Vol.2016-CG-162 No.5
2016/2/8

新たな枠組みに基づく三刺激値レンダリング

竹村 義浩[1,a)]　金田 和文[1]　玉木 徹[1]　Bisser Raytchev[1]

概要：レンダリング手法を大別すると，シーンにおける光源の分光放射輝度と物質の分光反射率を予め三刺激値に変換してレンダリングを行う RGB レンダリングと，光源の分光放射輝度と物質の分光反射率を直接用いてレンダリングを行い，表示の際に三刺激値に変換するスペクトラルレンダリングがある．RGB レンダリングでは物理則に基づく正確な光のシミュレーションを行うことができない．一方，スペクトラルレンダリングは可視光域の波長を密にサンプリングして照明計算を行うため計算コストが高くなるという問題がある．本論文では，シーンにおける光源の分光放射輝度と物質の分光反射率が与えられた条件下で，人の視覚特性に基づく等色関数を考慮して光の波長をサンプリングしながらレンダリングを行う三刺激値レンダリングを提案する．提案手法は正確性と低計算コストの両立をめざした新たな枠組みに基づくレンダリング手法である．

1. はじめに

近年，工業デザインや映画，ゲームなど様々な分野で物理ベースレンダリングが注目されている．物理ベースレンダリングでは，光学現象を物理則に基づいてモデル化しレンダリングを行う．

現在利用されている多くのレンダラーは RGB 色空間で照明計算を行う RGB レンダリングを採用している．RGB レンダリングでは照明計算の前にスペクトルを RGB 三刺激値に変換し，RGB 3 成分で照明計算を行う (図 1 参照) [1]．照明計算で得られた RGB 値は直接ディスプレイに表示することができるため，RGB レンダリングはディスプレイデバイス指向の手法であると言える．しかし，RGB レンダリングでは光の物理シミュレーションの前に，人の知覚に依存した色空間に変換してしまうため，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 [2]．

物理的に正しい光のシミュレーションを行うためにはスペクトルを考慮したレンダリングを行う必要がある．スペクトラルレンダリングでは光源の分光放射輝度と物体の分光反射率を直接用いて照明計算を行う．ディスプレイ表示の際には光のスペクトルを等色関数を用いて RGB 三刺激値に変換する (図 1 参照) [1]．スペクトラルレンダリングでは物理則に従った照明計算を行うことができるため，光学現象を正しく表現する真の物理ベースレンダリングと言うことができる．しかし，高精度の照明計算のためには約 400 nm におよぶ可視光域の波長を密にサンプリングする必要があり，RGB レンダリングに比べて計算コストが大きくなってしまう．

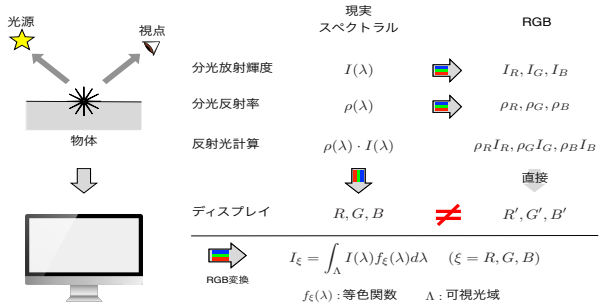


図 1: RGB レンダリングとスペクトラルレンダリングの違い

本研究では，スペクトラルレンダリングの正確性と RGB レンダリングの低計算コストでディスプレイ指向の両者の特徴を兼ね備えたレンダリング手法の開発を目指す．シーンにおける光源の分光放射輝度と物質の分光反射率が与えられた条件下で，人の視覚特性に基づく等色関数を考慮して可視光の波長をサンプリングしながらレンダリングを行う三刺激値レンダリングを提案する．提案手法は真の物理ベースレンダリングであり，かつ計算コストは 3 成分で照明計算を行う RGB レンダリングとほぼ同等である．

2. 物理ベースレンダリング

2.1 レンダリング方程式

物理ベースレンダリングにおいて解くべき照明計算の問

[1] 広島大学 大学院工学研究科 情報工学専攻
Department of Information Engineering, Graduate School of Engineering, Hiroshima University
[a)] takemura@eml.hiroshima-u.ac.jp

© 2016 Information Processing Society of Japan

題はレンダリング方程式に帰着される [3]．このレンダリング方程式に明示的に光の波長成分の項 λ を加えると次式で表される．

$$L_o(\boldsymbol{x},\vec{\omega}_o,\lambda) = L_e(\boldsymbol{x},\vec{\omega}_o,\lambda) + \int_\Omega f_s(\boldsymbol{x},\vec{\omega}_i,\vec{\omega}_o,\lambda)L_i(\boldsymbol{x},\vec{\omega}_i,\lambda)|\vec{\omega}_i\cdot\vec{n}|d\vec{\omega}_i \quad (1)$$

ここで，$L_o(x,\vec{\omega}_o,\lambda)$ は物体表面の点 $\boldsymbol{x}$ から ω_o 方向への波長 λ の放射輝度 (分光放射輝度)，L_e は自発光分光放射輝度，f_s は反射面の分光 BSDF，$\vec{n}$ は点 $\boldsymbol{x}$ における面の法線ベクトルである．

このレンダリング方程式に基づいてピクセル上の点 $\boldsymbol{p}$ から視点方向の分光放射輝度 $L(\boldsymbol{p},\lambda)$ を求めた後，人の知覚特性を考慮して XYZ 表色系へ変換すると三刺激値 X,Y,Z は次式で表わされる．

$$X(\boldsymbol{p}) = \frac{1}{k}\int_\Lambda f_{\bar{x}}(\lambda)L(\boldsymbol{p},\lambda)d\lambda \quad (2)$$

$$Y(\boldsymbol{p}) = \frac{1}{k}\int_\Lambda f_{\bar{y}}(\lambda)L(\boldsymbol{p},\lambda)d\lambda \quad (3)$$

$$Z(\boldsymbol{p}) = \frac{1}{k}\int_\Lambda f_{\bar{z}}(\lambda)L(\boldsymbol{p},\lambda)d\lambda \quad (4)$$

$$k = \int_\Lambda f_{\bar{y}}(\lambda)d\lambda$$

ここで，$f_{\bar{x}}, f_{\bar{y}}, f_{\bar{z}}$ は XYZ 等色関数，Λ は可視光域の波長範囲である．

RGB ディスプレイに表示する際には線形変換により XYZ から RGB に変換が可能である．sRGB 表色系への変換は次式で表される．

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$M = \begin{bmatrix} 3.2404542 & -1.5371385 & -0.4985314 \\ -0.9692660 & 1.8760108 & 0.0415560 \\ 0.0556434 & -0.2040259 & 1.0572252 \end{bmatrix}$$

2.2 RGB レンダリング

RGB レンダリングでは光源の分光放射輝度や物体の分光反射率を等色関数を用いて予め RGB 三刺激値に変換した後，RGB 3 成分についてレンダリング方程式を解く．スペクトルから三刺激値への変換は線形変換ではないので，物理則に従って正しく照明計算するためには前節で述べた手順でレンダリングを行わなければならない．しかし，RGB レンダリングでは三刺激値への変換がレンダリング方程式を解く前に行われており，物理的に正しい照明計算を行うことはできない．光の分散や干渉，回折が生じる光学現象が含まれるシーンをレンダリングする際に特にこのことが大きな問題となる．

2.3 スペクトラルレンダリング

スペクトラルレンダリングでは 2.1 節で述べた手順に従ってレンダリングを行う．その際，光のスペクトル表現方法が重要となる．

シンプルでかつロバストな方法は可視光域の波長をポイントサンプリングしてスペクトルを表現する方法である．Meyer ら [4] は一定間隔毎にサンプルした複数の波長でスペクトルを表現した．照明計算は波長毎の計算となるため，その計算コストは波長サンプル数に比例する．光の分散や干渉，回折などの波長依存性の高い光学現象もサンプリング間隔を密にすることで容易に取り扱うことが可能である．また，滑らかなスペクトルの場合にはサンプリング間隔が疎であっても十分な計算精度が得られる．しかし，輝線スペクトルを含むような険阻なスペクトルの場合は，輝線の波長がサンプルされるようにサンプリング間隔をかなり密に設定しなければならない．

このような問題に対処するために，スペクトラルレンダリングにおける波長サンプリング方法 [5] や波長サンプル数の設定手法 [6] が研究されている．

別の表現方法として，スペクトルを基底関数の線形結合で表現する方法 [7], [8] がある．この方法では，スペクトルを基底関数とその重みで表す．基底関数表現では，シーンに適した基底関数を選択することで少ない次数の基底関数でスペクトル計算を精度よく行うことができる．しかし，輝線を含む場合は必要な基底関数の次数が増大する，直交基底でない場合には基底関数どうしの積の計算が複雑になり計算コストが増大する，波長依存性の高い光学現象の取り扱いが困難であるなどの問題がある．

2.4 モンテカルロレイトレーシング

モンテカルロレイトレーシングにおいて最も基礎的な手法としてパストレーシング法 (PT) [3] がある．パストレーシングではモンテカルロ法を用いて (1) 式のレンダリング方程式の積分項を計算する．統計的なばらつきにより収束過程で各ピクセルの輝度値は真値からの誤差を生じるが，十分な時間をかけることで計算結果が真値に収束することが期待できる．また，反射，屈折を扱える，複雑なモデルも比較的容易に扱えるといった点で優れており，物理則に基づいた大域照明計算手法の主流となっている．

モンテカルロレイトレーシングに属する手法としてプログレッシブフォトンマッピング法 (PPM) [9] がある．PPM では第 1 段階として，視点からレイトレースを行い，非鏡面の物体における衝突点を記録する．第 2 段階では，光源からフォトンの追跡を行い，第 1 段階で計算された衝突点におけるフォトン統計を計算する．さらに PPM はフォトンの追跡を繰り返し，統計量の更新を漸進的に行う．一定量のフォトンの追跡をフォトントレースパスとし，フォトントレースパスを繰り返すことで精度の高い画像を生成で

© 2016 Information Processing Society of Japan

きる．

提案手法では，レンダリング方程式を解く際に，上述の PT と PPM を用いている．

2.5 重点的サンプリング

モンテカルロレイトレーシング法において，分散を低減する方法として重点的サンプリングがある．重点的サンプリングはモンテカルロ法がサンプルに任意の確率密度関数を使用可能なことを利用して，被積分関数にできるだけ比例した確率密度関数に従ってサンプルする．モンテカルロレイトレーシングにおける重点的サンプリングでは，照明計算を高速化するために，光源の配光特性や反射面の BRDF をレイの方向をサンプリングする際の確率密度関数として用いている．

提案手法では，光の波長をサンプリングする際に重点的サンプリングを用いる．

3. 提案手法

本論文で提案する三刺激値レンダリングの基本的なアイデアは，等色関数に基づいて光の波長をサンプリングしながらレンダリングを行うことで，物理ベースレンダリングの正確性を維持したまま計算コストを低減させる．

提案手法の手順は次の通りである．

(i) XYZ 等色関数に基づいた光の波長の重点的サンプリング
(ii) モンテカルロレイトレーシング法を用いた 3 波長での放射輝度計算
(iii) モンテカルロ積分と重点的サンプリングに基づく XYZ 三刺激値計算
(iv) ディスプレイ表示のための XYZ 三刺激値から RGB 値への変換

3.1 波長のサンプリング

スペクトルから XYZ 三刺激値を求める際の各等色関数に基づいて波長の重点的サンプリングを行う．すなわち，XYZ 等色関数 $f_\xi(\lambda)$，$(\xi = \bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ を用いて確率密度関数 (PDF) $P_\xi(\lambda)$ を次式により設定する．

$$P_\xi(\lambda) = \frac{f_\xi(\lambda)}{\int_\Lambda f_\xi(\lambda) d\lambda} \tag{6}$$

確率の値は正であるため，PDF には負の値をもたない XYZ 等色関数 (図 2 参照) を用いる．X 成分を計算する波長をサンプリングするための PDF を図 3a に示す．

PDF $P_\xi(\lambda)$ から累積分布関数 (CDF) $C_\xi(\lambda)$ を求め，逆関数法を用いて XYZ 3 成分を計算するための 3 つの波長 λ_ξ，$(\xi = X, Y, Z)$ を決定する．

$$C_\xi(\lambda) = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda} P_\xi(\lambda) d\lambda \tag{7}$$

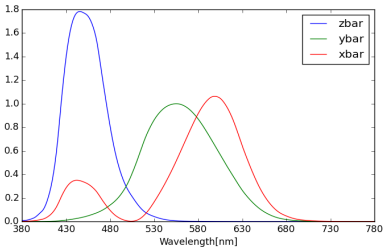
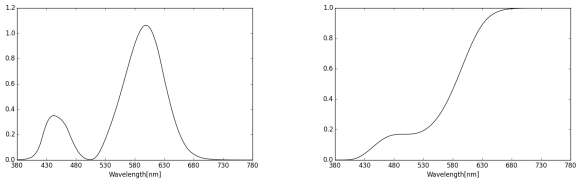


図 2: 視角 2 度の XYZ 等色関数



(a) PDF $P_{\bar{x}}(\lambda)$　　(b) CDF $C_{\bar{x}}(\lambda)$

図 3: 等色関数 $f_{\bar{x}}$ の PDF と CDF

$$\lambda_\xi = C(u)^{-1} \tag{8}$$

ここで，λ_{min} は可視光域の最短波長，u は $[0, 1]$ の一様乱数である．X 成分を計算する波長をサンプリングするための CDF を図 3b に示す．

3.2 3 波長での放射輝度計算

XYZ それぞれの等色関数に基づいてサンプリングした波長 λ_ξ，$(\xi = X, Y, Z)$ を用いて，(1) 式のレンダリング方程式をモンテカルロレイトレーシング法により解いて，各ピクセルにおける放射輝度 $L_\xi(\boldsymbol{p})$，$(\xi = X, Y, Z)$ を算出する．その際，モンテカルロレイトレーシング法のレンダリングパス毎に波長のサンプリングも繰り返し行いながら放射輝度計算を行う．

3.3 XYZ 三刺激値計算

2.1 節で述べた分光放射輝度 $L(\boldsymbol{p}, \lambda)$ から XYZ 表色系への変換の際には，波長 λ に関する積分計算が行われる．提案手法では XYZ 等色関数に基づいて確率的に波長サンプリングを行っているため，レンダリングパス毎の各ピクセルにおける放射輝度 $L_\xi(\boldsymbol{p})$，$(\xi = X, Y, Z)$ を単純に加算し，平均 (期待値) を求めるだけで三刺激値 XYZ 成分を得ることができる．

$$X(\boldsymbol{p}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} L_X^{(i)}(\boldsymbol{p}) \tag{9}$$

$$Y(\boldsymbol{p}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} L_Y^{(i)}(\boldsymbol{p}) \tag{10}$$

$$Z(\boldsymbol{p}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} L_Z^{(i)}(\boldsymbol{p}) \tag{11}$$

ここで，N はレンダリングパスの回数，$L_\xi^{(i)}(\boldsymbol{p})$，$(\xi = X, Y, Z)$

© 2016 Information Processing Society of Japan

はレンダリングパス i で計算した放射輝度である．

3.4 RGB 値への変換

最終的に RGB ディスプレイに画像を表示する際には，2.1 節で述べた (5) 式を用いて，XYZ 三刺激値を RGB 値へ変換する．その際，Photographic Tone Mapping[10] などのトーンマッピング手法を用いて表示を行うことも可能である．提案手法ではレンダリング結果として XYZ 三刺激値が得られるため，RGB 色空間よりも広い色空間を表現することができ，トーンマッピングを施す際にも有利となる．

4. 実験と結果

提案手法を用いて 3 つのシーンについて実験を行った．

比較対象として RGB レンダリング，XYZ レンダリング，スペクトラルレンダリングの 3 つの手法を用いる．各手法はそれぞれ以下の通りである．

RGB レンダリング (RGB): 光源の分光放射輝度と物体の分光反射率を等色関数を用いて RGB 値に変換した後に RGB 3 成分でレンダリングを行う．

XYZ レンダリング (XYZ): 光源の分光放射輝度と物体の分光反射率を等色関数を用いて XYZ 値に変換した後に XYZ 3 成分でレンダリングを行う．

スペクトラルレンダリング (Spectral)： 光源の分光放射輝度と物体の分光反射率のスペクトル分布を直接用いてレンダリングを行う．

提案手法は可視光域の 380-780[nm] を 1[nm] 間隔ごとに離散化した波長からサンプリングを行う．また，スペクトラルレンダリングでは可視光域の全波長サンプル数 400 をレイ，フォトンに割り当ててレンダリングを行う．

レンダリング環境は次に示す通りである．

- OS: OS X EL Capitan(10.11.1)
- CPU: Intel Xeon E5 3.5GHz 6 コア/12 スレッド
- RAM: 64GB DDR3 1866MHz
- 画像サイズ: 640 × 480 ピクセル

スペクトラルレンダリングで十分時間をかけてレンダリングした結果を真値とし，次式を用いて XYZ 三刺激値の誤差 (RMSE) を求め，各手法の評価を行う．

$$\epsilon = \sqrt{\frac{1}{3N_p}\sum_{i=1}^{N_p}\sum_{\xi}(L_{\xi}(i) - L_{\xi,Ref}(i))^2} \qquad (12)$$

ここで，N_p は画像の全ピクセル数，$L_{\xi}(i)$ はピクセル i の $\xi = X, Y, Z$ の強度，$L_{\xi,Ref}(i)$ は真値である．RGB レンダリングでは得られた RGB 値を (5) 式の逆変換を行って XYZ 値に変換し，スペクトラルレンダリングでは得られたスペクトルを (2) 式〜(4) 式を用いて XYZ 値に変換し誤差を算出した．

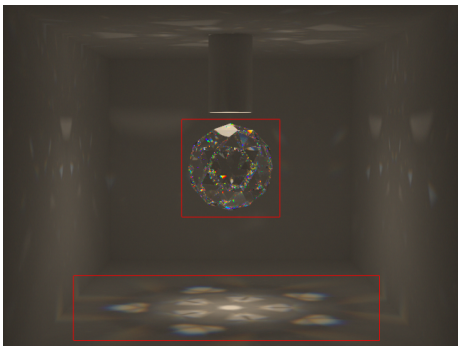


図 4: 分散現象が含まれているシーン（シーン 1）

4.1 分散現象が含まれているシーン (シーン 1)

光源直下にガラスの多面体を配置したシーンである (図 4 参照)．光源から射出されたフォトンの多くがガラスを透過し，光の分散が生じており，床面に虹色のパターンが生じる．光源には D65 光源を使用している．

画像全領域での計算時間と誤差の関係に加えて，光の分散が生じている図 4 の赤線の矩形で示したガラスの多面体領域，ならびに床領域についても誤差を算出した．それぞれの手法の実験結果を図 5 に示す．

画像全領域では提案手法はスペクトラルレンダリングよりも収束が速いことがわかる (図 5a)．RGB と XYZ レンダリングは最初は誤差の減少は速いが，時間をかけても誤差はあまり減少しないことがわかる (図 5a)．図 5b と図 5c より，提案手法が RGB や XYZ レンダリングよりも短時間で誤差が小さくなっている．これは，2.2 節で述べたように RGB レンダリングでは波長依存性の強い光学現象を正しく計算することができないためであると考えられる．スペクトラルレンダリングは提案手法よりも真値への収束が遅い．

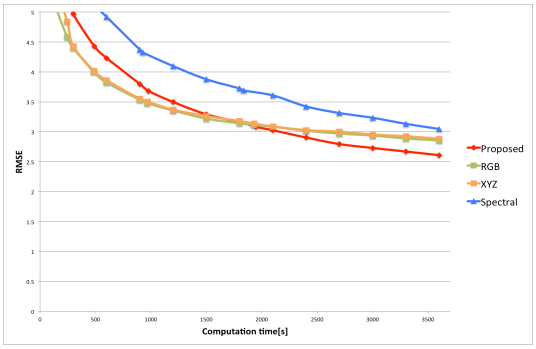
4.2 拡散反射環境でのシーン (シーン 2)

拡散反射物体のみから構成されているシーンである (図 6 参照)．シーンを構成する物体の分光反射率と光源 (D65 光源) の分光放射輝度を図 7 に示す．このシーンを用いて実験を行った結果を図 8 に示す．

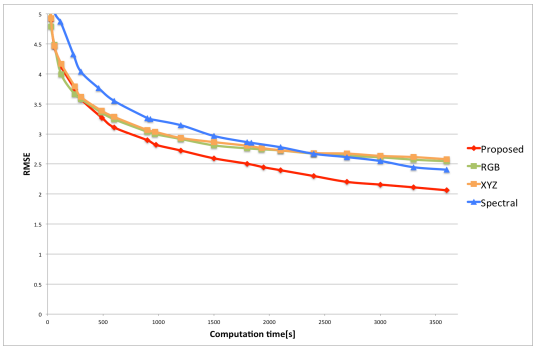
シーン 1 と同様に RGB と XYZ レンダリングは最初は誤算の減少は速いが，時間が経つと誤差が減少しなくなっている．一方，スペクトラルレンダリングは提案手法よりも誤差が小さく，かつ収束も速い．これはパストレースの際に，レイの衝突点計算が衝突点における放射輝度計算よりも高コストであるために，1 本のレイに多くの波長を持たせたほうが計算の効率が良くなるためであると考えられる．提案手法はスペクトラルレンダリングより収束は遅いが，計算時間とともに誤差は減少している．

各手法の計算時間 10 分での誤差を擬似カラーマップを用いて可視化した誤差分布画像を図 9 に示す．擬似カラーマップは図 9d を用いている．

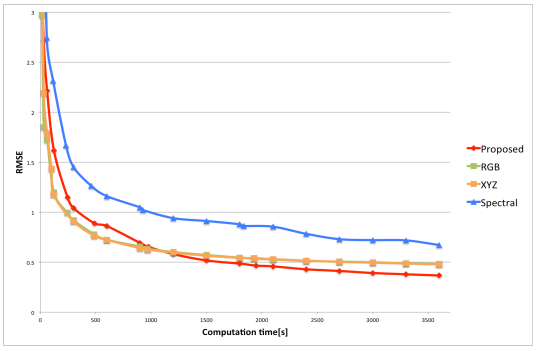
© 2016 Information Processing Society of Japan



(a) 画像全領域

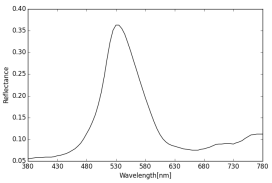


(b) ガラスの多面体領域

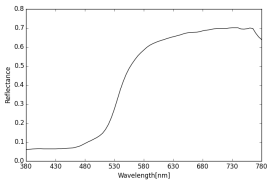


(c) 床領域

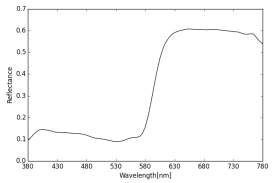
図 5: シーン 1 における各手法の RMSE



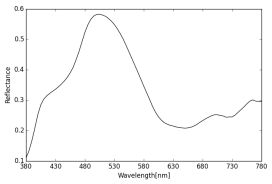
(a) 右壁，左壁，天井，床



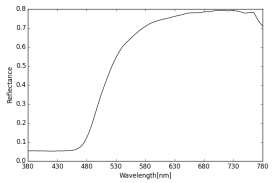
(b) 奥壁 (黄)



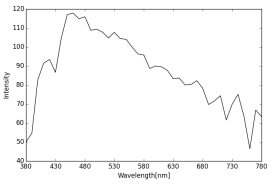
(c) 奥壁 (赤)



(d) 球 (緑)



(e) 球 (黄)



(f) 光源 (D65)

図 7: シーン 2 の分光反射率と分光放射輝度

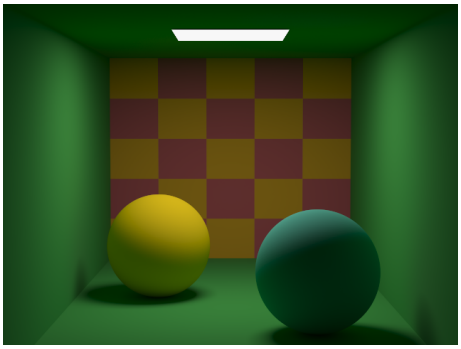


図 6: 拡散反射環境でのシーン (シーン 2)

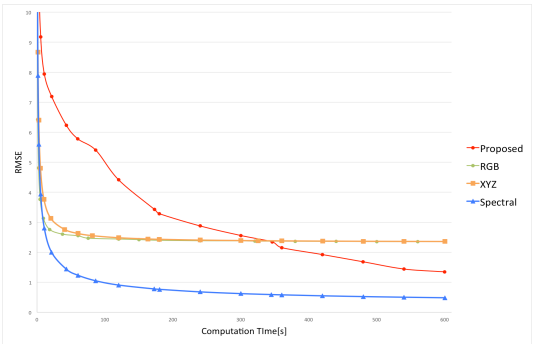
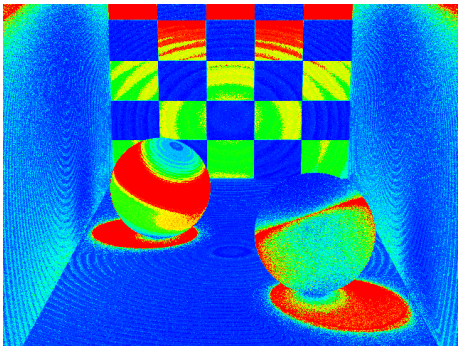
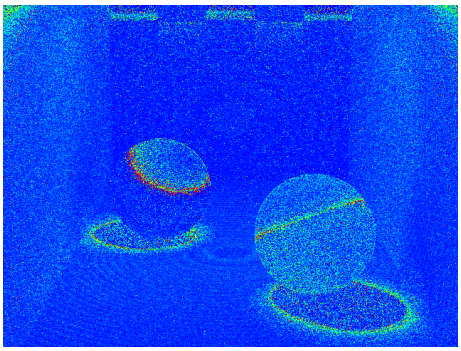


図 8: シーン 2 における各手法の RMSE

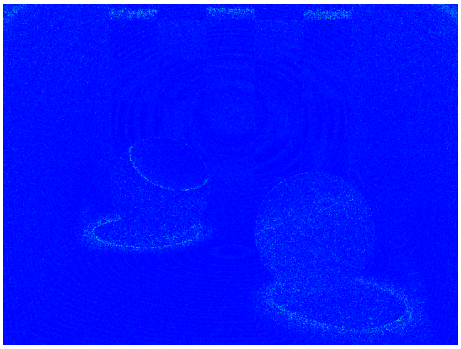
© 2016 Information Processing Society of Japan



(a) RGB レンダリング



(b) 提案手法



(c) スペクトラルレンダリング



(d) 擬似カラーマップ

図 9: シーン 2 の誤差分布画像

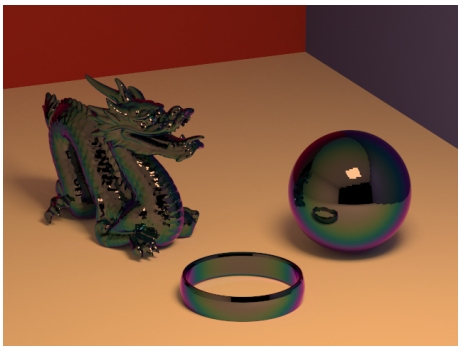


図 10: 干渉現象が含まれているシーン (シーン 3)

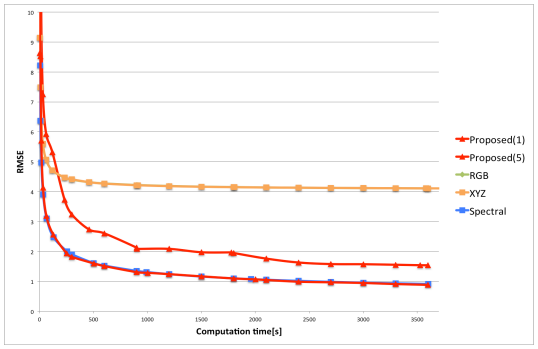


図 11: シーン 3 における各手法の RMSE

4.3 干渉現象が含まれているシーン (シーン 3)

薄膜 (SiO_2) をコーティングしたシリコンの物体 (ドラゴン，球，リング) を配置したシーンである (図 10 参照)．物体表面に干渉色が現れている．光源には F12 光源を使用している．このシーンを用いて実験を行った結果を図 11 に示す．提案手法では XYZ 成分それぞれ波長を 1 つずつサンプルしてレンダリングを行う手法 (Proposed(1)) に加えて，XYZ 成分それぞれ波長を 5 つずつサンプルしてレンダリングを行う手法 (Proposed(5)) での実験も行った．

シーン 2 と同様に Proposed(1) はスペクトラルレンダリングよりも誤差が大きく，収束も遅いが，Proposed(5) ではスペクトラルレンダリングと同等の結果が得られている．提案手法では，XYZ 成分に対して適切な数の波長サンプルを用いることでより速く真値への到達が期待できる．

5. まとめと今後の課題

人の視覚特性に基づく等色関数を考慮して光の波長をサンプリングしながらレンダリングを行う三刺激値レンダリングを提案した．提案手法では XYZ 等色関数に基づいて波長をサンプリングしレンダリングを行うことにより，物理ベースレンダリングの正確性を維持したまま計算コストを低減させることができる．しかし，衝突点計算と衝突点での放射輝度計算のコストの比率から提案手法が常に有利であるとは限らないことがわかった．そして，レイの衝突点計算のコストが高いシーンでは，XYZ 成分に対して複数の波長をサンプリングして割り当てる方法により，効果

© 2016 Information Processing Society of Japan

を改善できることを示した．

今後の課題としては，XYZ 成分に割りあてる波長サンプル数の設定方法の開発や，さらに多様なシーンでの実験を行うことなどが挙げられる．

参考文献

[1] S. Watanabe, S. Kanamori, S. Ikeda, B. Raytchev, T. Tamaki, and K. Kaneda. Performance improvement of physically based spectral rendering using stochastic sampling. In *CCIW 2013*, Vol. 7786 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 184–198, 2013.

[2] N. Isaivathi, S. Ikeda, B. Raychev, T. Tamaki, and K. Kaneda. Research on light light spectrum and color reprensentation in computer graphics rendering. 画像電子学会　第 269 回研究会, 2014.

[3] James T. Kajiya. The rendering equation. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, Vol. 20, No. 4, pp. 143–150, 1986.

[4] Gary W. Meyer. Wavelength selection for synthetic image generation. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, Vol. 41, No. 1, pp. 57 – 79, 1988.

[5] 池田翔, 玉木徹, Bisser Raytchev, 金田和文. スペクトラルレンダリングにおける光の波長サンプリング法の検討. 情報処理学会, Vol. 2015-CG-158, No. 3, pp. 1–6, 2015.

[6] 竹村義浩, 池田翔, 金田和文, 玉木徹, Bisser Raytchev. スペクトラルレンダリングにおける波長サンプル数決定法. Visual Computing/グラフィクスと CAD 合同シンポジウム, pp. 24:1–24:4, 2015.

[7] Mark S. Peercy. Linear color representations for full speed spectral rendering. In *Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH '93, pp. 191–198. ACM, 1993.

[8] Yinlong Sun, F. David Fracchia, Mark S. Drew, and Thomas W. Calvert. A spectrally based framework for realistic image synthesis. *The Visual Computer*, Vol. 17, No. 7, pp. 429–444, 2001.

[9] T. Hachisuka, S. Ogaki, and H. W. Jensen. Progressive photon mapping. *ACM Transaction on Graphics.*, Vol. 27, No. 5, pp. 130:1–130:8, 2008.

[10] Erik Reinhard, Greg Ward, Sumanta Pattanaik, and Paul Debevec. *High Dynamic Range Imaging: Acquisition, Display, and Image-Based Lighting (The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics)*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2005.

© 2016 Information Processing Society of Japan