

改良放射照度キャッシング法を用いた大域照明の計算

Yonghao Yue[†] 尾上 耕一^{††} 西田 友是^{††}

近年、写実的な 3DCG のレンダリングは設計やバーチャルリアリティなどさまざまな場面において利用されている。大域照明は写実的なレンダリングにおいては必要不可欠であるため、いかに効率的に大域照明を計算するかは重要な問題の一つである。高画質なレンダリングではしばしば photon map 法と final gathering を組み合わせた手法が使用される。本稿では、final gathering で放射する光線をキャッシングすることにより、フレーム間のコヒーレンスを利用して高速化し、インタラクティブな速度で光源や視点を動かせることを示す。

Interactive Global Illumination Using Extended Irradiance Caching

YONGHAO YUE,[†] KOICHI ONOUE^{††} and TOMOYUKI NISHITA^{††}

Recently, photo-realistic 3D computer graphics rendering is widely used in many fields such as design or virtual reality. Since the calculation of global illumination is necessary to produce photo-realistic images, how to efficiently calculate this is one of the most important problems. In high quality rendering, the combination of photon mapping method and final gathering is often used to produce images. In this paper, we propose a novel method which cache the final gathering rays so that we can exploit the temporal coherence between frames. We show that we can achieve interactive speed in rendering when we move or rotate the camera or lights.

1. はじめに

近年、高画質の CG のレンダリングが市販のソフトウェアで容易に実行できるようになっている。一方、ハードウェアの進歩により、リアルタイムあるいはそれに近い速度でのレンダリングを可能とする技術が多く研究されている。リアルタイムで大域照明の計算ができるようになると、建築物の照明シミュレーションや、バーチャルリアリティシステム、ゲームなどにおいてよりリアルな表現が可能となる。このように、大域照明は高画質のレンダリングでは重要であるが、通常一フレームごとの計算量が多いので、これをリアルタイムで実現することはさまざまな制約を課しても難しいことである。

本稿では、高画質なレンダリング結果が得られるように final gathering と photon map 法を併用した手法を用いる。ただし、final gathering とは、面に入射

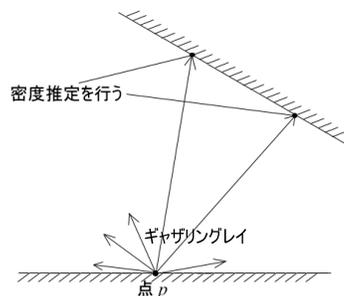


図 1 Final gathering

する間接光を多数のレイ (ギャザリングレイ) を放射し、モンテカルロ積分により求める方法である (ある点 p での final gathering は、図 1 のようにして行う)。

本稿の目的は、この併用手法をフレーム間のコヒーレンスを利用して、カメラと任意の種類の光源が移動または回転する環境下でも、インタラクティブな速度で大域照明を計算できるようにすることである。

本稿の構成は次の通りである。まず、2 節で大域照明計算およびその高速化に関連した従来法を紹介する。次に本稿で提案する放射照度キャッシング法を拡張し

[†] 東京大学理学部情報科学科

Department of Information Science, The University of Tokyo

^{††} 東京大学大学院新領域創生科学研究科複雑理工学専攻

Department of Complexity Science and Engineering, Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

たアルゴリズムを3節で説明する。そして、提案法による計算結果を4節に示す。最後に提案法の利点と今後の課題を5節にまとめる。

2. 関連手法

大域照明の計算には多くの方法が提案されている。例として、パストレース法⁸⁾、ラジオシティ法^{2),11)}、photon map 法⁷⁾がある。

パストレース法はレイトレース法の拡張で、ノイズがのりやすく、その除去のためには1ピクセルあたり膨大な数の光線を追跡する必要があり、処理時間が非常に長くなる。

ラジオシティ法は拡散面相互反射の計算において広く使われている手法で、一般的に計算量が多い。ラジオシティ法によるインタラクティブな速度のレンダリングを行う手法としては、レンダリング時に視点しか動かせないという制約はあるが、拡散面相互反射の計算を前処理し結果をリアルタイム表示する手法が一般に利用されている。このほかに、Coombeら³⁾はラジオシティをグラフィクスハードウェアで前処理なしに計算する手法を提案し、10,000プリミティブのシーンのレンダリングを1秒以下で行えるとしている。

また、Kellerらはinstant radiosity法⁹⁾を提案した。Instant radiosity法は、光源からエネルギーを伝播するパーティクルを放射し、準モンテカルロ法によって、仮想点光源を配置する方法である。グラフィクスハードウェアで計算できるようにするため、配置する仮想点光源の個数は処理速度のため制限され、間接照明の詳細が十分に再現できないことがある。

Photon map法は、光源からフォトン放射し、面上のフォトンの密度を推定することによって輝度を計算する。Photon map法は、大域照明の情報がジオメトリ情報とは独立しているため、どのようなプリミティブにも対応でき、また、コースティクスを効率よく計算できる利点がある。

しかしphoton map法のみを使用した場合は、フォトンの分布の偏りによって画質が影響を受けたり、多数のフォトン放射することによってメモリを著しく消費する。そこで、photon map法をfinal gathering^{4),10),12),13)}と組み合わせて使う手法がしばしば用いられる。ただし、final gatheringはレイトレースを要するため計算時間のかかる処理であり、ピクセルごとに行うと処理時間が膨大になる。拡散面での輝度変化は緩やかであるという考察に基づいた放射照度キャッシング法¹⁵⁾やそれを拡張した放射照度勾配法¹⁶⁾と組み合わせることで、計算時間は短縮できるが、それ

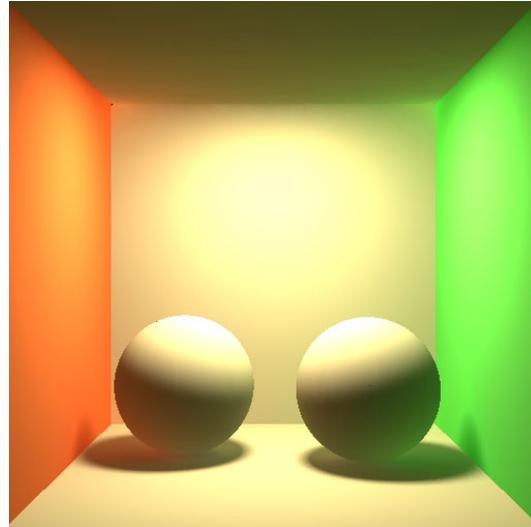


図2 提案法によるレンダリング (シーン a)

も毎フレームごとにfinal gatheringするのは、リアルタイムにはほど遠い。

彼らの手法¹⁴⁾では、ギャザリングレイを毎回すべて再放射するのではなく、確率的に選んで放射することで、final gatheringの時間を1/10程度にできている。ただし、この手法では、いかに確率的に選ぶかによって処理時間が大きく変化し、インタラクティブでのレンダリングは実現できていない。

本稿では、高画質なレンダリング結果が得られるようにする一方で、カメラと任意の種類の光源が移動または回転する環境下でも、インタラクティブな速度で大域照明を計算できるようにする。

3. 提案法

本稿では、final gatheringとphoton map法を組み合わせることにより、高画質のレンダリングを可能にするとともに、インタラクティブな速度のレンダリングを達成するために、改良放射照度キャッシング法を提案する。

図2及び図3は提案法によりレンダリングされた画像であり、これらについては4節で評価する。

ここでは、間接光の計算のみを対象とするが、直接照明での影の計算には、Arvoらの手法¹⁾を用いることができる。視点を動かしてもインタラクティブな速度でレンダリングできるように、放射照度キャッシング法を視点に依存しないように改良した手法を提案する。また、光源を動かしてもインタラクティブな速度でレンダリングできるようにするために、キャッシングする情報を照度ではなく、キャッシング点から放射され



図 3 提案法によるレンダリング (シーン b)

るギャザリングレイの情報にする。また、グリッドをもちいた photon map 法⁶⁾により、密度推定の時間を短縮する。

3.1 視点に依存しない放射照度キャッシング

Ward らの手法¹⁵⁾では、あるフレームのレンダリング時に各ピクセルの輝度計算において、輝度を放射照度キャッシングから補間して計算できるかどうかを判定し、補間できなければ final gathering を行うようにしていたため、どこでキャッシュするかは、レンダリングの結果副次的に得られるものであった。また、視点が移動すれば、新たに可視となる領域ができるため、その部分は前フレームで構築した放射照度キャッシングから補間できない可能性が高い。

そこで本稿では、あらかじめどの点でキャッシュを行うのかを、後述する方法によりシーン全体について求めておく。それらの点でキャッシュすることによって視点が移動したときでも、新たにキャッシュ点を追加すべき場所を計算することなく、レンダリングできるようにする。

3.2 キャッシュ点に保存する情報

Ward らの手法¹⁵⁾では、光源のみが移動する場合、キャッシュ点の位置は変わらないが、ギャザリングレイの交差先の輝度が変化するので、すべてのキャッシュ点で final gathering を再計算する必要があった。そのために、膨大な時間がレイトレースに費やされる。俵らの手法¹⁴⁾ではギャザリングレイを放射して得られる輝度の情報だけが保存していないので、交差先が同じとなるようなギャザリングレイもレイトレースする必要がある。

そこで、本稿では、final gathering した照度をキャッシュするのではなく、final gathering を行うのに放射したギャザリングレイと、その交差先の情報をキャッシュすることにより、光源が移動する場合でもレイトレースが発生しないようにする。

また、ギャザリングレイの放射方向を決定するのに以下のように、準モンテカルロ法⁵⁾を用いた。

放射するギャザリングレイの本数を N としたとき、 i 本目のギャザリングレイの方向決定において、まず以下のように e_0, e_1 を生成する。

$$e_0 = i/N \quad (1)$$

$$e_1 = \text{radical_inverse}(2, i) \quad (2)$$

ただし、関数 $\text{radical_inverse}(a, b)$ は、整数 a, b を入力とし、

$$b = \sum_{j=0} c_j a^j \quad (3)$$

と表されるとき、

$$\text{radical_inverse}(a, b) = \sum_{j=0} c_j \frac{1}{a^j} \quad (4)$$

となる関数である。上述の e_0, e_1 から、法線を基準とした球面極座標上の方向 (θ, ϕ) は $\cos \theta$ に関するインポートランスサンプリングを考慮して、次のように決定できる。

$$\theta = \arccos \sqrt{e_0} \quad (5)$$

$$\phi = 2\pi e_1 \quad (6)$$

また、各キャッシュ点で保存される情報は以下のようになる。

```
struct {
    HitRecord fgray[N];
    ColorRGB irradiance;
    Vector3 position;
    Vector3 normal;
    float r0;
    bool flag;
};
```

ここで、構造体 HitRecord にはレイが交差した場所での位置と法線の情報が含まれ、配列 fgray には、放射した各ギャザリングレイがの交差情報が記録される。変数 irradiance は、キャッシュ点で final gathering を行ったときの放射照度の情報である。また、変数 position は、キャッシュ点の位置、変数 normal はそこにおける法線、変数 r0 は配列 fgray の調和平均距離である。光源移動時にギャザリングレイの交差先の輝度を再計算する必要があるため、これを行ったかどうかを変数 flag に記録する。

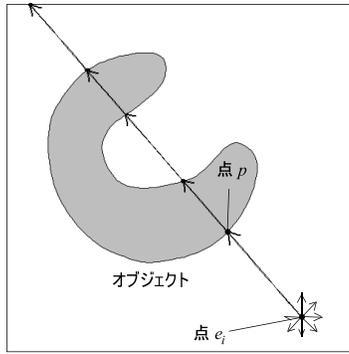


図 4 キャッシュ点の決定

3.3 前処理

レンダリングの前処理としてシーンに対して、シーン全体におけるキャッシュ点を以下のように計算しておく。

Ward らの手法¹⁵⁾ でスクリーン画面に対してのみ行っていた放射照度キャッシングのステップを次のように行う。なお、下記の過程を図示したものが図 4 である。

- (1) シーン内に数個点を取り、それぞれの点 e_i について以下を行う。
- (2) 点 e_i を中心とする球面上に光線をあらかじめ定めた数だけ放射する。
- (3) 光線が物体と交差した点 p で、点 p での照度がすでに定めたキャッシュ点から補間できないとき final gathering を行い、点 p を新たなキャッシュ点とする。
- (4) 点 p から、さらに光線を入射方向と同方向に放射し、何らかの物体と交差しなくなるまで (3)、(4) を繰り返す。

なお、ここで (1) を行うのは、ひとつの点だけで行った場合、その点からある角度に向けて放射される光線が面と平行かあるいはそれに近い関係にある場合、その面上でキャッシュ点がほとんど配置されないことを避けるためである。

3.4 レンダリング

各フレームのレンダリングは次のようになる。

- (1) 光源が移動したなら、photon map を再構成し、(2) を行う。そうでないなら (3) を行う。
- (2) 画面内の各ピクセルの色を以下の方法で計算する。
 - (a) 各キャッシュ点の flag を 0 にセットしておく。
 - (b) 各ピクセルについて Ward らの誤差評価

関数をもとにキャッシュ点をさがし、flag が 0 なら、各キャッシュ点の各ギャザリングレイの交差先の輝度を再計算し、flag を 1 に変更する。

- (c) 各有効なキャッシュ点に対し、そのピクセルでの重みを計算し、色を補間する。
- (3) 画面内の各ピクセルの色を以下の方法で計算する。
 - (a) 各ピクセルについて有効なキャッシュ点をさがす。
 - (b) 各有効なキャッシュ点に対し、そのピクセルでの重みを計算し、色を補間する。

ただし、上記のステップで有効なキャッシュ点をさがすとき、誤差の閾値を前処理で用いたものよりも大きめにとる。

4. 結果

提案法を実装し、二つのシーンで実験した。シーン a (約 18,000 ポリゴン、図 2 参照) は、箱の中に球を二つ配置したシーンであり、シーン b (約 48,000 ポリゴン、図 3 参照) は、箱の中にドラゴンを配置したシーンである。いずれも 512×512 ピクセルの解像度でレンダリングした。

シーン a 及びシーン b で視点及び光源を動かした場合のレンダリング時平均大域照明計算時間を表 1 にまとめた。レンダリング時の大域照明計算はキャッシュ

シーン	視点を動かしたとき	光源を動かしたとき
シーン a	1.3s	2.7s
シーン b	1.7s	7.4s

表 1 視点と光源をそれぞれ動かした場合の平均大域照明計算時間

点からの照度の補間のみであるので、処理時間はシーンの複雑さにはほとんど影響されず、補間の候補となるキャッシュ点の個数による。光源を動かした場合には photon map の再構成に時間がかかるので、視点を動かした場合よりも計算時間が長くなっている。

また、それぞれのシーンのレンダリングにおいてキャッシュされた点の個数、ギャザリングレイの本数を表 2 にまとめた。次に、Ward らの手法により生成

シーン	N	E
シーン a	200	7382
シーン b	200	13092

表 2 改良照度キャッシングのサイズ：N - ギャザリングレイの本数、E - キャッシュされた点の個数

されるキャッシュ点と、提案法により生成されるキャッシュ点とを比較する。

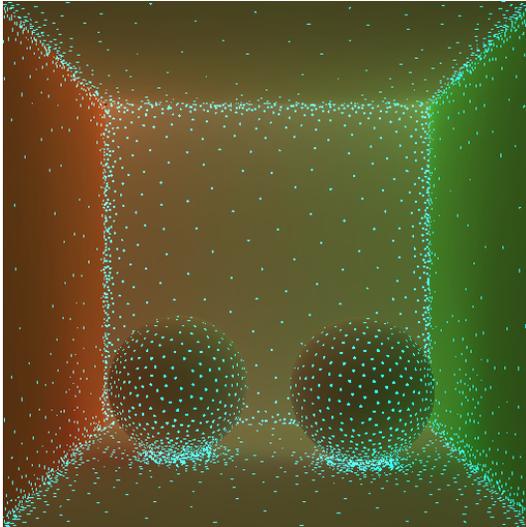


図5 キャッシュ点の位置 (提案法)

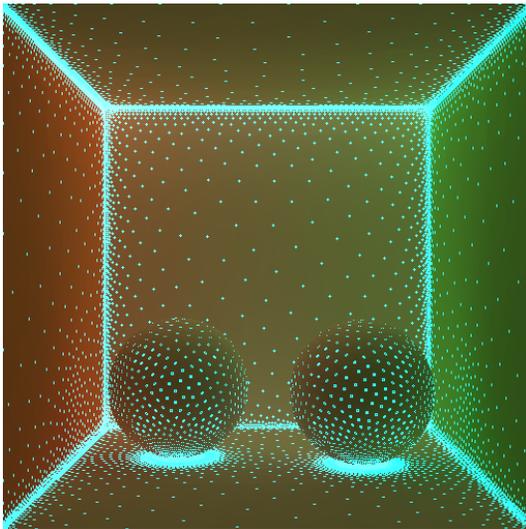


図6 キャッシュ点の位置 (Ward らの手法)

図5は提案法によるキャッシュ点の位置と、レンダリング結果を同時に出力したものである。

図6はWardらの手法によるキャッシュ点の位置と、レンダリング結果を同時に出力したものである。

提案法では、図4の点 e_i から半球状に光線を照射するとき、その本数を十分に大きくしないと、稜線や角の部分でキャッシュ点が不足してしまうことがある。図5と図6を比較すると、提案法ではその部分のキャッシュ点の分布がWardらの手法と比べてやや疎になっている。スクリーン内にあるキャッシュ点全体の分布に関してはほぼ同じようにあるといえる。

5. ま と め

本稿では、Wardらの放射照度キャッシング法を拡張し、キャッシュ点をシーン全体にとることで、視点を動かしてもインタラクティブな速度でレンダリングできることを示した。また、照度のかわりにギャザリングレイの情報を保存することにより、光源を動かしてもインタラクティブに近い速度でレンダリングできることを示した。

今後の研究課題としては次のようなことが挙げられる。

- 光源を移動させたときに本手法では photon map を再構成しているが、これを高速に計算し、光源の移動・回転に関してもインタラクティブな速度にする。
- 本手法では物体を動かすことはインタラクティブにはできないが、これを可能にする。

参 考 文 献

- 1) J.Arvo, M.Hirvikorpi and J.Tyystj. "Approximate Soft Shadows Using Image-Space Flood-Fill Algorithm," *Computer Graphics Forum*, vol.23 no.3, pages 271-280, 2004
- 2) M.F. Cohen, and J.R. Wallace. "Radiosity and Realistic Image Synthesis," *Academic Press Professional*, Boston, 1993
- 3) G. Coombe, M.J. Harrism, and A. Lastra. "Radiosity on Graphics Hardware," *Proc. Graphics Interface 2004 (GI '04)*, pages 161-168, 2004
- 4) C.Damez, K.Dmitriev, and K.Myszkowski. "State of the art in global illumination for interactive applications and high-quality animations," *Computer Graphics Forum*, vol.22 no.1, pages 55-78, 2003
- 5) J.Halton and G.Weller. "Algorithm 247: Radical-inverse quasi-random point sequence," *Comm, ACM (1964)*, no.12, pages 701-702, 1964
- 6) D. Hansson and N. Harrysson. "Fast Photon Mapping Using Grids," M. thesis, Chalmers University of Technology, 2002
- 7) H.W. Jensen. "Global Illumination using Photon Mapping," *Rendering Techniques '96*, pages 21-30, 1996
- 8) J.T. Kajiya. "The Rendering Equation," *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH '86)*, vol.20, no.4, pages 143-150, 1986
- 9) A. Keller. "Instant Radiosity," *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH '97)*, pages 49-55, 1997
- 10) D. Lischinski, F. Tampieri and D.P. Greenberg, "Combining hierarchical radiosity and discontinuity meshing," *Proc. SIGGRAPH '93*, pages 199-208, 1993
- 11) T. Nishita and E. Nakamae, "Continuous Tone Representation of Three-Dimensional Objects Taking Account of Shadows and Interreflection," *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH '85)*, vol.19

- no.3, pages 23-30, 1985
- 12) M. Reichert. "A Two-Pass Radiosity Method to Transmitting and Specular Reflection Surfaces," M.Sc. thesis, Cornell University, 1992
 - 13) B. Smits. "Efficient Hierarchical Radiosity in Complex Environments," Ph.D. thesis, Cornell University, 1994
 - 14) T. Tawara, K. Myszkowski and H.-P. Seidel. "Exploiting Temporal Coherence in Final Gathering for Dynamic Scenes," *Proc. Computer Graphics International (CGI '04)*, pages 110-119, 2004
 - 15) G. Ward, F.M. Rubinstein and R.D. Clear. "A Ray Tracing Solution for Diffuse Interreflection," *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH '88)*, vol.22 no.4, pages 85-92, 1988
 - 16) G. Ward and P. Heckbert. "Irradiance Gradients," *Eurographics Rendering Workshop*, pages 85-98, 1992