

令和 2 年 5 月 10 日現在

機関番号：23602

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16K00448

研究課題名（和文）分光的な光反射モデルに基づいた有形文化財の材質情報の画像計測法の開発

研究課題名（英文）Development of image measurement method for material information of tangible cultural property based on multi-spectral reflection model

研究代表者

田中 法博（TANAKA, Norihiro）

長野大学・企業情報学部・教授

研究者番号：90387415

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：複雑な反射特性を持つ様々な材質情報を記録できる画像計測に基づいた簡便なデジタルアーカイブ技術を開発した。提案手法では通常のカメラで撮影した画像データから材質計測できるようにした。この方法は、対象の光反射プロセスを光反射モデルと呼ばれる数学モデルで記述した。材質情報は、光反射モデルのモデルパラメータとして定量化した上で、このモデルパラメータを画像データから推定した。次に、推定した材質情報や材質の状態情報（劣化など）に基づいて対象の質感をCGで再現する手法も開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では実際の文化財の材質情報や材質の状態を含めたデジタルアーカイブに貢献できる。写真やCG映像に加えて材質情報の詳細な記録ができれば文化・歴史研究の分野で貴重な科学的資料となる。さらに、材質の状態変化による質感予測がCGにより可視化できるため、含有物質や劣化状態の変化などを高精度に予測が可能となる。また、本手法では従来法よりも計測が簡便になるため、文化財の材質計測の作業負担（計測時間、労力、特殊な計測系といった設備構築の面）やコストが大幅に軽減される。つまり、本研究の成果によって、文化財に関する研究者や専門家が文化財の科学的な調査を行うための強力かつ簡便なツールを提供できる。

研究成果の概要（英文）：We have developed a simplified digital archive method based on image measurement that can record various material information with complicated reflection characteristics. In the proposed method, the material can be measured from the image data taken by a standard digital camera. In this method, the light reflection process of the object is described by a mathematical model called a light reflection model. The material information was quantified as a model parameter of the light reflection model, and these model parameters were estimated from the image data. Next, we also developed a method to reproduce the texture of the target by CG based on the estimated material information and material state information (deterioration, etc.).

研究分野：情報工学

キーワード：有形文化財 材質推定 光反射モデル 肌 画像計測 照明光の推定 CG再現 劣化モデル

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 質感再現における有形文化財の材質情報の必要性

有形文化財(以下、単に「文化財」と記述)のデジタルアーカイブにおいて、その材質情報(物理材質、表面状態)は重要である。材質情報が記録できれば、単に文化財の姿だけでなく、物質の含有量、劣化状態など、科学的な視点で文化財を調査するための情報として活用できる。材質情報が重要なもう一つの理由は、近年急速に発達しているコンピュータグラフィックス(CG)技術に基づいた文化財のデジタルアーカイブ分野においても、材質情報が対象の精密な質感再現のために必要となっていることである。文化財の質感をCG再現する場合において、材質による反射特性を知ることが重要となる。しかしながら、歴史的に古い文化財は、その材質や工法の情報が記録として残っていないことが多い。たとえば、東京国立近代美術館に所蔵されている明治期の金工作品「十二の鷹」(鈴木長吉 1893)は、材質や製法について、おおよその記録は残っているものの詳細は知られていない。

### (2) 文化財の材質情報を計測する上での課題

文化財の材質を調べるためには、一般に破壊検査による材質分析か、X線撮像装置など特殊な計測装置が必要となる。しかしながら、貴重な文化財を破壊検査することは通常不可能であり、また、特殊な計測装置を常に使用できるとは限らない。

## 2. 研究の目的

本研究では画像計測に基づいたデジタルアーカイブ技術として以下の3つの技術開発を目的とした。

材質情報推定用の光反射モデルを開発し、材質情報は光反射モデルのモデルパラメータとして定量化する。このモデルパラメータを画像データから求める手法を開発する。ここでは一般的なデジタルカメラの使用を想定し、材質ごとに適した光反射モデルを開発し、それぞれの材質ごとにモデルを切り替えることでRGB画像から高精度に材質情報の推定を可能にする。

暗室環境を用いずに任意の照明環境下(任意の場所)で、文化財の材質情報を画像計測できる手法を開発する。光反射モデルを全方位のシーン照明に対応できるように改良する。

光反射モデルと計測した材質情報に基づいて文化財をCG再現するための手法を開発する。さらに、この方法を発展させ定量化した材質情報(モデルパラメータ)に基づいて、劣化状態などを含めて3DCGで可視化する。

## 3. 研究の方法

### (1) 材質推定用の分光ベースの光反射モデルを試作(光反射モデルと物理的な材質の対応)

本研究では、光反射モデルパラメータ(主に材質の分光特性)を物理材質に直接対応させることで、計測データに基づいた材質情報推定にも適用できる分光ベースの光反射モデルを開発する。

光反射モデルは数学モデルとして記述し、材質の物理的な特性をモデル内に組み込む。特にモデルパラメータと材質の物理特性を直接対応させて、材質固有の物理特性をモデル内で定量的に記述する。さらに光反射モデルを対象の表面状態(表面の粗さ、密度、劣化等)と対応させ、材質の表面状態をモデルパラメータとして定量化する。このように構築した光反射モデルに基づいて計測画像から対象の材質情報を推定する。

### (2) 実際の文化財の材質を計測

光反射モデルに組み込むための材質の物理特性は、計測データから求める。計測システムに低ノイズの中判カメラと冷却分光放射輝度計を設置して分光放射輝度と画像とを同時計測できるように改良し、実際の文化財に使われている材質(金属、塗料、木材、石材など)の分光反射特性と画像の対応関係を計測する。

まず材質が既知の一般的な試料を用意して、その反射特性を計測する。ここでは文化財のうち材質情報が既知のものを計測する。実際の文化財は単純な材質ではなく、漆のように複雑な質感を持つ物質や、制作者によって複雑に調合された顔料などが存在するため、これらの分光特性を定量化して記録することで材質情報の推定精度を向上させる。また、材質を大まかに分類し、本研究で開発する光反射モデルをそれぞれの材質の物理特性に適したモデルとして拡張する。材質ごとに光反射モデルを分けることで、センサ数(原色数)の少ないRGBデジタルカメラでも高精度に材質推定が可能となる。

(3) 暗室環境を必要とせずに任意の場所で材質情報を画像計測できるように光反射モデルを改良

これまでに開発した光反射モデルを改良して、照明環境(光源の空間分布と分光分布)の情報を組み込んだシーン全体の光反射プロセスを記述した光反射モデルを開発する。ここでは申請者らが開発した全方位の照明分布(空間分布と分光分布)の画像計測手法の知見(田中 他, 画像電子学会誌 2013)を応用する。

(4) 文化財(材質既知・任意の場所)を対象に提案手法を検証【研究協力者:小諸フィルムコミッション牧野和人氏,小諸市】

まず,小諸城の建材と似たもので材質既知の試料を対象に,提案手法の精度を検証する。次に提案手法を用いて画像計測のみで小諸城の現存する建造物に対して外観・屋内の材質情報の推定を行う。小諸市と牧野氏の協力を得て推定した材質情報と古文書等の資料の情報とを比較して提案手法の精度を検証する。小諸城が提案手法の検証に適している理由は,改修・復元時に古い材料を再利用し,現存する建造物の材料の大部分が江戸期以前のものを使用しているからである。そのため,劣化状態の推定も含めて提案手法の検証に適している。また,詳細な絵図録や古文書が多数残っているため,改修・復元時期に加え,材質や工法を含む当時の詳細な情報が得られる。

(5)開発した光反射モデルをCG生成用に改造して文化財の質感をCG再現する技術を開発

開発した光反射モデルを用いて,実際の文化財の材質を対象に計測し,材質情報を推定して3DCG再現する。また,提案手法を様々な特性を持つ対象のデジタルアーカイブに応用する。

#### 4. 研究成果

本研究では,対象の材質の特性を光反射モデルという数学モデルで記述することで,様々な材質の特性を計測することが可能となった[1][2]。

たとえば,塗料を対象に紫外線劣化した物体の分光反射率を調べることで物体の劣化による視覚特性を変化させることが可能である。劣化した物体表面の光反射のプロセスを分光的な光反射モデルで記述した。さらにこの分光反射率を光反射モデルに組み込んで,全方位の照明情報(光源の空間分布と分光分布)を与えることで,その紫外線劣化の状態を視覚的にシミュレートすることが可能となった。本研究では,分光情報に基づいたIBLを用いることで様々なシーン照明下で劣化した物体をCG再現する手法を開発し,実際に紫外線劣化した材質をCG再現し,劣化前の状態と比較した(図1)。なお,この研究成果は現在学術論文として投稿中である。

本研究では文化財だけでなく図2のように人の肌のような複雑な反射特性を持つ材質についても適用できることがわかった[3]。

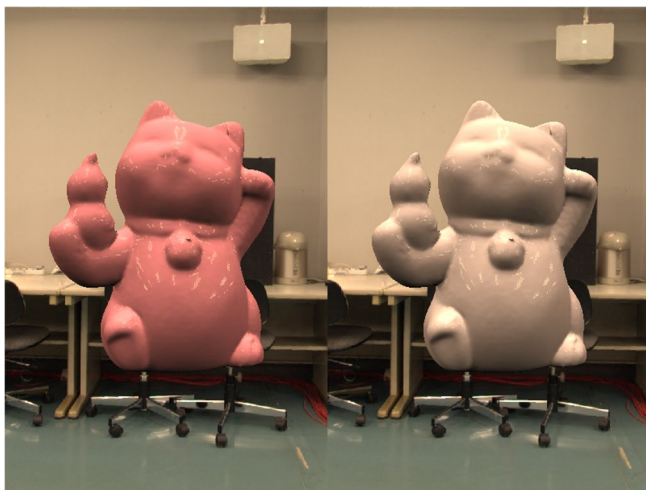


図1 .塗料の劣化前の材質と劣化後の材質のCG再現結果

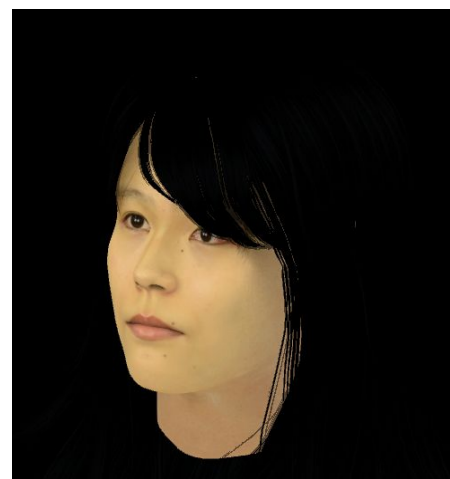


図2 .本研究の成果を人の肌計測に応用

- [1] 田中法博, 櫻井千寛: 古文書と計測データに基づいた小諸城のCG復元, 日本デザイン学会誌「デザイン学研究特集号」, 24(3), pp.30-37, 2017.
- [2] 望月宏祐, 足立優奈, 田中法博, 李元貞: 文化財を構成する漆材の反射特性計測, 日本デザイン学会誌「デザイン学研究特集号」, 24(3) pp.38-43, 2017.
- [3] N. Tanaka: Multi-spectral Imaging Method for 3D Computer Graphics Reproduction of Human Skin, Design Research, 80, pp.18 - 24, 2020.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 望月宏祐, 田中法博	4. 巻 40(1)
2. 論文標題 反射特性計測に基づいた絹織物表面の光反射モデル構築	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 長野大学紀要	6. 最初と最後の頁 21-26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 田中法博, 櫻井千寛	4. 巻 24
2. 論文標題 古文書と計測データに基づいた小諸城のCG復元	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本デザイン学会誌 「デザイン学研究特集号」	6. 最初と最後の頁 30-37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 望月宏祐, 足立優奈, 田中法博, 李元貞	4. 巻 24
2. 論文標題 文化財を構成する漆材の反射特性計測	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本デザイン学会誌 「デザイン学研究特集号」	6. 最初と最後の頁 38-43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 6件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 田中法博
2. 発表標題 「昔の小諸城をバーチャルタイムマシンで体験～CGで復元された江戸期の小諸城～」
3. 学会等名 小諸市立図書館文化講演会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中法博
2. 発表標題 計測データと CG 技術に基づいた文化財のデジタルアーカイブ
3. 学会等名 日本色彩学会測色研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高寺恵司, 望月宏祐, 田中法博
2. 発表標題 古文書と計測情報に基づいた小諸城の 3DCG 復元
3. 学会等名 日本色彩学会画像色彩研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古田なつみ, 望月宏祐, 田中法博
2. 発表標題 RGBカラー画像からのファンデーション塗布の判定のための一手法
3. 学会等名 日本色彩学会画像色彩研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中法博, 洪昇完, 田中清
2. 発表標題 分光レンダリングのためのRGBカラーカメラを用いた照明推定
3. 学会等名 画像電子学会年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中法博
2. 発表標題 小諸城CG復元の取り組み
3. 学会等名 浅麓議員研修会(小諸市, 軽井沢町, 御代田町) (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田中法博
2. 発表標題 小諸城の3DCG復元の取り組み
3. 学会等名 (公)技術士会 長野県支部CPD講演会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 洪昇完, 田中法博, 田中清
2. 発表標題 分光情報に基づいたシーン照明推定と3DCGの色再現法
3. 学会等名 情報処理学会 第80回全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木村薫平, 田中法博, 望月宏祐
2. 発表標題 VR用分光レンダリングエンジンの実装方法の検討
3. 学会等名 日本色彩学会 画像色彩研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小井土和宏, 望月宏祐, 田中法博
2. 発表標題 小諸城周辺の地形情報の3DCG復元
3. 学会等名 日本色彩学会 画像色彩研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中法博
2. 発表標題 よみがえる小諸城
3. 学会等名 国立歴史民俗博物館「デジタルで楽しむ歴史資料」
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 辰野直哉, 木村薫平, 櫻井千寛, 田中法博
2. 発表標題 デジタルアーカイブ用CGシステムのオンラインサーバの試作
3. 学会等名 日本色彩学会 画像色彩研究会 2016年度研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 望月宏祐, 足立優奈, 田中法博, 李元貞
2. 発表標題 画像計測に基づいた漆材の光反射特性推定法
3. 学会等名 日本色彩学会 画像色彩研究会 2016年度研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田中法博
2. 発表標題 小諸城CG復元プロジェクト
3. 学会等名 記念シンポジウム「地域文化財の活かし方 復元小諸城」(招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 田中法博
2. 発表標題 「真田丸」ゆかりの古城のデジタルアーカイブ
3. 学会等名 日本デザイン学会第63回春季研究発表大会 オーガナイズドセッション(招待講演)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

本研究成果は、学術的な成果のみならず自治体や地域の人々と協働で、長野県小諸市の小諸城のような実際の文化財のデジタルアーカイブに応用できた。また、その成果は様々なマスメディアでも報道されている。

6. 研究組織			
	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	牧野 和人  (MAKINO Kazuto)	小諸フィルムコミッション・会長	