

経年変化を考慮した反射モデルによる金銅仏表現

山本 龍吾 芝 公仁 岡田 至弘
龍谷大学大学院 理工学研究科

国宝や重要文化財を対象とした、高精度デジタル記録の方法として、三次元形状計測装置を用いて計測する方法が、近年多用されている。しかし歴史的に貴重なものを対象にしているため、計測環境によるオクルージョンの問題や計測装置自体の精度により、欠損領域が発生する問題がある。本研究では、欠損領域が存在する金銅仏に対して、表面微細形状の外殻に相当する簡易形状モデルを生成し、対象形状の土台となる部分を作成することを提案する。また、物体表面を構成する金属の錆を分析することで、金属特有の経年変化による劣化状態を表現するための反射モデルを考察する。

A Reflection Model for Representation of Gilt Bronze Statues with Aging Degradation

Ryugo Yamamoto Kimihito Shiba Yoshihiro Okada
Graduate School of Science and Technology
Ryukoku University

A number of studies measure national treasures and important cultural assets by three-dimensional scanning systems and archive measurement results in little degradation and a high sense of reality. Because of restrictions in measuring historical valuable objects and accuracy limitations of scanning systems, the measurement results have occluded regions. This paper describes a method of generating a simple shape model as base shape of a gilt bronze statue of the Buddha for inpainting occluded regions. This paper also describes analysis of construct of metallic patinas on the surface and a reflection model for representation of aging degradation of the metal.

1. はじめに

歴史的に貴重な文化財を後世に伝えるために如何に劣化の少ない、現実感の高いものとしてデジタル保存を行うため、三次元形状の高精細表現は重要な研究課題である。

これまで、国宝や重要文化財を対象に三次元形状計測装置を用いて計測を行い、デジタル保存として劣化のない形で残す研究が行われている。しかし、これらを三次元形状計測装置で計測する場合、歴史的に貴重なものを対象にしているが故に、様々な制約が存在する。例えば、計測環境の制約によるオクルージョンの問題、計測装置自体の精度の限界による細部の情報不足などが考えられる。これにより、形状復元が不可能な欠損領域が発生してしまうという問題が生じる。

従来、この不完全な三次元形状データに対して、修正・加工を行うソフトウェアを利用し、修正や加工を行う際、複雑な形状データである場合、三次元形状データのポリゴンパッチ数が膨大で、欠損部分の補間や穴埋め、面の重複部分の削除などを行うことは、時間の非効率や高

度な技術を要し、容易ではないという問題がある。また形状データを手動、あるいは自動で修正を行う場合、表面の微細凹凸形状を十分考慮してポリゴンの欠損部分の補間などを行うことは、あまり追求されてこなかったといえる。自動で修正を行った場合、精確な形状復元にならない可能性がある。意図していないポリゴンの辺どうしを繋いだりしてしまうことが考えられる。これは、精確な形状復元とはいえない。これらのことにより、三次元形状データの表面形状自体を修正することは有効的ではないと考えられる。

本研究では欠損領域が存在する三次元形状データに対し、表面微細形状の外殻に相当する簡易形状モデルを生成し、対象形状の土台となる部分を生成する。

また、仮想空間上で現実感のある文化財を表現するためには、物体表面の反射特性などを考慮し再現する必要がある。物体表面を表現するための反射モデルは多数存在するが、本研究の対象である金銅仏に関しては経年変化による表面の劣化が激しく、一般的な反射モデルでは表現が不可能であるため、経年変化を考慮した反

射モデルが必要となる。そこで、本研究では微細な表面形状を表現するために金属の経年変化を考慮した金銅仏の表現手法を提案する。

2. 三次元形状計測

対象物体の形状データを取得するために三次元形状計測装置として Creafom 社のハンディレーザースキャナ EXAscan を使用した。EXAscan はレーザ光を用いて非接触で高速に対象物の表面形状を計測し、分解能 0.05mm、精度最大 40 μ m の高精細スキャンが可能である。対象物体にポジショニングマーカを貼り、スキャン処理の実行中に、リアルタイムでポジショニングマーカからの反射を捉えて計測を行う。その原理は線状レーザ光による光切断法であり、可搬型で機動性に優れており、柔軟に計測を行うことが可能である。

2.1 計測環境による形状データの問題点

安田ら[1]の研究で対象とした欄間のような複雑な形状の三次元形状データを取得するには、様々な問題が生じる。計測環境の制約によるオクルージョンの問題や、計測装置の精度の限界による細部の形状データ不足などが挙げられる。欄間の場合、固定されているため一定方向からのレーザ計測では、レーザ光に対し垂直な表面は計測可能だが、水平な表面の計測は不可能である。そのため、見えない部分は欠損領域となる(図 2 中においては赤色領域の部分)。また、高精細な形状データ部分はポリゴン自体も細かく、数も多いため、修正するのが非常に困難である。



図 1：欄間の形状データ

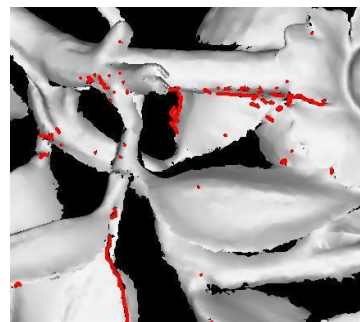


図 2：欠損領域

2.2 計測環境と対象データ

今回は対象物体が貴重な文化財であるため、直接物体本体にマーカを貼ることが不可能であるため、対象物体を囲うような円筒形(図 3 内)を銅線で自作し、プラスチック製のネットで覆った。ネットにマーカを貼ることで直接対象物体にマーカを貼ることなく、計測することが可能となった。

計測時は対象物体を動かすことが出来ない条件であり、形状データの取得には全周方向からの計測が必要なため、ハンディレーザースキャナを使用し 360 度方向から計測を行った。

円筒形を用いることでポジショニングマーカを全周に貼り付けることが可能となり、全周に配置することで常にマーカからのレーザの反射を捉えられる状態にし、計測を行うことにした。

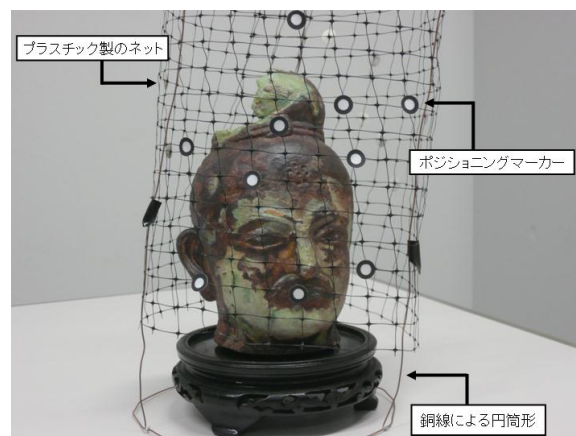


図 3：計測環境

対象とするのは、東京国立博物館所蔵の金銅仏である。铸造による銅製の仏像の表面に鍍金を施し金色に仕上げている。しかし、経年劣化による鍍金の剥離や銅部分の錆により緑青で覆われている。



図 4：金銅仏と計測データ

3. 簡易形状モデル

ここでは、欠損領域が存在する形状データに対し複雑形状復元を実現するために提案する、簡易形状モデルについて述べる。対象形状に欠損領域が存在するポリゴンデータなどの表面形状に対して、その外殻に相当する簡易的な形状モデルを生成し、対象形状の基本土台となる形状モデルと定義したものを、簡易形状モデルとする。この簡易形状モデルに対し、表面の微細凹凸形状を表現することで、複雑形状復元を可能とする。ただし、ここで述べる「複雑」とは、表面の微細凹凸形状のことである。

本研究での形状復元は、外殻に相当する簡易形状モデルと、その表面である微細凹凸形状の表現に分けて考察する。一般的なモデリングは、まず大まかな形状を作成し、その後、細部の形状を作り込んでいくという手順が考えられる。この手順を基に、大まかな形状（簡易形状モデル）を生成し、細部の形状（表面微細凹凸形状）を表現することで、複雑形状復元を行う。簡易形状モデルの特徴として、複雑な形状データはポリゴン数が膨大であり、修正、加工にも時間を費やさなければならず、さらに処理時間もかかるのに対し、簡易的な形状であることから、ポリゴン数は抑えられ、簡易形状モデルの表面に微細凹凸形状を表現することで、処理時間も短縮可能であると考えられる。

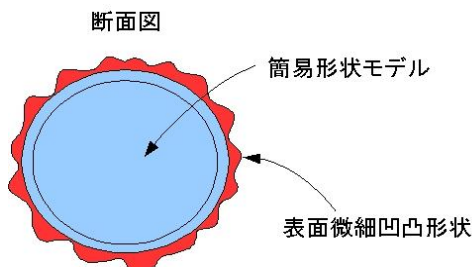


図 5：簡易形状モデル

次に、欠損領域が存在する形状データに対する簡易形状モデルの適用法の概念を図示する。

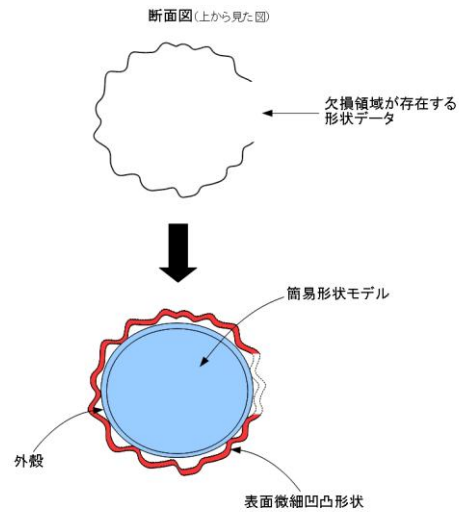


図 6：簡易形状モデル概念図

このように、欠損領域が存在する形状データに対して、その外殻に相当する簡易形状モデルを生成し、対象形状の土台となる部分を作成する。簡易形状モデルによって補間された形状データに対し、表面の微細凹凸形状を表現することで、金銅仏表現を目指す。

3.1 簡易形状モデルの生成

具体的に、簡易形状モデルの生成手法について以下に示す。

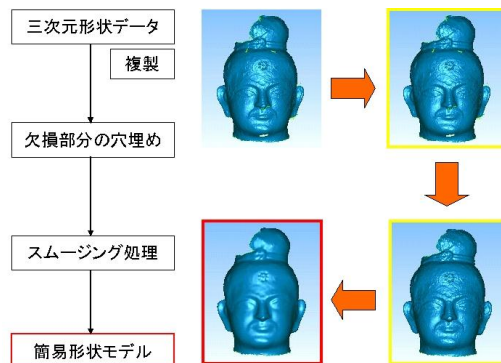


図 7：生成手順

対象の形状データと同様の形状データを複製し、欠損部分の穴埋めを行い、スムージング処理を数回繰り返す、表面が非常にフラットなモデルを生成する。これを、簡易形状モデルとして対象形状データに対し統合を行い、欠損領域の補間を行う。

3.2 簡易形状モデルによる補間結果

金銅仏の形状データに対して行った、簡易形状モデルによる補間結果と、補間前と補間後での欠損個数及び補間率を以下に示す。

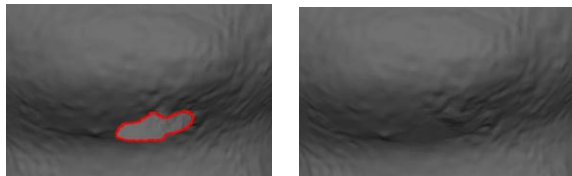


図 8：欠損領域と補間結果

表 1：欠損個数と補間率

	補間前	補間後	補間率[%]
欠損個数	156	54	65.4

金銅仏の形状データは、計測装置のレーザー光が当たらなかった顎下の一部に欠損領域が存在しているため、その一部に対して外殻に相当する簡易形状モデルを生成し補間を行っている。表面形状が非常に複雑であり微細な欠損が多数存在する。そのため、簡易形状モデルでは補間が出来ない箇所も存在している。

4. 経年変化を考慮した反射モデル

4.1 表面下散乱モデル

物体表面を正確に表現するためには表面上での反射のみではなく、物体内部を通過した光が物体内部で散乱し再び物体表面から光が通過する現象（表面下散乱）を考慮する必要がある。これを考慮したモデルとして双方向散乱面反射率分布関数(BSSRDF)を用いる方法がある。物体上のサンプル点 x_o から $\vec{\omega}_o$ 方向に放出する輝度 $L_o(x_o, \vec{\omega}_o)$ は点 x_i に $\vec{\omega}_i$ 方向から入射する光 $L_i(x_i, \vec{\omega}_i)$ と BSSRDF である S で表され以下のような式になる。

$$L_o(x_o, \vec{\omega}_o) = \int_A \int_{2\pi} S(x_i, \vec{\omega}_i, x_o, \vec{\omega}_o) L_i(x_i, \vec{\omega}_i) (\vec{n}_i \cdot \vec{\omega}_i) d\omega_i dA(x_i) \quad (1)$$

ここで A は物体表面の面積、 \vec{n}_i はサンプル点 x_i における法線であり $dA(x_i)$ はサンプル点 x_i における微小面積とする。相井らは式 1 を拡張し、顔料特性を考慮した反射モデルを提案している[2]。従来の BSSRDF は物体表面を滑らかと仮定しているため、表面の粗さを考慮した拡散近似による反射モデル[3]を用いた(式 2)。式 1 の S を S_d に置換し、積分計算を行うことで光

の輝度を求めている。ここで R_d は拡散反射率、 ρ_{dt} は表面粗さなどの幾何形状を表している。

$$S_d(x_i, \vec{\omega}_i, x_o, \vec{\omega}_o) = \frac{1}{\pi} \rho_{dt}(x_i, \vec{\omega}_i) R_d(\|x_i - x_o\|) \rho_{dt}(x_o, \vec{\omega}_o) \quad (2)$$

ここで ρ_{dt} は式 3 で表され、 f_r は Torrance-Sparrrow の双方向反射率分布関数(BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function)である。

$$\rho_{dt}(x, \vec{\omega}_o) = 1.0 - \int_{2\pi} f_r(x, \vec{\omega}_o, \vec{\omega}_i) (\vec{\omega}_i \cdot \vec{n}) d\vec{\omega}_i \quad (3)$$

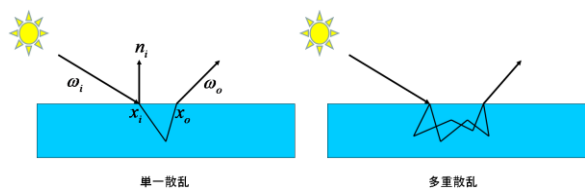


図 9：表面下散乱モデル

4.2 Kubelka-Munk 理論

Kubelka-Munk 理論とは、多層表面構造である材質を通過する光の反射率を求めるものである。Kubelka と Munk は色材層内（顔料、色素、その他混合物）の光に対する特性を吸収と散乱によってモデル化した[4]。ここでは、Kubelka-Munk の計算方法を説明する。

まずはじめに図 10 で示す色材層内部における上下方向へのある分光エネルギーを j, i とし、それらの色材の微小厚における変化量を散乱係数 S と吸収係数 K とする。 j, i の変化量は次式 4 で表される。

$$\begin{aligned} dj &= -(S+K)jdx + Sidx \\ -di &= -(S+K)idx + Sjdx \end{aligned} \quad (4)$$

さらに、式 4 を変形し、 j/i を反射率 R と置き換えた後、二つの境界条件を与えることにより、色材の任意の厚さにおける反射率の式 5 と厚さ無限大の場合の反射率の式 6 を得ることができる。ここで R_g は下地の反射率である。

$$R = \frac{\frac{1}{R_\infty} (R_g - R_\infty) - R_\infty \left(R_g - \frac{1}{R_\infty} \right) e^{SX \left(\frac{1}{R_\infty} - R_\infty \right)}}{\left(R_g - R_\infty \right) - \left(R_g - \frac{1}{R_\infty} \right) e^{SX \left(\frac{1}{R_\infty} - R_\infty \right)}} \quad (5)$$

$$R_\infty = \left(\frac{S+K}{S}\right) - \sqrt{\left(\frac{S+K}{S}\right)^2 - 1}$$

$$= \left(1 + \frac{K}{S}\right) - \sqrt{\left(\frac{K}{S}\right)^2 + 2\left(\frac{K}{S}\right)}$$

(6)

- R : 塗膜の反射率
- X : 塗膜の厚さ [μm]
- R_∞ : $X \rightarrow \infty$ のときの塗膜の反射率
- R_g : 下地層の反射率
- S : 塗膜の散乱係数
- K : 塗膜の吸収係数

ここで重要な点は、複数の色材を混合した場合、 K, S 値は式 7 のように和として表すことが可能である。なお、式中で m_i は色材 i の比率である。

$$K = \frac{\sum_i m_i K_i}{\sum_i m_i}, S = \frac{\sum_i m_i S_i}{\sum_i m_i}$$

(7)

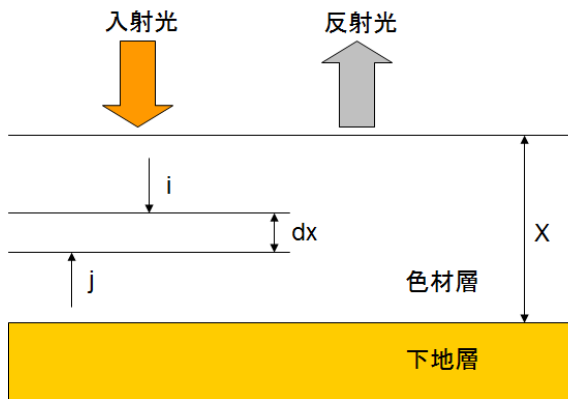


図 10 : Kubelka-Munk 理論模式図

この Kubelka-Munk 理論で説明されたような多層表面構造である物体表面に対する反射モデルを、多層構造化した経年変化（錆）を考慮した反射モデルへ近似的な表現を行う。経年変化（錆）を考慮するために式 2 中で表された拡散反射率 R_d を式 5（式 6 は厚さ ∞ の場合）に置き換える。

4.3 物体表面の劣化による粗さ表現

金銅仏表面は劣化が激しく、表面形状自体は微細な凹凸の連続である。このような表面の微細な凹凸の変化は、4.1 節で示した Torrance-Sp arrow モデルにおける BRDF を用いる（式 3）。式 3 中の表面粗さを表現している Beckmann 関数の粗さパラメータに物体表面の劣化による粗

さを表現するために、錆の拡がり具合の分布を利用することで、表面の粗さを表現する。

$$f_r(x, \vec{\omega}_o, \vec{\omega}_i) = \frac{D(x, \vec{\omega}_o, \vec{\omega}_i) G(x, \vec{\omega}_o, \vec{\omega}_i) F(x, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o)}{4(\vec{\omega}_i, \vec{n})(\vec{\omega}_o, \vec{n})}$$

(8)

ここで D はマイクロファセット分布関数（Beckmann 関数）、 G は幾何学的減衰係数、 F はフレネル反射率である。マイクロファセットとは微細な凹凸形状を構成する微小な面のひとつひとつのことである。

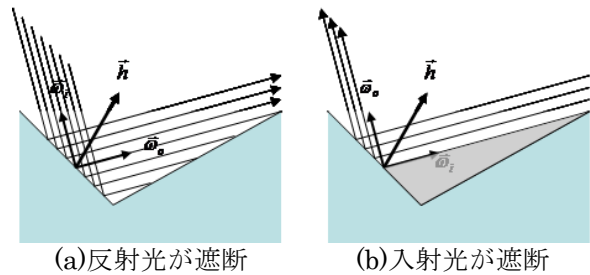


図 11 : マイクロファセットによる光の遮断

平面の微細な凹凸形状が一つ一つのマイクロファセットで構成されていると考える場合、ひとつのマイクロファセットに入射する光の一部は、表面に到達する前、または反射した後、隣のマイクロファセットによって遮断される。この遮断によって、鏡面反射がわずかに暗くなる。この効果は幾何学的減衰係数によって表すことができる。

図 11(a) のように左のマイクロファセットで反射した光が右のマイクロファセットで遮断されるとき、視点に達する光の割合 G_1 （入射光を 1 とする）は次式のようにになる。

$$G_1 = \frac{2(\vec{n} \cdot \vec{h})(\vec{n} \cdot \vec{\omega}_o)}{\vec{\omega}_o \cdot \vec{h}}$$

(9)

また、図 11(b) のようにマイクロファセットに到達する前に光が遮断される場合、光の割合 G_2 は次式のようにになる。

$$G_2 = \frac{2(\vec{n} \cdot \vec{h})(\vec{n} \cdot \vec{\omega}_i)}{\vec{\omega}_o \cdot \vec{h}}$$

(10)

ただし、 \vec{h} は入射方向 $\vec{\omega}_i$ と反射方向 $\vec{\omega}_o$ のハーフベクトルである。このようにマイクロファセ

ットで反射する光に関して、光が全く遮断されない（視点に到達する光の割合が 1）、反射光の一部が遮断される、入射光の一部が遮断されるという 3 つの場合が挙げられる。これらをすべて表すために、視点に到達する光の最小割合として幾何学的減衰係数は式 11 のように表される。

$$G(x, \vec{\omega}_o, \vec{\omega}_i) = \min \{1, G_1, G_2\} \frac{2(\vec{n} \cdot \vec{h})(\vec{n} \cdot \vec{\omega}_i)}{\vec{\omega}_o \cdot \vec{h}}$$

$$= \min \left\{ 1, \frac{2(\vec{n} \cdot \vec{h})(\vec{n} \cdot \vec{\omega}_o)}{\vec{\omega}_o \cdot \vec{h}}, \frac{2(\vec{n} \cdot \vec{h})(\vec{n} \cdot \vec{\omega}_i)}{\vec{\omega}_o \cdot \vec{h}} \right\} \quad (11)$$

また、鏡面反射光強度は光の入射角によって変化し、入射角が浅いほど鏡面反射光強度は強まり、全反射に近づいていく。この現象を表すフレネル反射率 F は次式のようになる。

$$F = \frac{1}{2} \frac{(g-c)^2}{(g+c)^2} \left(1 + \frac{(c(g+c)-1)^2}{(c(g-c)+1)^2} \right) \quad (12)$$

$$c = \vec{\omega}_i \cdot \vec{h}$$

$$g = \sqrt{\eta^2 + c^2 - 1}$$

η は材質の屈折率である。

D はマイクロファセット分布関数であり、微細面が面の法線に対してどの程度ずれて分布しているかを記述する関数である。 S_{rough} が小さいほど滑らかになる。物体表面の劣化による粗さを表現するために、錆の拡がり具合の分布を S_{rough} のパラメータとして用いる。分布関数 D は以下の式で表される。

$$D(x, \vec{\omega}_o, \vec{\omega}_i) = \frac{1}{S_{rough}^2 \cos^4 d} \exp \left(- \left(\frac{\tan d}{S_{rough}} \right)^2 \right) \quad (13)$$

4.4 経年変化（錆）の特性

Dorsey ら[5]は金属の錆について、経年で徐々に錆びていく様子のシミュレーションを仏像モデルで表現を行っている。化学的に金属が錆びる現象の流れとして、①金属表面が酸化、②酸化物が表面に被覆し被膜を形成（緑青）、③被膜層がさらに堆積、④堆積層が剥離、という流れである。各層がどのような光の反射をするのが定義されており、レンダリング時のライティング処理には複数層に渡っての反射と色の出

方について考慮されている。対象とする金銅仏の表面構造は、銅製の表面が緑青に覆われており、一部に金属箔がみられる状態である。この表面構造を、下地層である青銅と複数層からなる錆の層と定義する。青銅、錆が被膜した銅、それぞれの反射特性を分析することで、反射モデルへのパラメータを推定する。

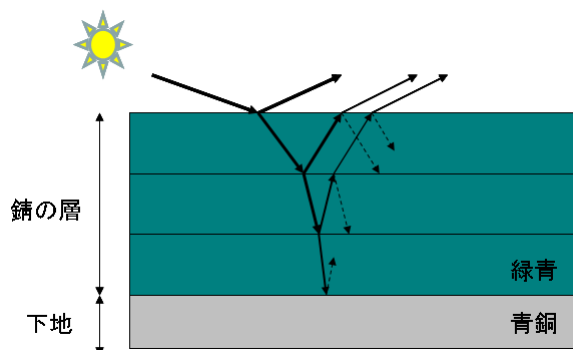


図 12：金銅仏表面の模式図

5. おわりに

本報告では、レーザースキャナによる三次元形状計測、欠損領域が存在する形状データを修正するための簡易形状モデルによる補間の提案、微細な形状を有する物体表面を表現するために経年変化を考慮した反射モデルの提案を行った。

今後の課題として、提案した反射モデルに基づいて反射効果を表現し、金銅仏の表現を行う。表現結果の評価手法について検討する必要がある。

参考文献

- [1] 安田裕一郎, 相井孝仁, 高井智代, 信原耕太郎, 岡田至弘: コンテキストベース三次元木彫モデルの復元, 人文科学とコンピュータシンポジウム, Vol.2008, No.15, pp.367-372, 2008.
- [2] 相井孝仁, 廣瀬翼, 岡田至弘: 顔料特性を考慮した表面下散乱モデルによる紙本の CG 表現, 情報処理学会研究報告(CH), Vol.2007, No.49, pp.97-103, 2007.
- [3] Craig Donner, Henrik Wann Jensen: Light Diffusion in Multi-Layered Translucent Materials, SIGGRAPH 2005, pp.1032-1039, Los Angeles, August 2005.
- [4] Von P.Kubelka and F.Munk: Ein Beitrag zur Optik der Farbanstriche, Zeitschrift für technische Physik, pp.593-601, 1931.
- [5] Julie Dorsey, Pat Hanrahan: Modeling and Rendering of Metallic Patinas, SIGGRAPH 1996, pp.387-396, 1996.