

## 光反射モデルに基づいた工芸作品のCG再現

松田宗<sup>†1</sup> 田中法博<sup>†1</sup> 市川拓磨<sup>†1</sup> 望月宏祐<sup>†2</sup> 室屋泰三<sup>†3</sup> 北村仁美<sup>†4</sup>

分光的な光反射モデルに基づいた工芸作品のCG再現手法を提案する。本研究では東京国立近代美術館に所蔵されている「十二の鷹」を対象とした。この工芸作品は明治期に鈴木長吉によって制作された金工作品である。最初に「十二の鷹」の一つの頭部をレーザレンジファインダで形状計測する。このとき欠損部分は複数のレンジ画像から合成して補完する。2番目に金工作品の各材質をレンダリングするために分光的な光反射モデルを構築する。このモデルは金属、合金、不均質誘電体の反射を記述することができる。本稿では、合金として臙銀の反射特性をこのモデルで記述した。3番目にRGBカメラ出力から分光反射率を推定するアルゴリズムを提案する。そして、工芸作品の材質はこの分光反射率に基づいて判別される。最後に推定した材質の情報で工芸作品のCGを生成した。

## CG Reproduction of A Craft Object Based on Light Reflection Model

SO MATSUDA<sup>†1</sup> NORIHIRO TANAKA<sup>†1</sup> TAKUMA ICHIKAWA<sup>†1</sup>  
KOSUKE MOCHIZUKI<sup>†2</sup> TAIZO MUROYA<sup>†3</sup> HITOMI KITAMURA<sup>†4</sup>

A method for CG reproducing of craft objects based on a multispectral reflection model is proposed. In this study, one of the twelve hawks which are owned by The National Museum of Modern Art Tokyo was used as experimental object. The object is metal work by Chokichi Suzuki of the Meiji period. First, the 3D shape of the head of one of the twelve hawks is measured with laser range finder. The defective part of the shape data is complemented plurality of range images. Next, multi-spectral reflection model is developed for rendering the material of the metal work. The reflection model can describe reflection of metal, alloy and inhomogeneous dielectric material. In this paper, we described reflection properties of Oborogin as alloy with the reflection model. Third, An estimation algorithm of spectral reflectance from RGB camera outputs is developed based on statistically analysis of relation of spectral reflectance and camera output. The object material is discriminated with the estimated spectral reflectance. Finally, we rendered CG image of the craft object with estimated material information.

### 1. はじめに

歴史的に価値の高い工芸作品は、形状情報と質感が極めて重要な要素となる。これまでデジタルアーカイブの分野では、美術品や文化財を3次元形状計測に基づいてコンピュータグラフィックス(CG)再現が行われてきている[1-2]。CG技術に基づいた美術品のデジタルアーカイブは、自由な視点や自由な照明環境で対象の文化財を鑑賞できるという利点がある。特に工芸品などの立体造形は、その形状の美しさに美術的価値があるため3次元的なCG再現としてのデジタルアーカイブは有効なアプローチであると考えられる。

しかしながら、金工作品等の金属物体は石膏像等のような不均質誘電体とは異なり、内部反射を持たず鏡面反射成分しか持たないためレーザー計測が難しいという問題がある。また、古い工芸作品では、その素材の記録や情報が残されていないため、どのような材料がどこに使用されてい

るか等の詳細が知られていないことが多い。本研究で対象とする東京国立近代美術館の工芸館に所蔵されている明治期の工芸作品「十二の鷹」も、金工作品であり、しかも、その材料に関する情報が不足している問題からデジタルアーカイブが難しい対象の一つである(図1)。この「十二の鷹」は明治期の金工家である鈴木長吉(1848-1919)によって制作され、1893年開催のシカゴ万国博覧会で発表されたものである[3]。この「十二の鷹」は、青銅の地に金、銀、赤銅、臙銀による象嵌、さらに嘴の漆の塗りがなされている金工作品である。

本研究では、先程述べた「十二の鷹」を対象に、頭部の形状を3次元形状計測し、3DCGで再現する手法を提案してきた。本法の前報[4]では、分光情報に基づいた合金の光反射モデルを提案し、「十二の鷹」の表面材質を単純な臙銀と仮定してCGレンダリングした。このモデルではFresnel関数で金属物体の反射光の色を計算するため、物理的な根拠に基づいたモデルであるため、入射角度の変化によるカラーシフトの問題や照明環境の変化による物体の見え方を精密に再現することができる。

しかしながら、実際の「十二の鷹」は青銅、赤銅、臙銀、金、漆等の塗りがなされているため、この方法では必ずしも物理的に正しい色を再現できているわけではない。

<sup>†1</sup> 長野大学 企業情報学部  
Faculty of Business and Informatics Nagano University

<sup>†2</sup> 信州大学大学院  
Shinshu University

<sup>†3</sup> 国立新美術館  
The National Art Center, Tokyo

<sup>†4</sup> 東京国立近代美術館  
The National Museum of Modern Art, Tokyo

そこで本稿では「十二の鷹」の表面において、いくつかの表面材質を仮定し、光反射モデルで材質の反射特性を予測するだけでなく、カメラデータから分光反射率を推定することで計算面と計測面の両者のアプローチから「十二の鷹」のCG再現を目指す。

本研究では、レーザー光を用いて光切断法により対象物体の形状計測を行う。このとき計測精度を高めるために対象物体の小領域ごとに計測し、それらを1つの形状情報に合成する。そして、光反射モデルに基づいた物体をCG再現する手法を提案している。

本稿では、対象物体をカメラで撮影し、その画像情報から分光反射率を推定する。不均質誘電体については、その分光反射率を用いて、LambertモデルとTorrance-Sparrowモデルに基づいて対象をCG再現する。金属物体に対しては、既知の金属物体と波長ごとにFresnel反射率を比較することで物体の材質を推定する。金属材料としては、青銅、臙銀、金、不均質誘電体としては、漆等の塗料を仮定して対象を計測しレンダリングする。

ここでは推定した材質の分光反射率等の反射特性に基づいて、分光的な光反射モデルを用いて物体をCG再現する。本研究では、「十二の鷹」のCG再現において、まだ、個々の材質の光反射特性を再現している段階であるため、視覚的なレベルでの総合評価ができないため、ここの反射特性の計測値と計算値を比較した。



図1 計測対象とした「十二の鷹」のうち一羽

Figure 1 One of the twelve hawk which is measurement object

## 2. 金工作品の形状計測

立体の造形物をデジタルアーカイブするときレーザー光を用いた形状計測が一般に行われる。工芸作品の形状計測は、計測対象の破損を防ぐために非接触に行うことが必要であるため、本研究においても、レーザー光を用いた光切断法による形状計測を行う(図2)。

しかしながら、一般にレーザー光は、拡散面に対してしか適用することが難しいため、黒色の表面や鏡面では十分な精度で形状計測を行うことができない。特に金属物体のレーザー光計測は難しい。本研究で対象とする「十二の鷹」の場合においても、特にレーザー光が鏡面反射をしたり、レーザー光が届かなかつたりする部分で欠損部分が生じる。金属物体は内部反射を持たないが、物体表面が持つ粗さを

利用して、レーザー光の拡散反射を捉えることで形状の計測を行う(図2)。形状計測データにはそれぞれ欠損領域ができるので、様々な方向から「十二の鷹」を計測し、獲得できた複数の小領域の形状データを合成して、一つの形状として生成した(図3)。形状データの合成は、各小領域で対応点を求め、その対応点を手掛かりにして形状データの合成を行う(図4)。複数形状を合成したとしても部分的に欠損部分が残ってしまう。この欠損部分はNURBS曲面に欠損部分にフィッティングして形状情報の補完を行った。

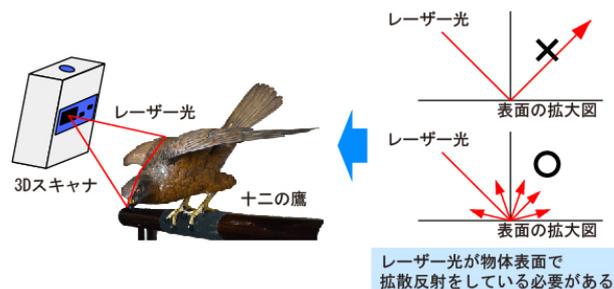


図2 レーザー光を用いた3次元形状計測法

Figure 2 3D shape measurement method with laser beam

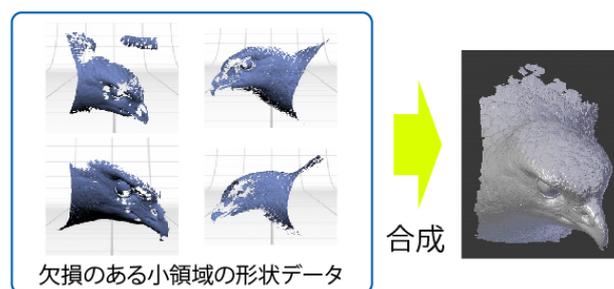


図3 計測された小領域の形状データを合成

Figure 3 Composed image of each region.

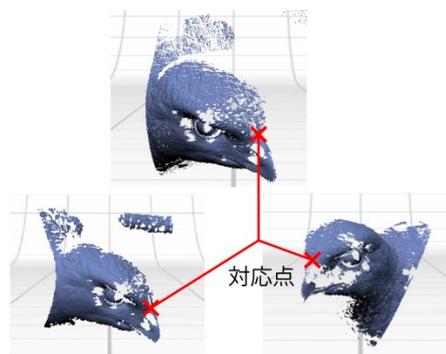


図4 形状の欠損部分は複数のレンジ画像から合成

Figure 4 The defective part of the shape data is complemented plurality of range images.

## 3. 分光的な光反射モデル

本研究ではモデルベースで工芸作品のCG再現を行うた

め対象物体の光反射モデルで記述する。また、様々なシーン照明環境下で物体を CG 再現できるように光反射モデルは分光的に拡張する。光反射モデルは物体表面で生じる光反射のプロセスを詳細な数学モデルで記述し、表面の光沢や陰影を CG でレンダリングする。「十二の鷹」の表面材質は主に複数の金属を混ぜ合わせた合金であるが、嘴の漆等の表面に塗布された塗料は不均質誘電体であるため、本研究ではそれぞれの表面材質に応じた光反射モデルを用いる。

### 3.1 金属の光反射モデル

まず金属の光反射モデルについて述べる。対象の材質は複数の金属からなる合金とする。金属表面の反射光は界面反射のみであるため内部反射を持たないため、金属の色は鏡面反射光のみで決まる。金属の反射光は波長ごとに反射率が異なる。また、金属の色は入射角度によっても変化する。このような金属の反射光の物理的に Fresnel 反射に基づく。金属は極めて高い反射率を持ち、さらに入射する光の角度により色に変位するカラーシフトと呼ばれる現象が発生する。金属光沢の波長依存性は Fresnel 反射関数に波長毎に与える複素屈折率で記述する。このときの金属表面で光が反射され視覚系に到達したときの色信号  $C(\lambda)$  は次式のように記述できる。

$$C(\lambda) = F(n(\lambda), k(\lambda), \theta_i) E(\lambda) \quad (1)$$

このとき屈折率は波長に依存し複素数として値を持つ。屈折率は波長  $\lambda$  の関数として、実数項は  $n(\lambda)$ 、虚数項は  $k(\lambda)$  となる。ただし  $k(\lambda)$  は吸収係数とも呼ばれる。このとき(1)式は完全鏡面の滑らかな面による反射光のモデルを記述しているが、実際の物体表面は微細な凹凸があるため、この微細な凹凸により幾何的に反射光強度が変化する。ここで Torrance-Sparrow モデル[5]を用いて粗さパラメータ  $\mu_0, \mu_1$  を導入し、金属物体の表面の粗さを表現する。図 5 は本研究で用いる光反射の幾何モデルである。この図で示す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  $\theta_i$ 、 $\mathbf{N}$  と  $\mathbf{V}$  のなす角は、 $\theta_r$  となる。ここで作るモデルは gloss 成分と mirror 成分の項をモデル化する。そして金属表面の反射をモデル化し、視覚系に入射する色信号を屈折率と吸収係数の関数として記述する。金属の色信号  $C(\lambda)$  は次式のように記述できる[6]。

$$C(\lambda) = \beta \frac{F(n(\lambda), k(\lambda), \theta_i) D(\mu_0, \varphi) G(\mathbf{N}, \mathbf{V}, \mathbf{L})}{\cos \theta_r} E(\lambda) + \chi D(\mu_1, \varphi) F(n(\lambda), k(\lambda), \theta_i) E(\lambda) \quad (2)$$

ここで  $\beta, \chi$  はそれぞれ gloss 成分と mirror 成分の反射強度を表す係数である。

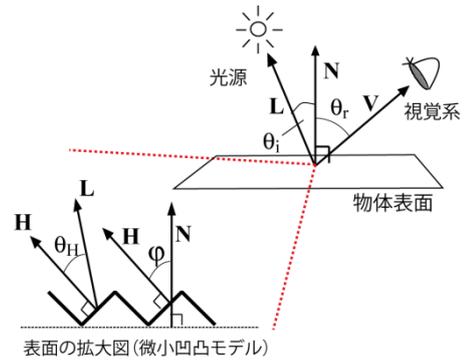


図 5 光反射の幾何モデル

Figure 5 Geometrical model of light reflection

### 3.2 合金の光反射モデル

金属物体の色は屈折率  $n(\lambda)$  と吸収係数  $k(\lambda)$  の 2 つの関数によって決まる。この 2 つの関数の組は金属の種類に対応するパラメータと考えることができる。そこで本研究では  $m$  種類の金属からなる合金において、それぞれの金属に対応する屈折率と吸収係数の組  $n_1(\lambda), k_1(\lambda)$  から  $n_m(\lambda), k_m(\lambda)$  を用いて、それぞれの金属の色信号を求める。その上で、色信号  $C_{\text{alloy}}(\lambda)$  は次式のように、それぞれの金属の色信号の線形結合として記述する。

$$C_{\text{alloy}}(\lambda) = w_1 C(\lambda, n_1(\lambda), k_1(\lambda)) + w_2 C(\lambda, n_2(\lambda), k_2(\lambda)) + \dots + w_m C(\lambda, n_m(\lambda), k_m(\lambda)) \quad (3)$$

ここで  $w_1, w_2, \dots, w_m$  はそれぞれの金属の含有量に対する割合であり、 $1 = w_1 + w_2 + \dots + w_m$  となる。

「十二の鷹」の材質の一つである臙銀は、日本古来の金属工芸で使われてきた色金と呼ばれるものの一つであるが、これは主に銀と銅を混ぜたもので、そこに少量の金を加えた合金である。現時点では「十二の鷹」の材質は正確にはわかっていないため、本稿では「十二の鷹」の材質を臙銀と仮定した。表 1 は今回の計算で使用した臙銀 (合金) の素材金属の割合である。図 6 (a) は銀の屈折率を示し、 $n_s(\lambda), k_s(\lambda)$  と表現する。図 6 (b) は銅の屈折率を示し、 $n_c(\lambda), k_c(\lambda)$  と表現する。図 6 (c) は金の屈折率を示し、 $n_g(\lambda), k_g(\lambda)$  と表現する。並四分一の場合、これらを用いて合金表面から反射して視覚系に到達する色信号  $\bar{C}_{\text{alloy}}(\lambda)$  は次式のように計算される。

$$\bar{C}_{\text{alloy}}(\lambda) = 0.250 C(\lambda, n_s(\lambda), k_s(\lambda)) + 0.749 C(\lambda, n_c(\lambda), k_c(\lambda)) + 0.001 C(\lambda, n_g(\lambda), k_g(\lambda)) \quad (4)$$

図 7 は提案手法で計算した並四分一の臙銀の反射特性である。このグラフは波長、入射角、反射率の関係を 3 次元グラフで示しており、臙銀の反射光の色は入射角で変化していることがわかる。

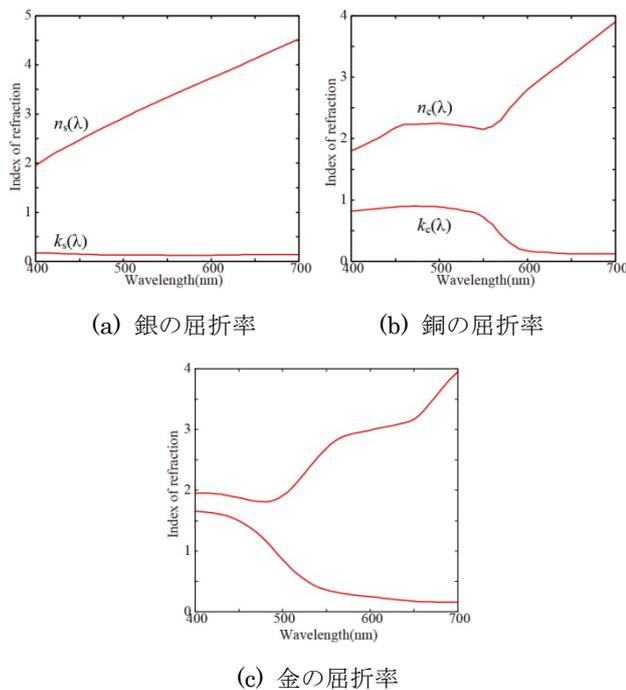


図 6 臙銀の分光反射率を計算するために使用した素材金属の屈折率

Figure 6 Index of refraction of ingredient of alloy for calculating spectral reflectance of Oborogin.

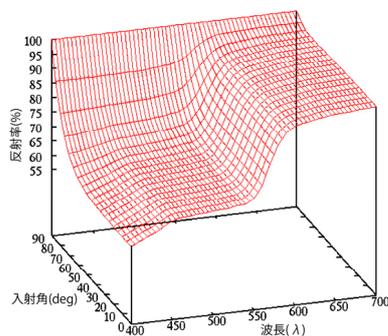


図 7 臙銀（並四分一）の反射特性の計算結果

Figure 7 Calculating result of reflection property of Oborogin (Nami-Shibuichi)

表 1 臙銀（合金）の素材金属の含有量の割合

Table 1 Content of metal material of Oborogin (alloy)

|          | 銀     | 銅     | 金    |
|----------|-------|-------|------|
| 並四分一     | 25.0% | 74.9% | 0.1% |
| 白四分一     | 59.4% | 39.6% | 1.0% |
| 上四分一     | 39.6% | 59.4% | 1.0% |
| 並四分一 内三分 | 29.7% | 69.3% | 1.0% |
| 並四分一 外三分 | 22.7% | 76.2% | 1.0% |

### 3.3 不均質誘電体の光反射モデル

物体表面の総合的な不均質誘電体の反射モデルを構築する。プラスチック、塗料などの不均質誘電体の表面反射

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。物体表面の光反射のプロセスを分光関数として記述すれば視覚系に入射する色信号  $C(\lambda)$  は光の波長  $\lambda$  の関数として次式のようにモデル化できる。

$$C(\lambda) = \alpha \cos \theta_i S(\lambda) E(\lambda) + \beta \frac{F(n, \theta_H) D(\mu_0, \varphi) G(N, V, L)}{\cos \theta_i} E(\lambda) + \chi D(\mu_1, \varphi) F(n, \theta_i) E(\lambda) \quad (5)$$

右辺第 1 項は拡散反射成分、第 2 項は gloss 反射成分、第 3 項は perfect mirror 成分を示す。  $\alpha, \beta, \chi$  はそれぞれ拡散反射, gloss, perfect mirror の項の重み係数である。ここでこれら 3 つの重み係数は、個々の材質によって異なる物体固有のパラメータとなる。

## 4. 分光反射率計測に基づいた物体の材質推定

### 4.1 RGB カメラを用いた物体表面の分光反射率推定

本研究では、カメラで撮影した画像情報から分光反射率を推定し、その分光反射率情報と光反射モデルの計算値をフィッティングすることで対象物体の材質を推定する。

一般に RGB カメラのような少数のセンサ数のカメラで連続的な分光情報を推定することは難しい。これは低次元情報から高次元情報を推定する問題となり、何らかの拘束条件がなければ数学的に推定することが難しいからである。そこで多数のカラーパッチから分光反射率とカメラ出力の組のデータベースを構築し、そこから分光反射率の統計的な性質から拘束条件を求め、高次元情報を推定する。まず一般的な物体の分光反射率  $\bar{S}(\lambda)$  は、少数の基底関数  $B_i(\lambda)$  の線形結合で表現できるという Vrhel らの知見[7]に基づく分光反射率は次式のように記述できる。

$$\bar{S}(\lambda) = \sum_i B_i(\lambda) \quad (6)$$

本稿では分光情報は、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。RGB カラーカメラと分光光度計で、カラーチャートを計測し、その各カラーパッチについてカメラ出力と分光反射率の対応関係をデータベース化する。このときのカラーパッチの数を  $m$  とすると、データベース内の分光反射率の組  $\Lambda$  は  $m \times 61$  の行列で示す。このデータベースを主成分分析し、3 つの主成分ベクトルを求める。この 3 つの主成分ベクトルは  $61 \times 1$  のベクトル  $\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \mathbf{b}_3$  で示す。各画素に対応する分光分布を  $\bar{\mathbf{s}}$  はこの 3 つの基底ベクトルの線形結合で示すことができる。

$$\bar{\mathbf{s}} = w_1 \mathbf{b}_1 + w_2 \mathbf{b}_2 + w_3 \mathbf{b}_3 \quad (7)$$

ここで  $w_1, w_2, w_3$  は、それぞれの基底ベクトルの重み係数でありスカラー量である。そしてカメラの RGB 出力から基底関数の重み係数への変換は  $3 \times 3$  の変換行列  $\mathbf{M}$  を用いて次式のように記述する。

$$\begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (8)$$

このとき  $\mathbf{M}$  は分光反射率の組み  $\mathbf{A}$  とカメラ出力の組みとの関係から推定する。この  $\mathbf{M}$  が求まったカメラを基準カメラと呼ぶ。しかしながら、このままでは分光光度計等の特殊な計測機器がなければカメラ画像から分光反射率を推定することができない。

そこで次に任意のカメラで分光反射率を推定するために 24 色程度のカラーチャートを同時に計測し、それを手掛かりに撮影時のカメラの色空間を基準カメラの色空間へ変換する。このとき任意のカメラを用いて物体を計測する時に同時にカラーチャートを計測する。  $k$  色のカラーチャートを用いた場合、基準カメラのカメラ出力の組は  $3 \times k$  の行列  $\rho_0$  とする。ただし  $k$  は RGB3 原色よりも多い値とする必要があるため  $k \geq 3$  とする。この  $\rho_0$  を用いて他のカメラの較正を行うが、この  $\rho_0$  は他のカメラ系に依存しないので一度求めておけば良い。

次に実際にそのカメラで対象物体を計測するときには、同じ  $k$  色のカラーチャートを計測する。このときのカメラ出力を  $3 \times k$  の行列  $\rho_r$  とする。このとき  $\rho_r$  の色空間から  $\rho_0$  の色空間へ線形変換する  $3 \times 3$  変換行列  $\mathbf{M}_2$  は次式で求める。

$$\mathbf{M}_2 = \rho_0 \rho_r^+ \quad (9)$$

任意のカメラで対象物体を計測したときの各画素のカメラ出力を  $3 \times 1$  の行列  $\rho_s$  とすると(3)式の  $w_1, w_2, w_3$  は、この  $\mathbf{M}_2$  と基準カメラの変換マトリックス  $\mathbf{M}$  を用いて次式で求める。

$$\begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_2 \rho_s \mathbf{M} \quad (10)$$

ここで求まった  $w_1, w_2, w_3$  から(2)式を用いて物体の分光反射率情報を 61 次元のベクトルとして復元する。

#### 4.2 推定した分光反射率推定から物体の材質を判別

金属物体の場合には推定した対象の分光反射率に対して、光反射モデルで計算した色信号  $C_c(\lambda, n_j(\lambda), k_j(\lambda))$  をフィッティングすることで対象物体の材質を判別する。このとき  $j$  は材質の種類を示すインデックスである。このとき次式を最小化する  $j$  の材質が判別された材質となる。

$$\min_j \sum_{\lambda} \{C_c(\lambda, n_j(\lambda), k_j(\lambda)) - \bar{S}(\lambda)\}^2 \quad (11)$$

### 5. レンダリングアルゴリズム

「十二の鷹」から推定したそれぞれの材質で「十二の鷹」頭部をレンダリングする。現時点では、物体全体が同一の材質であると仮定してレンダリングする（テクスチャは持たない）。図 8 は「十二の鷹」の CG 生成のプロセスを示したものである。この図では物体表面の光反射を分光的に

計算し求める。

推定した色信号  $\bar{C}(\lambda)$  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 を求める。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \int_{400}^{700} \bar{C}(\lambda) \begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix} d\lambda \quad (12)$$

この後、ディスプレイのデバイス特性に合わせてデバイス RGB 値に変換する。

### 6. 実験

「十二の鷹」のうち一羽の頭部を対象に、3D スキャナ (NextEngine HD pro) を用いて形状計測を行った。図 9 は形状計測をしている様子の写真である。このとき計測対象に対して様々な角度から 3D スキャナを用いて複数回の形状計測を行った。その後、計測した複数の形状データを合成し、欠損部分を補完した。これにより完成した合成後の形状データは、約 103 万ポリゴンとなった。

次に「十二の鷹」の頭部に注目し、いくつかの材質の分析を行った。図 10 は、「十二の鷹」の頭部材質の仮定を示したものである。ここでは、その仮定が正しいかどうか提案手法を用いて、カメラ画像から推定した分光反射率と光反射モデルで計算した分光反射率を比較して判別した。図 11 は、その推定結果と反射モデルで計算した結果を比較したものである。この結果、比較的計算値と推定値のグラフの波形が近いことがわかった。図 12 は嘴の漆の分光反射率の推定結果である。

図 13 は「十二の鷹」を提案手法に基づいて分光的に 3DCG 化した結果である。計測データは「十二の鷹」のうち一羽の頭部である。屋外の照明環境を別途計測し光源データとして使用している。現時点では「十二の鷹」の表面材質は正確にはわかっていないため、対象物体そのものの精密な色再現はできていないが、形状データは表面の羽毛も含めて再現ができています。CG 生成を行った PC の仕様は CPU が Intel Core i7 3770 3.4GHz、GPU は NVIDIA GeForce GTX680(4GB)、メモリは 32GB である。

### 7. まとめ

本稿では、国立近代美術館に所蔵されている「十二の鷹」を対象に形状情報と表面の反射特性の計測手法を提案した。形状情報は、レーザー光を用いて光切断法により計測した。このとき計測精度を高めるために対象物体の小領域ごとに計測し、それらを 1 つの形状情報に合成した。2 番目に光反射モデルに基づいた物体を CG 再現する手法を提案した。3 番目に対象物体をカメラで撮影し、その画像情報から分光反射率を推定した。不均質誘電体については、その分光反射率を用いて、Lambert モデルと Torrance-Sparrow モデル

に基づいて対象を CG 再現した。金属物体に対しては、既知の金属物体と波長ごとに Fresnel 反射率を比較することで物体の材質を推定した。

最後に、推定した材質の分光反射率等の反射特性に基づいて、分光的な光反射モデルを用いて物体を CG 再現した。本研究では、「十二の鷹」の CG 再現において、まだ、個々の材質の光反射特性を再現している段階であるため、視覚的なレベルでの総合評価ができないため、この反射特性の計測値と計算値を比較するにとどめた。

**謝辞** 本研究は JSPS 科研費 24500299 の助成を受けたものです。

**参考文献**

- 1) M. Levoy: The digital Michelangelo project. In Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, pp.131-144 (2000).
- 2) 池内克史, 倉爪亮, 西野恒, 佐川立昌, 大石岳史, 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-, 日本バーチャリアリティ学会論文誌, vol.7・1, pp.103-113 (2002)
- 3) 鈴木長吉: 「十二の鷹」1893年, 東京国立近代美術館 <http://search.artmuseums.go.jp/records.php?sakuhin=4048>
- 4) 松田宗, 田中法博, 市川拓磨, 望月宏祐, 室屋泰三, 北村仁美: 鈴木長吉作「十二の鷹」の3次元形状とCG再現, 日本色彩学会会誌, Vol.38, No.3, pp208-209, (2014).
- 5) 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).
- 6) 田中法博, 望月宏祐, 禹在勇: 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, pp.311-321 (2010).
- 7) M. J. Vrhel, R. Gershon, L. S. Iwan: Measurement and analysis of object reflectance spectra, Color Research and Application., Vol.19, pp.4-9, (1994).

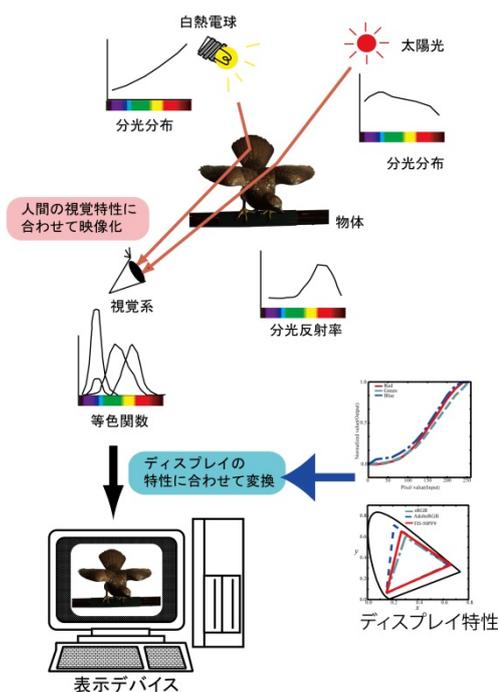


図 8 CG 生成のプロセス

Figure 8 The process of CG rendering

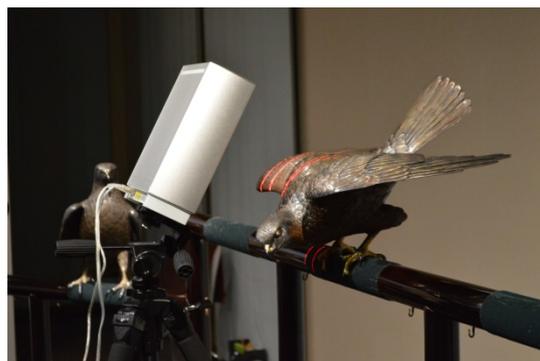


図 9 「十二の鷹」を 3D スキャナで計測している様子  
 Figure 9 The experimental scene of 3D shape measurement with 3D scanner

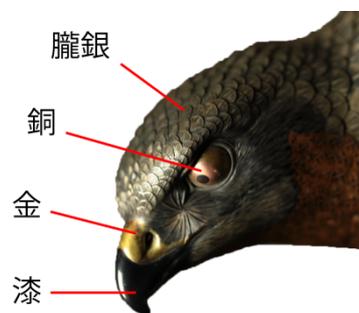


図 10 「十二の鷹」の頭部の材質(仮定)  
 Figure 10 The material of head of the twelve hawk (assumption)

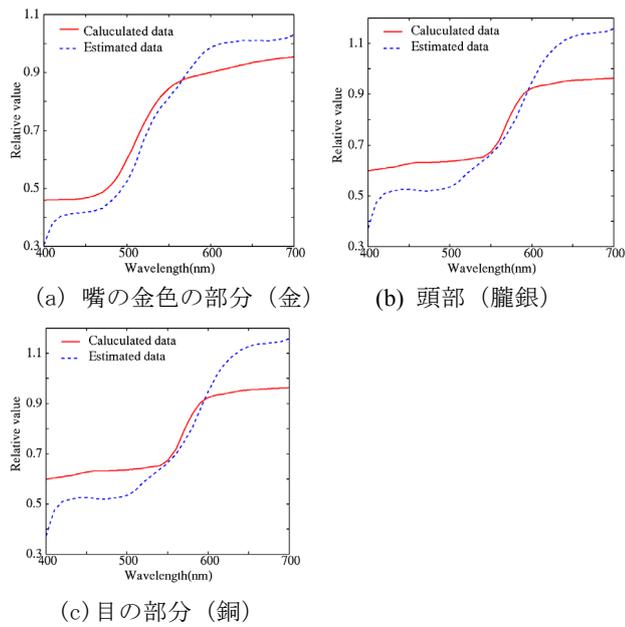


図 11 金属部分の分光反射率の推定結果

Figure 11 Estimation results of spectral reflectance of metal part

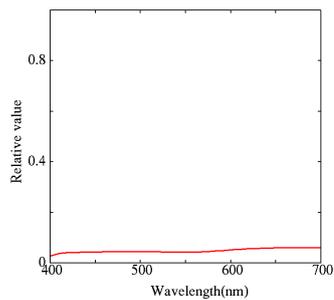
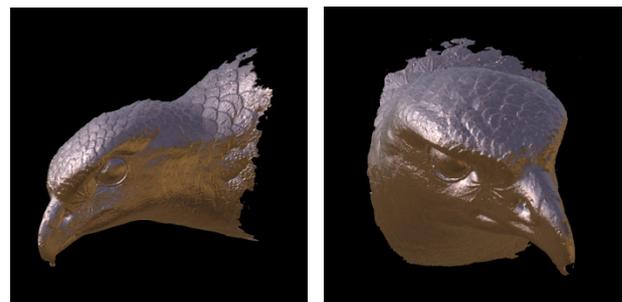
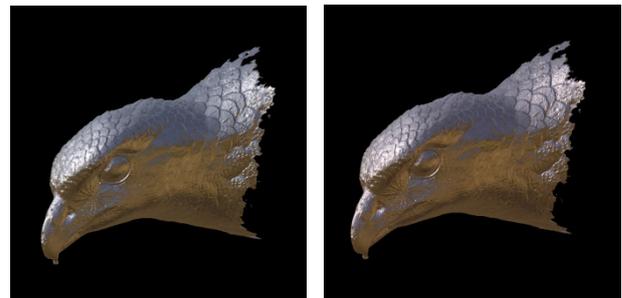


図 12 漆の分光反射率の推定結果

Figure 12 Estimation result of spectral reflectance of Urushi.

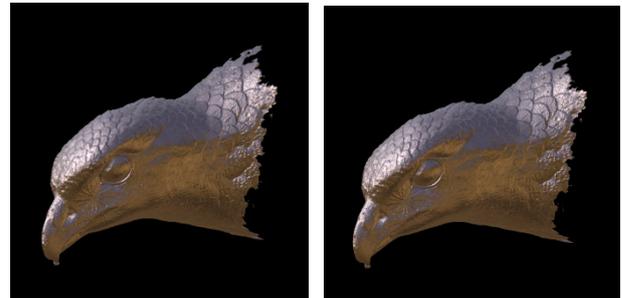


(a) 「十二の鷹」のCG生成結果 (並四分一)



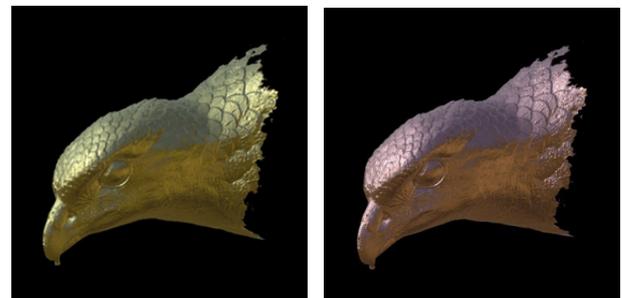
(b) 白四分一

(c) 上四分一



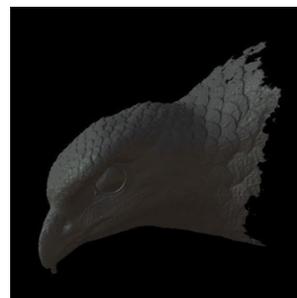
(d) 並四分一 内三分

(e) 並四分一 外三分



(f) 金

(g) 銅



(h) 漆

図 13 「十二の鷹」頭部のレンダリング結果

Figure 11 Rendering results of head of twelve hawks.