Vol.2020-CG-179 No.1
2020/9/19

環境照明下におけるImageworksライティングモデルを用いた材質のリアルタイムレンダリング（2020年08月20日版）

溝口 智博[1,a)]　Kitti Vongsay[1,b)]

概要：本研究の目的は，Imageworks ライティングモデルを用いた材質を環境照明下で高速に描画する実装方法を提案し，リアルタイムアプリケーションで利用可能とすることである．このライティングモデルは金属と非金属のエネルギー保存則を完全に満たす材質を効率的に描画するためのモデルであり，主に映像制作の分野で用いられているが環境照明を計算するために重点的サンプリング法を用いると計算コストが高いという課題がある．そこで本稿では，まず Imageworks ライティングモデルに Split Integral 法を組み込み，事前に作成したテーブルデータを用いることで環境照明の計算を高速化する．さらに本稿ではエネルギー保存則を満たした上でこのテーブルデータのサイズを削減するために新たな関数を導入する．この関数と削減したテーブルデータは Imageworks ライティングモデルにも適用するが，これによって改善された Imageworks ライティングモデルは半導体のエネルギー保存則も満たすことができるようになる．最後に重点的サンプリング法と Split Integral 法との描画結果と計算時間の違いを示すことで，リアルタイムアプリケーションでも環境照明下で Imageworks ライティングモデルを利用できることを示す．

Real-time Material Rendering with Imagework Lighting Model under Environment Lighting (version 2020/08/20)

1. はじめに

Kulla et al. [1] が提案した Imageworks ライティングモデルはエネルギー保存則を完全に満たした金属と非金属を効率的に描画するモデルであり，近年では Sony Pictures Imageworks Inc. が携わった映画等で利用されているが，このモデルを用いた材質を環境照明下で高速に描画する実装の詳細は明らかではない．そこで本稿は環境照明下で Imageworks ライティングモデルを用いた材質を高速に描画する実装方法を提案する．Imageworks ライティングモデルは，微細表面を反射する単一反射光，多重反射光，そして拡散反射光の反射特性を持つ関数で構成されている．このモデルを用いた材質を環境照明下で描画する場合，重点的サンプリング法 [2] を用いて描画することもできるが，ゲームのようなリアルタイム性が求められる分野では環境照明の計算コストが高いという問題がある．そこで本稿では Imageworks ライティングモデルを用いた材質に対して Split Integral 法 [3] を用いることで環境照明を高速に計算する．重点的サンプリング法では材質の反射特性に従って全球方向に分布する環境照明を計算するため，高品質な画像の生成に必要な環境照明の方向数が多くなると計算コストが高くなってしまうが，Split Integral 法では環境照明の計算に必要な積分を，事前に作成したテーブルデータを用いて高速に計算することができる．この Split Integral 法は元々 Schlick Fresnel [4] を用いた単一反射光にのみ適用された手法であるのに対し，本稿では Artist Friendly Fresnel [5] を用いた Imageworks ライティングモデルに Split Integral 法を適用する．Artist Friendly Fresnel は金属の材質特性を決定する物理パラメータをアーティストが容易に調整できるように提案された技術であり，Schlick Fresnel よりも

[1] 株式会社スクウェア・エニックス
SQUARE ENIX CO., LTD., Shinjuku East Side Square, Shinjuku, Tokyo 27–30, Japan
[a)] mizotomo@square-enix.com
[b)] vongkitt@square-enix.com

ⓒ 2020 Information Processing Society of Japan

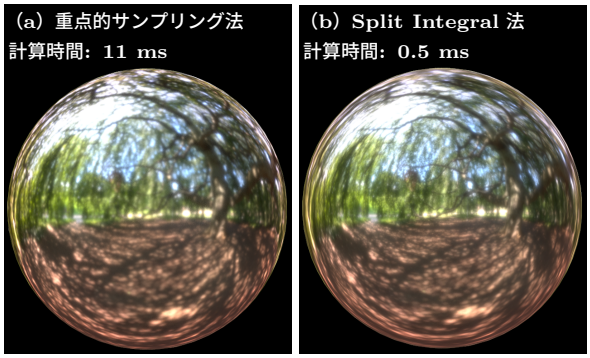


図 1 環境照明下における Imageworks ライティングモデルを用いた材質の描画結果．重点的サンプリング法（a）の場合全球方向に分布する環境照明の中で考慮すべき方向数がより多くなると計算コストが高くなるが，Split Integral 法（b）の場合環境照明に必要な積分の計算で事前に作成したテーブルデータを用いるため環境照明を高速に計算することができる．

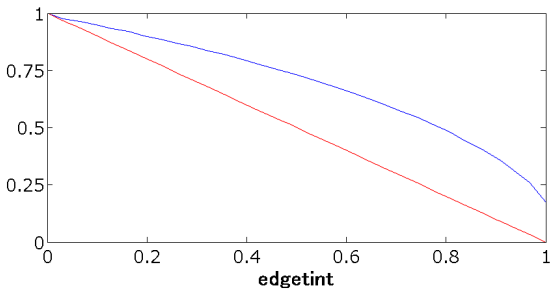


図 2 Split Integral 法で用いるテーブルデータを縮小する関数（青）．この関数の値よりも小さな値を，提案するテーブルデータに掛け合わせることで半導体でもエネルギー保存則を満たすことができるようになる．この関数は多項式で近似することもできるが，1-edgetint（赤）を用いることで多項式の計算コストをさらに削減することができる．

厳密に金属を描画することができる．これらの違いにより従来の Split Integral 法よりもテーブルデータのサイズが増加するため，本稿では Imageworks Lighting Model で満たしているエネルギー保存則の特徴を可能な限り維持した上でテーブルデータのサイズを削減する．この目的を達成するために本稿ではテーブルデータを調整する関数も新たに導入する．この関数と削減されたテーブルデータは Imageworks ライティングモデルにも適用するが，この改善された Imageworks ライティングモデルは半導体でもエネルギー保存則を満たすことができるようになる．

2. Split Integral 法

本稿で提案する実装方法について説明する前にまず Split Integral 法について述べる．Split Integral 法では環境照明の計算に必要な積分を高速に計算するためにテーブルデータを事前に作成しなければならない．このテーブルデータを作成するためにはまずこの積分を 2 つの項に分離する必要がある．1 つ目の項である指向性アルベド項 D は，物体表面法線 $\boldsymbol{n}$ と視線方向 $\boldsymbol{\omega_o}$ との余弦そして物体表面の粗さ s で表される関数であり以下の式で与えられる．

$$D(\boldsymbol{\omega_o}\cdot\boldsymbol{n},s)=\int_{\Omega} f_r(\boldsymbol{\omega_o},\boldsymbol{\omega},s)\max(\boldsymbol{\omega_o}\cdot\boldsymbol{n},0)d\boldsymbol{\omega}. \quad (1)$$

ここで Ω は物体表面法線を基準とする上半球を意味しており，$\boldsymbol{\omega}$ はこの上半球から入射する光の方向ベクトルである．そして f_r は微細表面へ入射する単一反射光の反射特性を持つ双方向反射率分布関数（BRDF）である [1]．

2 つ目の項である環境照明の畳み込み項 L は，視線方向 $\boldsymbol{\omega_o}$ と物体表面の粗さ s で表される関数であり以下の式で与えられる．

$$L(\boldsymbol{\omega_o},s)=\frac{\int_{\Omega} l(\boldsymbol{\omega}) f_r(\boldsymbol{\omega_o},\boldsymbol{\omega},s)\max(\boldsymbol{\omega_o}\cdot\boldsymbol{n},0)d\boldsymbol{\omega}}{D(\boldsymbol{\omega_o}\cdot\boldsymbol{n},s)}. \quad (2)$$

ここで $l(\boldsymbol{\omega})$ は上半球 Ω から入射する環境照明である．Split Integral 法では指向性アルベド項を単純に計算し，環境照明の畳み込み項を物体表面法線と光の反射方向が視線方向と同一方向を向く仮定を用いて計算する．環境照明の計算では各項の計算結果を保存したテーブルデータを単純に掛け合わせるだけでよいため環境照明を高速に計算することができる．

3. 提案する実装方法

本章では Artist Friendly Fresnel を用いた Imageworks ライティングモデルの材質に Split Integral 法を適用する実装方法について述べる．本実装ではこの材質に Split Integral 法を適用するためのテーブルデータを新たに追加する．また本稿ではテーブルデータを調整するための関数も導入するが，この関数を用いることでテーブルデータのサイズを削減できるだけでなくエネルギー保存則を満たす半導体も描画できるようになる．

3.1 テーブルデータの構築

Imageworks ライティングモデルによる影響． Imageworks ライティングモデルは微細表面に入射する単一反射光に加えて多重反射光と拡散反射光を考慮するため，BRDF も各反射光で形成される．この単一反射光と多重反射光の BRDF は 2 章で述べた指向性アルベド項を用いて計算し，拡散反射光の BRDF は単一反射光と多重反射光の BRDF を用いて作成した指向性アルベド項を用いて計算する [1]．Imageworks ライティングモデルではこの拡散反射光の指向性アルベド項もテーブルデータとして保存する．環境照明の畳み込み項は元々単一反射光の BRDF にのみ適用されていたため，本稿では式（2）で述べた BRDF を各反射光の BRDF に置き換え，環境照明の畳み込み項を個別で計算することによってテーブルデータを構築する．

Artist Friendly Fresnel による影響． Artist Friendly Fresnel では Schlick Fresnel よりも厳密な金属を描画する

ⓒ 2020 Information Processing Society of Japan

ために reflectivity と edgetint と呼ばれる物理パラメータを調整する [5]．reflectivity は物体表面法線の方向から入射する光のフレネル反射率であり，edgetint は reflectivity によって新たに計算されたフレネル反射率が単調増加する範囲で材質の屈折率を制御するための値である．この edgetint が 0 のときフレネル反射率は最小となり，edgetint が 1 のときフレネル反射率は最大となる．本稿ではこの Artist Friendly Fresnel を単一反射光と多重反射光の BRDF に適用するため，拡散反射光の指向性アルベド項と環境照明の畳み込み項の次元数は Artist Friendly Fresnel の物理パラメータの数だけ増加する．これらの項はそのまま計算してテーブルデータとして保存することもできるが，本稿ではこのテーブルデータのサイズを削減する方法を次節で述べる．

3.2 テーブルデータのサイズの削減

拡散反射光の指向性アルベド項．非金属の場合，拡散反射光が支配的となりフレネル反射率はより小さくなるため edgetint も 0 に近い値となる．そのため本稿では edgetint を 0 に固定した拡散反射光の指向性アルベド項を用いることでテーブルデータのサイズを削減する．このテーブルデータは非金属に対して直接利用することができるが，任意の edgetint を持つ半導体に対してこのテーブルデータを用いるとエネルギー保存則を満たさなくなるため，テーブルデータの値を縮小する必要がある．このテーブルデータを縮小する値の上限値 f は拡散反射光の指向性アルベド項 D' を用いると以下の式で与えられる．

$$f(g) = \min_{\{\boldsymbol{\omega_o}\cdot\boldsymbol{n},s,r\}} \frac{1 - D'(\boldsymbol{\omega_o}\cdot\boldsymbol{n}, s, r, g)}{1 - D_0} \tag{3}$$

$$D_0 = D'(\boldsymbol{\omega_o}\cdot\boldsymbol{n}, s, r, 0) \tag{4}$$

ここで D_0 は edgetint を 0 に固定した拡散反射光の指向性アルベド項，r は reflectivity，そして g は edgetint である．この上限値よりも小さな値を上記のテーブルデータに掛け合わせることで半導体でもエネルギー保存則を満たすようになる．この関数は多項式で近似することもできるが，本稿では計算コストを優先して関数 $f'(g) = 1 - g$ を用いてテーブルデータの値を縮小する（図 2）．これにより半導体のエネルギー保存則を満たした上で指向性アルベド項 D_0 のテーブルデータのサイズを削減することができる．

拡散反射光の環境照明の畳み込み項．3.1 節で述べたように Imageworks ライティングモデルは拡散反射光の BRDF を計算するために拡散反射光の指向性アルベド項を用いる．本稿ではこの拡散反射光の指向性アルベド項を用いる代わりに指向性アルベド項 D_0 と関数 $f'(g)$ をこの BRDF で利用する．式 (2) の BRDF をこの改善された BRDF に置き換えると，関数 $f'(g)$ は積分の外に出され分母分子で打ち消しあう．これにより拡散反射成分の環境照明の畳み込み項は edgetint に依存しなくなるため，環境照明の畳み込み項で構築するテーブルデータのサイズを削減することができる．

3.3 半導体のエネルギー保存則

従来の Imageworks ライティングモデルでは金属と非金属のエネルギー保存則を完全に満たしていたが，半導体のエネルギー保存則に関する詳細は明らかではなかった．3.2 節における改善された Imageworks ライティングモデルは Artist Friendly Fresnel を用いており，全ての reflectivity と edgetint でエネルギー保存則を満たす．また改善された Imageworks ライティングモデルと従来の Imageorks ライティングモデルで作成する指向性アルベド項のテーブルデータの次元数は同一であるため，本稿で改善された Imageworks ライティングモデルは従来の Imageworks ライティングモデルとほぼ同じコストでエネルギー保存則を満たした半導体も描画することができる．

4. 実験結果と今後の課題

本実験では NVIDIA® GeForce® GTX 1070 GPU を用いて Imageworks ライティングモデルを用いた材質の描画時間を計測した．Marmoset Toolbag™ 3 による実装の結果，重点的サンプリング法を用いた描画時間が約 11 ms であるのに対し，Split Integral 法を用いた描画時間が約 0.5 ms であることが確認された（図 1）．両者の結果を比較すると視線方向と法線方向との向きがより離れた物体表面ほど見た目に違いが見られた．これは Split Integral 法で考慮された仮定による誤差であると考えられる．

異方性反射．本実装は異方性反射に対応していないため，今後実装していきたいと考えている．異方性反射を考慮する場合，異方性を制御するための物理パラメータによって Split Integral 法の全てのテーブルデータの次元数が増加してしまう．そのためテーブルデータの削減や近似ができないかどうか今後検証していきたい．

参考文献

[1] Kulla C. and Conty A.: *Revisiting Physically Based Shading at Imageworks*, In Proceedings of the ACM SIGGRAPH 2017 Courses (2017).
[2] Colbert M. and Krivanek J.: *GPU-based Importance Sampling*, In GPU Gems 3 (2007).
[3] Karis B. : *Real Shading in Unreal Engine 4*, In Proceedings of the ACM SIGGRAPH 2013 Courses (2013).
[4] Schlick C.: *An Inexpensive BRDF Model for Physically-based Rendering*, Computer Graphics Forum, Vol. 13, No. 3, pp. 233–246 (1994).
[5] Gulbrandsen O.: *Artist Friendly Metallic Fresnel*, Journal of Computer Graphics Techniques (JCGT), Vol. 3, No. 4, pp. 64–72 (2014).

ⓒ 2020 Information Processing Society of Japan

正誤表

下記の箇所に誤りがございました．お詫びして訂正いたします．

訂正箇所	誤	正
3 ページ 式(3)	$f(g) = \min_{\{\boldsymbol{\omega_o}\cdot\boldsymbol{n},s,r\}} \frac{1 - D'(\boldsymbol{\omega_o}\cdot\boldsymbol{n},s,r,g)}{1 - D_0}$	$f(g) = \min_{\{\boldsymbol{\omega_o}\cdot\boldsymbol{n},s,r\}} \frac{D'(\boldsymbol{\omega_o}\cdot\boldsymbol{n},s,r,g)}{D_0}$

ⓒ2020 Information Processing Society of Japan