

表面下散乱を考慮した蛍光現象のスペクトラルレンダリング

釘田尚弥¹⁾(学生会員) 金田和文¹⁾(正会員) ライチェフビセル¹⁾(非会員) 玉木徹²⁾(非会員)

1) 広島大学 大学院工学研究科 情報工学専攻 2) 名古屋工業大学 大学院工学研究科 情報工学専攻

Spectral Rendering of Fluorescence on Translucent Materials

Masaya Kugita¹⁾ Kazufumi Kaneda¹⁾ Bisser Raytchev¹⁾ Toru Tamaki²⁾

1) Department of Information Engineering, Graduate School of Engineering, Hiroshima University

2) Department of Computer Science, Nagoya Institute of Technology

{masaya-kugita}@hiroshima-u.ac.jp

概要

波長依存性の高い蛍光現象を表現するためには光のスペクトルを考慮してレンダリングを行う必要がある。さらに、蛍光物質を含有した半透明媒質では表面下散乱を考慮した蛍光現象のレンダリングが必要となる。本論文では大域照明環境下における表面下散乱を考慮した蛍光現象のスペクトラルレンダリング手法を提案する。提案手法では、蛍光現象の物理的特性に基づき PPPM(確率的漸進的フォトンマッピング)法を用いてレンダリングを行う。光の成分を蛍光、単散乱光、多重散乱光の3成分に分けてフォトンマップに格納することにより、表面下での光の散乱・吸収を考慮した蛍光現象を表示する。計算効率化と表面下からの光の出射点を確率的に決定するために新たにフォトンパワーテーブルを導入する。提案手法を用いて蛍光物質を含有した半透明媒質をレンダリングし、その有用性を示す。

Abstract

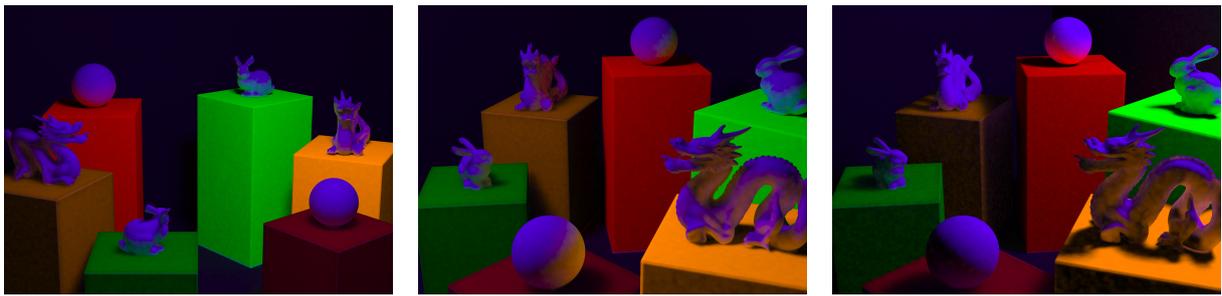
To render fluorescence, a wavelength dependent phenomena, we need to take into account the spectral distribution of light. Moreover, for translucent fluorescent medium we need to consider subsurface scattering. We propose a spectral rendering method to render fluorescence on translucent materials under global illumination environment. The proposed method is based on the physical properties of the fluorescence phenomena and rendered in a Probabilistic Progressive Photon Mapping method. By separating the power of photons into 3 elements (fluorescence, single scattering, multiple scattering), our method realizes fluorescence taking into account the scattering and absorption of light under the surface. We also introduce the Photon Power Table used for calculating the illuminance efficiently and deciding the outgoing point of light probabilistically. Finally, we show the usefulness of our method by demonstrating the rendered image.

1 はじめに

コンピュータグラフィックスの分野においてより写実的なシーンをレンダリングするために様々な研究が行われてきた。虹や多層薄膜における干渉現象、蛍光現象などは波長依存性の高い光学現象である。これらの現象が

含まれるシーンをレンダリングするためには光のスペクトルを考慮してレンダリングする必要がある。

レンダリングには RGB の 3 成分で照明計算を行う RGB レンダリングと光のスペクトルを考慮したスペクトラルレンダリングに分類される(図 2 参照)。現在ゲームや映画、アニメーションで利用されているレンダラー



(a) 3種類の蛍光物質と表面下散乱あり/なし2種類の属性を持つ角柱のシーン

(b) 視点位置を変更した例

(c) (b)の光源位置を変更した例

図1 提案手法による表面下散乱を考慮した蛍光現象のレンダリング

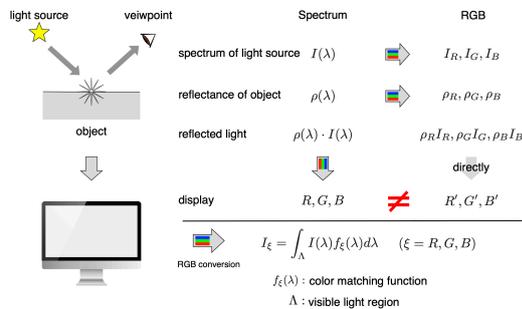
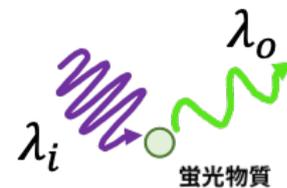


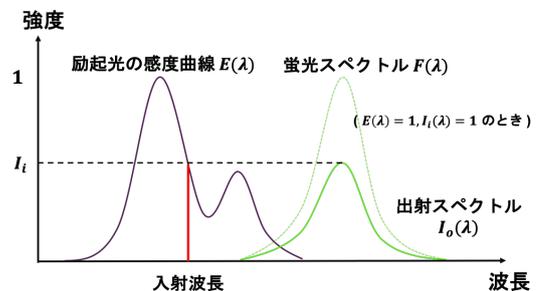
図2 RGBレンダリングとスペクトラルレンダリング

の多くはRGBレンダリングを採用している。しかし、RGBレンダリングでは光の物理シミュレーションを行う前に人の知覚に依存した色空間に変換をして計算を行うため、光学現象を物理的に正しくシミュレーションすることはできない。物理的に正しい光のシミュレーションを行うためには光のスペクトルを考慮したレンダリングを行う必要がある。近年、波長依存性の高い光学現象のレンダリングにおいて、スペクトラルレンダリングの研究が盛んに行われている [1]。

波長依存性の高い光学現象の一つである蛍光は、蛍光物質がある特定の波長の光を吸収し、吸収したエネルギーによって別の波長の光を発光する現象である (図3(a) 参照)[2]。蛍光現象には大きく2つの特徴がある。1つは、蛍光物質にエネルギーを与える光である励起光の波長と蛍光として放出される光の波長が異なるという特徴である。蛍光として放出される光の波長は、励起光の波長よりも常に長くなる。これをストークスの法則という。したがって、可視光ではない紫外線によって蛍光物質が照らされた場合、紫外線よりも長波長の光が蛍光として発せられ可視光として観測される。もう1つの特



(a) 入射光と蛍光の波長



(b) 蛍光物質の特徴 (感度曲線と蛍光スペクトル)

図3 蛍光現象

徴は、励起光が変化しても、蛍光として放出される出射スペクトルは蛍光スペクトルの相似形になるということである (図3(b) 参照)。

最先端の研究では大域照明環境下における重点的サンプリングを用いた蛍光物質のレンダリング手法 [3] やBBRRDFを用いて反射特性と蛍光特性を組み合わせる蛍光を表現する手法 [4] が開発されている。また、表面下散乱を考慮した蛍光の表現 [5] についても研究が行われている。蛍光物質を含有する石 (蛍光鉱物)[6] や液体

などを表現するためには、表面下で起こる蛍光現象と光の散乱の両者を考慮する必要がある。表面下散乱を考慮してレンダリングすることで蛍光物質を含む半透明媒質をリアルに表現することができる。

本論文では PPPM(確率的漸進的フォトンマッピング)法 [7] を用いて、大域照明環境下における表面下散乱を考慮した蛍光現象のレンダリング手法を提案する。フォントトレースの際に光を蛍光現象、単散乱、多重散乱のそれぞれに寄与する光の成分に分けてフォトンマップに格納することで、媒質内部での蛍光現象と光の散乱・減衰を合わせて表現することができる。また提案手法では、計算効率化のために3種類のフォトンパワーテーブル(以降 PPT)を予め作成する。これらの PPT は計算効率化だけでなく、フォトンの入射点から表面下散乱後の出射点までの距離を確率的に決定する際にも用いることができる。

2 関連研究

大域照明環境下での蛍光現象のレンダリング法として Yamamoto ら [3] は光源のスペクトルと蛍光物質の発光スペクトルを考慮した多重重点的サンプリングによるスペクトラルレンダリング手法を開発した。Yamamoto らは前述の蛍光現象の2つの特徴を考慮して蛍光物質をモデル化した。

Jung ら [4] は蛍光面での蛍光発光と非蛍光成分による反射を表現するために BBRRDF(Bispectral Bidirectional Reflection and Reradiation Distribution Function) を提案した。BBRRDF では、蛍光面に含まれる蛍光成分の割合 $c \in [0, 1]$ をパラメータとして用いている。

Abdellah ら [5] は光の散乱を考慮した蛍光を表現するためにボリュームレンダリングを用いたパストレーシング法を拡張し、すべての経路における蛍光現象の有無を確率的にサンプリングする手法を開発した。通常のパストレーシングと異なり、蛍光現象が起こると確率的に決定された経路のみが寄与として輝度計算に貢献する。この手法の問題点は、蛍光現象の処理のために地点間を接続して経路を構築しても、蛍光現象が起こらないと確率的に決定された場合は輝度計算に貢献せず、計算効率の低下を招くことである。また、ボリュームパストレーシングを用いた半透明媒質の表示は物理的に正確な散乱の計算を行うことができるが、一般的にはレンダリングに

は長時間かかってしまうという問題もある。

提案手法では蛍光現象の2つの特徴に基づく Yamamoto らのモデル [3] に基づいて、これを表面下散乱を取り扱うことができるように拡張する。レンダリング手法に PPPM(確率的漸進的フォトンマッピング)法 [7] を採用し、光の成分を蛍光、単散乱光、多重散乱光、の3成分に分けてスペクトル分布を持ったフォトンマップに格納することにより、蛍光と表面下散乱の2つの現象を効率よくレンダリングする。そして、各レンダリングパス開始時に波長をサンプルし、同一のレンダリングパスでは同じ波長を利用することにより処理の単純化をはかる。また、Jung ら [4] と同様に、蛍光面に含まれる蛍光成分の割合をコントロールできるようにレンダリング手法の拡張を行い、蛍光現象の表現力を高める。すなわち、蛍光物質の割合に応じて蛍光と表面下散乱の照明計算を分けて行ない、それらを統合することにより両者を考慮した画像を生成する。

大理石や液体などの半透明媒質を表現するためには物質表面における光の反射だけでなく、表面下で起こる光の散乱を考慮する必要がある。Jensen ら [8] は BSSRDF を多重散乱項 S_d と単散乱項 $S^{(1)}$ に分けてモデル化した。そして多重散乱項については光が入射した地点の真下と真上に正と負の仮想点光源を配置するダイポールモデルを開発した。提案手法では、表面下散乱における多重散乱成分には Jensen らのダイポールモデルを用いる。実験では物質に落ちる影の境界に着目し、表面下散乱の効果を検証する。

3 表面下散乱を考慮した蛍光現象のスペクトラルレンダリング

3.1 提案手法の概要

提案手法では表面下での蛍光成分の割合を $c \in [0, 1]$ 、散乱成分の割合を $1 - c$ とする。また、前提条件として表面下での蛍光物質を含む媒質の厚みは十分厚いと仮定する。

提案手法の処理の流れを図4に示す。

まず、前処理として、表面下での蛍光の減衰、単散乱、多重散乱の計算を効率化するために3種類の PPT を作成する(前処理)。詳細は3.6節で述べる。

フォントトレースの際には、蛍光成分の割合 c に応じたロシアンルーレットにより表面下でフォトンが蛍光物

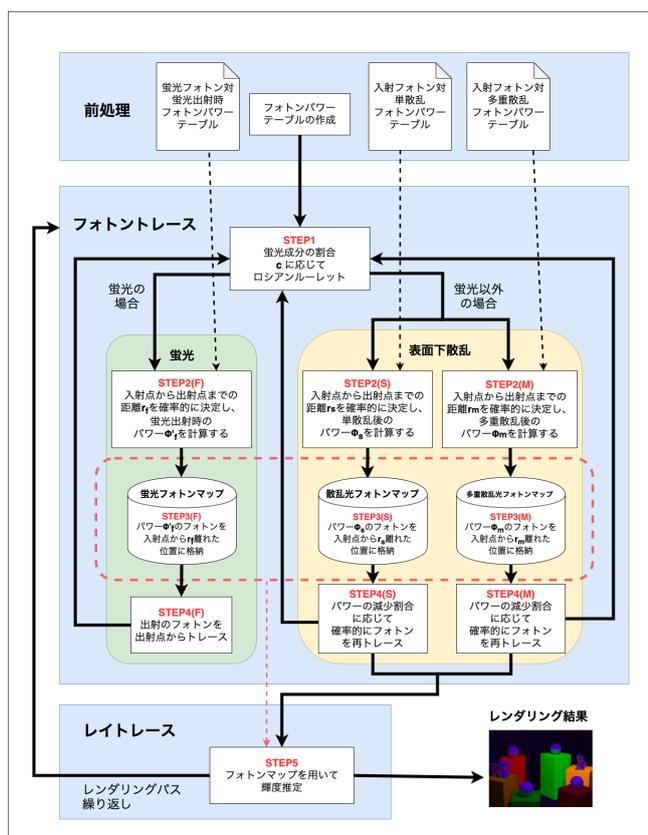


図4 提案手法の流れ
(実線は処理の流れ, 点線はデータの流れを示している)

質と衝突するか否かを確率的に決定する (STEP1).

蛍光物質と衝突すると判定された場合は、蛍光発光した光が表面下の散乱媒質を通過し出射点から出射するときのパワーを計算する (STEP2(F)). 計算の際には前処理で作成した蛍光フォトン対蛍光出射時 PPT を用いる。また、入射点から出射点までの距離を確率的に決定する際にも、このテーブルを用いる。

次に STEP2(F) で計算したフォトンパワーをフォトンマップに格納する (STEP3(F)).

その後、フォトンを出射点から再びトレースする (STEP4(F)).

蛍光物質には衝突しないと判定された場合は単散乱と多重散乱のフォトンパワーを計算する。STEP2(F)と同様に、計算には前処理で作成した入射フォトン対単散乱 PPT と入射フォトン対多重散乱 PPT をそれぞれ用いる。また、入射点から出射点までの距離についてもテーブルを用いて確率的に決定する (STEP2(S) と STEP2(M)). ここで、散乱後のフォトンと蛍光物質との衝突は考慮しないものとする。これは散乱後のフォト

ンはパワーが減衰し蛍光発光への寄与は小さいためである。

STEP2(S) と STEP2(M) で計算したフォトンパワーをそれぞれフォトンマップに格納する (STEP3(S) と STEP3(M)).

単散乱と多重散乱後のフォトンの再トレースについては、失われたパワーの割合に応じて再トレースを行うかどうかを確率的に決定する (STEP4(S) と STEP4(M)).

最終段階のレイトトレースでは分けて格納した蛍光、単散乱光、多重散乱光による3種類のフォトンマップを合わせて輝度推定に用いる。フォントトレースでフォトンの種類を分けてフォトンマップに格納し、レイトトレースの際に合わせて輝度推定を行うことで表面下散乱を考慮した蛍光現象を表示することができる (STEP5).

3.2 蛍光

蛍光物質と衝突するフォトンの経路を図5に示す。まず、入射点 x_i から入射したフォンは経路 t を通過し蛍光物質と衝突する。蛍光物質の含有割合に基づいて確率的に蛍光物質との衝突が決定されているため、経路 t 間で散乱は生じない。蛍光物質との衝突により蛍光発光したフォンは経路 s_2 を通過し、入射点 x_i から距離 r_f 離れた出射点 x_o から出射する。入射点からの距離 r_f は蛍光フォトン対蛍光出射時 PPT の全波長での平均値分布 (図8(a) 参照) に基づいて逆関数法を用いて確率的に決定する。

入射時のフォトンパワーを $\Phi_p(\lambda_i)$ とすると蛍光によるフォトンパワー $\Phi_f(\lambda)$ は次式で表される。

$$\Phi_f(\lambda) = K(\Phi_p(\lambda_i))F(\lambda) \quad (1)$$

ここで、 $F(\lambda)$ は蛍光スペクトルであり、励起係数 $K(\Phi_p(\lambda_i))$ は次式で表される。

$$K(\Phi_p(\lambda_i)) = \eta \int_{\Lambda} \Phi_p(\lambda_i) E(\lambda_i) d\lambda_i \quad (2)$$

ここで、 $E(\lambda_i)$ は波長 λ_i の励起光に対する感度、 Λ は波長領域、 η は蛍光係数 ($\eta = 2.0 \times 10^{-2}$) である。蛍光発光し出射点から出射するまでに経路 s_2 間で散乱・吸収によりフォトンパワーは減衰する。出射点 x_o でのフォトンパワー $\Phi'_f(\lambda)$ は経路 s_2 間での減衰を考慮して次式により計算される。

$$\Phi'_f(\lambda) = \Phi_f(\lambda) \int_0^{\infty} e^{-\sigma_i(\lambda)s_2(t)} dt \quad (3)$$

ここで $\sigma_t(\lambda)$ は消散係数である.

式 (3) によって求めた光子パワー $\Phi'_f(\lambda)$ と出射点 \mathbf{x}_o を蛍光光子マップに格納する. ここで出射点 \mathbf{x}_o は入射点 \mathbf{x}_i を中心とし, 半径 r_f の円周上をランダムにサンプルした点とする. そして, 蛍光によって生じた光子 ($\Phi'_f(\lambda)$) のトレースを繰り返す. このとき新しい光子の出射方向は Jensen らの表面下散乱モデル [8] と同様に, 表面下からの透過を完全拡散透過と仮定し, 半球面上をコサインローブに基づいてサンプルする. また, トレースする光子のパワーは STEP2(F) で計算した光子のパワーを使用する.

3.3 単散乱

単散乱を起こす光子の経路を図 6 に示す. 前節の蛍光の場合と同様に, 入射点 \mathbf{x}_i から入射した光子は経路 s_1 を通過し散乱粒子と衝突する. 散乱により光子は進行方向が変えられ, 経路 s_2 を通過し, 入射点 \mathbf{x}_i から距離 r_s 離れた出射点 \mathbf{x}_o から出射する. このとき, 経路 s_1 と s_2 で光子パワーは減衰する. この減衰したパワーが多重散乱成分に寄与する.

出射点 \mathbf{x}_o の決定方法は前節の蛍光の場合と同様に距離 r_s を入射光子対単散乱 PPT を用いて確率的に決定し, 入射点 \mathbf{x}_i を中心とした半径 r_s の円周上の点をランダムサンプルして求める.

入射点 \mathbf{x}_i での光子パワーを $\Phi_p(\lambda)$ とすると, 出射点 \mathbf{x}_o での光子パワー $\Phi_s(\lambda)$ は次式により求められる.

$$\Phi_s(\lambda) = \Phi_p(\lambda)\sigma_s(\lambda)FP(\alpha) \int_0^\infty e^{-\sigma_t(\lambda)(s_1+s_2)} ds_1 \quad (4)$$

ここで, $\sigma_s(\lambda)$ は散乱係数, F は光が物質表面を透過する割合を表すフレネル項, $P(\alpha)$ は位相関数である.

式 (4) によって求めた光子パワー $\Phi_s(\lambda)$ と出射点 \mathbf{x}_o を単散乱光子マップに格納する.

そして, フォトンの再トレースについては失われたパワーの割合に応じてロシアンルーレットにより再トレースを行うかどうかを確率的に決定する. 再トレースする場合には, フォトンのパワーは入射時のパワーを使用し, 出射方向については蛍光の場合と同様にコサインローブに基づいてサンプルする. 確率的に光子の再トレースを決定することにより, パワーの小さい多数の光子が生成されることを防ぎ, 効率よくレンダリングを行うことができる.

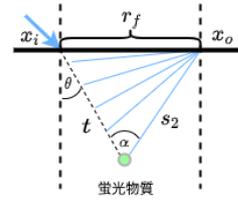


図 5 蛍光物質と衝突する光子の経路

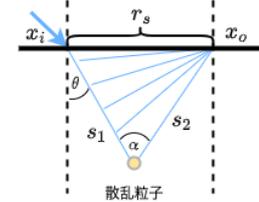


図 6 単散乱の場合の光子の経路

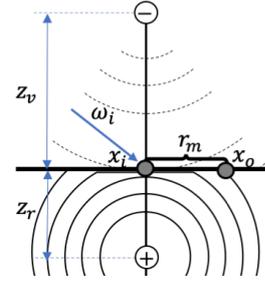


図 7 ダイポールモデル [8] を用いた多重散乱光の計算

3.4 多重散乱

多重散乱光子のパワー $\Phi_m(\lambda)$ は Jensen らのダイポールモデル [8] を用いて次式により求める. (図 7 参照)

$$\Phi_m(\lambda) = \frac{\Phi_p(\lambda)}{4\pi D} \left(\frac{e^{-\sigma_{tr}(\lambda)d_r}}{d_r} - \frac{e^{-\sigma_{tr}(\lambda)d_v}}{d_v} \right) \quad (5)$$

ここで, D は拡散定数, $\sigma_{tr}(\lambda) = \sqrt{3\sigma_a(\lambda)\sigma_t(\lambda)}$, $\sigma_a(\lambda)$ は吸収係数, d_r と d_v はそれぞれ正と負の仮想光源からの距離である.

多重散乱の光子パワー $\Phi_m(\lambda)$ は前節の単散乱の場合と同様に, 出射点 \mathbf{x}_o とともに多重散乱光子マップに格納する. また, 出射点 \mathbf{x}_o を決定する際の距離 r_m は単散乱の場合と同様に入射光子対多重散乱 PPT を用いて確率的に決定する.

光子の再トレースについても, 前節の単散乱の場合と同様に再トレースを行うかどうかを確率的に決定する. 再トレース時の光子パワーと出射方向についても単散乱の場合と同様である.

3.5 輝度推定

レイトレースでは蛍光光子マップ, 単散乱光子マップ, 多重散乱光子マップを合わせて次式

表1 フォトンパワーテーブル

蛍光光子対蛍光出射時光子パワーテーブル	$\frac{\Phi_f'}{\Phi_f}(r_f, \theta, \lambda)$
入射光子対単散乱光子パワーテーブル	$\frac{\Phi_s}{\Phi_p}(r_s, \theta, \lambda)$
入射光子対多重散乱光子パワーテーブル	$\frac{\Phi_m}{\Phi_p}(r_m, \lambda)$

を用いて輝度推定を行う (STEP5).

$$L(x, \omega) \approx \frac{1}{\pi r^2} \sum_{p=1}^N \frac{1}{\pi} (\Delta\Phi_{fp} + \Delta\Phi_{sp} + \Delta\Phi_{mp})$$

$$\approx \frac{1}{\pi r^2} \sum_{p=1}^N (\Delta I_{fp} + \Delta I_{sp} + \Delta I_{mp}) \quad (6)$$

ここで、 $\Delta I_{fp}, \Delta I_{sp}, \Delta I_{mp}$ は計算点 x の近傍に存在する微小領域での蛍光、単散乱光、そして多重散乱光光子による放射強度である。通常の光子マッピング法における輝度推定と異なり、提案手法では3種類の光子マップには表面上での光子パワーを格納している。そして、表面では完全拡散透過を仮定し光子パワー (放射束) から放射輝度を計算している。

3.6 フォトンパワーテーブルの作成

フォントレースごとに各光子のパワーの計算を繰り返すと処理時間がかかってしまう。この問題を解決するために前処理とし光子単位パワーに対する出射光子のパワーをあらかじめ計算しテーブル化しておく (図4. 前処理)。フォントレースの際には、そのテーブルを参照し入射光子のパワーにテーブル参照値を掛けるだけで出射点での光子パワーを計算することができる。すなわち、蛍光光子に対しては、蛍光光子のパワー $\Phi_f(\lambda) = 1$ として、 r_f, θ, λ を変化させて式 (3) を計算し、 $\Phi_f'(\lambda)$ の値をテーブルに格納しておく。出射時の蛍光光子パワーを求める際には、式 (1) で求めた蛍光発光の光子パワー $\Phi_f(\lambda)$ にテーブルの参照値を掛けて光子パワー $\Phi_f'(\lambda)$ を求める。単散乱、多重散乱についても同様である。

前処理で作成する3つのテーブルを表1に示す。

作成したテーブルは処理時間の短縮だけでなく、各光子の入射点から出射点までの距離を確率的に決定する際にも用いる。前述したように入射点からの距離を決定する際には各テーブルの全波長での平均値分布を用いる (図8参照)。図8(a) は蛍光光子対蛍光出射時PPTである。インデックスとして入射点から出射点までの距離 r_f 、波長 λ に加えて屈折角 θ を持つ。図8(a)

表2 シーンデータのパラメータ

光源	BlackLight光源	図9(a)
蛍光物質I	Qdot545(緑)	図9(b)
蛍光物質II	Qdot585(黄)	図9(c)
蛍光物質III	Qdot655(赤)	図9(d)
散乱係数	大理石[7]のRGB成分の $\frac{1}{2}$ を補間	図10(a)
消散係数	大理石[7]のRGB成分を補間	図10(b)

表3 フォトンパワーテーブルのパラメータ

r	入射点から出射点までの距離	0.0 ~ 10.0[mm] 0.1[mm]ごと100サンプル
θ	屈折角	0.0 ~ 90.0[deg] 0.09[deg]ごと100サンプル
λ	波長	300 ~ 795[nm] 5[nm]ごと100サンプル

では屈折角 θ が $\frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{3}$ の例を示している。単散乱、多重散乱についても同様である。ただし、多重散乱を扱う入射光子対多重散乱PPTは屈折角 θ に依存しないため図8(c)では1本の曲線で表されている。

4 結果

4.1 実験設定

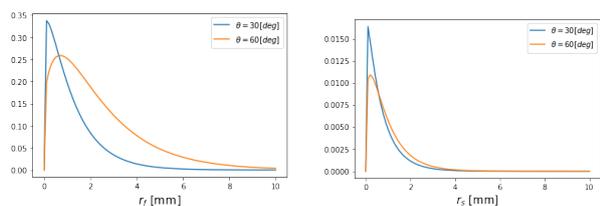
レンダリングに用いた光源や蛍光物質を表2に示す。蛍光物質として光安定性を示し、広い波長帯域幅の励起スペクトルを持つQdotプローブ (緑, 黄, 赤)[2]を用いた。また、式(4)のフレネル項は $F = 1$ と近似し、等方性散乱とし位相関数 $P(\alpha) = \frac{1}{4\pi}$ とする。

PPT作成の際には、表3に示すパラメータを用いて各テーブルを前計算し、JSON(JavaScript Object Notation)形式で記録した。

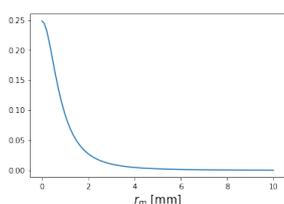
スペクトラルレンダリングでの波長サンプルは300[nm]から780[nm]の波長帯域から1[nm]間隔でランダムサンプルを用いてサンプルした16個の波長成分を用いてレンダリングを行った。また、レンダリングパスについては全ての実験において1024パスとし、レンダリングパスごとに波長をサンプルし直してレンダリングを行った。

4.2 表面下散乱による蛍光面での光のにじみの表現

図12, 図13では表面下散乱を起こす蛍光面に対して影絵を投影することで蛍光のにじみ現象を表現した。表面下散乱を起こす蛍光面と指向性を持つブラックライト

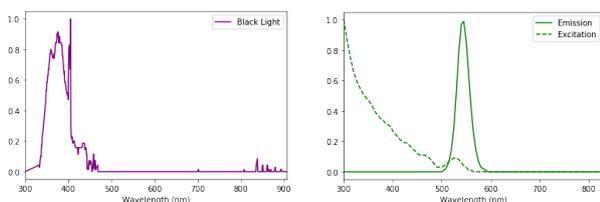


(a) $\frac{\Phi'_f}{\Phi_f}$ (b) $\frac{\Phi'_s}{\Phi_p}$

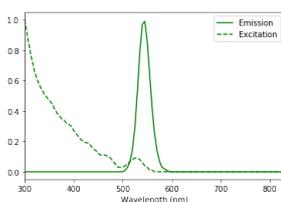


(c) $\frac{\Phi'_m}{\Phi_p}$

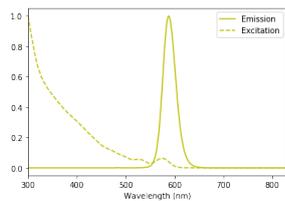
図 8 全波長での平均値分布



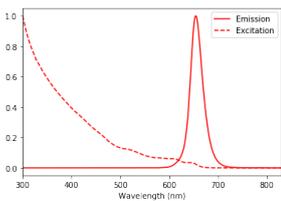
(a) Black light



(b) 蛍光物質 Qdot545



(c) 蛍光物質 Qdot585

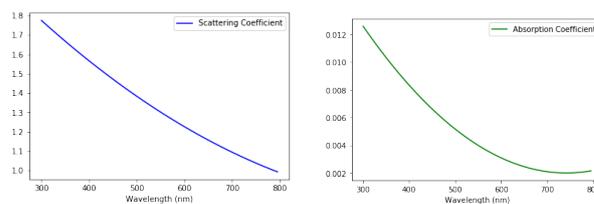


(d) 蛍光物質 Qdot655

図 9 光源と蛍光特性のスペクトル

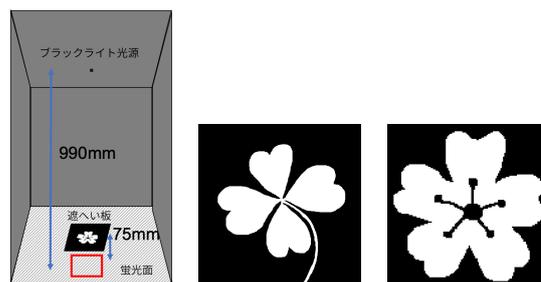
光源の間に遮へい板を設置し図 11(a) に示す蛍光面上の赤枠の矩形領域をレンダリングした。遮へい板は画素値が 1(白) の場合は光子が透過し, 0(黒) の場合は光子が透過しない 2 値画像のテクスチャを貼り付け, 図 11(b) と 11(c) のテクスチャをそれぞれ図 12 と図 13 のシーン設定として用いた。

表面下散乱ありの場合には, 蛍光成分と散乱成分の割合を半々 ($c = 0.5$) としているため, 表面の明るさが表面



(a) 散乱係数 (b) 吸収係数

図 10 散乱係数・吸収係数



(a) シーン概略 (b) 図 12 の場合 (c) 図 13 の場合

図 11 シーン設定

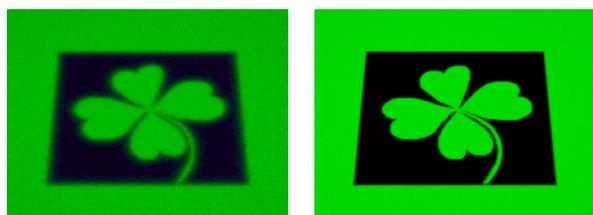
下散乱なし ($c = 1.0$) の場合と比べると暗くなる。両者がほぼ同じ明るさになるように, 表面下散乱ありのシーンにおける光源の強度を調整した。

表面下散乱ありの画像の方がノイズが残っているがこれは, 蛍光に加えて表面下散乱を考慮したためである。図 14 に図 11(b) のテクスチャのシーンにおいて, 表面下散乱ありの場合 (青線) と表面下散乱なしの場合 (橙線) でのレンダリングパスごとの RMSE 誤差を示す。ここでは 10,000 パスでのレンダリング結果を真値画像とし RMSE 誤差を計算している。図中の破線から同程度のクオリティの画像を得るにはおよそ 3.5 倍のパス数が必要になることが確認できる。

図 12(a) と図 12(b), 図 13(a) と図 13(b) を比較すると表面下散乱ありの場合には多少ノイズは残るが, 影絵の模様の輪郭がにじみ, リアリティのある画像が生成できている。

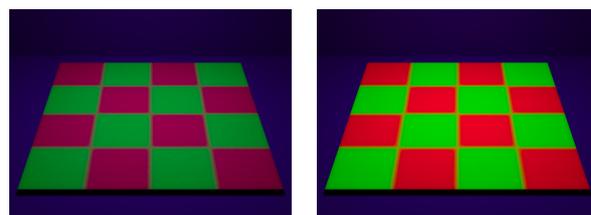
4.3 蛍光成分と散乱成分の変化

図 15 のシーンでは蛍光物質 Qdot545 と蛍光物質 Qdot655 の蛍光タイルを交互に並べた。図 15(a) と図 15(b) は蛍光成分と散乱成分の割合がそれぞれ $c = 0.25$, $c = 0.75$ とした蛍光面 (表面下散乱あり) である。



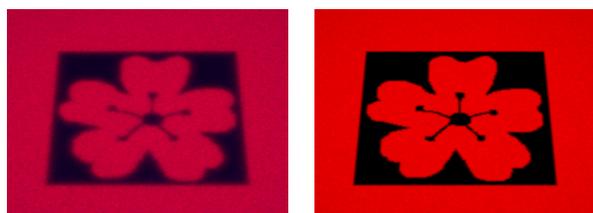
(a) $c = 0.5$ (表面下散乱あり) (b) $c = 1.0$ (表面下散乱なし)

図 12 蛍光物質 Qdot545



(a) $c = 0.25$ (表面下散乱あり) (b) $c = 0.75$ (表面下散乱あり)

図 15 蛍光タイル



(a) $c = 0.5$ (表面下散乱あり) (b) $c = 1.0$ (表面下散乱なし)

図 13 蛍光物質 Qdot655

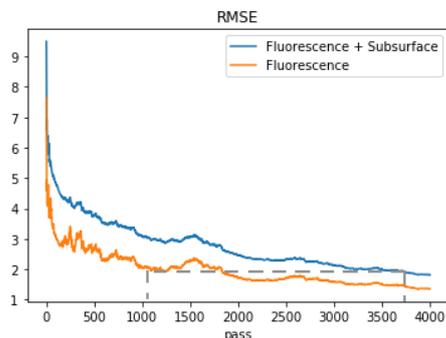


図 14 レンダリングパスごとの RMSE 誤差

図 15(a) に比べ、図 15(b) では蛍光成分の割合が増えるため、蛍光現象がより強く表されている。表面下散乱により、タイルの境界部分で、蛍光物質 Qdot545 の緑色が蛍光物質 Qdot655 の赤色ににじみ出している。

図 16 に示すように、図 17 のシーンではブラックライトと視点の間に遮へい物となる球を設置し、表面下散乱を考慮した円盤状の蛍光パネルをレンダリングした。円盤状の蛍光パネルは 6 分割されており、図 17(a)、図 17(b) における最下部を基準に時計回りで $c = 0.0$, $c = 0.2$, $c = 0.4$, $c = 0.6$, $c = 0.8$, $c = 1.0$ と蛍光成分と散乱成分の割合を変化させた。また、図 17(a) では図 10(a) に示す散乱係数、図 17(b) では図 10(a) の散乱係数の値を 2 倍したものをを用いた。図 17(c) と (d) はそ

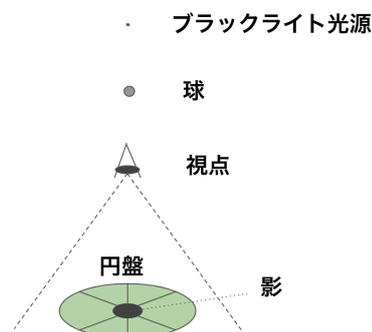


図 16 シーン概略

れぞれ図 17(a) と (b) を拡大した画像である。

図 17 から蛍光成分の割合が多くなるにつれて蛍光現象がより強く表現されていることが確認できる。また、散乱係数の値が小さい図 17(a), (c), のほうが減衰の影響が少なくなるため、球による影での境界部分においてより蛍光のにじみがより広い範囲に表れていることがわかる。

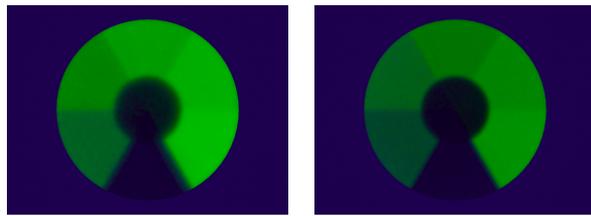
4.4 蛍光による物体の照明

図 18 に示すように蛍光面をもつ 2 本の異なる高さの角柱の手前に球 (完全拡散面 (白)) を設置し、さらにブラックライト光源の前に遮へい物となる球を配置する。また、4.2 節と同様に光源には指向性を持つブラックライト光源を用いる。

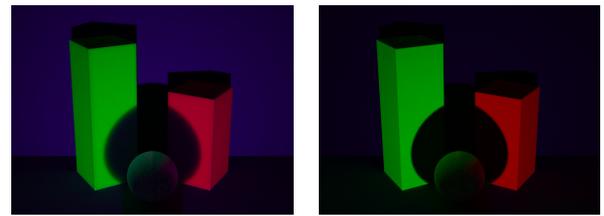
図 19(a) と図 19(b) の角柱の蛍光面での影の境界部分に注目すると、この例でも表面下散乱を考慮した蛍光面では蛍光のにじみが表現されていることがわかる。また、図 19(c) と図 19(d) のクローズアップしたシーンでは、蛍光面での発光が球面を照らしていることが確認できる。

4.5 オブジェクト展示への応用例

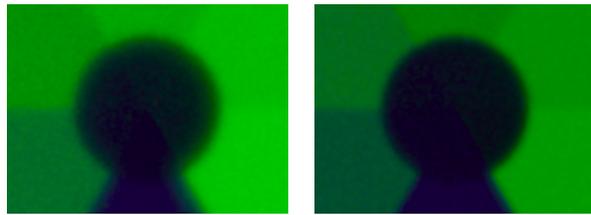
表 2 に示した 3 種類の蛍光物質と表面下散乱あり/なしの 2 種類の蛍光面をもつ角柱を設置してレンダリング



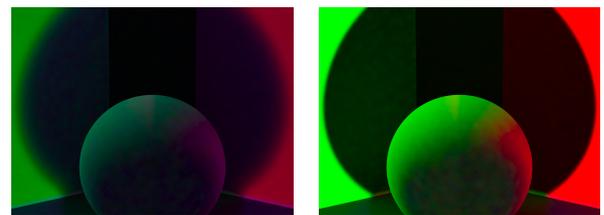
(a) 散乱係数: 図 10(a) (b) 散乱係数: 図 10(a) の 2 倍



(a) $c = 0.5$ (表面下散乱あり) (b) $c = 1.0$ (表面下散乱なし)



(c) (a) のクローズアップ (d) (b) のクローズアップ



(c) (a) のクローズアップ (d) (b) のクローズアップ

図 17 異なる散乱係数

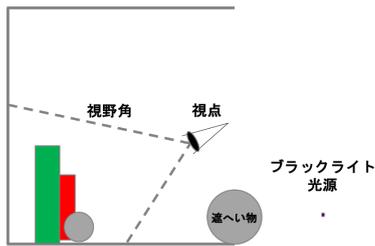


図 18 シーン概略

を行った結果を図 1 に示す。このシーンでは、角柱の上部には完全拡散面 (白) をもつオブジェクト (球, ドラゴン, バニー) を配置した。これらのオブジェクトの色が青色に表示されているのはブラックライト光源に短波長の可視光成分が含まれているためである (図 9(a) 参照)。図 1(a) の手前の 3 つの角柱, 図 1(b), 図 1(c) の左の 3 つの角柱が表面下散乱ありである。表面下散乱ありの方が蛍光現象の割合が少なくなっていることが確認できる。蛍光によって照らされた各種のオブジェクトが綺麗に表現されている。

図 20 はおおよそ同じレンダリング時間において PPT(フォトンパワーテーブル) を用いる場合 (上部) と, PPT を用いずに毎回のパスで蛍光と表面下散乱の照明計算を直接行った場合 (下部) での比較である。PPT を使わない場合だと同じレンダリング時間で 32 パスまでしかレンダリングできずノイズの多い画像になっている。このように, PPT を用いることでより高速にレン

図 19 蛍光によって照らされた球

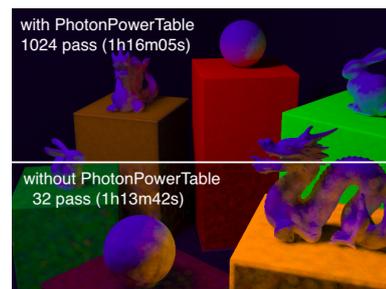


図 20 フォトンパワーテーブルの有無

ダリングを行うことができる。

5 おわりに

本論文では表面下散乱を考慮した蛍光物質のモデル化を行い, 大域照明環境下で物質内部の光の散乱, 減衰を考慮してレンダリングする手法を提案した。フォトン を 3 種類に分けてフォトンマップに格納し, 輝度推定時に合わせて計算することにより, 処理を簡素化して蛍光現象と表面下散乱現象を同時にレンダリングすることができる。また, 前処理として PPT を用意することで効率的にレンダリングを行うことができる。提案手法により表面下散乱を考慮した蛍光面を含むシーンをレンダリングし, 蛍光面での光のにじみ現象をとまなうリアルティある画像を生成することができることを確認し, 提案手法の有用性を示した。

今後の課題として, GPU を用いた表示の高速化や表

面下での透過を扱う際にフレネル項を考慮できるように改良することが挙げられる。また、提案手法では多重散乱光の計算に Jensen らのダイポールモデル [8] を用いているため、表面下散乱を起こす蛍光面が平面または比較的曲率の小さな曲面に限られる。より幅広い蛍光面をレンダリングするためには曲面への対応が必要になる。さらに、蛍光物質を含有する鉱物のリアルな表示に挑戦することも今後の課題である。

参考文献

- [1] S. Ikeda et al. Spectral rendering of interference phenomena caused by multilayer films under global illumination environment. In *ITE Transactions on Media Technology and Applications*, Vol. 3, pp. 76 – 84, 2015.
- [2] 伊東丈夫. 機能を探る quantum dot multiple staining. 顕微鏡, 第 43 巻, pp. 198 – 201, 2008.
- [3] W. Yamamoto et al. Spectral rendering of fluorescence using importance sampling. In *ACM SIGGRAPH Asia 2018 Posters*, 2018.
- [4] A. Jung et al. A simple diffuse fluorescent bbrdf model. In *Proceedings of the Eurographics 2018 Workshop on Material Appearance Modeling (EG MAM'18)*, pp. 15 – 18, 2018.
- [5] M. Abdellah et al. A physically plausible model for rendering highly scattering fluorescent participating media. *CoRR*, Vol. abs/1706.03024, , 2017.
- [6] 山川倫央. 蛍光鉱物&光る宝石ビジュアルガイド: 光る石を楽しむデータ・ブック. 誠文堂新光社, 2009.
- [7] C. Knaus and M. Zwicker. Progressive photon mapping: A probabilistic approach. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 30, pp. 25 – 37, 2011.
- [8] H. W. Jensen et al. A practical model for subsurface light transport. In *ACM SIGGRAPH 2001*, pp. 511 – 518, 2001.

釘田 尚弥



2019 年広島大学工学部第二類情報工学課程を大学院進学のため退学。現在、広島大学大学院工学研究

科情報工学専攻でコンピュータグラフィックスに関する研究に従事。

金田 和文



1982 年広島大学工学部卒業。1984 年同大学院博士課程前期修了。1986 年広島大学工学部助手。1995 年同大工学部助教授。2004 年同大学院工学研究科教授。2020 年同大学院先進理工系科学研究院教授。この間、1991 年より 1 年間米国ブリガムヤング大学客員研究員。

主にコンピュータグラフィックス、可視化などの研究に従事。工博。ACM, 情報処理学会, 画像電子学会, 電子情報通信学会各会員

ライチェフ ビセル



2000 年筑波大学大学院工学研究科電子情報専攻博士課程修了。同年 NTT コミュニケーションサイエンス研究所研究員。2003 年産業技術総合研究所情報技術研究部門博士研究員。2008 年広島大学情報

工学専攻助教, 2018 年准教授, 現在に至る。機械学習, コンピュータビジョン, 自然言語処理, 脳型コンピューティングの研究に従事。工博。

玉木 徹



2001 年名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程情報工学専攻修了。博士 (工学)。同年新潟大学工学部情報工学科助手。2005 年広島大学大学院工学研究科, 2020 年同大先進理工系科学研究科准教授。

2020 年 10 月より名古屋工業大学教授。電子情報通信学会シニア会員, 情報処理学会等会員。コンピュータビジョン, 画像認識の研究に従事。