

分光ベースレンダリングを用いた教材画像の色再現の向上

西野入勇紀 田中法博 望月宏祐 禹 在勇

長野大学 企業情報学部

要旨

本論文では、分光情報と光反射モデル、そして様々な反射モデルパラメータに基づいた教材画像の計測手法とレンダリング手法を提案する。物体の計測はマルチバンドカメラと独自開発の反射光強度分布計測装置を用いる。本手法は計測パートと画像生成パートに分かれる。計測手法の部分では、物体表面の反射特性は反射光強度分布計測装置を用いて入射角や受光角を変えながら画像計測する。画像生成手法では、物体表面の反射特性を記述した光反射モデルをグラフィックスプロセッシングユニット(GPU)に実装して、高精度かつ高速にレンダリングできるようにする。最後に提案手法で実際の物体をCG再現して、視覚的にも本手法の有効性を示す。

Improvement of Color Reproduction of Teaching Material Images Using Multi-spectral Rendering

Youki Nishinoiri, Norihiro Tanaka, Kosuke Mochizuki, and Jae-Yong Woo

Faculty of Business and Informatics
Nagano University

Abstract

In this paper, we propose a method for measuring and rendering teaching material image based on multi-spectral data and various reflection model parameters using both multi-band camera and the apparatus for measuring reflection intensity. The method consisted of a measuring part and a rendering part. In the measuring part, the object surface reflectance is measured using the imaging apparatus. The reflection properties are characterized by capturing the object image at each incident and viewing angles. In the rendering part, a reflection model describing reflectance properties of object surface is developed and the reflection model is implemented to Graphics Processing Unit(GPU) for improving rendering performance. Finally, we render a realistic image of the object and confirm the validity of the proposed method visually.

1. はじめに

美術、理科、社会等の様々な授業において学習者に対して実物にできるだけ近い画像を見せたいという要求が発生することがある。たとえば美術の授業において、美術作品を見せたい場合、多くは様々な要因から実物を直接みせることは難しいことが多い。そのため、これまでは学習者は写真やビデオによる教材画像で美術品を鑑賞することが多かった。この場合、問題となるのが自由に照明の種類や方向、観賞方向を変えたりすることができない。また、写真やビデオでは光沢を含めた精密な色再現が難しいという問題があった。そこで本研究では、分光ベースの3次元デジタルアーカイブ技術[1]を応用して、実際の物体を記録し画像再現するための方法を提案する。本稿では分光反射モデルに基づいて対象となる物体を画像計測し、その画像計測した情報から対象物体を3DCG再現する。ここでは周囲の照明環境や視点位置といった観賞条件の変化にも対応できる手法を提案する。従来のRGBカラー情報では色情報が映像機器の特性や照明環境に依存す

るという問題が生じるため、カメラから得られるRGB値は物理的な根拠を持たない。それに対して分光情報は物体固有の物理情報であるため、映像機器や照明環境に依存しないという利点がある。こういった理由から対象物の記録再現には分光ベースの手法が有効である。一般に3次元レンダリングは物体表面の光反射をモデル化した光反射モデルを用いるが、実在する物体を精密にCG再現するためには、この反射モデルの性能とモデルに与えるパラメータの精度が重要となる[2]。

本研究で提案する方法では入射角や受光角を変化させながら、物体表面の反射光強度分布を計測し、その計測データを反射モデルに適合することで物体表面の反射特性を記録する。ただし、一般的な対象は表面にテクスチャを持つなど反射特性が均一ではないため、対象を画像計測ができることが必要となる。つまり、対象物の色特性を推定するためにはゴニオメトリックに分光画像計測を行う必要がある[1]。

分光画像計測において、分光関数は可視波長域にお

ける連続関数であり、RGB カメラであればそれを3つの領域で粗くサンプリングしていることになるため、絶対的な精度が不足する。特に鮮やかな色、つまりスパイクな分光反射特性を持つ物体の分光反射率推定においてはバンド数の増加は推定精度を向上させるために重要となる。先に述べた RGB カラーカメラの限界から、こういった画像計測による物体表面反射特性推定の精度を向上させるためにはカメラのバンド数を増加させることは有効である。しかし、これまでマルチバンドカメラは、その構造や重量の面からカメラ系を動かすような反射特性計測には不向きであった。そういった問題に対して、最近では RGB カラーカメラに可視波長域の光を選択的に透過できるくし型透過フィルタを用いた軽量のマルチバンドフィルタが使用できるようになってきた。

そこで本研究では、文献[1]で提案した光反射計測系のカメラ部分をマルチバンド化することにより、物体表面の分光画像計測と反射特性計測を同時に行う手法を提案する。対象となる物体は不均質誘電体を仮定する。

しかしながら、教材として物体を 3DCG 再現する場合、色の再現精度とともにインタラクティブ性が重要視され高速なレンダリングが要求される。これら2つの要求は矛盾するもので、高精度な色再現のためには複雑な計算処理が必要となる。

こういった問題に対して GPU と呼ばれるグラフィックス処理専用のハードウェアを使用して、これら2つの要求を同時に満たせるようになってきた。特に分光ベースレンダリングや高精度な反射モデル計算が GPU を用いてリアルタイムにレンダリングできるようになってきた[1]。ただし、これまでの GPU を用いたレンダリングは、主に Zバッファ法がレンダリングアルゴリズムとして用いられている。このアルゴリズムは多重反射や影の計算が難しいという問題点がある。たとえば、一般にゲーム等で用いられている CG の映り込みや影は、一見リアルにレンダリングされているが、実際には近似的な手法が用いられているため、実物と比較した場合には映り込みや影等が精密に表現されていないことが多い[3]。こういった問題はアミューズメント分野ではあまり深刻な問題とはならないが、精密な色再現等を目的とした教材としての用途では致命的な問題となることがある。特に多重反射を表現する場合、光学的な多重反射計算等を行わなければ再現する色が実物と大きくずれる等の問題が表れる可能性が高くなる。

こういった対象にはレイトレーシング法等の大域照明モデルに基づいた映像生成手法が必要となるが、複数の物体間の多重反射の計算が必要となる。こういった

多重反射は OpenGL などのグラフィックス API に実装されているような固定されたレンダリングパイプラインでは計算処理が難しい。そういったことから、近年では NVIDIA 社が提供する CUDA 等の General Purpose Graphics Processing Unit(GPGPU)環境を用いることで大域照明モデルの計算の可能性が高くなってきた。このとき分光画像を用いた IBL やテクスチャマッピングでは画像サイズが極端に大きくなり HOST-GPU 間のバス帯域を圧迫したり、GPU 側のローカルメモリを圧迫したりといった問題を解決するためにはレンダリングアルゴリズムに加えて分光情報の圧縮技術も合わせて必要となる。

本研究ではこういったことから、物体の記録から 3DCG 再現までの処理を分光ベースの光反射モデルに基づいて行う。特に多重反射を含む対象を精密かつ高速にレンダリングするために GPGPU による分光ベースのレイトレーシング手法を提案する。そしてさらに分光情報の統計的性質を用いた分光画像圧縮技術を組み合わせることで分光ベースのレイトレーシング手法を高速化して高精度な色再現に加えてインタラクティブ性も確保する。ただし、本手法では対象の色や反射特性を計測するが、形状計測までは行わない。画像から形状情報を計測するためには別の手法と組み合わせる必要がある[4]。

2. 計測系

本研究では、マルチバンドカメラを用いた画像計測系により対象物体を計測する。市販の RGB カメラにくし型分光透過フィルタを装着して、フィルタ装着時と非装着時の2つの RGB カメラの分光感度が得られる。この2つの状態で撮影した画像を合成することにより2ショット型の6バンドカメラ(マルチバンドカメラ)を構築する[5]。

この計測系で光源からの入射角とカメラ側への受光角といった幾何条件を任意に設定し、そのときの反射光強度を計測する。ここから様々な幾何条件に対する反射光強度分布が得られる。本研究で試作した計測系の概略図を図2に示す。この計測系はデジタルカメラ(Canon EOS 40D)、くし型分光透過フィルタ(NTTデータ)、全周囲計測装置(Texnai AUTO QTVR RC5P-3)、白熱電球、光源クレーン(Libec SK-1000A)、制御用 PC から構成されている。本システムで使用しているカメラは1010万画素の解像度で各画素14bitのダイナミックレンジを持つ。カメラから出力された画像は RAW データとして直接取り出す。この計測系ではカメラは受光角0度から140度までの範囲で、光源は入射角度35度から125度までの範囲で設定可能である。ただし、実際には計測物体を乗せるテーブルは、

10 度から 45 度程度まで傾斜させることが可能なので物体に対して入射角度 0 度(垂直入射)からの計測が可能である。光源角度は 0.5 度単位、カメラの受光角度は 0.1 度単位の精度で設定可能である。ここで光源角度の設定は手動で行うが、カメラの受光角度設定とカメラの制御、撮影データの PC への取り込みは自動制御で行う。



図 1. くし型透過フィルタを装着したマルチバンドカメラ

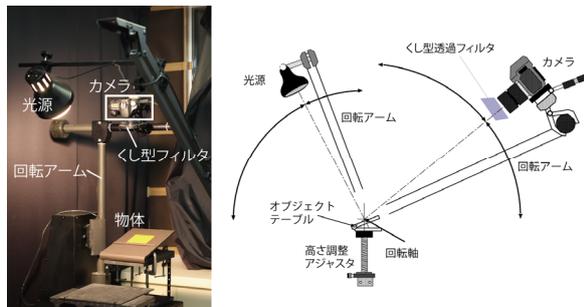


図 2. 光反射計測系の概略図

3. カメラ出力から分光反射率の推定

3.1. カメラ出力のモデル化

マルチバンドカメラから得られるカメラ出力をモデル化する。図 3 はマルチバンドカメラのカメラ出力をモデル化した概略図である。カメラ系に入力する色信号 $C(\lambda)$ は入射角や受光角などの幾何条件を省略すれば、照明光源の分光分布 $E(\lambda)$ と対象物体表面の分光反射率 $S(\lambda)$ から $C(\lambda) = E(\lambda)S(\lambda)$ として記述できる。

次にカメラ出力 ρ は本研究で用いたカメラは 6 つのバンドを持つため、6 つの値を持つ 6.1 のベクトルで示す。これをモデル化すると(1)式ようになる。カメラの分光感度は 6 つのバンドそれぞれに対して $R_1(\lambda)$ から $R_6(\lambda)$ までの 6 つの関数で示す。ここで一つの画素あたりのカメラ出力 ρ を可視波長域(400nm-700nm)に関してモデル化すると次式のようになる。

$$\rho = \int_{400}^{700} C(\lambda) \begin{bmatrix} R_1(\lambda) \\ \vdots \\ R_6(\lambda) \end{bmatrix} d\lambda \quad (1)$$

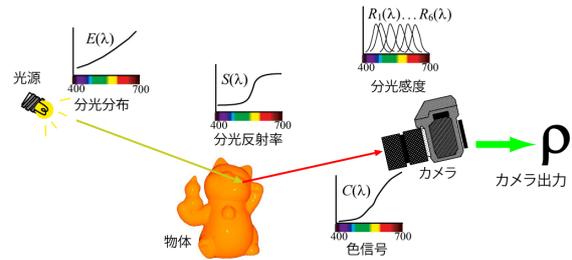


図 3. カメラ出力の分光モデル

3.2. 分光反射率の推定アルゴリズム

多数の色情報からカメラ系の RGB と分光反射率の関係を調べる。カメラと分光放射輝度計で同時に多数のカラーパッチを計測し、その対応関係から求める。分光情報は可視波長域(400nm-700nm)を 5nm 間隔でサンプリングし、61 次元のベクトルとして扱う。データベースに含まれる分光分布の数を m とすると、データベース内の分光分布 Λ は $m \times 61$ の行列で示す。ここから得られた 6 つの主成分ベクトルは、それぞれ 61×1 のベクトル $\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \dots, \mathbf{b}_6$ で示す。このとき、各画素に対応する分光分布を \mathbf{s} とすれば、この最大 6 つの基底ベクトルの線形結合で示すことができる[6][7]。

$$\mathbf{s} = \sum_i^6 w_i \mathbf{b}_i \quad (2)$$

このとき w_1, w_2, \dots, w_6 は、それぞれの基底ベクトルの重み係数である。一度、基底ベクトルが決定されると、分光分布はこの 6 つのスカラ値のみが分かれば元の情報をほぼ復元することができる。つまり、高次元の分光情報が 6 つの数値で表現できる。各画素の重み係数 w_1, w_2, \dots, w_6 から作られた $6 \times m$ の行列を \mathbf{W} 、寄与率の高い順に 6 つの基底ベクトルからつくられた 61×6 の行列 \mathbf{B}' とすると、重み係数行列 \mathbf{W} は \mathbf{B}' の一般化逆行列を用いて次式から推定できる。

$$\mathbf{W} = \mathbf{B}'^+ \Lambda^T \quad (3)$$

カメラ出力の集合は、データベース中の分光分布それぞれに対応させた $m \times 6$ の行列 \mathbf{P} として表す。このカメラ出力 \mathbf{P} を重み係数行列に変換する変換行列は 6×6 の行列 \mathbf{M} とすると、これらの関係は \mathbf{P} の一般化逆行列を用いて次式のように求めることができる。

$$\mathbf{M} = \mathbf{P}^+ \mathbf{W}^T \quad (4)$$

この \mathbf{M} を用いて(2)式から分光分布を推定する。このように \mathbf{M} が求めれば RGB 画像から分光情報への変換が可能となる。

4. 分光ベースの光反射モデル

物体が見えるというメカニズムは光源から出た光が物体表面で反射して視覚系に入射する光反射のプロセスに依存する。この光反射のプロセスを数学的にモデル化したものを光反射モデルと呼ぶ。図 4 は本研究で

用いた光反射モデルの幾何モデルの概略図である。この幾何モデル図は Torrance-Sparrow モデル[8]をベースに微小面モデルに基づいて構築した。V は視線方向ベクトル、N は物体の法線ベクトル、L は照明方向ベクトルである。N と L のなす角は θ_l 、N と V のなす角は θ_r となる。このモデルは表面粗さを表現するため物体表面が微小面で構成されていると仮定している。この微小面の法線ベクトルは H である。L と H のなす角は θ_H であり、N と H のなす角が ϕ である。視覚系に到達する色信号 $C(\lambda)$ は光の波長 λ の関数として次式で記述する。

$$C(\lambda) = \alpha \cos \theta_l S(\lambda) E(\lambda) + \beta \frac{F(n, \theta_H) D(\mu, \phi) G(N, V, L)}{\cos \theta_r} E(\lambda) + \chi F(n, \theta_l) E(\lambda) \quad (5)$$

ここで右辺第 1 項は拡散反射、第 2 項と第 3 項は鏡面反射成分であるが、第 2 項は粗さを持つ表面の鏡面反射(gloss)、第 3 項は滑らかな鏡面(perfect mirror)を示している。S(λ) は物体表面の分光反射率 E(λ) は光源の分光分布である。 α, β, χ はそれぞれ各項の重み係数である。F は Fresnel 関数である。屈折率は実数項が $n(\lambda)$ 、虚数項が $k(\lambda)$ である。D は物体表面の滑らかさを表す微小面の分布関数でありガウス分布を仮定した。ここでは μ 値によって滑らかさが決まる。G は幾何的減衰係数である。分光ベースレンダリングの特徴は、映像デバイスに依存しない画像生成が可能なことである。ここではまず人間の視覚系が受ける色刺激を計算する。視覚系に入射する色信号 $C(\lambda)$ は純粋に物理的な光の分光分布であり(1)式で求められる。人間が受ける色刺激は、ここから等色関数 $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ を用いて三刺激値 CIE-XYZ として求める。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \int_{400}^{700} C(\lambda) \begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix} d\lambda \quad (6)$$

このとき計算される色情報は表示するデバイスの色空間上の色ではなく、まずデバイスに依存しない三刺激値 CIE-XYZ として計算する。次に各ディスプレイの色特性に応じて表示するデバイスの RGB 空間へ変換する[1]。

5. 反射モデル推定

実物を精密に再現するためには光沢も含めた 3 次元 CG 再現では物体表面の反射特性を正確に知る必要がある。このためには物体表面の反射特性を知る必要があるが、これはつまり反射モデルパラメータを推定することに帰着する。入射角と受光角といった幾何条件を変化させながら、物体表面の反射光強度分布の

計測データとモデルをフィッティングすることによりモデルパラメータの推定を行う。ここでは未知変数は、 α, β, μ の 3 つである。これらは次式を最小化することにより求める。

$$\sum_j \left[\alpha \cos \theta_{ij} + \beta \frac{F(n, \theta_{Hj}) D(\mu, \phi_j) G(N_j, V_j, L_j)}{\cos \theta_r} - \rho_{Gj} \right]^2 \quad (7)$$

ここではカメラ出力は green チャンネル ρ_{Gi} を用いた。j は画素位置である。

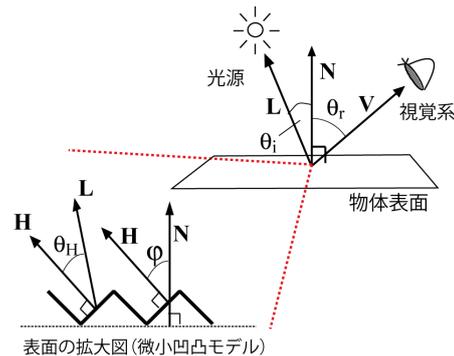


図 4. 光反射の幾何モデル

6. GPUへのレイトレーシング法の実装

6.1. 一般的なGPUによるレンダリング

GPUを用いたレンダリングはOpenGLやDirect3Dのグラフィックスパイプラインの流れに沿って実行される。図2は一般的なGPUのグラフィックスパイプラインを示したものである。近年のGPUでは、図5のパーティックスシェーダとフラグメントシェーダがプログラム可能であるが、パーティックスシェーダは頂点に関する計算を行い、フラグメントシェーダは物体の幾何的な計算が終了した後、ラスタ化された各ピクセルの色計算を行う。分光反射モデルの実装等、独自の反射モデル計算はフラグメントシェーダに実装する。

6.2. レイトレーシング法

本研究では大域照明モデルを実現する手法としてレイトレーシング法を用いた。図6はレイトレーシング法の概略図である。レイトレーシング法では視点からスクリーン上の各画素に対して視線(ray)を出し、反射や透過を繰り返しながら視線を追跡することで光の反射・透過や影(cast shadow)を表現する。

このときレイトレーシング法の処理の流れは各画素に対して以下ようになる。

- (1) プリミティブ (形状) を3次元空間上に配置
- (2) 視点座標変換
- (3) 視線探索(視線と物体の交差判定, 反射・透過による視線の経路の追跡)
- (4) 反射モデルの計算

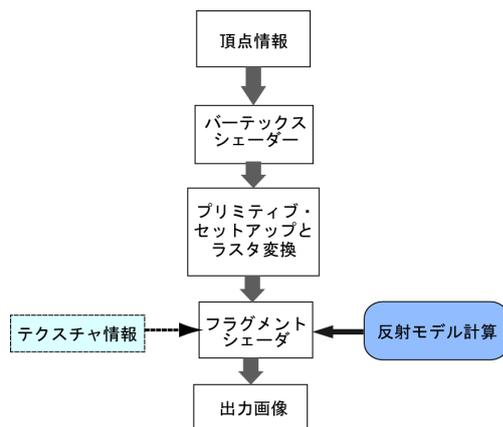


図5. 一般的なGPUのグラフィックスパイプラインと独自の反射モデルの実装

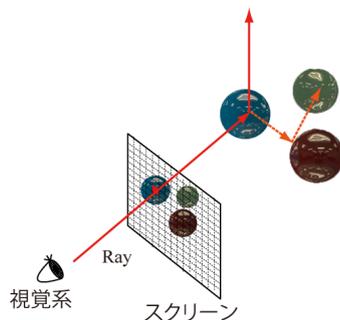


図6. レイトレーシング法の概略図

6.3. GPUにレイトレーシング法の実装

ここではGPU上へのレイトレーシングアルゴリズムの実装方法を示す。レイトレーシングでは視線探索により反射・透過の計算過程が複雑になるため上記のグラフィックスパイプラインに沿って処理を行うことが難しい。レイトレーシング法の特徴は各画素における処理が完全に独立しているため画素単位で並列処理が比較的容易に行えることである。

GPUは内部に多数のプロセッサを持ち、バーテックスシェーダやフラグメントシェーダをGPU内のプロセッサで並列に処理する。特にフラグメントシェーダの処理は画素毎に処理するため画素単位でMIMD (Multi Instruction Multiple Data)型の並列計算機と考えることができる。こういったハードウェアの性質から考えればGPUのフラグメントシェーダにレイトレーシング法を実装することが効率的である。

図7はGPU上のフラグメントシェーダにレイトレーシング法を実装している様子を示したものである。ここで注意すべき点はグラフィックスパイプラインの中でフラグメントシェーダを汎用のプロセッサに見立てて、本来は他のパートで処理すべき点も含めて全ての処理をフラグメントシェーダに実装していることであ

る。このためバーテックスシェーダ等は実質的に本来のグラフィックス処理をしていない。

この方法はGPUの本来のグラフィックスパイプラインを使うのではなくシェーディング言語を用いたGPGPUと同じ考え方で実装している。ただし、レイトレーシング法は画素毎の処理を行うことから、通常のGPGPUで行われる処理よりもフラグメントシェーダの性質に合ったアルゴリズムであるといえる。

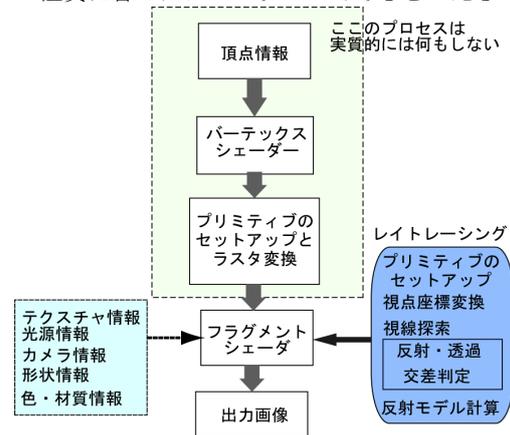


図7. グラフィックスパイプラインへのレイトレーシングの実装法

7. 分光画像圧縮によるレンダリングの高速化

分光ベースレンダリングにおいては IBL(Image Based Lighting)やテクスチャマッピングではRGB画像と比較して画像サイズが極端に大きくなり HOST-GPU間のバス帯域を圧迫したり、GPU側のローカルメモリを圧迫したりといった問題を解決するために分光反射モデルと分光情報の統計的性質を用いた分光画像圧縮技術を組み合わせることでGPU上に分光ベースのレイトレーシングを高速化する。本研究では対象となる一枚の分光画像に対して主成分分析を行い、直接分光分布の基底関数を求める。このことによりスペクトル分布の変動が激しい分光分布であっても圧縮率やデータの復元率の低下は少なくなる。まず圧縮率を決めるために基底関数の数を決定しなければならないが、GPUは画像情報をR,G,B,Aといった4つの数値データで記録することを想定している。またGPUはこのRGBAの4つのデータを同時に処理することを想定して設計されているため、計算処理を4つのパイプラインで同時に計算する一種のSIMD(Single Instruction Multiple Data)型の並列計算機と考えることができる。このため処理単位は4の倍数であることがデータ容量効率上、あるいは処理効率上から考えて望ましい。

7.1. データ圧縮アルゴリズム

データ圧縮はGPUで処理する前にCPU側で計算する。こちらの処理はレンダリングの前処理となるため

事前に計算をしておく。このときの処理は図8のような処理となる。与えられた分光画像は主成分分析して、その基底関数の重み係数画像として記録される。このとき仮に4つの重み係数で表現できるならば圧縮率は4/61となる。

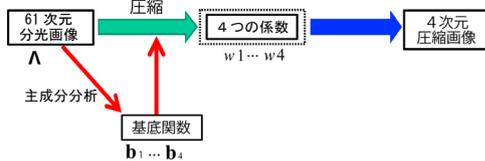


図8. 分光画像の圧縮プロセス (CPU 上での処理)

7.2. GPU を用いた分光画像の復号とレンダリング

ここでは圧縮された分光情報を複合しながらレンダリングしていく手法を示す。図9は本研究で提案するレンダリング処理の過程を示したものである。ここでは分光情報は4次元に圧縮されている。まずレンダリングプロセスに入る前に GPU 側には事前に基底関数を読み込ませておく。その後、実際のレンダリング処理の段階で以下の処理を行う。① CPU から4次元の圧縮画像を GPU 上に転送し、GPU 上のローカルメモリに一時的に保存する。②画素ごとに 61次元の分光分布に復号する。③復号した分光分布を反射モデルに与え色信号を計算する。④得られた色信号から三刺激値計算して色情報を得る。その後、デバイスの色特性に合わせてデバイス固有の色空間に変換する。

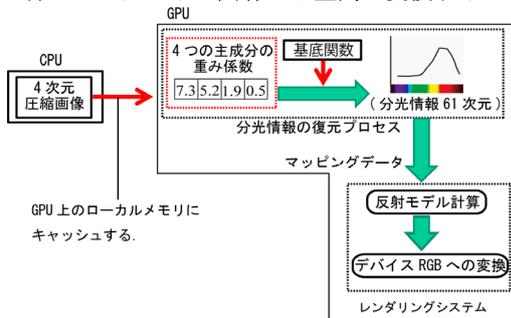


図9. GPUを用いたレンダリング処理の概略図

8. 全方位光源に基づいた反射モデル

全方位光源分布情報に基づいた光反射モデルを計算は周囲に存在する照明光源の足し込み処理となり、光源の数が増えればそれだけ計算量が膨大になる。シーン空間内の全方位に対して光源の反射分布を計算し、光反射計算を一種のルックアップテーブルとして利用する放射照度マップを用いた手法が効果的である。本研究では、分光ベースの放射照度マップを用いた画像生成手法を提案する。拡散反射成分は、Lambert モデルを仮定する。ここで照明光源の拡散反射光強度 $I_d(\lambda, \theta, \phi)$ は次式のように記述する。

$$I_d(\lambda, \theta, \phi) = \sum_j \cos \theta_j(\theta, \phi) E(\lambda, \theta_j, \phi_j) \quad (8)$$

ここで j は画素位置を示す。 j 番目の画素 (光源) の分光分布は $E(\lambda, \theta_j, \phi_j)$, 着目する光源からの入射角は $\theta_j(\theta, \phi)$ である。

実際のシーン内の全方位画像を用いて物体を分光ベースによりレンダリングする。図4は環境光源を用いて分光ベースレンダリングを行っている様子を示したものである。全方位画像と放射照度マップを用いて、鏡面反射は全方位画像を直接使い、また拡散反射は放射照度マップ (反射成分をマップ化) をルックアップテーブルとして用いる。このとき照明方向 (θ, ϕ) に対応する物体表面からの反射光による色信号 $C(\lambda, \theta, \phi)$ は先ほど述べた放射照度マップ I_d と鏡面反射モデル $I_{\text{gloss}}, I_{\text{mirror}}$ を用いて次式のように記述する。

$$C(\lambda, \theta, \phi) = \alpha I_d(\lambda, \theta, \phi) S(\lambda) + \{\beta I_{\text{gloss}}(\lambda, \theta, \phi) + \chi I_{\text{mirror}}(\lambda, \theta, \phi)\} E(\lambda, \theta, \phi) \quad (9)$$

ただし以後は(9)式の $C(\lambda, \theta, \phi)$ は方向パラメータを省略して $C(\lambda)$ と記述する。ここで α, β, χ はそれぞれの項の重み係数である。このとき右辺第一項は他の項と異なり、 I_d の中に照明光の分光分布情報が含まれている。 $S(\lambda)$ は物体の分光反射率、 $E(\lambda, \theta, \phi)$ は (θ, ϕ) 方向に対応する光源の分光分布である。このように物体表面の拡散反射成分は放射照度マップ (拡散反射マップ) I_d を与え、鏡面反射には全方位画像から光源の分光分布 $E(\lambda, \theta, \phi)$ を与えることにより、環境光源によって仮想物体を照明することができる。このことにより周囲の環境光源を考慮した分光ベースのレンダリングが可能となる。

9. 実験

提案手法を用いて実際に存在する物体をCG再現した。ただし、今回は物体の形状は球と板といった単純な形状であるため計測せずに分光情報のみを推定した。複雑な形状を持つ対象の場合は別途レンジファインダ等で形状を計測する。ここではまず長野大学の室内の全方位画像を計測し、そこから 6000×3000 画素の全方位分光画像を生成した。このシーン情報に基づいて実際に存在する3つの球体と1枚の板の3DCG再現を行った。この再現結果と実物とを比較した様子を図10に示す。このとき反射の打ち切り回数は5回と設定した。球体にはそれぞれ分光反射率を与えて分光ベースのレイトレーシング法でレンダリングしている。実物と再現CGを比較すると相互反射や周囲環境の映り込みも含めて再現できていることがわかる。このときのレンダリング速度はNVIDIA社製GeForce GTX295を用いて約30fpsの速度が得られた。一般的に30fpsあれ

ばリアルタイムレンダリングと呼ぶことができることから、今回の条件においてリアルタイムレンダリングができていることがわかる。



図10. 提案手法で生成したCG画像と実物との比較

10. まとめ

本論文では学習者に対して実物にできるだけ近い画像を見せるため、分光ベースの3次元デジタルアーカイブ技術を応用して、実際の物体を記録し画像再現するための方法を提案した。ここではマルチバンドカメラと光反射計測系を用いて高い精度で分光反射率情報に加えて、物体表面の反射特性を計測した。次に分光ベースのレイトレーシングアルゴリズムにより物体間の相互反射を含めて高い色再現精度で物体を3DCG再現することができた。

参考文献

- [1] 田中法博, 望月宏祐 他: 物体表面の反射特性と分光反射モデルに基づいたリアルタイムレンダリング手法, 日本感性工学会論文誌, Vol.9, No. 2, 11 pages, 2010.
- [2] 田中法博, 富永昌治: 3次元反射モデルの解析と推定, 情報処理学会論文誌 CVIM, Vol.41, No. SIG 10(CVIM 1), pp.1-11, 2000.
- [3] R. Fernando et al., GPU Gems: Programming Techniques, Tips and Tricks for Real-Time Graphics, Addison-Wesley Professional, 2004.
- [4] 西野入勇紀, 宮下朋也, 田中法博, 禹在勇: 画像計測に基づいた物体の形状と分光反射率推定, 計測自動制御学会中部支部シンポジウム 2009 講演論文集, pp. 23-26, 2009.
- [5] 橋本勝: 浮世絵の6バンド撮影と分光スペクトル分析, カラーフォーラム JAPAN, pp. 63-66, 2008.
- [6] J. Cohen, Dependency of the spectral reflectance curves of the Munsell color chips, Psychonomical Science, Vol. 1, pp.369-370, 1964.
- [7] M. J. Vrhel, et al. :Measurement and analysis of object reflectance spectra, Color Res.andApp., Vol.19, pp.4-9. 1994.

- [8] K. E. Torrance and E. M. Sparrow: Theory for off-specular reflection from roughened surfaces, J. of Optical Society of America A, Vol.57, No.9, pp.1105-1114, 1967.