

計測データに基づいた日本刀のレンダリング手法

望月宏祐 林 一成 更科友啓 田中法博 禹 在勇

長野大学 企業情報学部

要旨

本稿では、日本刀を対象に形状と光反射特性を計測し、それに基づいて日本刀の分光的な光反射モデルを構築する手法を提案する。さらにその反射モデルを用いて日本刀を 3DCG 再現する手法を提案する。まず、幾何的情報を得るためにレーザレンジファインダを用いた日本刀の形状計測を行う。このとき同時に金属物体の形状計測の誤差を減少させる手法も同時に示す。次に日本刀表面の光反射特性を計測するための計測系を試作する。この計測系は、光源、回転アーム、デジタルカメラによる視覚系から構築されている。ここから得られた画像データから日本刀の反射モデル構築やモデルパラメータの推定を行う。そして、刀身上のテクスチャ情報を獲得するために反射特性の空間分布を推定する。これらの計測データと推定した反射モデルを用いて日本刀の刀身の独特の形状や光沢を 3DCG で再現する。そして提案手法は日本刀のリアルタイムレンダリングのために GPU 上に実装する。最後に再現した日本刀の CG 画像により視覚的に本手法の妥当性を検証する。

A Rendering Method for Japanese Swords Based on Measured Data

Kosuke Mochizuki, Kazunari Hayashi, Norihiro Tanaka
Tomohiro Sarashina and Woo Jae Yong

Faculty of Business and Informatics
Nagano University

Abstract

This paper proposes a method for developing the multi-spectral reflection model of a Japanese sword based on measuring of shape and reflection properties of the Japanese swords. And also, we propose a method for rendering the Japanese sword by the reflection model. First, to acquire geometrical information of the Japanese sword, we measure shape of the Japanese sword by using a laser range finder. In this case, we describe a method for reducing measurement errors of the shape of metallic objects. Next, we make an apparatus for measuring reflection properties of the Japanese sword. The apparatus consists of a lighting system, goniometric rotating arms, and a vision system with digital camera. Image data from this apparatus are used to estimate various parameters of the surface of Japanese sword. In order to obtain the texture information on the surface of the sword, we measure spacial distribution of reflection properties of the surface. At the rendering stage, we use the developed spectral 3D light reflection model for creating computer graphics images of Japanese swords. Moreover, we implement the proposed method to Graphics Processing Unit(GPU) for real-time rendering of the Japanese sword. Finally, we render a realistic image of a Japanese sword and confirm the validity of the proposed method visually.

1. はじめに

日本刀はその刀身の美術的価値が高いことが一般に知られている。この刀身の美しさは、形状、光沢、表面テクスチャなどで決まる。日本刀の鑑賞者は「光をいただく」という表現を使って刀身表面に光をあて、光沢や色の変化を鑑賞する。このように日本刀は独特の金属光沢を持ち、それが美術品としての特徴となっている。こういった光沢は従来の写真撮影などの方法で画像情報として記録することは難しい[1]。その理由は、刀身の光沢が照明方向や見る位置によって刻一刻と変化するため、それら全てを画像上で記録・再現することが困難だからである。

しかしながら、日本刀をデジタルアーカイブする場合、こういった光沢の記録は必要不可欠である。このような光沢の見え方の変化は光反射によって生じるため、光反射を考慮したデジ

タルアーカイブ手法が求められている[2-5]。この場合、刀身の反射特性を知ることが重要であることは言うまでもないが、刀身の形状による影響も大きい。

そこで本研究では、刀身の表面反射特性と形状情報を記録し、それらの情報に基づいて日本刀を 3DCG で再現する手法を提案する。

まず、反射特性の面から考えると、日本刀表面は、鋼で作られており、そこにモリブデンやタングステンなどが不均一に混入している。また、作刀の過程で何度も鋼を練ったり鍛えたりする。それらが独特の模様になり、肌と呼ばれる独特のテクスチャになる。

次に、美術品において 3 次元的な形状も重要な要素である[6][7]。形状に関しては刀匠の創作により様々な形の刀身が作られる。切っ先の形状、反りなどがそれぞれの日本刀の特徴となる。

本研究では、こういった日本刀をデジタルア

ーカイクするため、3次元コンピュータグラフィックス(3DCG)技術に基づいて、刀身の光沢や表面の反射特性を再現する手法を提案する。このとき従来のRGBカラーベースでは映像デバイスや計測時の照明環境に色が依存するという問題が生じるため、分光情報に基づいた反射モデルを構築する[3-5][8]。そのモデルに与えるパラメータは計測データに基づいて決定する。刀身は平地や刃紋など部位毎だけでなくその表面の反射特性は連続的に異なるため、画像計測により刀身上の反射特性空間分布を求める。

本稿では(1)日本刀の部位ごとに適した光反射モデルを構築する、(2)日本刀の形状計測を行う、(3)日本刀表面の反射を計測するための計測系を試作する、(4)計測データに基づいて反射モデルパラメータを決定する、(5)反射特性の空間分布を推定する、(6)計測データに基づいた画像生成アルゴリズムを開発する、(7)提案手法をGraphics Processing Unit(GPU)へ実装する。最後に提案手法の妥当性はCG再現した日本刀を視覚的に確認する。

2. 日本刀の反射モデル

日本刀表面は部位ごとに反射の特性が異なる。これらの特性は大きく分けて鏡面状の部位と粗い表面の部位が存在する。ここではそれぞれの特性に合わせてモデル化を行う。

2.1. 平地の反射モデル

平地の部分は視覚的に判断して鏡面反射が仮定できるためFresnel反射をベースに反射モデルを記述する。このとき視覚系に到達する色信号 $C_i(\lambda)$ は次式のように記述できる。

$$C_i(\lambda) = \chi D(\varphi, \mu_0) F(n(\lambda), k(\lambda), \theta_i) E(\lambda) \quad (1)$$

ここで $E(\lambda)$ は光源の分光分布である。 λ は光の波長を示す。 χ は反射の重み係数である。FはFresnel関数である。 n は物体表面の屈折率、 k は吸収係数である。さらに表面の滑らかさを表す微小面の分布関数Dを導入した。ガウス関数を仮定し、 $D(\varphi, \mu) = \exp\{-\ln(2)\varphi^2 / \mu^2\}$ とした。

μ_0 は表面の滑らかさを示すパラメータであり、 φ は微小面の位相角である。

2.2. 刃紋の反射モデル

刃紋部分は視覚的に粗い表面となっているためTorrance-Sparrowモデル[9]を仮定した。ここでは図1のような粗い微小面を持つと仮定した。このモデルで刃紋の光反射を記述すると刀身表面から得られる色信号 $C_i(\lambda)$ は次式ようになる。

$$C_i(\lambda) = \beta \frac{F(n(\lambda), k(\lambda), \theta_H) D(\varphi, \mu_1) G(N, V, L)}{\cos \theta_r} E(\lambda) \quad (2)$$

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、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 である。 β は鏡面反射成分の重み係数、FはFresnel関数である。Fresnel関数の入射角は、(1)式とは異なり

微小面に対しての入射角 θ_H となっている。 D は表面の滑らかさを表す微小面の分布関数であり、(1)式と同じものを用いた。 μ_1 は表面の滑らかさを示すパラメータであり、 φ は微小面の位相角である。 G は微小面による幾何的減衰係数である。

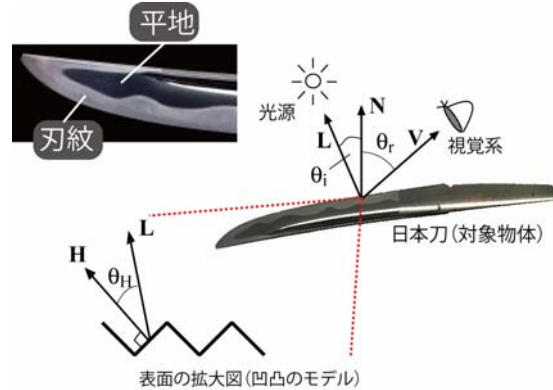


図1. 日本刀表面での反射の幾何モデル

3. 計測系

3.1. 日本刀の形状計測

光反射を記録・再現する場合には物体の幾何情報が必要である。ここではレーザレンジファインダを用いて刀身の形状を計測する。今回使用したレーザレンジファインダは、コニカミノルタ製Vivid910を用いた。図2は、日本刀の形状計測の様子を示したものである。このレンジファインダはレーザ光を投影して、三角測量の原理でレンジ画像を計測する。一度に計測できるレンジ画像は640×480画素である。

ただし、レーザレンジファインダは拡散面を対象に形状計測を行う計測器であるため、日本刀のように強い鏡面反射成分のみで構成されている金属物体の計測はできない。そこで本研究では、日本刀表面にレーザ光を投影できるようにつや消しの白色塗料を塗布して計測する。

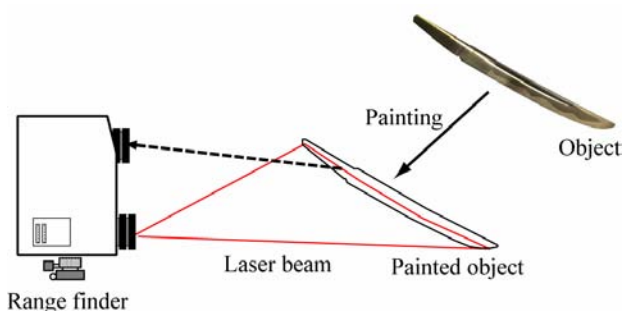


図2. レーザレンジファインダを用いた日本刀の形状計測の様子

3.2. 光反射計測系

日本刀の光反射特性を計測するための計測系を試作する。光反射特性は、先ほど示した図1のように光源、物体、視覚系の幾何的条件と反

射光強度分布の関係で決まる。

この両者の関係に基づいて光反射特性を計測するための計測系を開発する。この計測系では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とが可能である。これにより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3に示す。この計測系はデジタルカメラ (Canon EOS 40D)、全周囲計測装置、撮影用クレーン、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1010万画素の解像度を持ち、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。

視覚系への受光角度は、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。

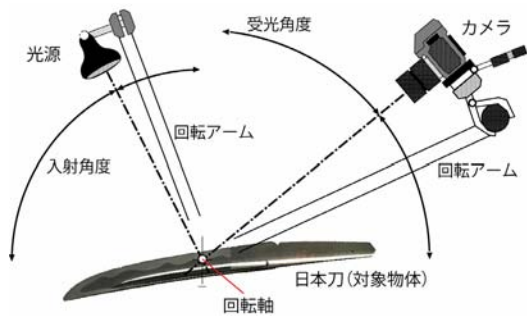


図3. 計測系の概略図

4. 日本刀の計測

4.1. 形状計測

本研究で使用したレンジファインダは一度に計測できるレンジ画像は640×480画素である。この解像度では日本刀全体を計測するには精度が不足するため部分ごとに複数枚計測し、それを合成する(図4)。

次に合成した日本刀の形状データはレーザ光による計測のため誤差を含む。これを日本刀を計測した画像データに基づいてベジエ曲面によりスムージングする。

4.2. 反射特性計測

刀身表面の反射特性は、ある入射角度に対して受光角度を変化させながら反射光強度を計測する。

(1) 平地の反射モデル推定

計測データから(1)式とカメラ出力から平地の反射モデルのモデルパラメータを推定する。ここでの未知変数は χ と μ_0 である。こ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。

$$\sum_j \{ \chi D(\varphi, \mu_0) F(n(\lambda), k(\lambda), \theta_j) - \rho_g \}^2 \quad (3)$$

ここで ρ_g はカメラのグリーンチャンネルである。

(2) 刃紋の反射モデル推定

同様に刃紋に対しても計測データから(2)式を用いて関数フィッティングを行う。ここでは未知変数は、 β と γ の2つである。これらは次式を最小化することにより求める。

$$\sum_j \left\{ \beta \frac{F(n(\lambda), k(\lambda), \theta_{H_j}) D(\varphi_j, \mu_1) G(N_j, V_j, L_j)}{\cos \theta_j} \right\}^2 \quad (4)$$

4.3. 反射特性の空間分布計測

日本刀は鍛え肌、刃紋などといったテクスチャを持ち部分的に反射特性が異なる。このため日本刀表面では、テクスチャを持つため反射特性の空間分布を推定する。本稿では粗さに基づいて使用するモデルとモデルパラメータをそれぞれマッピングデータとして用意する。ただし、本研究で開発したアルゴリズムでは画素毎に全て異なるモデルパラメータを設定できるが、計測データとしては、鎧部分と波紋部分の2種類に対するモデルとパラメータのみを持つ。

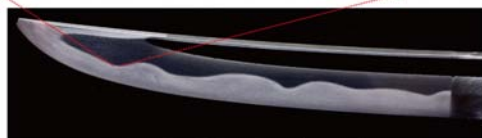
拡散光源を用いて日本刀表面にハイライトが入らないように均一に光を当てれば、鏡面部分は黒くなり、粗い面は光が拡散して明るくなる。この性質を利用して画像から日本刀の反射特性の空間分布を得る。

この方法で計測した画像データから画素毎に粗さを推定し、日本刀表面の反射特性マップを作成し、日本刀の形状にマッピングする。粗さなどの表面特性は撮影画像の画素値により求めた。このとき暗い部分は鏡面部分なのでFresnelベースのモデル、明るい部分は光が拡散しているのでTorrance-Sparrowモデルとした。ただし、輝度の中間部分はそれぞれの特性を線形補間により合成した。そこで、本研究では、日本刀刀身の放射輝度 $C(\lambda, x)$ は(1)式と(2)式の線形補間であると仮定し、次式のように反射特性空間分布をモデル化した。

$$C(\lambda, x) = w C_f(\lambda, x) + (1-w) C_t(\lambda, x) \quad (5)$$

このとき w は各モデルの重み係数、 x は位置パラメータである。この w は計測したテクスチャ画像の輝度から推定する。図7はこのマッピング情報を推定するために使用したテクスチャ画像である。

Pixel0	Pixel1	Pixel...	Pixeln
model type Fresnel based	model type T-S based	model type T-S based	model type Fresnel based
$\mu_0 = 0.05$	$\mu_1 = 0.05$	$\mu_1 = 0.05$	$\mu_0 = 0.05$
$\chi = 79000$	$\chi = 43000$	$\chi = 43000$	$\chi = 79000$



テクスチャの各画素に対応したモデルとパラメータをマッピングデータとして保持

図 4. 日本刀の反射特性の空間分布を得るために計測した画像とそこから推定される反射特性データ

5. 画像生成アルゴリズム

ここでは日本刀の映像生成手法を示す。本研究では分光ベースの反射モデルに基づいて画像生成を行う(図 5)。また実シーン内で実際の日本刀を見ると日本刀表面の粗さにより映りこみの像がぼやけて見える。これは日本刀表面の粗さにより反射光が拡散しているからである。本研究では、分散レンダリングによりこの粗さを実現する。一画素あたり複数回この計算を繰り返してガウス関数で加重平均を取ることで金属表面の粗さを表現する。ここでは 30 回の繰り返し計算を行う。ここでパラメータ μ は推定した反射モデルパラメータを用いれば日本刀表面の粗さを表現できる。

等色関数 $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ を用いて三刺激値 CIE-XYZ を求める。

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

ここで得られた三刺激値は映像デバイスに依存しない情報であるため、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ため非線形変換が含まれる。

次に CIE-XYZ から実際のディスプレイデバイスの RGB へ変換する。ここでの変換プロセスは、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。

$$[R_L, G_L, B_L]^T = \mathbf{M}[X, Y, Z]^T \quad (7)$$

次にディスプレイデバイスの非線形な入出力特性であるガンマ特性を補正する。線形 RGB 値をデバイス RGB 値 $[R_d, G_d, B_d]^T$ に変換する。

$$[R_d, G_d, B_d]^T = [R_L^\gamma, G_L^\gamma, B_L^\gamma]^T \quad (8)$$

ここで γ は RGB 輝度の非線形性を補正するためのパラメータであり、個々のディスプレイデバイスに依存する。

これまで提案した手法を GPU 上のフラグメントシェーダに実装してリアルタイムレンダリングを目指す。

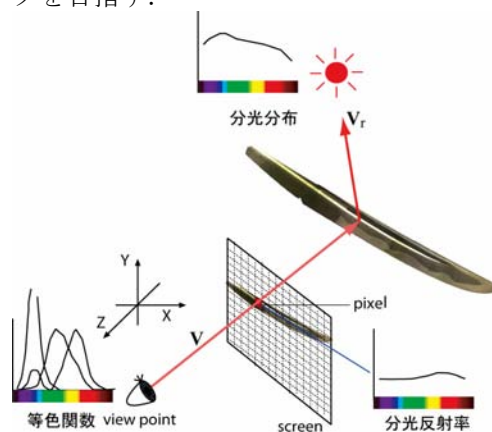


図 5. 分光ベースレンダリングの概念図

6. 実験

6.1 日本刀の計測

実際の日本刀を対象に提案手法を適用し、その日本刀の反射モデル構築と画像再現を行った。図 6 は計測に使用した日本刀である。図 7 はレーダファインダを用いた日本刀の形状計測結果である。形状計測は日本刀上の 5cm の幅で部分的に計測し、最後に合成して一振り of 日本刀を作成した。この後、画像情報を元にベジエ曲線で対応点を取り、形状の補正を行った。図 8 は、この補正後の形状をワイヤーフレームで表示したものである。

次に日本刀を計測するための光反射計測系を試作して、この日本刀の反射光分布を計測した。計測の対象は、日本刀の平地の部分と刃紋の部分である。計測は、入射角度 15 度から 65 度まで 10 度間隔で 6 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 度から 80 度までの範囲を計測した。このときハイライトピークの ± 20 度の範囲を 0.2 度間隔、それ以外は 2 度間隔で撮影した。図 9 (a), (b) はそれぞれ平地の部分と刃紋の部分に対して反射光強度分布と計測値とをフィッティングした結果である。実線は計測値であり破線はモデルによる計算値を示す。平地と刃紋それぞれの反射モデルパラメータは、 $\chi = 79000$, $\mu_0 = 0.05$, $\beta = 43000$, $\mu_1 = 0.05$ と推定した。ただし、このとき Fresnel 関数には鉄の屈折率(図 10)を与えた。また、図 11 は、推定したパラメータで計算した日本刀の表面粗さを示す。

これら 2 つの実験結果からは、入射角度が小さいうちは比較的良好にモデルに適合している

ことがわかる。入射角度が大きくなるにつれて、モデルと計測値の差異が出てくるが、受光角度が大きくなると、計測系のわずかな誤差が計測結果に大きな影響を与えるため計測系の精度も検証しなければならない。

今回の実験結果から日本刀表面の反射特性は、入射角度が小さい場合においては Fresnel 反射または Torrance-Sparrow モデルで記述できることがわかった。図 1 2 はこれにしたがって分光的な反射モデルで日本刀表面の分光反射率を求めた結果である。図 1 2(a)は平地部分、図 1 2(b)は刃紋部分を示す。この図では波長、入射角度、反射率の関係を 3 次元的に示したものである。

6.2 日本刀の画像再現

提案手法と計測データに基づいて日本刀を分光ベースの 3DCG で再現する。ここでは(5)式で示す反射モデルを計算し、(6)から(8)式によりディスプレイデバイスの色空間で再現色を計算した。分光ベース反射モデルとモデルパラメータ、そして計測した形状データを GPU 上に実装してリアルタイムレンダリングを行った。分光情報は可視波長域 400nm-700nm までを 5nm 間隔でサンプリングして 61 個のデータで表現した。

ここで使用した実験環境は GPU(nVidia 社製 GeForce 9800GTX+), 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ある。レンダリング時には、反射モデルに全方位の環境光光源情報を与え、実シーンの照明環境下でレンダリングを行った。環境光源は 6000×3000 画素の解像度の長野大学キャンパス内の全方位 HDR 分光画像を用意した(図 1 3)。レンダリング画面解像度は 800×600 画素と設定した。この条件で生成した CG 画像が図 1 4 である。画像生成速度は約 50fps となり、照明方向や視点をリアルタイムに変えながら日本刀を画像再現できることが分かった。

8. まとめ

本研究では日本刀を対象として光反射モデルに基づいた 3DCG 再現手法を提案した。このことにより照明方向や見る位置によって、刻一刻と変化する日本刀の姿や光沢を再現することが可能になった。このとき従来の RGB カラーベースでは映像デバイスや計測時の照明環境に色が依存するという問題が生じるため、分光情報に基づいた日本刀の部位ごとに 2 つの反射モデルを構築した。そのモデルに与えるパラメータは計測データに基づいて決定した。

また日本刀の反射特性だけでなく、形状計測についての手法も提案した。レーザレンジファインダとベジエ曲面を利用した形状補正により高精度な日本刀の形状が再現できた。

さらに提案手法を GPU 上に実装したことによりリアルタイムに照明方向や視点を換えながら日本刀を 3D CG で再現することが可能となった。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、長野県坂城町と宮入小左衛門行平刀匠には習作を提供していただくなど日本刀計測に多大なるご支援をいただきました。コニカミノルタセンシング株式会社の中尾光孝氏には日本刀の形状計測でのご協力をいただきました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- [1] A. Ide, et al.: Technology for Digitalizing Pictorial Data of Japanese Swords.,Hawaii International Conference on System Sciences-2005(IEEE) pp.102-108, . 2005
- [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.10, pp.1-11,2000.
- [3] 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.
- [4] S. Tominaga and N. Tanaka: "Measuring and Rendering Art Paintings Using an RGB Camera", Proc. of EUROGRAPHICS 2002, pp.299-306, 2002.
- [5] 田中法博, 駒田隆之, 富永昌治: マルチバンドカメラを用いた油彩画の計測とレンダリング, Visual Computing/グラフィックスと CAD 合同シンポジウム 2003, pp. 165-170, 2003.
- [6] M. Levoy et. al. The Digital Michelangelo Project. In Proc.SIGGRAPH 00, pp.131-144(2000)
- [7] 池内克史, 倉爪亮, 西野恒, 佐川立昌, 大石岳, 高瀬裕, The Great Buddha Project-大規模文化遺産のデジタルコンテンツ化-, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.7・1, pp.103-113 (2002)
- [8] 横山康明, 長谷川隆行, 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)-画像入力システムの設計, 日本写真学会誌, Vol. 61, No.6, pp.343-355, 1998.
- [9] 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.



図 6. 実験に用いた日本刀の実物(提供宮入小左衛門行平刀匠)

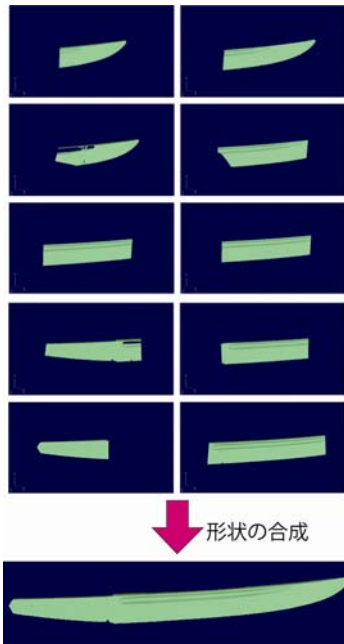


図 7. 日本刀形状の部分毎の計測と合成

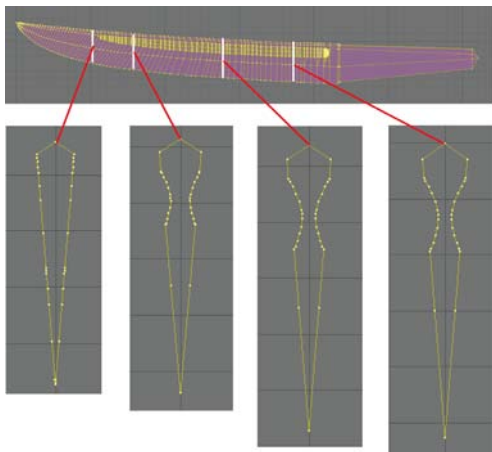
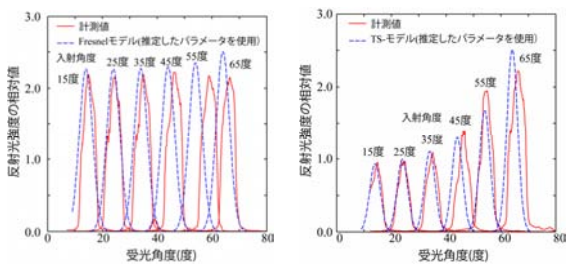


図 8. 日本刀の形状計測結果と断面図



(a) 平地

(b) 刃紋

図 9. 平地部分と刃紋部分の反射モデルとの適合結果

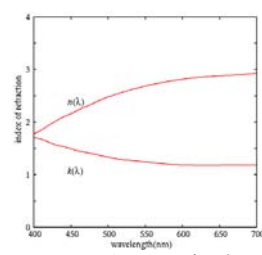


図 10. 鉄の屈折率

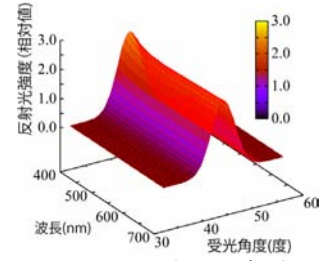
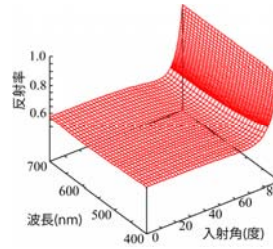
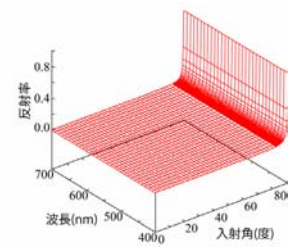


図 11. 日本刀の粗さの推定結果



(a) 平地



(b) 刃紋

図 12. ハイライトピークにおける反射強度の計算結果



図 13. 画像生成に使用した全方位分光画像

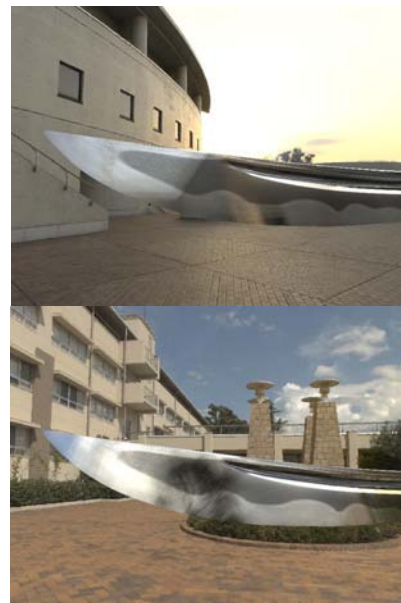


図 14. 長野大学キャンパス内の照明環境下で 3DCG で再現した日本刀