じ結果を得ます：

$$f_p^{spec}(\omega_i \rightarrow \omega_o) = \frac{D(\omega_h)}{4\sigma(\omega_i)}, \quad (24)$$

これは、エネルギー保存則(式 7)と相反性(式 8)の両方を満たします。 f_p^{spec} は、式 12 の D と式 11 の σ の解析形式を使って評価できます。

拡散位相関数

同様に、拡散マイクロフレークための SGGX 位相関数は、ランパート表面の楕円体によって反射される方向の分布である(図 12(b))。この場合、マイクロフレークのマイクロ位相関数は $p^{diff}(\omega_m, \omega_i \rightarrow \omega_o) = \frac{1}{\pi} \langle \omega_o, \omega_m \rangle$ です。式 23 に代入すると：

$$\begin{aligned} f_p^{diff}(\omega_i \rightarrow \omega_o) &= \frac{1}{\pi} \int_{\Omega} \langle \omega_o, \omega_m \rangle D_{\omega_i}(\omega_m) d\omega_m \\ &= \frac{1}{\pi\sigma(\omega_i)} \int_{\Omega} \langle \omega_o, \omega_m \rangle \langle \omega_i, \omega_m \rangle D(\omega_m) d\omega_m, \end{aligned} \quad (25)$$

これも、エネルギー保存則と相反性(式 8)の両方を満たします。 f_p^{diff} の評価は鏡面マイクロフレークのものよりも複雑です。5.4 節では、実用的な評価手順を提示します。

5.3 位相関数のインポータンスサンプリング

可視法線の分布

Heitz と d'Eon [4] は、マイクロファセット BRDF モデルが、最初に可視法線の分布 D_{ω_i} から法線をサンプリングして、それからその法線に沿ったマテリアルのマイクロ BRDF をサンプリングすることで、効果的にインポータンスサンプリングを行えることを示しました。同じ考えがマイクロフレーク位相関数のインポータンスサンプリングにも適用できます：インポータンスサンプリングする場合、サンプル ω_m を作るために VNDF D_{ω_i} を、次にマイクロ位相関数 $p(\omega_m, \omega_i \rightarrow \omega_o)$ を使って出射方向 ω_o をサンプルすると、 ω_o は $D_{\omega_i}(\omega_m)$ と $p(\omega_m, \omega_i \rightarrow \omega_o)$ の内積によっ

て与えられる PDF に従います。ここで、この内積は、マイクロファセットの位相関数 $f_p(\omega_m, \omega_i \rightarrow \omega_o)$ であることに注意してください（式 23）。

マイクロファセット BRDF の場合は、このインポータンスサンプリング技術は、サンプルの重みで表現されるシャドウイング確率を考慮していないため完璧ではありません。しかし、マイクロフレーク位相関数では、マスキングだけで、シャドウイング^{*3}はありません。したがって、インポータンスサンプリング技術は完璧であり、サンプルの重みは常に 1 です。

インポータンスサンプリングの重要なステップは、次で説明する、可視法線の分布のサンプリングとなります。

SGGX 分布を用いた重点サンプリング

後で見るように、SGGX 分布が法線の分布を表現する橿円体に基づいているという事実は、結果としての位相関数を効果的にインポータンスサンプリングできるようにします。VNDF のサンプリングは、アルゴリズム 1 に詳述されており、サンプリングアルゴリズムの最後のステップは、図 13 に示されています。

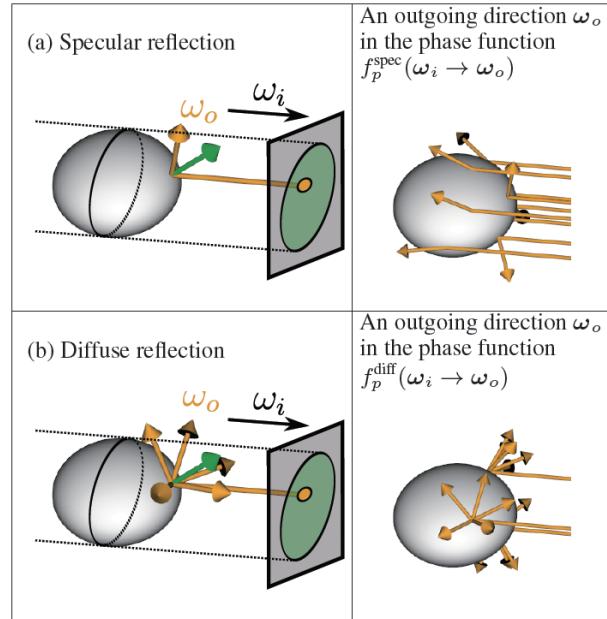


図 13 私たちのインポータンスサンプリングアルゴリズムで出射方向を計算。

VNDF のサンプリング

アルゴリズム 1 SGGX による VNDF のインポータンスサンプリング

- 1: function VNDF サンプリング (ω_i, S, U_1, U_2)
- 2: ω_i 周りの正規直交基底 ($\omega_k, \omega_j, \omega_i$) を計算
- 3: S をこの基底に射影
- $$S^{kji} = \begin{pmatrix} S_{kk} & S_{kj} & S_{ki} \\ S_{kj} & S_{jj} & S_{ji} \\ S_{ki} & S_{ji} & S_{ii} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_k^T S \omega_k & \omega_k^T S \omega_j & \omega_k^T S \omega_i \\ \omega_j^T S \omega_j & \omega_j^T S \omega_j & \omega_j^T S \omega_i \\ \omega_i^T S \omega_i & \omega_j^T S \omega_i & \omega_i^T S \omega_i \end{pmatrix}$$
- 4: ベクトル $M_k = \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{|S^{kji}|}{S_{jj}S_{ii}-S_{ji}^2}} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$,
- $$M_j = \frac{1}{\sqrt{S_{ii}}} \begin{pmatrix} -\frac{S_{ki}S_{ji}-S_{kj}S_{ii}}{\sqrt{S_{jj}S_{ii}-S_{ji}^2}} \\ \sqrt{S_{jj}S_{ii}-S_{ji}^2} \\ 0 \end{pmatrix}, M_i = \frac{1}{\sqrt{S_{ii}}} \begin{pmatrix} S_{ki} \\ S_{ji} \\ S_{ii} \end{pmatrix}$$
 を計算
- 5: 可視球上でのランダムな 3D の点 (u, v, w) を生成
 $u = \sqrt{U_1} \cos(2\pi U_2)$
 $v = \sqrt{U_1} \sin(2\pi U_2)$
 $w = \sqrt{1-u^2-v^2}$
- 6: 法線を計算して、ワールド空間へ回転

$$\omega_m^{kji} = \frac{uM_k+vM_j+wM_i}{||uM_k+vM_j+wM_i||}$$

 $\omega_m = (\omega_k, \omega_j, \omega_i)\omega_m^{kji}$
- 7: return ω_m
- 8: 関数終わり

最初に、入射方向 ω_i に沿った正規直交基底 ($\omega_k, \omega_j, \omega_i$) を計算し、この基底の SGGX 行列 S を回転させて新たな SGGX 行列 S^{kji} を作る。 S^{kji} のコレスキーフィルタを使って、橿円体上の点を単位球面上の 3 次元の点に変換することができます；これらの点の法線は $\omega_m^{kji} = \frac{uM_k+vM_j+wM_i}{||uM_k+vM_j+wM_i||}$ で計算できます。ここで、ベクトル M_k, M_j と M_i は、コレスキーフィルタから計算されます。可視性を考慮するために、可視半球上にポイント (u, v, w) を生成します。この点を得るために、単位円板状の 2 次元点 (u, v) を 2 つの乱数を使用してサンプリングし、第三の座標 w を得るために球体に投影します。最後に、法線 ω_m^{kji} をワールド空間に戻すために回転します。この導出の詳細と実装は補足資料に記載されています。

鏡面位相関数でのインポータンスサンプリング

f_p^{spec} をサンプリングするために、 D_{ω_i} から ω_m を生成し、出射方向を生成するために、 ω_i を ω_m で反射させます
 $\omega_o = -\omega_i + 2\omega_m(\omega_i, \omega_m)$ (図 13a)

拡散位相関数でのインポータンスサンプリング

f_p^{diff} をサンプリングするために、 D_{ω_i} から ω_m を生成し、 ω_m で与えられる半球の中の拡散反射方向 ω_o をサンプルします (図 13b)

検証

私たちは、Mitsuba レンダラ [7] が提供する χ^2 検定でインポータンスサンプリング技術を実験的に検証しました。テストでは、インポータンスサンプリングにより生成された分布が効果的に正しい位相関数に向かって収束することが示されました。

^{*3} マイクロファセット BRDF のシャドウイングでは、マイクロサーフェスに複数回散乱する光線を取り除きます。すなわち、単一の散乱だけがモデル化されます。しかし、マイクロフレークの理論では、光線とマテリアルのさらなる相互作用は、出射方向 ω_o に散乱する時に考慮されます。すなわち、多重散乱は積分器において自動的に計算されます。これは影がないことと、式 8 の他とは異なる相反性制約を説明します。

比較

我々の SGGX のインポータンスサンプリング方式は、従来の鏡面マイクロフレーク位相関数と比較して、有益な特性と有意に改善された性能を持っています。

	[Jacob ら 2010]	[Zhao ら 2011]	SGGX
解析性	x		
決定論的		x	
2 つの乱数		x	
パフォーマンス	x	x	×10

5.4 拡散位相関数の評価

上述のように、拡散位相関数の評価は、式 25 中の積分の計算を必要とします。残念ながら、解析的には不可能です。積分を非常に精密に、つまり非常にコストを掛けない限り、数値評価は(かなりの)バイアスが入ります。(我々がターゲットとする)モンテカルロレンダリングで言うと、バイアスのない推定で確率的に積分を評価することにより、合理的なコストでバイアスのない評価を得ることができます。これは、次で見ることができます。

$$\begin{aligned} f_p^{diff}(\omega_i \rightarrow \omega_o) &= \frac{1}{\pi} \int_{\Omega} \langle \omega_o, \omega_m \rangle D_{\omega_i}(\omega_m) d\omega_m \\ &= \lim_{N \rightarrow +\infty} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{1}{\pi} \langle \omega_o, \omega_m(j) \rangle \quad (26) \end{aligned}$$

ここで、 $\omega_m(j)$ は、可視法線分布 D_{ω_i} からの j 番目のサンプルです。すなわち、拡散位相関数のバイアスのない推定は、5.3 節で説明された手順で D_{ω_i} から法線 ω_m をサンプルし、この法線への光源の拡散成分の寄与 $\frac{1}{\pi} \langle \omega_o, \omega_m(j) \rangle$ を評価することで得られます。

6. 結果

20GB のメモリと NVIDIA Quadro M6000 GPU を搭載したインテル Core i7-3770 CPU 上で我々の結果を生成しました。私たちの主な実装は、Mitsuba レンダラ [7] に統合しました。以降の段落で主な成果を紹介します。8 分木構造 [2] を活用して CUDA で GPU レンダリングを実装しました。これは、図 1 の生成に使用しました。この GPU 実装は、毎秒 1.15M の経路をトレースすることができ、我々の方法は、十分に単純で、このようなプラットフォーム上でも実現できることを示します。

鏡面拡散マイクロフレーク

図 15 は、(拡散および GGX マイクロファセット BRDF の)表面散乱モデルによる三角形メッシュの外観と私たちの SGGX 位相関数による密度ボリュームの外観とを比較します。比較すると、鏡面と拡散 SGGX 位相関数は、単純な等方散乱を越えて、ボリュームトリックな外観のモデリングを可能にすることを示しています。

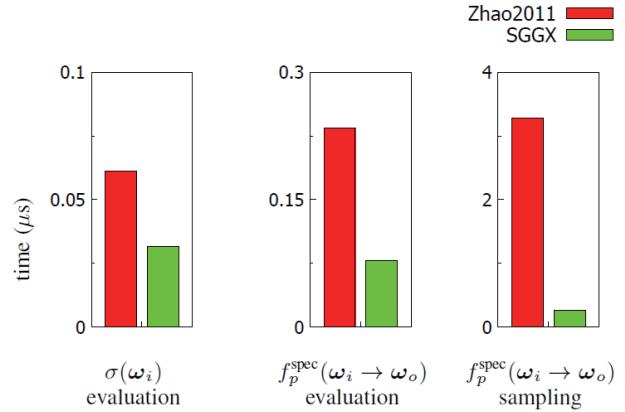


図 14 パフォーマンス。[Zhao ら 2011] のマイクロフレーク演算と SGGX とのパフォーマンスを比較。

パフォーマンス

図 14 は Zhao ら [21] によるガウスマイクロフレークの分布のものと SGGX 演算のパフォーマンスを比較します。我々は、忠実な比較のために私たちが方法を統合した Mitsuba レンダラの現在のリリースにおいて提供されている実装を使用しました。我々は、さまざまなガウスマイクロフレークの分布と異なる入射・出射方向を持つ 100 万のランダムな配位を生成しました。4.3 節で説明した SGGX パラメータは、変換のコストは測定タイミングの一部であるとして事前計算せずに変換しました。

結果は、投影面積 $\sigma(\omega_i)$ と鏡面反射位相関数 $f_p(\omega_i \rightarrow \omega_o)$ の評価は、実装が簡単でありながらも、SGGX は約 2 倍高速であることを示しています。これは、私たちの解析的 SGGX 演算のおかげです。一方、Zhao ら [21] は、フェッヂと補間に事前に計算したデータを使用しています。どちらの方法でも、インポータンスサンプリングは、最もコストが高い演算です。ガウス分布では、各反復でコスト高な数値 CDF (累積分布関数) 逆関数法を使用する非決定的棄却サンプリング手法が要求されます。我々のインポータンスサンプリングは一桁以上速くなっています。さらに、GPU アーキテクチャで効率的に組み立てられる予測可能な命令シーケンスに従います。最後に、私たちのインポータンスサンプリングは、入力として一定数の乱数をとることで、メトロポリス光輸送などのより複雑なグローバルイルミネーションの方法により良く適しているサンプリング空間の連続的なパラメータ化を提供していることに注意して下さい。

既存データとの互換性

図 16 は、入力として Zhao ら [21] のデータを事前計算なしで SGGX に変換する例を示しています。(表現は同一ではないので、) 画像は同じ結果に正確には収束ませんが、外観の整合性は保たれています。私たちのより効率的な SGGX 演算で、スカーフモデルのレンダリングパフォーマンスは約 25 % 高速化されています。我々は、Mitsuba レン

ダラがボリュームデータにアクセスするための I/O のオーバーヘッドがボトルネックであることを発見しました。3 番目の例では、空間的に一様なボリュームを示しています。この場合、レンダリングが、I/O によって減速されないため 2 倍から 3 倍高速化されました。マルチスケールレンダリングを脇においとくと、SGGX 演算は、このように、レンダリングパフォーマンスを向上させます。

SGGX 分布のフィルタリング

図 17 は、SGGX 表現のプレフィルタを評価するための毛玉と木の高解像度ボリュームモデルです。それぞれ、プロシージャルと表面のボクセル化から、これらデータを生成しました。図 18 は遠くから見たモデルです。我々は、3 次元 MIP マッピングで、リファレンスとなるフル解像度のモデル (1024^3 ボクセル) とダウンスケールされた SGGX データを計算しました。Kraus と Bürger [9] が示したように、直接、密度を MIP マップするのは悪い結果を生みます。したがって、我々は密度とアルベドの両方のフィルタリングにこれらの手法を使いました。いくつかの詳細レベルを比較します; LOD の数字は、何回モデルがダウンスケールされたかを示します (LOD0:フル解像度、LOD2 :すべての次元で 1/4 倍にダウンスケール)。

両方の景観で、1 ボクセル/1 ピクセルの比に合うように SGGX の LOD を選択し、密度の LOD を変化させました。フル解像度の密度での SGGX ダウンスケールは、うまく動作して、結果は安定した見た目となります。しかしながら、密度のダウンサンプリングは一般的に結果を変化させることがわかりました。これは、密度ダウンサンプリング手順は、光路に沿った可視性の相関を考慮しないからです。我々のアプローチのもう 1 つの制限は、我々はボクセルとマテリアル特性の可視性との間の相関を無視しています。

それでも、1 ピクセルあたり 1 ボクセルの比にマッチし、密度が非積極的にダウンサンプリングされている場合の SGGX データは、リファレンスに近い結果が得られることを確認しています。たとえば、2 行目の「密度 LOD2 の SGGX LOD3」組み合わせは、リファレンスと近いです。このように、遠くの視点なら、15MB のメモリで十分に同等の外観を生成できます。

7. まとめ

我々は、マイクロフレークの枠組みの中で使用される演算のための閉形式の解析的な表現を提供する SGGX マイクロフレークの分布を導入しました。実装および利用が簡単であることに加えて、マイクロフレークボリュームのレンダリングをかなり高速化します。また、統一的に鏡面と拡散マイクロフレークを表現できます。

私たちの表現は線形にフィルタリングすることができます。私たちは、事前フィルタリング分布が、光沢のあるマテリアルが浮かび上がらせる粗い外観を保存できることを

見てきました。また少し離れた場所なら、少量のメモリでも複雑なボリュームトリックオブジェクトの外観を復元するのに十分な情報を含んでいることを見てきました。

我々のアプローチの中で最も重要な制限は、密度を事前フィルタリングする方法です。多くの構成では、マテリアルの可視性は、それ自体や、空間的に変化するマテリアルの特性と相関します。密度のダウンサンプリングは、将来の仕事となる重要な問題として残されています。

8. 謝辞

著者らは、橙円分布への価値あるアドバイスと彼のマルチスケーリング表現の共有に関して Fabrice Neyret に感謝をしています。Eric Heitz と Cyril Crassin は、NVIDIA Research の David Luebke と Aaron Lefohn に対して、研究のサポートをしてくれたことに感謝しています。Jonathan Dupuy は、GRAND と ANR AMCQMCSCGA の経済的なサポートに謝意を表します。

参考文献

- [1] Bala, K.: Modeling cloth at micron resolution, *In Proc. SPIE*, pp. vol. 9018, 90180J–90180J–6 (2014).
- [2] Crassin, C., Neyret, F., Lefebvre, S. and Eisemann, E.: Gigavoxels: Ray-guided streaming for efficient and detailed voxel rendering, *In Proc. ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*, pp. 15–22 (2009).
- [3] Dupuy, J., Heitz, E., Iehl, J.-C., Poulin, P., Neyret, F. and Ostromoukhov, V.: Linear efficient antialiased displacement and reflectance mapping, *ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH Asia)*, pp. 32, 6, 211:1–211:11 (2013).
- [4] Heitz, E. and d'Eon, E.: Importance sampling microfacet-based BSDFs using the distribution of visible normals, *In Proc. Eurographics Symposium on Rendering*, pp. 103–112 (2014).
- [5] Heitz, E.: Understanding the masking-shadowing function in microfacet-based BRDFs, *Journal of Computer Graphics Techniques*, pp. 3, 2, 32–91 (2014).
- [6] Hill, S., McAuley, S., Dupuy, J., Gotanda, Y., Heitz, E., Hoffman, N., Lagarde, S., Langlands, A., Megibben, I., Rayani, F. and de Rousiers, C.: Physically based shading in theory and practice, *In ACM SIGGRAPH Courses* (2014).
- [7] Jakob, W.: Mitsuba renderer, <http://www.mitsubarenderer.org> (2010).
- [8] Jakob, W., Arbree, A., Moon, J. T., Bala, K. and Marschner, S.: A radiative transfer framework for rendering materials with anisotropic structure, *ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH)*, pp. 29, 4, 53:1–53:13 (2010).
- [9] Kraus, M. and Bürger, K.: Interpolating and downsampling rgba volume data, *In Proceedings of the Vision, Modeling, and Visualization Conference*, pp. 323–332 (2008).
- [10] Marschner, S. R., Jensen, H. W., Cammarano, M., Worley, S. and Hanrahan, P.: Light scattering from human hair fibers, *ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH)*, pp. 22, 3, 780–791 (2003).

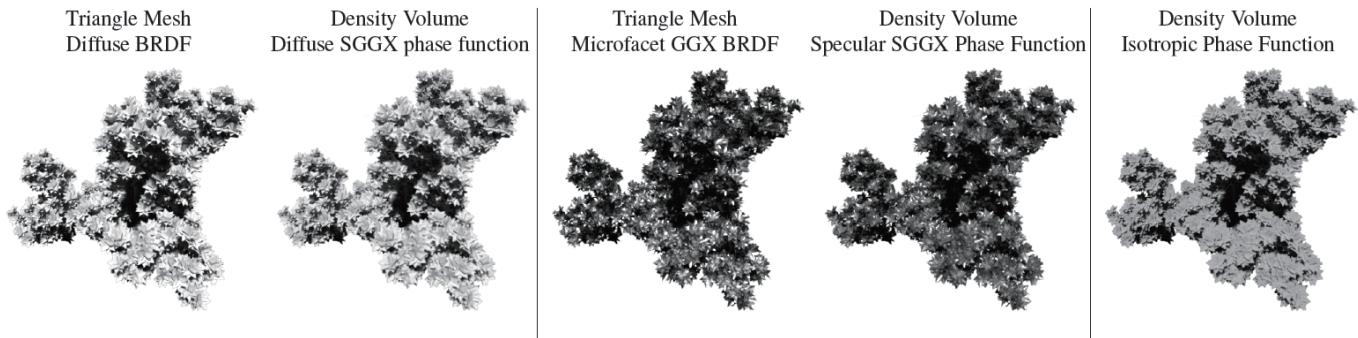


図 15 鏡面と拡散 SGGX 位相関数

- [11] Neyret, F.: A general and multiscale model for volumetric textures, *In Graphics Interface*, pp. 83–91 (1995).
- [12] Neyret, F.: Modeling animating and rendering complex scenes using volumetric textures, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, pp. 4, 1, 55–70 (1998).
- [13] Olano, M. and Baker, D.: Lean mapping, *In Proc. ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*, pp. 181–188 (2010).
- [14] Pharr, M. and Humphreys, G.: Physically Based Rendering: From Theory to Implementation, *Morgan Kaufmann Publishers* (2010).
- [15] Schröder, K., Klein, R. and Zinke, A.: A volumetric approach to predictive rendering of fabrics, *Computer Graphics Forum (Proc. Eurographics Symposium on Rendering)*, pp. 30, 4, 1277–1286 (2011).
- [16] Schröder, K., Zhao, S. and Zinke, A.: Recent advances in physically-based appearance modeling of cloth, *ACM SIGGRAPH Asia 2012*, p. Course Notes (2012).
- [17] Trowbridge, T. S. and Reitz, K. P.: Average irregularity representation of a rough surface for ray reflection, *Journal of the Optical Society of America*, pp. 65, 5, 531–536 (1975).
- [18] Walter, B., Marschner, S. R., Li, H. and Torrance, K. E.: Microfacet models for refraction through rough surfaces, *In Proc. Eurographics Symposium on Rendering*, pp. 195–206 (2007).
- [19] Xu, K., Sun, W.-L., Dong, Z., Zhao, D.-Y., Wu, R.-D. and Hu, S.-M.: Anisotropic spherical gaussians, *ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH Asia)*, pp. 32, 6, 209:1–209:11 (2013).
- [20] Zhao, S., Hašan, M., Ramamoorthi, R. and Bala, K.: Modular flux transfer: Efficient rendering of highresolution volumes with repeated structures, *ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH)*, pp. 32, 4, 131:1–131:12 (2013).
- [21] Zhao, S., Jakob, W., Marschner, S. and Bala, K.: Building volumetric appearance models of fabric using micro CT imaging, *ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH)*, pp. 30, 4, 44:1–44:10 (2011).
- [22] Zhao, S., Jakob, W., Marschner, S. and Bala, K.: Structure-aware synthesis for predictive woven fabric appearance, *ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH)*, pp. 31, 4, 75:1–75:10 (2012).

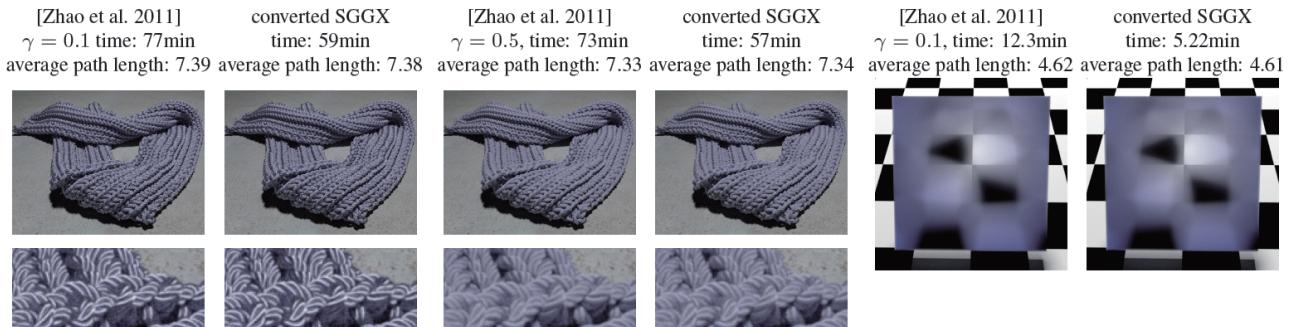


図 16 既存データの SGGX への変換。左 : Zhao らによる位相関数の実装による Mitsuba を用いたスカーフモデルと、事前準備なしでの我々の SGGX 表現へと変換した同じデータ。我々は、インポータンスサンプリングと閉形式評価を行っている。ほぼ同じ結果画像がより良いパフォーマンスで得られる。右 : Zhao らの位相関数と SGGX に関する異方性の高い均質なマイクロフレーク媒質。6 つの画像すべては、ピクセルごとに 256 個のサンプルを用いた Mitsuba のボリュームフォワードバストレーサーで 1024×1024 の解像度で計算された。

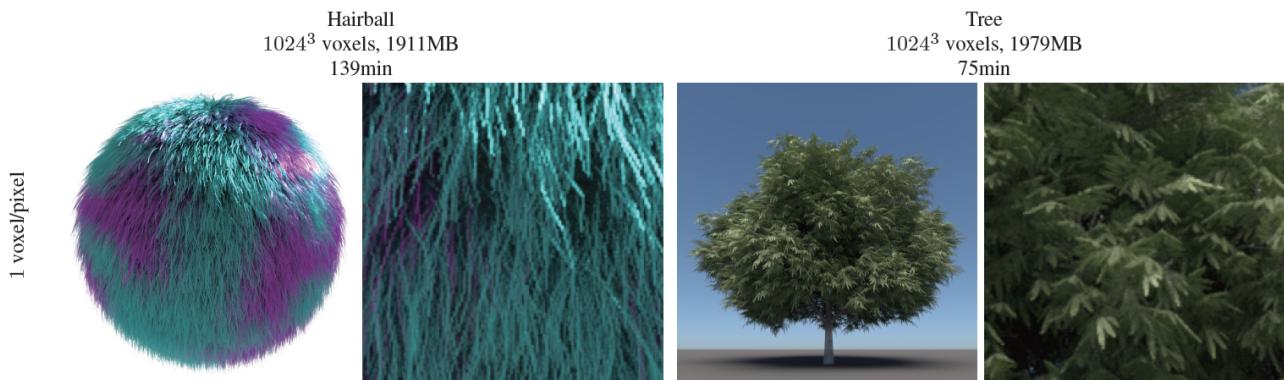


図 17 高解像度ボリュームモデル。画像はピクセル毎に 256 サンプルを使った 1024×1024 解像度の Mitsuba ボリュームフォワードバストレーサーで計算。

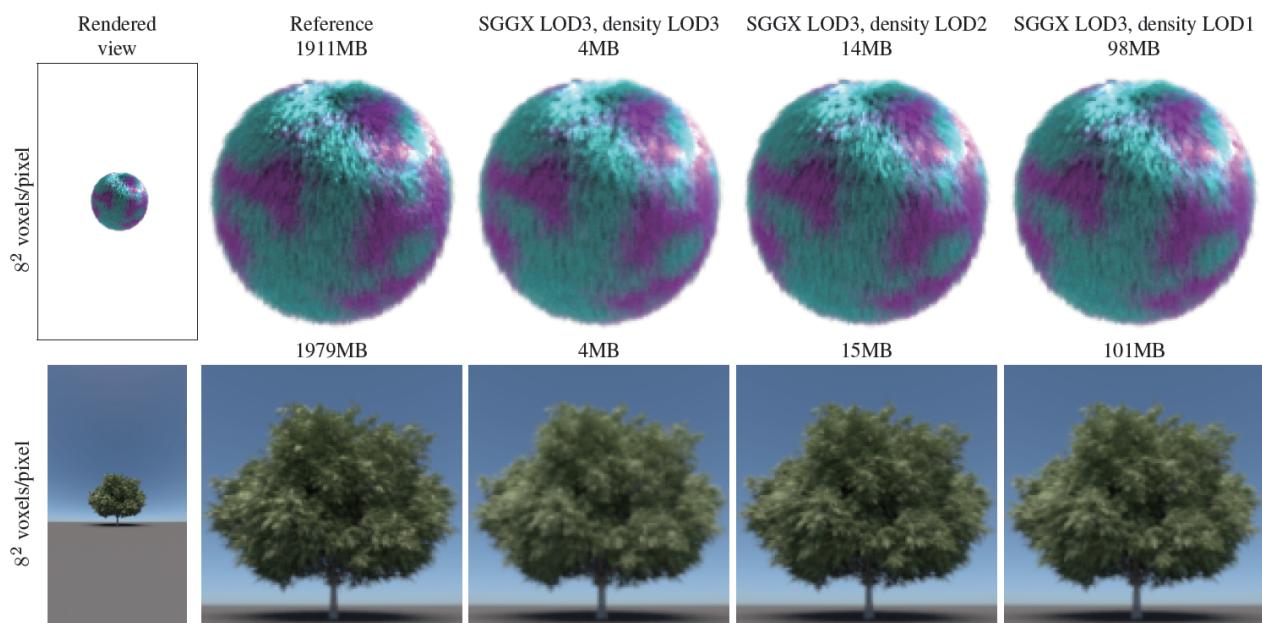


図 18 ボリュームモデルのプリフィルタ。左列は 512×512 解像度でのレンダリング結果。他の画像は $\times 8$ 倍解像度。(フル解像度の) レファレンス画像と異なる詳細レベル設定の描画結果。