

GPU を用いた分光ベースレンダリングの高速化

田中法博

富永昌治

長野大学 企業情報学部

千葉大学大学院 融合科学研究科

A Method for Improving Performance of Spectral-Based Image Rendering by Using GPU

Norihiro TANAKA † and Shoji TOMINAGA ‡

† Faculty of Business and Informatics, Nagano University

‡ Graduate School of Advanced Integration Science, Chiba University

あらまし

本稿では美術品などの高精度の画像再現を目的とした分光情報に基づく3次元コンピュータグラフィックス画像の生成手法とその高速化手法を提案する。本稿では、物体表面の反射特性を計測し、その計測データに基づいて反射モデルパラメータを推定する。次に観測環境に依存するRGB カラー情報に対して映像デバイスや観測環境などに依存しない分光情報に基づいた映像生成手法を提案する。しかし、分光ベースのレンダリングは、通常のRGB ベースのものと比較して計算時間が膨大に必要となる。そこで分光的な光反射モデルをGPU上に実装し、映像生成の高速化を行う。本稿では(1)光反射計測系の試作、(2)対象物体表面の反射光分布を計測、(3)精密な色再現のためのディスプレイデバイスのキャリブレーション法、(4) Graphics Processing Unit(GPU)を用いた分光ベースリアルタイムレンダリング手法について提案する。ここでは画像再現対象の美術品のサンプルとして小柄小刀の反射特性を計測し、それに基づいて小柄小刀をCG画像として再現する。

キーワード：デジタルアーカイブ、コンピュータグラフィックス、光反射モデル、光反射計測、反射モデル推定、色再現

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色再現の重要性が高くなってきている。たとえば、最近では美術品や文化遺産の映像再現にコンピュータグラフィックス技術が用いられてくるようになってきた[1]。我々は、これまで美術絵画のデジタルアーカイブを行ってきた。現在では我々の具体的なデジタルアーカイブの対象を美術刀剣としての日本刀に広げており、日本刀を精密に画像再現することを目指している。

こういった美術品の画像再現では対象物の色をディスプレイ上で再現する精度はきわめて重要となる。しかしながら、これまでのRGBベースのコンピュータグラフィックス技術で、さまざまな物体を映像再現しようとするディスプレイやプリンタ上の映像と実物の色に大きな違いが生じる[2][3]。

これらの問題は、主に2つの問題があり、まず

反射モデルの精度、次にRGB カラー情報に基づいた観測環境に依存した画像生成、という2つの原因によって生じている。

まず物体の見えは、物体表面の光反射に依存する。これを数学的にモデル化したものが反射モデルである。CGで画像生成するためには、この反射モデルが必要となるが、物体を精密に画像再現するためには、物体表面の光反射を高精度で記述したモデルを用いて、さらにモデルパラメータも精密に決定しなければならない。特にモデルパラメータの決定には高精度な光反射計測が必要となる[4]。

次に、2つ目の問題としてRGB カラー情報は映像デバイスや照明環境に依存するという問題がある。たとえば、撮影するカメラや表示するディスプレイが変われば画像の色が変わる。また、照明光の種類を太陽光から白熱電球というように変更しても画像上の色は変わってしまう。この

場合、どの色もシーン環境に依存するため、どの色も正しく対象を再現できていないといえる[1][5].

こういった問題は、特に美術品などの映像再現では深刻なものとなる。これらの問題に対して、本研究では計測データに基づいた精密な光反射モデルを使用する。画像生成は RGB カラー情報ではなく、分光情報に基づいて行う。特に美術品などの映像化には、RGB ベースの画像生成手法では、十分な画像再現を行うことが難しく、精密な色再現には分光情報に基づいて行う必要がある[4]。分光反射率は、物体表面の物理特性であるのでデバイスや照明光源には依存しない。

しかし、これまで分光情報に基づいた画像生成手法は膨大な計算を必要とするため、画像生成を高速に行うことができなかった。

最近になって、ハードウェア技術が劇的に進歩して GPU(Graphics Processing Unit)と呼ばれる映像生成用のハードウェアが一般的な PC に搭載されるようになってきた[6]。本来 GPU は、CPU と独立して画面描画するハードウェアから発展したものであるが、近年では 3 次元グラフィックス描画機能の向上が目立ってきている。特に近年では GPU の処理がプログラマブルになり、映像生成の自由度が大幅に向上したことである。

これまで GPU を用いた分光ベースの 3DCG の高速生成手法として、Durikovic らが提案した手法[7]があるが、実在する物体の精密な色再現という立場からみると、実際の物体に対する反射モデルの精度検証と映像デバイスへの依存という問題を解決できていない。

そこで本研究では色再現精度という立場から分光的な光反射モデルに基づいた映像化手法を提案する。具体的には(1)光反射計測系の試作、(2)対象物体表面の反射光分布を計測、(3)精密な色再現のためのディスプレイデバイスのキャリブレーション法、(4) Graphics Processing Unit(GPU)を用いた分光ベースリアルタイムレンダリング手法について提案する。本稿では特に対象の美術品として小柄小刀の反射特性を計測し、それに基づいて小柄小刀を 3DCG 画像として再現する。

2. 光反射計測系と映像生成システム

2.1 光反射計測系

光反射計測系の概略図を図 1 に示し、その計測風景を図 2 に示す。本研究で用いる計測系は、デジタルカメラ (EOS kiss Digital)、全周囲計測器

(AUTO QTVR RC5P-3)、撮影用クレーン(Libec SK-1000A)からなる。本システムのここで用いたカメラは、600 万画素の解像度を持ち、各画素 12bit のダイナミックレンジを持つ。

本計測系では、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。

また光源角度は 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撮影から撮影データの PC への取り込みは全自動制御で行うことが可能である。

この計測系の精度は鏡を用いて幾何的なキャリブレーションを行い、その妥当性は反射特性が機知の黒色の塩化ビニル板の反射特性を調べて検証した。

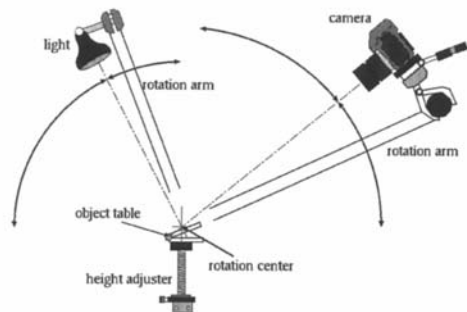


図 1. 光反射計測系の概略図



図 2. 試作中の光反射計測装置

2.2 画像生成システム

3D CG 画像生成システムは GPU を搭載した PC(表 1), 50 インチ 1920×1080 画素の解像度を持つプラズマハイビジョンディスプレイで構成されている。GPU は nVidia 社製 QuadroFX 1500, プラズマディスプレイは, 松下電器製 TH-50PF9 を用いた。グラフィックス API としては OpenGL 2.1.1 を用い, シェーディング言語として GLSL を用いた。OpenGL の支援ライブラリとして, GLUT 7.0 を用いた。OS は FreeBSD 6.2-stable を用いた。

表 1. 映像生成用 PC の仕様

CPU	Intel Core 2 Duo 2.66GHz
Memory	2GB
GPU	nVidia Quadro FX 1500 (256MB)

3. 物体表面の光反射のモデル化

本研究では詳細な光反射モデルに基づいた映像生成を行う[4]。ここでは光反射を物理的に詳細に記述した Torrance-Sparrow モデルを採用する。図 1 は光反射の幾何モデルである。反射の幾何モデルは, 照明, 物体, 視覚系の 3 者の幾何的な関係で記述する。ここでは視線方向ベクトルは \mathbf{V} , 物体の法線ベクトルは \mathbf{N} , 照明方向ベクトルは \mathbf{L} で表す。このとき \mathbf{N} と \mathbf{L} のなす角は θ_i , \mathbf{N} と \mathbf{V} のなす角は, θ_r となる。このモデルでは物体表面が微細な凹凸で構成されていると仮定しており, その微小面の法線ベクトルは \mathbf{H} である。 \mathbf{L} と \mathbf{H} のなす角は θ_h であり, \mathbf{N} と \mathbf{H} のなす角が φ である。

3.1 不均質誘電体の反射モデル

プラスチック, 革製品, 塗料, 木材などの多くの物体が持つ表面反射は, 物体色として見える拡散反射成分とハイライトとして見える鏡面反射成分によって構成されている。一般的に不均質誘電体は, このように 2 つの反射成分を持つ 2 色性反射の特性を持つ。この物体表面の光反射のプロセスを Torrance-Sparrow モデルで記述すると次式のようになる。

$$I(\lambda) = \alpha \cos \theta_r S(\lambda) E(\lambda) + \beta \frac{F(n, \theta_h) D(\gamma, \varphi) G(\mathbf{N}, \mathbf{V}, \mathbf{L})}{\cos \theta_i} E(\lambda) \quad (1)$$

ここで右辺第 1 項は拡散反射成分を示し, 第 2 項は鏡面反射成分を示す。 $I(\lambda)$ は色信号, $S(\lambda)$ は物体表面の分光反射率, $E(\lambda)$ は光源の分光分布である。 λ は光の波長を示す。 α, β はそれぞれ拡散反射成分, 鏡面反射成分の重み係数である。 n は物体表面の屈折率である。 F は Fresnel 関数である

が, ここでは不均質誘電体用に簡略化したものを用いた。 D は表面の滑らかさを表す微小面の分布関数である。表面粗さのパラメータ γ と微小面の位相角 φ をパラメータに持つ。 G は微小面による幾何的減衰係数である。 G は微小面の凹凸により光や視線が遮蔽された場合の反射光の減衰を記述している。

3.2 金属の反射モデル

金属は鏡面反射成分のみを持つ 1 色性の反射特性を持つ。また金属は波長毎に複素屈折率が異なるため, 鏡面反射成分の反射率は波長ごとに異なる。つまり, 金属の色は鏡面反射の色で決定される。ここで金属表面の反射のプロセスを Torrance-Sparrow モデルで記述すると次式のようになる。

$$I(\lambda) = \beta \frac{F(n(\lambda), k(\lambda), \theta_h) D(\gamma, \varphi) G(\mathbf{N}, \mathbf{V}, \mathbf{L})}{\cos \theta_i} E(\lambda) \quad (2)$$

ここでは Fresnel 反射の記述方法が異なっている。不均質誘電体の場合は, 屈折率が波長に依存しないため簡略化することができたが, 金属の場合は屈折率が波長に依存する上, 虚数項を持つため簡略化することができない。そのため屈折率は波長 λ の関数として, 実数項は $n(\lambda)$, 虚数項は $k(\lambda)$ となる。

4. 分光ベースレンダリング

4.1 人間の視覚特性に基づいた映像化手法

光反射の計算に基づいて人間の視覚系が受ける色刺激を計算する。図 3 は分光的な光反射モデルに基づいた映像化のプロセスである。ここでは, まずデバイスに依存しない色刺激を計算し, その後, 画像を各デバイスの色空間に変換するというプロセスとなる。

ここではまず(1)式または(2)式で計算した色信号 $I(\lambda)$ から, 可視波長域(400nm-700nm)について等色関数 $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ を用いて三刺激値 XYZ を求める。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \int_{400}^{700} I(\lambda) \begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix} d\lambda \quad (3)$$

三刺激値は映像デバイスに依存しない色情報であるため, 実際にディスプレイなどの映像デバイスに出力するためには生成した画像を各デバイス固有の色空間に変換しなければならない。ディスプレイデバイスの表示特性は一般にルータ条件を満たさないので非線形変換が含まれる。変換

のプロセスは、まず三刺激値 XYZ を 3×3 の変換行列 \mathbf{M} により線形 RGB 値 $[R_L, G_L, B_L]^T$ に変換する。

$$[R_L, G_L, B_L]^T = \mathbf{M}[X, Y, Z]^T \quad (4)$$

次にディスプレイデバイスの非線形特性であるガンマ特性を補正する。(4)式で求めた線形 RGB 値をデバイス RGB 値 $[R_d, G_d, B_d]^T$ に変換する。

$$[R_d, G_d, B_d]^T = [R_L^\gamma, G_L^\gamma, B_L^\gamma]^T \quad (5)$$

ここで γ は補正值であり、個々のディスプレイデバイスに依存する。

4.2 ディスプレイデバイスの特性計測と推定

ディスプレイデバイス個々の色特性を知ることが変換行列 \mathbf{M} と γ の推定に帰着する。変換の手法は入力 RGB 値をディスプレイに与え、そこから出力された画像の輝度との関係から求める。輝度は分光光度計で計測する。 \mathbf{M} はディスプレイの入力信号(RGB 値)で非線形特性の影響を受けない値を選択し、それに対する出力画像の三刺激値 XYZ との対応関係から推定する。 γ は入力 RGB 値を線形に与え、その出力画像の輝度の変化から非線形最小二乗フィッティングにより推定する。

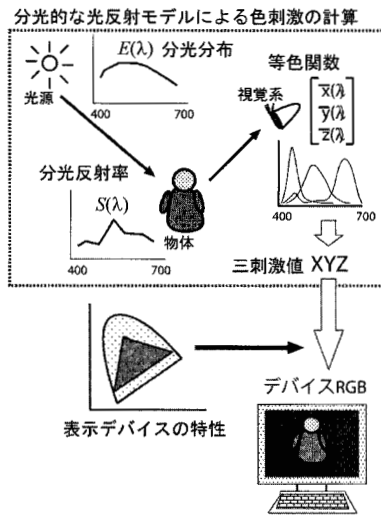


図3. 光反射の計算から映像生成までのプロセス

5. Graphics Processing Unit(GPU)による映像化

近年ではこの GPU に対してユーザが直接プログラミング可能になったため、その自由度が飛躍的に向上した。本研究で用いた GPU は頂点シェーダユニットとフラグメントシェーダユニットと呼ばれる 2 種類のプログラミング可能なシェーダユニットが搭載されている。頂点シェーダ

ユニットはライティングや座標変換を担当し、フラグメントシェーダユニットはシェーディングなどの色計算を担当する。シェーダユニットは一種の SIMD 型の並列コンピュータと考えることができ、光反射モデルの計算を並列処理できる。本研究では図3のプロセス、つまり(1)式から(5)式をフラグメントシェーダ上に実装して分光ベースの反射モデルを用いて CG 画像を生成した。このとき(3)式の積分計算は、コンピュータ上では計算できないので、分光情報を可視波長域(400nm-700nm)に関して 5nm 間隔でサンプリングして 61 個の分光データとして離散化した。

6. 実験結果

本研究で提案した手法を用いて対象物体の表面反射特性計測から画像再現までを行った。本稿では画像再現の対象として美術刀剣のひとつである小柄小刀を用いた。本研究で用いている小柄小刀は日本刀と同じ玉鋼(鉄)で作られており、刀匠藤安将平氏によって作刀されたものである。

6.1 物体表面の反射特性の計測

図4は計測対象の小柄小刀である。まずこの小刀の形状をノギスなどの計測器を用いて直接計測した。その計測結果を図5に示す。

この小刀の材質は鉄であるので一色性の金属反射の特性を持つ。また表面は完全な鏡面状ではなく若干のざらつきが観測される。そこで光反射モデルとして Torrance-Sparrow モデル[8]に従うと仮定した。表面に微細な凹凸がある表面では一定の入射光に対して反射光の広がり(分布)が見られる。この反射光の分布の形状が光反射の重要な特性の一つとなる。そこで本研究では、小刀の反射光分布を計測して、光反射モデルと比較する。

反射光分布の計測は、入射角度 18.7 度、47.2 度、74.8 度の 3 つの光源入射に対する反射光の分布を調べた。それぞれの入射角度に対して、受光角度は正反射方向に対して、 ± 10 度の範囲を 0.2 度間隔で撮影した。その結果の反射光の強度分布を図6に示す。

次に計測データから Torrance-Sparrow モデルのモデルパラメータを推定した。ここでの未知変数は β と γ である。この 2 つの未知変数は計測データとモデルを関数フィッティングすることにより求めた。このフィッティングは次式を最小化することに帰着する[1]。図7のグラフからモデルと計測値が良く適合していることが分かる。

6.2 ディスプレイの色特性の計測

映像再現に使ったディスプレイに入力信号 RGB を与え、その値に対応する出力画像の三刺激値 XYZ を分光光度計で計測した。このときのディスプレイの画質設定は standard mode とした。まずディスプレイの入力信号(RGB 値)に対する出力特性(ガンマ特性)を図 8 に示す。この結果からこのディスプレイの γ 値は 2.2 と推定された。また分光光度計で計測したディスプレイ表面の分光分布からディスプレイの色再現範囲を計測した。この計測した色再現範囲はこの図 9 の色度図上に示す。この図では sRGB 色空間, AdobeRGB 色空間と色再現範囲も同時に示す。この色再現範囲に基づいて三刺激値 XYZ からディスプレイデバイスの RGB 色空間への変換行列 M を推定した。

6.3 レンダリング

GPU に分光ベースの反射モデルを実装し、金属物体を映像化した。ここでは CG 分野でレンダリングサンプルとしてよく用いられている Teapot の形状を用いてレンダリングの速度を調べた。次に我々が独自に計測した小柄小刀の形状 (図 5) を映像化した。この小柄小刀の形状は、1734 ポリゴンで構成されている。ここでは Teapot, 小柄小刀の両者とも屋外シーンで計測した環境光の下で照明され[9], 物体は単一の材質でできているものと仮定している。このとき画像解像度は 800×600 と設定した。反射モデルパラメータ γ と β は本実験の計測結果から与えた。分光反射率計算は直接分光反射率データではなく鉄の分光複素屈折率を別途与えた。図 10 は Teapot, 図 11 は小柄小刀の CG 画像生成例である。以上の条件で画像生成速度としてフレームレートを調べた。

この結果 Teapot がおよそ 10fps の速度でレンダリングできることがわかった。そして小柄小刀の画像再現では、およそ 21fps の速度でレンダリングできることがわかった。本手法では金属の反射モデル計算を行う場合、Fresnel 関数を含む 61 回の反射モデル計算とそれらの積算計算が必要になるが、本手法を用いればほぼリアルタイムに映像化できていることが分かる。



図 4. 計測した小柄小刀

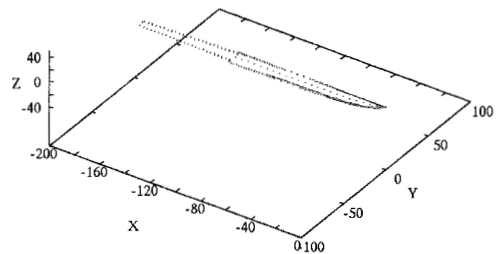


図 5. 小柄小刀の形状の計測結果

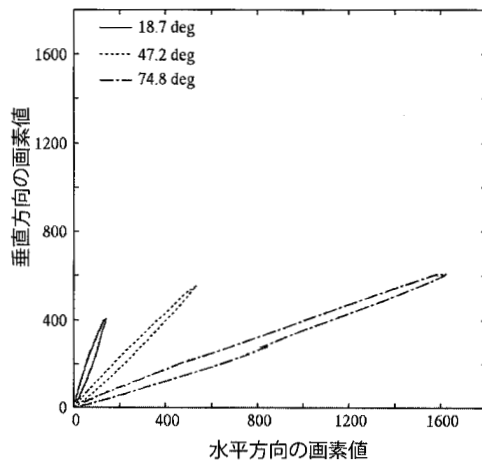


図 6. 反射光の強度分布の計測結果

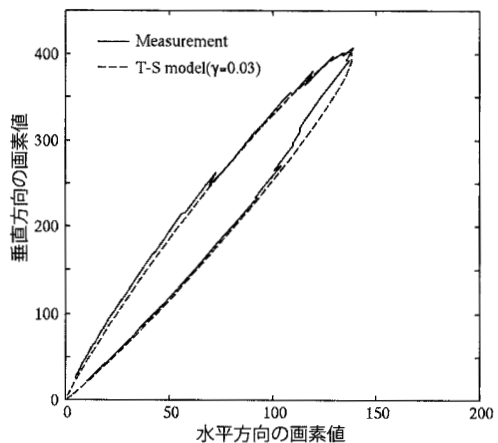


図 7. 計測データと Torrance-Sparrow モデルのフィッティングの結果

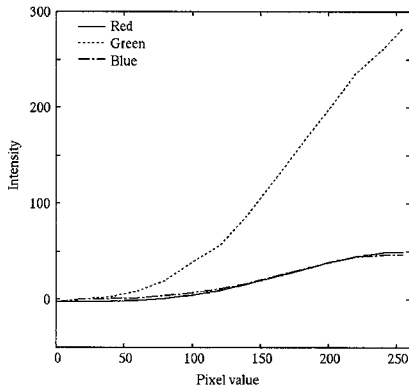


図 8. ディスプレイのガンマ特性の計測結果

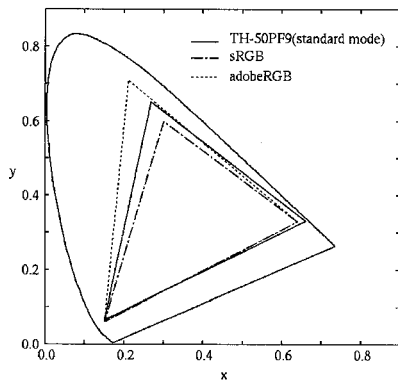


図 9. ディスプレイの色再現範囲の計測結果



図 10. 計測した小柄小刀と同じ反射特性を用いて提案手法で生成した別の形状(Teapot)の金属物体の CG 画像



図 11. 計測した小柄小刀を CG で画像再現した結果

7. まとめ

本研究では美術品の映像再現を目的とした分光ベースの光反射モデルを用いたレンダリング手法を示し, GPU を用いて高速化する手法を提案した. 本稿では美術刀剣の小柄小刀を対象とし, その反射特性を試作光反射系で計測した. その計測データを用いて対象を 3D CG で画像再現した. ここでは分光的な反射モデルと表示デバイスの特性に基づいた映像化手法を示した. そして GPU を用いてに分光ベースの 3 次元レンダリングを高速化する手法を述べた.

本研究の最大の特徴は, 対象物体の光反射特性計測, 分光ベースレンダリング, 映像デバイスの色特性のキャリブレーションを行うことにより, 精密な色再現が可能になったことと GPU に映像化アルゴリズムを実装したことにより高速なレンダリングが可能になったことである.

参考文献

- [1] 富永昌治, 田中法博: カラーカメラを用いた美術絵画の計測とレンダリング, 情報処理学会論文誌, Vol.45, No.1, pp.350-361, (2004)
- [2] 大田登: 色再現工学の基礎, コロナ社(1997)
- [3] 納谷嘉信: 産業色彩学, 朝倉書店, 東京(1980)
- [4] 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)
- [5] 横山康明, 細井麻子, 津村徳道, 羽石秀昭, 三宅洋一: 絵画の記録再現を目的とした高精細カラーマネジメントシステムに関する研究(第一報), 日本写真学会誌, 61(6), pp. 343-355(1998)
- [6] R. Fernando et al., GPU Gems: Programming Techniques, Tips and Tricks for Real-Time Graphics, Addison Wesley, (2004)
- [7] R. Durikovic and R. Kimura: Spectrum-Based Rendering using Programmable Graphics Hardware, Proceedings of the 21st spring conference on Computer graphics, pp. 233-236(2005)
- [8] K.E. Torrance and E.M. Sparrow: Theory for off-specular reflection from roughened surfaces, J. of Optical Society of America, Vol. 57, pp.1105-1114 (1967)
- [9] S. Tominaga and N. Tanaka: Omnidirectional Scene Illuminant Estimation Using A Mirrored Ball, The Journal of Imaging Science and Technology, Vol. 50, No. 3, pp. 217-227(2006)