

光沢反射を考慮した多光源レンダリングのための誤差推定法

岩崎 陸人[†] 名畑 豪祐[‡] 酒井 広和[‡] 岩崎 慶[§]
和歌山大学[†] 和歌山大学/ドワンゴ CG リサーチ[¶]

1. はじめに

大域照明を考慮したレンダリング方法の一つに仮想的な点光源 (Virtual Point Light, 以降 VPL と呼称する) を用いる多光源レンダリング法がある. この手法では VPL をシーン中に大量に生成し, 輝度を計算する点 (以降シェーディング点と呼称する) に入射する光の輝度を, VPL からの入射光で近似することで大域照明計算を単純化している. しかし, この手法ではすべての VPL からの寄与を計算するため計算コストが高いという問題がある.

Multidimensional Lightcuts[1] (以降 MDLC と呼称する) は, VPL とシェーディング点をそれぞれクラスタリングすることでレンダリングを高速化しているが, クラスタリングによる誤差を制御できないという問題がある. クラスタリングによる誤差を制御した手法[2, 3]も提案されているが, 複数のシェーディング点における誤差推定に対応していない[2]か, 光沢材質を考慮していない[3]という問題がある.

そこで本研究では多光源レンダリングにおける光沢材質のための誤差推定法を提案する. 本稿では, 光沢材質の反射モデルとして MDLC と同様に Phong モデルを使用する.

2. 提案法

2.1. 提案法の概要

提案法では VPL とシェーディング点をそれぞれ VPL クラスタ \mathbb{C} とシェーディング点クラスタ \mathbb{G} にクラスタリングし, ピクセルの推定値 L を計算する. VPL クラスタ \mathbb{C} とシェーディング点クラスタ \mathbb{G} を組 (\mathbb{C}, \mathbb{G}) とする. 提案法では, 各ピクセルについて以下の処理を繰り返す.

1. \mathbb{C} と \mathbb{G} からそれぞれ 2 点サンプリングし, ピクセルの推定値 L , 真値との誤差の推定値 $\Delta\hat{L}$, 組 (\mathbb{C}, \mathbb{G}) の分散 σ^2 を計算する.

2. 誤差の推定値 $\Delta\hat{L}$ が許容誤差 $\epsilon\Delta\hat{L}$ (ϵ は許容相対誤差) より小さければ処理を終了する.
3. すべての組の中で最も分散 σ^2 が大きい組 (\mathbb{C}, \mathbb{G}) を選択し, (\mathbb{C}, \mathbb{G}) において軸平行バウンディングボックスの対角線の長さが長いクラスタを分割する.
4. 1 と同様に, 分割されたそれぞれの組を用いて, 分散 σ^2 を推定し, L , $\Delta\hat{L}$ を更新して 2 へ戻る.

2.2. 輝度と誤差の推定

ピクセルの推定値 L は, 各組 (\mathbb{C}, \mathbb{G}) の視点 \mathbf{x}_v への出射輝度 \hat{L} を推定し, 全ての組について総和することで計算される. 組 (\mathbb{C}, \mathbb{G}) の視点への出射輝度の推定値 \hat{L} は以下の式で計算される.

$$\hat{L} = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^2 W_{\mathbb{G}} I_{\mathbb{C}} M(\mathbf{x}_v, \mathbf{x}_s, \mathbf{y}_s) G(\mathbf{x}_s, \mathbf{y}_s) V(\mathbf{x}_s, \mathbf{y}_s) \quad (1)$$

ここで \mathbf{x}_s と \mathbf{y}_s はそれぞれサンプリングしたシェーディング点と VPL, $W_{\mathbb{G}}$ はシェーディング点の重みの総和, $I_{\mathbb{C}}$ はクラスタ内 VPL の放射強度の総和, M は物体の反射特性に依存する材質項, G は幾何項, V は可視関数である. これらの詳細な説明は文献[1]を参照されたい.

真値との誤差の推定値 $\Delta\hat{L}$ は[2]の手法で用いられた以下の式で推定する.

$$\Delta\hat{L} = t_{\alpha} \sqrt{\sum_{i=1}^N s_i^2} \quad (2)$$

ここで t_{α} は t 分布の α 分位点, N は組の数, s_i^2 は i 番目の組の \hat{L} の標本分散である.

2.3. 分散の近似

クラスタ分割の指標となるクラスタの輝度の推定値 \hat{L} の分散 σ^2 は以下の式で近似する.

$$\sigma^2 \approx W_{\mathbb{G}}^2 I_{\mathbb{C}}^2 M_{ub}(\mathbb{C}, \mathbb{G}) G_{ub}(\mathbb{C}, \mathbb{G}) \text{Var}[V] \quad (3)$$

M_{ub} は組 (\mathbb{C}, \mathbb{G}) の材質項の上限値, G_{ub} は幾何項の上限値, $\text{Var}[V]$ は可視関数の分散である. [2]の手法と同様に $\text{Var}[V]$ は最大値の 0.25 を用いる.

Error estimation for many-light rendering of glossy materials

[†]Rikuto Iwasaki Wakayama University

[‡]Kosuke Nabata Wakayama University

[§]Hirokazu Sakai Wakayama University

[¶]Kei Iwasaki Wakayama University / Dwango CG Research

3. 光沢材質における材質項の上限値

材質項の上限値 $M_{ub}(\mathbf{C}, \mathbf{G})$ は、 \mathbf{G} 内のすべてのシェーディング点の BRDF において、 \mathbf{C} 内の全ての VPL から入射して視点に反射する BRDF の値の上限値を表す。拡散 BRDF の場合は、BRDF の値が光の入射方向に依存せず一定であるため、上限値の計算は容易である。光沢 BRDF の場合は、光の入射方向により BRDF の値が変化するため、組 (\mathbf{C}, \mathbf{G}) が作られるたびに BRDF からそのまま上限値を計算するのは計算コストが高い。

そこで各シェーディング点生成時に BRDF の上限値をキューブマップに格納しておく。キューブマップの各ピクセルには、そのピクセルに対応する入射方向の集合に対する BRDF の最大値を格納する。ここで今回使用する Phong モデルの式を以下に示す。

$$f(\omega_i, \omega_o) = \rho_s \frac{n+2}{2\pi} \cos^n \theta \quad (4)$$

ω_i は光の入射方向、 ω_o は出射方向、 ρ_s は反射係数、 n は反射の鋭さを制御するパラメータである。 θ は、出射方向 ω_o の法線に関する正反射方向と、入射方向 ω_i とのなす角であり、 θ が小さいほど BRDF の値が大きくなる。キューブマップの各ピクセルにおける BRDF の上限値は、そのピクセルに対応する方向の集合を内包する円錐を作成し、それと ω_o の法線に関する正反射方向とのなす角がそのピクセルでの最小の θ に近似できるので計算することができる。

シェーディング点をクラスタリングする際に、統合されたキューブマップを作成する。 \mathbf{G} 内の全てのシェーディング点のキューブマップについて、各ピクセルを比較し BRDF の最大値を格納したキューブマップを \mathbf{G} が保持する。

組 (\mathbf{C}, \mathbf{G}) の分散計算時には、 \mathbf{G} が保持するキューブマップに格納された BRDF の上限値を、 \mathbf{C} 内の全ての VPL に対応する入射方向から計算する。これは、 \mathbf{C} の軸平行バウンディングボックスをキューブマップに投影することで、入射方向を近似する(図 1)。投影範囲を含むキューブマップのピクセルに格納されている BRDF の値を比較し、その最大値を材質項の上限値 $M_{ub}(\mathbf{C}, \mathbf{G})$ として、分散の計算を行う。

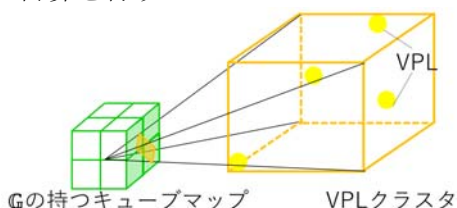


図 1 : キューブマップへの VPL クラスタのバウンディングボックス投影。図のキューブマップ上の色のついているピクセルの BRDF を使用する。

4. 結果

本研究の結果を図 2 と図 3 に示す。レンダリングするシーンは san miguel を使用し、誤差の推定精度を MDLC と比較する。パラメータは、VPL 数が約 55000 個、1 ピクセルあたりのシェーディング点数を 256 個、許容相対誤差 ϵ を 2% とした。提案法では $\alpha = 95\%$ を指定している。

図 2 は提案法による結果画像と多光源レンダリング法の参照画像である。ノイズが少なく高精度にレンダリングできていることが確認できる。図 3 は提案法と MDLC において、各ピクセルの相対誤差を示した画像である。図中の各数字は許容相対誤差 2% を満たしているピクセルの割合を示している。図 3 より提案法のほうが MDLC より約 2 倍推定精度が高いことがわかる。



図 2 : 提案法の結果画像(左)と参照画像(右)

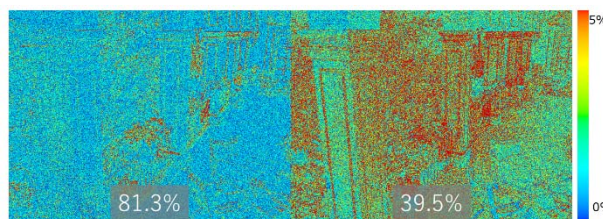


図 3 : 相対誤差画像(左:提案法, 右:MDLC)

5. まとめ

本論文では、光沢反射を考慮した多光源レンダリングのための誤差推定法を提案した。これにより、MDLC よりも推定精度が約 40 ポイント向上した。今後の課題として、Phong モデル以外の複雑な反射分布を持つ反射モデルへの対応があげられる。

参考文献

[1] B. Walter et al., Multidimensional Lightcuts, ACM Trans. Graphs., Vol. 25, No. 3, pp. 1081-1088, 2006.
 [2] K. Nabata et al., An Error Estimation Framework for Many-Light Rendering, Computer Graphics Forum, Vol. 35, No. 7, pp. 431-438, 2016.
 [3] H. Sakai et al., Error Estimation for Many-Light Rendering with Supersampling, SIGGRAPH ASIA Technical Brief, pp. 17:1-17:4, 2018.