6ZF-04

計測 BRDF を考慮した多角形光源のレンダリング

田中　剣樹†　　岩崎　慶†

和歌山大学†

1.　はじめに

近年，多角形光源を用いたレンダリング手法がいくつか提案されている[1,2]が，物体表面における光の反射率である双方向反射率分布関数 BRDF(Bidirectional Reflectance Distribution Function)として，マイクロファセット BRDF に限定されているという問題がある．現実世界の材質を実際に計測した計測 BRDF は，写実的なレンダリングにおいて広く用いられている．計測 BRDF を用いた多角形光源レンダリングの手法として，計測 BRDF を球面調和関数展開し，多角形領域で球面調和関数を積分する手法[3]も提案されているが，反射光の輝度計算に三重積積分が必要であり，計算コストが高いという問題がある．

本研究では，多角形光源を可視領域と不可視領域に分割する二分木である BSPVT (Binary Space Partitioning Visibility Tree)[1,2]と，球面調和関数を組み合わせる．計測 BRDF を球面調和関数展開することによって計測 BRDF を考慮した多角形光源の効率的なレンダリングを行う．

2.　多角形光源のレンダリング

多角形光源によるレンダリング方程式は以下のように計算される．

$$L_o(\boldsymbol{\omega}_o) = \int_P L_i(\boldsymbol{\omega}_i)V(\boldsymbol{\omega}_i)\tilde{f}_r(\boldsymbol{\omega}_o,\boldsymbol{\omega}_i)d\boldsymbol{\omega}_i \qquad (1)$$

ここで，L_oは出射輝度，L_iは入射輝度，$\boldsymbol{\omega}_o$は視線方向，$\boldsymbol{\omega}_i$は入射方向，Vは可視関数，$\tilde{f}_r$は余弦項を乗じた BRDF，Pは多角形領域である．式(1)の多角形領域Pについての積分は解析的に計算することが難しいため，モンテカルロ積分を用いて計算されることが多い．しかしながら，モンテカルロ積分の計算コストはサンプル数に比例して増大するため，インタラクティブな速度でのレンダリングには適していない．

3.　提案法

3.1　概要

提案法では Okuno らの手法[1,2]と Wang らの手法[3]を組み合わせ，計測 BRDF を使用した多角形光源の効率的なレンダリングを行う．可視関数$V(\boldsymbol{\omega}_i)$を BSPVT で表現し，計測 BRDF を球面調和関数で近似する．また，Okuno らの手法と同様に多角形光源からの入射輝度$L_i(\boldsymbol{\omega}_i)$は方向$\boldsymbol{\omega}_i$によらず一定値$L_i$と仮定する．提案法の流れは以下のとおりである．

① シーンの各頂点で BSPVT を構築
② 計測 BRDF の球面調和係数を計算
③ 事前計算された球面調和係数と BSPVT を用いてレンダリング

可視関数を格納する BSPVT と BRDF を近似する球面調和係数は事前計算で求められる．次節以降はそれぞれの過程を説明する．

3.2　BSPVT の構築

BSPVT は，可視関数Vを可視領域($V=1$)と不可視領域($V=0$)に分割する分割線を格納した二分木である．可視関数Vをキューブマップで表現し，キューブマップの各面のエッジを検出する．領域を分割するための分割線は検出されたエッジから以下の式を用いて計算される．

$$\sin\theta x - \cos\theta y + c = 0 \qquad (2)$$

ここで，図1に示すように，θはエッジとx軸のなす角であり，cはエッジの切片bと$\cos\theta$の積である．

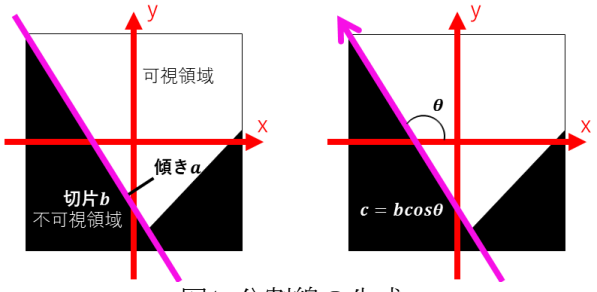

図1:分割線の生成

生成された分割線によって，領域を2分割し，分割線のパラメータを二分木に格納する．領域内の可視関数の分散値が閾値未満となったら分割を終了し，領域内の可視関数の平均値$\bar{v}$を格納する．レンダリング時には，BSPVT を用いて多角形光源を可視領域と部分的に可視な領域に分割する．

3.3　計測 BRDF の球面調和関数展開

計測 BRDF を入射方向$\boldsymbol{\omega}_i$に関する球面調和関数$y(\boldsymbol{\omega}_i)$で展開するために，出射方向$\boldsymbol{\omega}_o$を離散化する．離散化した出射方向$\boldsymbol{\omega}_o^l$についてn次の球面調和関数展開を行う．

Polygonal Light Rendering for Measured BRDFs
†Kenju Tanaka Wakayama University
‡Kei Iwasaki Wakayama University

Copyright ©2022 Information Processing Society of Japan.
All Rights Reserved.

$$\tilde{f}_r(\boldsymbol{\omega}_o^l, \boldsymbol{\omega}_i) \approx \sum_{k=1}^{n^2} f_{l,k} y_k(\boldsymbol{\omega}_i) \quad (3)$$

$$f_{l,k} = \int_{S^2} \tilde{f}_r(\boldsymbol{\omega}_o^l, \boldsymbol{\omega}_i) y_k(\boldsymbol{\omega}_i) d\boldsymbol{\omega}_i \quad (4)$$

事前計算された係数によって球面調和関数展開を行うことでレンダリング方程式を解く．BSPVT によって分割されたすべての多角形領域において積分計算を解くことになるため，最終的なレンダリング方程式は以下のようになる．

$$L_o(\boldsymbol{\omega}_o^l) \approx L_i \left(\sum_{P_j \in P_{visible}} \sum_{k=1}^{n^2} f_{l,k} \int_{P_j} y_k(\boldsymbol{\omega}_i) d\boldsymbol{\omega}_i \right. \quad (5)$$

$$\left. + \sum_{P_j \in P_{partial}} \bar{v}_j \sum_{k=1}^{n^2} f_{l,k} \int_{P_j} y_k(\boldsymbol{\omega}_i) d\boldsymbol{\omega}_i \right)$$

$P_{visible}, P_{partial}$は，多角形光源Pを BSPVT で分割した可視多角形の集合と部分的に可視な多角形の集合であり，$\bar{v}_j$は部分的に可視な多角形領域における可視関数の平均値である．

Wang らの手法では可視関数と BRDF を球面調和関数展開しており，球面調和関数の積を多角形領域で積分する必要がある．この計算に球面調和関数の三重積積分が必要であり，三重積積分の計算量はn次の球面調和関数の場合$O(n^5)$となる．提案法では，可視関数を BSPVT で表現しているため，分割された可視多角形の数がm個の場合，計算量は$O(mn^2)$となる．そのため，$m < n^3$の場合，提案法の方が効率的だと考えられる．

4. 実験結果

本研究の結果を図 2 に示す．実行環境は Intel Core i9-10850K 3.60GHz, 16GB RAM を搭載した PC である．レンダリングするシーンは stanford dragon を置いたシーンで行い，計測 BRDF として MERL BRDF[4]の fruitwood を使用した．比較として Wang らの手法でレンダリングした結果を使用する．球面調和関数展開に用いた次数は 4 である．図 2 から，提案法と Wang らの手法の結果に目立った相違は見られないが，dragon の手元などの影が濃い部分の表現では，提案法では参照画像と同様に濃い影が表現できているが，Wang らの手法ではうまく表現できていない．これは，提案法では可視関数に BSPVT を用いたため，はっきりとした影を表現することができたと考えられる．また，参照画像との RMSE は，提案法では 1.676e-2 であり，Wang らの手法では 1.894e-2 となった．このことからも，提案法は Wang らの手法よりも精度が高いといえる．また，次数を変えて 1 フレームあたりのレンダリング時間を計測した結果を表 1 に示す．この表より提案法は次数が大きいほど Wang らの手法よりも効率的であることが見て取れる．

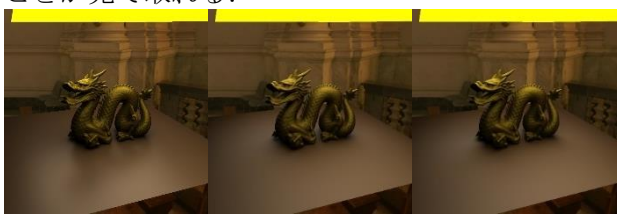

図2:左から参照画像，提案法，Wang らの手法のレンダリング結果

表1:1 フレームあたりのレンダリング時間

SH の次数n	提案法	Wang らの手法
4	1.4~2.0s	400~500ms
8	4.6~5.2s	4.5~5.1s
16	18s	92s

5. まとめ

本稿では，計測 BRDF を考慮した多角形光源のレンダリング手法を提案した．結果画像から，参照画像との誤差が提案法は 1.676e-2 であり，Wang らの手法では誤差が 1.894e-2 と Wang らの手法よりも精度が高くなった．また，Wang らの手法では薄く表現された影が提案法でははっきりと表現された．また，レンダリング時間において，球面調和関数の次数を大きくするほど提案法の方が効率的であるということを示した．今後の課題として，さらなる高速化があげられる．

参考文献

[1] H. Okuno et al. 2019. Binary Space Partitioning Visibility Tree for Polygonal Light Rendering. SIGGRAPH Asia 2019 Technical Briefs, pp. 79-82.

[2] H. Okuno et al. 2021. Binary Space Partitioning Visibility Tree for Polygonal and Environment Light Rendering. The Visual Computer, Vol. 37, pp. 2499-2511.

[3] J. Wang et al. 2018. Analytic Spherical Harmonic Coefficients for Polygonal Area Lights. ACM Transactions on Graphics 37, 4, 54:1-54:11.

[4] W. Matusik et al. 2003. A Data-Driven Reflectance Model. ACM Transactions on Graphics Vol 22, No.3, pp.759-769.

Copyright ©2022 Information Processing Society of Japan.
All Rights Reserved.