

## 前計算放射輝度伝達法のための適応的メッシュ分割法

西本 陽太<sup>†</sup> 岩崎 慶<sup>‡</sup> 高木 佐恵子<sup>‡</sup> 吉本 富士市<sup>‡</sup>和歌山大学大学院システム工学研究科<sup>†</sup> 和歌山大学システム工学部<sup>‡</sup>

## 1 はじめに

写実的な画像をリアルタイムに生成する手法として、前計算放射輝度伝達法[1]は有効な手法である。しかし、この手法は頂点単位で輝度計算を行うため、頂点数の少ない3次元モデルに適用した場合、高精細な画像を生成することは難しい。前計算放射輝度伝達法のためのメッシュ再分割法[2]が提案されているが、低周波数照明だけが考慮されており、全周波数照明には対応できない。そこで本稿は、全周波数照明下の前計算放射輝度伝達法のためのメッシュ分割法を提案する。提案手法では Ng らが提案した伝達関数にウェーブレット基底関数を用いて近似する手法[3]を用いる。伝達関数のウェーブレット係数を用いて適応的に三角形メッシュの分割を行う。

## 2 前計算放射輝度伝達法の輝度計算

頂点  $x$  での輝度は以下の式を計算することで求められる。

$$B(x, \omega_o) = \int_{\Omega} L(\omega_i) V(x, \omega_i) f_r(x, \omega_i \rightarrow \omega_o) (\omega_i \cdot n(x)) d\omega_i \quad (1)$$

ここで  $\omega_i$  は入射方向、 $L(\omega_i)$  は  $\omega_i$  方向から入射する光の輝度である。 $V(x, \omega_i)$  は頂点  $x$  における  $\omega_i$  方向の可視関数で、 $x$  から  $\omega_i$  方向のレイが物体と交差する場合は 0、それ以外は 1 を返す関数である。 $f_r(x, \omega_i \rightarrow \omega_o)$  は双方向反射率分布関数、 $n(x)$  は頂点  $x$  での法線である。

物体表面を拡散反射面と仮定すると、 $f_r(x, \omega_i \rightarrow \omega_o) = p_d / \pi$  となる。ここで  $p_d$  はアルベドである。式(1)について、伝達関数  $T(x, \omega_i)$  を以下のように定義する。

$$T(x, \omega_i) = V(x, \omega_i) \frac{p_d}{\pi} (\omega_i \cdot n(x))$$

このとき、輝度計算式は以下ようになる。

$$B(x, \omega_o) = \int_{\Omega} L(\omega_i) T(x, \omega_i) d\omega_i \quad (2)$$

Ng らの方法では、式(2)の入射光  $L(\omega_i)$  および伝達関数  $T(x, \omega_i)$  をウェーブレット変換する。ウェーブレット変換を用いて、絶対値の小さいウェーブレット係数を破棄することにより輝度計算の高速化を行う。ウェーブレット変換により式(2)は以下ようになる。

$$B(x) = \sum_m L_m T_m(x) \quad (3)$$

ここで  $L_m$  は入射光の  $m$  番目のウェーブレット係数、 $T_m(x)$  は伝達関数のウェーブレット係数である。

## 3 提案手法

頂点数の少ない3次元モデルに対して前計算放射輝度伝達法を適用した場合、頂点間の輝度の差が大きい三角形メッシュにおいて輝度の補間が行われるので、高精細な画像を生成することができない。そこで三角形メッシュに対して分割処理を行い、補間を行う頂点間の輝度の差を小さくすることで高精細な画像を生成する。

メッシュを構成する全ての三角形メッシュを均一に細かく分割することにより高精細な画像を生成することが可能である。しかし均一な分割の場合は結果画像にほとんど影響のない箇所まで分割されるため、頂点数が大幅に増加してしまう。前計算放射輝度伝達法は頂点単位で処理を行うため、頂点数の増加は前計算データ量の増加や描画速度の低下の原因になる。

提案手法では伝達関数のウェーブレット係数を用いて、頂点間の輝度の差が大きい三角形メッシュを推定する。頂点間の輝度の差が大きい三角形メッシュを重点的に分割することで適応的な分割を行い、頂点数の増加を抑えたメッシュの生成を行う。

## 3.1 ウェーブレット係数による輝度の推定

各頂点の輝度は式(3)により入射光のウェーブレット係数ベクトル  $L$  と伝達関数のウェーブレット係数ベクトル  $T(x)$  の内積で求めることができる。同一のシーンでは、入射光のウェーブレット係数ベクトル  $L$  は全ての頂点に対して同じ値を持つので、各頂点の輝度は伝達関数のウェーブレット係数ベクトル  $T(x)$  によって決まると言える。提案手法では各頂点で前計算されてい

Adaptive mesh subdivision method for Precomputed Radiance Transfer

<sup>†</sup> Youta Nishimoto, Graduate School of Systems Engineering, Wakayama University

<sup>‡</sup> Kei Iwasaki, Saeko Takagi and Fujiichi Yoshimoto, Faculty of Systems Engineering, Wakayama University

る伝達関数のウェーブレット係数を用いて三角形メッシュ毎に判断値  $\varepsilon$  を計算する。

### 3.2 判断値 $\varepsilon$

$\varepsilon$  は各頂点間のウェーブレット係数の差を示す指標である。まず、三角形メッシュを構成する各頂点間でのウェーブレット係数ベクトルの差の  $L_2$  ノルムを計算する。そして各頂点間の  $L_2$  ノルムを足し合わせたものを  $\varepsilon'$  とする。三角形  $ABC$  での  $\varepsilon'$  の計算式は以下ようになる。

$$\varepsilon' = \|T_A - T_B\| + \|T_B - T_C\| + \|T_C - T_A\|$$

ここで  $T_A, T_B, T_C$  は頂点  $A, B, C$  で前計算されたウェーブレット係数ベクトルである。次に  $\varepsilon'$  を曲面の分割が進み過ぎないように頂点の法線ベクトルの発散で割り、 $\varepsilon$  とする。

$$\varepsilon = \frac{\|T_A - T_B\| + \|T_B - T_C\| + \|T_C - T_A\|}{1 + \alpha \angle \left( n_A, \frac{n_A + n_B + n_C}{\|n_A + n_B + n_C\|} \right)} \quad (4)$$

ここで  $n_A, n_B, n_C$  は頂点  $A, B, C$  での法線ベクトル、 $\alpha$  はユーザが指定する定数である。

同一のシーンでは各頂点の輝度は伝達関数のウェーブレット係数によって決まるので、 $\varepsilon$  が大きい三角形メッシュは頂点間の輝度の差も大きくなる。提案手法では  $\varepsilon$  が閾値よりも大きい三角形メッシュに対して分割処理を行う。

### 3.3 分割処理

図 1 左の三角形  $ABC$  の判断値  $\varepsilon$  が閾値より大きい場合、三角形  $ABC$  を分割する。

(1) 図 1 右のように辺  $AB, BC, CA$  の中点に新しい頂点  $A', B', C'$  を作成する。(2) 新しい三角形  $A'B'C', AA'C', A'BB', C'B'C$  を作成する。(3) 分割した三角形  $ABC$  に隣接する三角形  $BEC, ADB$  の  $\varepsilon$  を調べる。(4) 三角形  $BEC$  の  $\varepsilon$  が閾値より小さい場合、頂点  $B'$  と頂点  $E$  を結ぶ。三角形  $ADB$  の  $\varepsilon$  が閾値より大きい場合、(1)(2) の処理を行う。

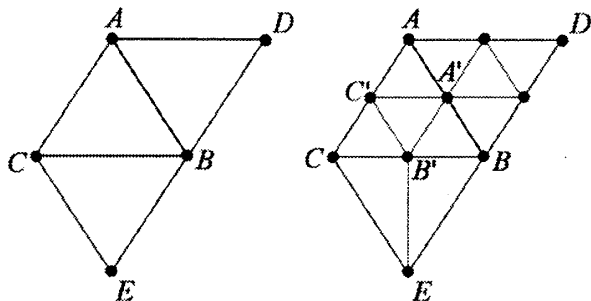


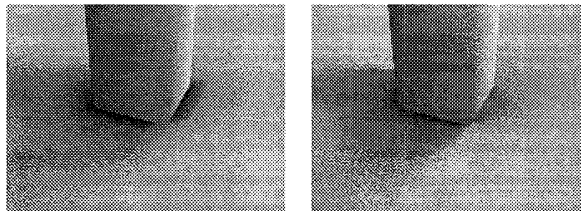
図 1 分割処理

全ての三角形メッシュの  $\varepsilon$  が閾値より小さくなるか、三角形メッシュの数が指定した数以上になるまで分割処理を繰り返すことで、最終的な

メッシュを生成する。

## 4 結果とまとめ

均一な分割を行ったメッシュ、提案手法で作成したメッシュによる結果画像を図 2, 図 3 に示す。



(a) 均一な分割

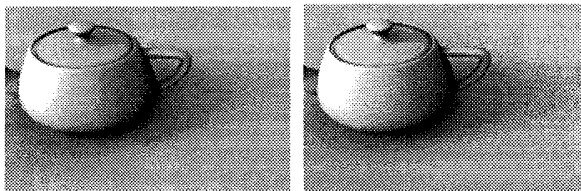
頂点数 1,681

(b) 提案手法

頂点数 1,681

図 2 結果画像

図 2(a)(b) で使用したメッシュの頂点数は同じである。(a) では物体付近に不自然な影が描画されるのに対して、(b) では物体付近でも(a) に比べ、なめらかな影が描画されている。



(a) 均一な分割

頂点数 10,201

(b) 提案手法

頂点数 2,154

図 3 結果画像

図 3(a)(b) は見た目に遜色がないように作成した結果画像である。(a) の前計算データの容量は 47.0MB, (b) の容量は 18.8MB である。

提案手法では均一な分割に比べ、約 2 割の頂点数で見た目に遜色のない画像を生成することができた。また均一な分割に比べ、前計算データ量を約 6 割減少することができた。今後の課題として適切な閾値の設定などが挙げられる。

## 参考文献

- [1] P. Sloan et al., Precomputed Radiance Transfer for Real-Time Rendering in Dynamic, Low-Frequency Light Environments, In Proc. SIGGRAPH 2002, pp. 527-536, 2002.
- [2] J. Krivanek et al., Adaptive Mesh Subdivision for Precomputed Radiance Transfer, In Proc. Spring Conference on Computer Graphics, pp. 106-111, 2004.
- [3] R. Ng et al., All-Frequency Shadows Using Non-linear Wavelet Lighting Approximation, In Proc. SIGGRAPH 2003, pp. 376-381, 2003.