

遮蔽度の曲率近似による アンビエントオクルージョンの 局所照明モデル化

服部智仁[†] 久保尋之[†] 森島繁生[†]

間接光を考慮した大域照明モデルによって生成される柔らかい陰影は、より物体を立体的にリアル表現するために必要であり、局所照明モデルによって得難いものである。現在、Ambient Occlusion と呼ばれる大域照明モデルを局所照明モデルに付加することにより、ソフトシャドウを低コストに得る手法が知られている。本稿では、Ambient Occlusion を、曲率を用いた局所照明モデルに落とし込むことにより、従来のモデルより少ない計算量により効果を得る手法を提案する。

Ambient Occlusion by Curvature Depended Local Illumination Approximation of Occlusion.

Tomohito Hattori[†] Hiroyuki Kubo[†] Shigeo Morishima[†]

Ambient Occlusion is used widely for improving the realism of rapid lighting simulation. We propose a new, simple, real-time technique for computing Ambient Occlusion, by a curvature depended local illumination approximation of occlusion. According to our result, we achieve Ambient Occlusion from curvature by less computational complexities than past techniques.

1. 序論

近年、映画やゲーム、テレビCMなど様々な用途でコンピュータグラフィクス(CG)が用いられるようになっており、そのためリアルでかつ高速なレンダリング手法の需要は一層高まっている。特にゲームの分野では、常にプレイヤーによってオブジェクトの変形や移動、視点の変更等が生じるため、シーンの動的な変化に対応するリアルタイムなレンダリング手法の導入が必要不可欠である。

シーンをリアルにレンダリングするためには、直接光だけでなく間接光を考慮した、大域照明による効果を計算する必要があるが、大域照明モデルは計算量の多さが欠点であり、リアルタイムのレンダリングには不向きであるといえる。

そのため、少ない計算量で大域照明効果を獲得するための技術開発が盛んに行われており、中でもアンビエントオクルージョン[1]は、極めて効果的に大域照明効果を表現可能である点から多くの研究がなされてきた。アンビエントオクルージョンは、注目する点の遮蔽度に応じて間接光による影響を決定することによって、大域照明を考慮したリアルな陰影を高速に得ることを可能にした。しかし遮蔽度を求めるためにはシーンの大域的な構造を考慮する必要があるため、未だリアルタイムのレンダリングにはなお負荷の高い処理であった。

そこで、本稿では物体の曲率を用いることでアンビエントオクルージョンを近似する手法を提案する。曲率は物体表面上で局所的に決定されるパラメータであるため、局所照明モデルが適用可能であり、高速なレンダリングが実現される。

2. アンビエントオクルージョン

アンビエントオクルージョンは、アンビエント光を効果的に表現する手法である。アンビエント光(環境光)とは大域照明のひとつであり、特定の光源によって照らされるのではなく、シーン中のあらゆる点において反射や透過、散乱等を繰り返すことで到達する光のことをさす。アンビエント光を考慮してレンダリングを行う場合、影の中や光源から見て裏側にあたる部位など、直接光の届かない部位にも間接的に光が回り込むような現象や、切り立った谷間のような部位には光が届きにくく暗くなるような現象の表現が可能になり、全体として柔らかい立体感のある結果が得られることが知られている。

アンビエント光を正確にシミュレートするには、レイトレーシング等を用いて、光の挙動を光源から追跡する必要があるため、計算量が非常に増大するデメリットが

[†] 早稲田大学
Waseda University

あり、高速なレンダリングが要求される場合に用いることは難しい。

そのため、アンビエント光を効率的に表現するための手法の開発が盛んに行われ、Landis ら[1]によってアンビエントオクルージョンが提案された。アンビエントオクルージョンは、注目する点におけるアンビエント光をシミュレートするために周囲からの遮蔽を求め、その遮蔽度に応じてアンビエント光を定める手法である。この場合、前述したレイトレーシングなどによるシミュレーションよりも効率的にアンビエント光が近似可能であり、現在でも関連する研究が行われている。

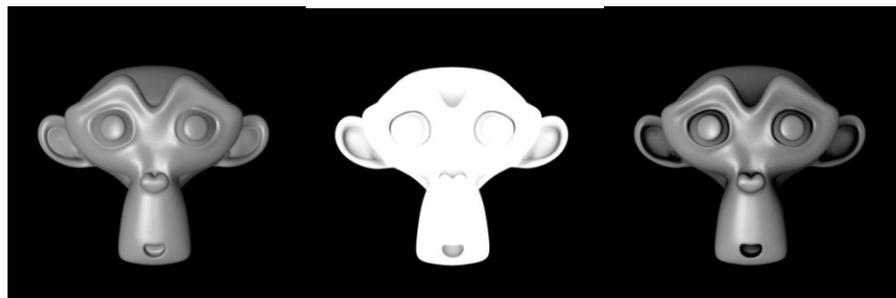


図 1 比較画像 元のモデル(左), 求まる遮蔽度(中), アンビエントオクルージョンが付加された状態(右)

Figure 1 Comparison : No Effected Model(Left), This model's occlusion, Model with Ambient Occlusion(Right)

アンビエントオクルージョンは以下の式で求められる。

$$L_{abocc}(x) = \frac{1}{\pi} \int_{\Omega_+} V(x, \omega) \cos \theta d\omega \quad (1)$$

このときアンビエントオクルージョンを求める点の座標を x 、上半球領域を Ω_+ とする。 $V(x, \omega)$ は点 x における、 x から注目する方向 ω に対する遮蔽を評価する可視関数である。 $\cos \theta$ は物理的な正確さを重視する場合に、 ω の角度に応じて Lambert 則によって課される重みづけであり、美術的な表現性等を重視する場合には用いられないことや、異なる評価関数が用いられることがある。このモデルの具体的なイメージは、図 2 のようになっている。範囲 Ω_+ において、遮蔽があると評価されている部分が、赤で表示されている。

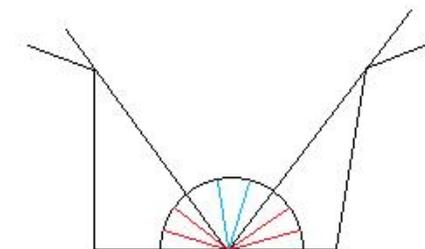


図 2 遮蔽度サンプリングの概念図
Figure2 A Conceptual image of occlusion sampling

Landis らは遮蔽評価の際に、レイトレーシングの手法を用いた衝突判定によって解を得ている。その手法は以下の様になる。

アンビエントオクルージョンを求める点 x より、 Ω_+ 内のランダムな方向 ω にレイを飛ばし、レイが遮蔽を受けたかをレイトレーシングの可視関数によって判定する。判定結果には、 ω の方向に応じて Lambert の余弦則に基づく重みづけがされる。それを十分な回数繰り返し行い、レイを飛ばした本数の重み付き総数に対する、遮蔽が起きた本数の重み付き総量の割合によって、遮蔽度が導出される。

アルゴリズムが単純である割に視覚的効果が高く、大域照明の効果的な実装手法として知られているが、アルゴリズムに用いられている手法はレイトレーシングの衝突判定と同様のものであり、動的シーンに用いるためには、なお負荷の高いものであり、改良の必要があるといえる。

3. 関連研究

アンビエントオクルージョンをインタラクティブに用いるために、これまで様々な研究が行われてきた。すでに述べた通り、Landis らの手法においては遮蔽判定の評価関数 $V(x, \omega)$ を求める際にレイトレーシングを用いるため計算負荷が高いことが問題であった。

Ambient Occlusion Fields[2]では、物体を囲む立方体のフィールド表面で定義されるマップに、前処理として遮蔽判定を行った結果を独自のエンコード方式で書き込む。

レンダリング時にはシーンの情報を読み込むことによって、ハードウェア上でリアルタイムに遮蔽度計算を可能にしているが、自己遮蔽を考慮できないこと、事前計算が必要なことがデメリットとして挙げられる。

また、より高速に処理可能な手法として Screen-Space Ambient Occlusion (SSAO) [3] が挙げられる。従来は遮蔽の評価を 3D 空間上で求めていたのに対し、SSAO では、レンダリング時に作成された Z-Buffer を用いることで、画面座標系において遮蔽を評価し、ポストプロセスとしてアンビエントオクルージョンの影響を追加可能にした。実際には着目するピクセルから 4 方向ないし 8 方向に対する深度情報を Z-Buffer から読み込み、その変化を調査することで物体の大まかな形状を推定し、ピクセルの周囲の遮蔽度を近似する。

この手法では、レンダリングのポストプロセスとして GPU 処理により高速にアンビエントオクルージョンの効果を付加可能なこと、事前計算が不要なことがメリットとしてあげられる。しかし、物体の形状を Z-Buffer により近似するため、Z-Test により棄却された、手前の物体に隠される位置にあるような形状は考慮されないため、特に物体境界付近でアーティファクトが発生することがデメリットとなっている。

本研究では、物体表面の曲率を用いて形状を局所的に近似することで、遮蔽の評価を行う。本手法では近傍から受ける自己遮蔽を表現可能であり、さらに遮蔽度は曲率から解析的に求まるため、GPU を用いてリアルタイムで処理が可能である。

4. 曲率によるアンビエントオクルージョン

4.1 曲率による遮蔽度

本稿では、アンビエントオクルージョンを曲率によって近似的に求める方法を提案する。また、曲率は物体表面で定義される局所パラメータであり、曲率を用いることで局所照明モデルを構成することが可能であり、曲率から遮蔽度を直接求めることが可能である。

注目する点の曲率を K とすると、この点の周りの勾配は、 $r = 1/K$ で定義される半径 r の円で近似されるため、注目する点の周りの遮蔽情報を解析的に得ることが可能である。これによって、従来の手法においてレイトレーシングの手法を用いた衝突判定などで遮蔽度計算を行っていたのに対して、曲率を用いた局所照明モデルによって遮蔽度の導出が可能であるため、計算効率の大幅な向上が可能である。

また、従来の手法によると、注目する点の遮蔽度に影響を及ぼす範囲 Ω_+ は、有限または無限の半径を持つ半球が想定されており、 Ω_+ 上のあらゆる点に対して遮蔽のサンプリングを行っていた。しかし、遮蔽によって受ける影響は、離れた点よりも、近傍の点によるものが圧倒的に大きいと考えられる。そのため、離れた点による遮蔽は考慮する必要がなく、近傍の点による遮蔽のみ考慮すればよい。

よって、近傍の点の形状特徴を示す曲率は、アンビエントオクルージョンを求める上で有効なパラメータであるといえる。

4.2 曲率から遮蔽度への近似手法

本章では、曲率から遮蔽度を求めるアルゴリズムについて述べる。本稿で提案する手法は、主曲率のみを用いた近似による手法であり、非常に単純な式で注目する点の遮蔽度を近似することが可能である。

今、注目する点の曲率が κ で表されたとき、この点の近傍の形状を $r = 1/\kappa$ の半径を持つ球で近似する。以下では、球面によって近似された曲面に対し、遮蔽度を求める手法について述べる。

本手法では、半径 r の球に対して、ある閾値 T_h を設け、閾値の部分で球体を切り取ったモデルを作成する。閾値 T_h を描画対象の物体の曲率の分布に応じてユーザが適切に設定することで、 T_h に対する近似球の半径の違いによって注目する点における遮蔽度が求められる。

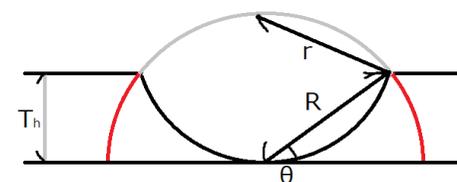


図3 曲率より求まる遮蔽部分
Figure 3

従来のアンビエントオクルージョンの手法では、上半球領域 Ω_+ に対してランダムなレイを飛ばし、レイの遮蔽の有無を可視関数 V とし衝突の割合を遮蔽度としていた

が、計算コストが高くなりがちである点が問題であった。

そこで、本手法では注目する点に対してあらかじめ曲率を求め、さらに閾値 T_h を設定することにより、半球領域上の遮蔽部分の割合を、遮蔽度として解析的に求めることが可能である。

まず図3の様に遮蔽があることを考える。曲率より得られる遮蔽に対して、半径 r で与えられる半球範囲において、遮蔽される部分の割合を求めたい。

遮蔽される部分は、半球に対する、赤い部分の示す割合であり、これは次のように求まる。まず、 r と T_h によって θ は次式で与えられる。

$$\theta = \arctan \left(\frac{r \sin \left(\arccos \left(\frac{r-a}{r} \right) \right)}{T_h} \right) \quad (2)$$

与えられた θ より遮蔽度を求める。ただし図では2次元の断面図であるが実際にはこれを3次元の極座標空間に直し、 ϕ 周りの積分も考慮する。また、今回の実装では、物理的な正確さを求めるため、サンプリングの際にランバート則による $\cos \theta$ の重みを考慮するものとする。

従って、求める遮蔽部分の重み付き面積積分は

$$O(R, \theta, \phi) = \int_{\theta}^{\pi} \int_0^{2\pi} \cos \theta' R^2 \cos \theta' d\theta' d\phi \quad (3)$$

となる。半球の面積全体に対する $O(R, \theta, \phi)$ の割合が求める遮蔽度となるので、遮蔽度を求める式は

$$L_{abocc}(R, \theta, \phi) = \frac{\int_{\theta}^{\pi} \int_0^{2\pi} \cos \theta' R^2 \cos \theta' d\theta' d\phi}{4\pi R^2} \quad (4)$$

となる。この積分を実行すると次のようになる。

$$L_{abocc}(\theta) = \frac{\kappa \left(\pi - \left(\theta + \frac{1}{2} \sin 2\theta \right) \right)}{4} \quad (5)$$

θ は式2によって一意的に与えられているので、曲率 κ と閾値 T_h によって一意的に

遮蔽度が求まる。閾値 T_h はユーザ設定の定数であるため、曲率 κ によって各点は一意的なアンビエントオクルージョンが得られる。さらに、本アルゴリズムは、局所パラメータである曲率のみをオブジェクトより参照するため、局所照明モデルの形になっており、従来の手法より高速にアンビエントオクルージョンを求めることが可能である。

4.3 実装結果

本研究では、曲率はあらかじめアプリケーション側で前計算しておき、レンダリング時にシェーダ側にパラメータとして転送するように実装した。図4に求められた曲率を示す。

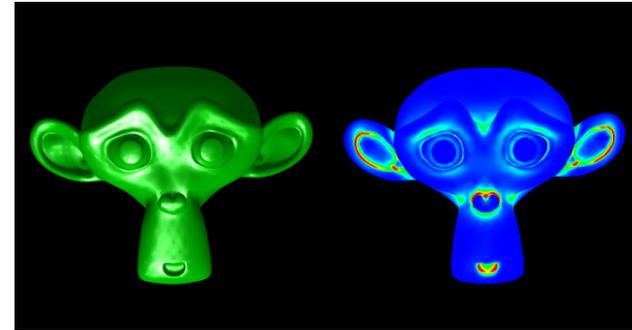


図4 モデル(左)より得られる曲率(右)
Figure4 Curvature(Right) from Monkey model(Left)

次に、本手法によって求められたアンビエントオクルージョンの描画結果を図5に示す。求めた曲率に対して式5を適用し、遮蔽が大きいと判断された点の輝度を下げている。遮蔽が大きくなるにしたがって、輝度は黒に近づく。図によると、耳の輪郭や口の中、鼻の周り等で大きな遮蔽が見られており、アンビエントオクルージョンが、曲率を用いたモデルによって再現されているといえる。

ただし、ここで問題になるのが、閾値 T_h の値であり、アンビエントオクルージョンの効果的な再現のために、与えられたモデルに応じてユーザがそれらしい値を与える必要があるのだが、正確な値を導出することは困難であるので、本研究ではトラックバーによって適当な値を直感的に指定する方法をとっている。

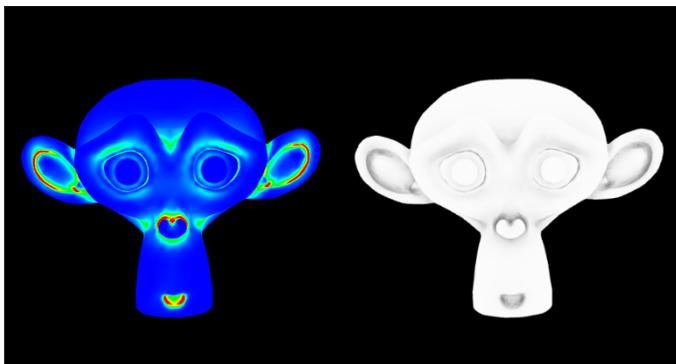


図 5 得られる遮蔽度の結果
Figure5 Our Result of Ambient Occlusion from Curvature

なお、本手法は CPU : Intel Core2 Duo Dual-Core (2.66 GHz), VGA : NVIDIA Geforce GTX 285 の環境において、曲率計算に 2.3 秒、レンダリング時には 1000fps 以上での高速な描画が可能である。

5. 適用例

本章では、本手法を実際のシーンで用いた例を紹介する。Lambert モデルを用いて Diffuse カラーでレンダリングされたモデルを初期値とし、本手法によるアンビエントオクルージョンを付加したモデルとの対比を行い、この結果を図 6、図 7 に示す。

それぞれ図の左側に示したのが、Diffuse カラーのみを用いてレンダリングした結果である。対する右側に、本手法によって各ピクセルにおいてアンビエントオクルージョンを求め、Diffuse カラーの輝度値に対して乗算処理を行ったものを示している。

どちらの例においても、アンビエントオクルージョンが再現されていることを確認することができる。

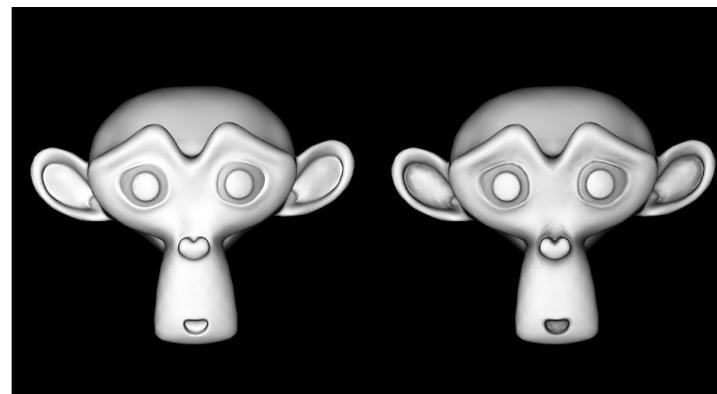


図 6 Monkey における比較
Figure6 Diffuse+Ambient Occlusion (Monkey)

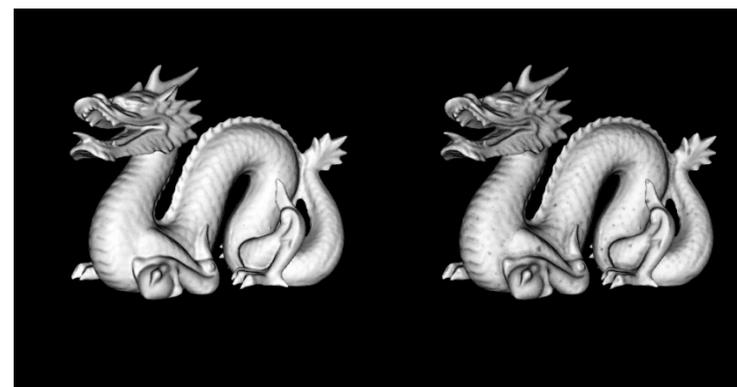


図 7 Stanford-Dragon における比較
Figure 7 Diffuse + Ambient Occlusion (Stanford Dragon)

6. まとめと今後の課題

アンビエントオクルージョンは、大域照明モデルの効果的な実装方法であり、間接光による影響を効率的にシミュレートできることから、フォトリリスティックレンダリングにおいて非常に有効な技術である。しかし、リアルタイムレンダリングで用いるためには、高負荷なものであることや、アーティファクトが発生してしまうなど

の問題がある．そこで本研究では，曲率を用いた局所照明モデルによって遮蔽度を求める手法を提案し，リアルタイムで効果的にアンビエントオクルージョンの効果を得ることを可能とした．

さらに，Light Warping[5]という技術の中で紹介されている，GPUによってスクリーンスペースで曲率を求める手法を用いることによってスクリーンスペースアンビエントオクルージョンと同等の計算速度で，アンビエントオクルージョンの効果を得ることも可能である．スクリーンスペースにおいて曲率を求める場合，SSAOの欠点として挙げた様な物体境界付近におけるアーティファクトの発生が危惧されるが，SSAOでは注目する点から離れた位置での遮蔽を考慮していたために，アーティファクトが強く出る結果となっており，対するLight Warpingの手法では曲率を求める際に原則隣のピクセルのみを参照する手法となっているので，アーティファクトの発生は最小限に防ぐことが可能である．

また，本研究では主曲率のみを用いたモデルで遮蔽度計算を行っていたが，さらに従曲率も用いたモデルでの実装を行い，物理的な正確さを高めることも目標としている．

7. 参考文献

- 1) Hayden Landis. “Production-Ready Global Illumination”. *Siggraph2002*. vol. 5, No. 4, pp. 93-95, 2002
- 2) Jannne Kontkanen, Samuli Laine. “Ambient Occlusion Fields”. *Siggraph 2005*
- 3) Miguel Sainz. “Real-Time Depth Buffer Based Ambient Occlusion”. Game Developer Conference, 2008.
- 4) Tobias Ritschel, Thorsten Grosch, Hans-Peter Seidel. “Approximating Dynamic Global Illumination in Image Space”. *Siggraph 2009*.
- 5) Romain Vergne, Romain Pacanowski, Pascal Barla, Xavier Granier, Christophe Schlick. “Light warping for enhanced surface depiction”. *Siggraph 2009*. Vol. 4, No. 2, pp. 3