

スペクトルを考慮した計測 BRDF の圧縮表現

大西 和輝† 岩崎 慶†

和歌山大学大学院システム工学研究科†

1. はじめに

物体表面における光の反射の振る舞いを記述する双方向反射率分布関数 (Bidirectional Reflectance Distribution Function) は、写実的な CG 画像を生成する上で重要な要素の一つである。現実の素材の反射率を計測することで得られる計測 BRDF は、計測した素材の質感を忠実に再現することが可能であるが、細かくサンプリングした方向について計測するため、データ量が大きいという問題がある。Bagher らは、計測 BRDF を 1 次元関数の積に分解することで、計測 BRDF を圧縮する手法を提案した[2]が、対象とする計測 BRDF が等方性および RGB 値 3 成分に限られているという問題がある。

近年、Dupuy らは、波長ごとの反射率であるスペクトラル BRDF を計測する手法を提案した[1]。サンプリング分布を適応的に変形させることで、少ないサンプル数で効率的にスペクトラル BRDF を計測することが可能となった。しかしながら、異方性計測スペクトラル BRDF は、2 つの方向 (各 2 次元) と波長の 5 次元関数なため、1 つの計測データのデータ量が大きいという問題がある。

本研究はこの問題を解決するため、5 次元の異方性計測スペクトラル BRDF を、低次元関数の積に分解することで圧縮する手法を提案する。本研究により、異方性計測スペクトラル BRDF のデータ量を約 1/30 に圧縮することが可能となった。

2. 提案法

2.1. 提案法の概要

提案法では、いくつかのパラメータで表現されたモデルに最小二乗法を用いて計測スペクトラル BRDF にフィッティングを行う。具体的な手順を以下に示す。

1. 入射ベクトル \mathbf{i} と反射ベクトル \mathbf{o} を Rusinkiewicz ら [3] のパラメータ表現 $(\theta_h, \phi_h, \theta_d, \phi_d)$ に変換し、あらかじめ定めたそれぞれのサンプリング間隔に基づいて、近似対象の計測スペクトラル BRDF を再サ

ンプリングする。

2. サンプリングされた値より、フィッティングに使用する重み (w_I, w_V, w_C) を計算する。
3. 最小二乗法に基づき、サンプリングされた値との誤差 E を最小化するようにモデルのパラメータを更新する。
4. パラメータ更新当たりの誤差の変動量が閾値以上の場合 3 に戻り更新を続ける。

2.2. 近似モデル

フィッティングに使用する近似モデル ρ_M は、異方性マイクロファセット BRDF であり、以下の式で表される。

$$\rho_M(\theta_h, \phi_h, \theta_d, \phi_d) = \rho_d + \rho_s \left(\frac{D(\theta_h, \phi_h) F(\theta_d) G(\theta_i) G(\theta_o)}{\cos \theta_i \cos \theta_o} \right) \quad (1)$$

ここで D 項は法線分布関数、 F 項はフレネル反射、 G 項は微小面の凹凸による幾何減衰項を表す。

2.3. フィッティング

モデル ρ_M のうち、 $(\rho_d, \rho_s, D, F, G)$ はパラメータであり、最小二乗法を用いて推定対象の計測スペクトラル BRDF に近似される。特に (D, F, G) は角度ごとにサンプリングされた配列で表される。このパラメータの推定はサンプリングされた波長ごとに行われ、それぞれ独立したパラメータとなる。

最小二乗法を用いたフィッティングは以下の誤差 E を最小にするように行われる。

$$E = \sum_j w_j (\rho(\theta_h, \phi_h, \theta_d, \phi_d)_j - \rho_j^*)^2 \quad (2)$$

ここで $(\theta_h, \phi_h, \theta_d, \phi_d)_j$ はサンプリング角度の j 番目の組であり、 ρ_j^* は j 番目の角度の組に対応する計測スペクトラル BRDF である。

誤差関数に使用する重み w_j は以下のように表される。

$$w_j = w_V(\theta_h, \phi_h, \theta_d, \phi_d)_j w_I(\theta_h, \phi_h, \theta_d, \phi_d) w_C(\rho_j^*) \quad (3)$$

● Volume form weighting

入射ベクトルと反射ベクトルの組を (\mathbf{i}, \mathbf{o}) とすると、 $(\theta_h, \phi_h, \theta_d, \phi_d)$ の次元において均等にサンプリングされた座標を (\mathbf{i}, \mathbf{o}) へと変換した場合、変換後の座標に偏りが生じることになるが、 w_V

A Compressed Representation of Measured Spectral BRDF

†Kazuki Oonishi Wakayama University

†Kei Iwasaki Wakayama University

はその偏ったサンプリング分布による学習への影響を排除するための重みである。 w_V は以下のように表される。

$$w_V = 4 \sin \theta_h \sin \theta_d \cos \theta_d \quad (4)$$

- BRDF importance weighting
重み w_I は以下で表される。

$$w_I = \cos \theta_i \cos \theta_o \quad (5)$$

$\cos \theta_i$ は入射方向への反射面の投影面積を示しており、 $\cos \theta_o$ も相互対称性のために含まれており、同様に反射方向への投影面積を示している。法線ベクトルと視線方向が一致するほどその角度がサンプリングされる可能性が高いため、この重みはその偏りを表している。

- Compressive weighting

BRDF の値が大きいと、フィッティング時の誤差も大きくなりやすくなる。重み w_C は BRDF の値が大きいの誤差関数の重みを減らすことで、BRDF 値が大きい場合も小さい場合もフィッティングにかかる労力を同じようにすることを目的としている。

w_C は以下の式で表される。

$$w_C = \left(\frac{f(\rho_j^*/\bar{\rho}; \log 2)}{\rho_j^*/\bar{\rho}} \right)^p \quad (6)$$

圧縮関数 f は以下の式で表される。

$$f(x; \alpha) = 1/\alpha (1 - e^{-\alpha x}) \quad (7)$$

ここで $\bar{\rho}$ はすべてのサンプリングされた BRDF の値に $w_V w_I$ を適用したものの中央値で、乗数 p は 1.4 である。 α と p は Bagher らの実験 [2] で用いられたものを使用している。

2.4. フィッティング方法

フィッティング方法には基本的に最小二乗法を使用するが、 $(\rho_d, \rho_s, D, F, G)$ の組のうち各パラメータをフィッティングする時、それ以外のパラメータはフィッティングを安定させるために値が固定される。例えば D のすべての要素を更新するとき他の (ρ_d, ρ_s, F, G) の組は固定されており、 D の中で D_k とラベル付けられた要素を更新するときはすべての (ρ_d, ρ_s, F, G) の組での誤差を計算し、それらの合計を利用して最小二乗法の計算を行う。

3. 結果

本研究の結果を図 1 と図 2 に示す。実験対象の BRDF は、Dupuy らが計測 [1] したモルフォ蝶の翅を表す異方性計測スペクトラル BRDF である。中央のブツダ像に設定されている。サンプリングレートは θ_h と θ_d が 45, ϕ_h が 10, ϕ_d が 90 となっている。範囲は θ_h と θ_d が $[0, \pi/2]$, ϕ_h と ϕ_d が $[0, \pi]$ である。元データの容量は 108.8MB であっ

たが、提案法を用いたパラメータ表現では 3.2MB まで圧縮された。

図 1 は計測スペクトラル BRDF を用いて作成した参照画像(左)と、提案法によって圧縮したスペクトラル BRDF を用いてレンダリングした画像(右)であり、図 2 は各ピクセルの相対誤差を示した画像である。これらの結果より、提案法は目視では目立った誤差がないように近似できているが、特に入射ベクトルや出射ベクトルが水平面上に近い部分で誤差が大きくなっていることがわかる。



図 1: 参照画像(左)と提案法の結果画像(右)

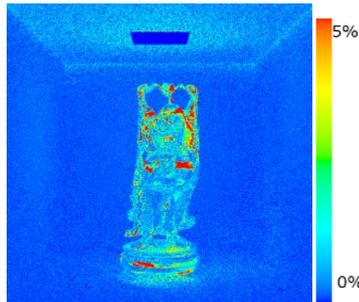


図 2: 相対誤差の可視化画像

4. まとめ

本論文では、計測スペクトラル BRDF の圧縮方法を提案した。今後の課題としては、特定の角度で発生する誤差の軽減や、BRDF のサンプリング分布を近似対象の BRDF に近づけることによる精度の向上などがあげられる。

参考文献

- [1] J. Dupuy et al., An Adaptive Parameterization for Efficient Material Acquisition and Rendering, ACM Trans. Graphs., Vol. 37, No. 6, Article 274, 2018.
- [2] M. Bagher et al., A Non-Parametric Factor Microfacet Model for Isotropic BRDFs, ACM Trans. Graphs., Vol. 35, No. 5, Article 159, 2016.
- [3] S. Rusinkiewicz et al., A New Change of Variables for Efficient BRDF Representation, Eurographics Workshop on Rendering, pp.11-22, 1998.