

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：23602

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K11893

研究課題名(和文) 光沢や蛍光を有する物体の見えを計測・解析・再現する技法の開発

研究課題名(英文) Development of techniques to measure, analyze, and reproduce the appearance of glossy and fluorescent objects

研究代表者

富永 昌二 (Tominaga, Shoji)

長野大学・企業情報学部・研究員

研究者番号：10103342

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：質感に重要な役割を果たす光沢や蛍光を有する物体の見えを計測・解析・再現する方法の開発を目指した。質感計測では、光源とカメラを移動制御可能にする分光画像系を構築した。また光沢計を用いて強い光沢を計測するシステムを構築した。さらに金属のHDR画像データベースを作成した。質感解析では、複雑な特性をもつ反射・発光特性を記述する数理モデルを構築した。金属のHDR画像データベースにCNNを適用して質感特徴を抽出し、HDR画像を予測する手法を開発した。質感再現では、蛍光物体のレンダリング手法を開発した。また強い光沢を有する金属物体の見えをLDR画像から生成し、視覚評価実験により質感生成の妥当性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

蛍光の開発手法は実用的な機器の開発につながり、また色を正しく予測できるので、複数蛍光物体の展示に有用である。金属の開発手法は、現存する飽和したLDR画像からHDR画像を生成でき、映像産業への応用が期待できる。

研究成果の概要(英文)：This study aimed to develop methods to measure, analyze, and reproduce the appearance of objects with gloss and fluorescence. In appearance measurement, we constructed a spectral imaging system that enables to control the light source and camera. We also constructed a system to measure object surfaces with strong gloss using a gloss meter. We further created an HDR image database of metals. In appearance analysis, we considered a mathematical model that describes the reflection and luminescence characteristics of fluorescent objects. A CNN approach was proposed to extract the appearance features of the HDR image database and predict the HDR images from LDR images. In appearance reproduction, we developed a rendering method for the appearances of fluorescent objects and metal objects with a strong gloss. The validity was confirmed through visual evaluation experiments.

研究分野：知覚情報処理

キーワード：質感 光沢 蛍光 アピアランス HDR画像 分光イメージング

1. 研究開始当初の背景

(1) 質感研究は比較的新しい研究分野で、米国 EI Symposium では Material Appearance 会議が発足し、ノルウェーでは MUVApp のプロジェクトが進行していた。高光沢や蛍光の見えに関する統一研究は国内外で見当らなかった。

(2) 質感知覚研究のほとんどは「つや」や「てかり」のように弱い光沢を対象としており、鏡のように強い光沢面を計測・評価する手段はなかった。蛍光は物体の質感を向上させるのに有効であるが、当時はその質感研究はほとんどなかった。

2. 研究の目的

(1) 光沢素材として金属、プラスチック、セラミックを想定している。このうち金属は鏡面反射成分のみからなる。プラスチックのような誘電体は拡散反射成分と鏡面反射成分を併せ持つ。これらの質感は鏡面反射ピークの周辺にあり、シャープ感や光沢感に影響を与える。しかし従来の BRDF 計測では鋭い光沢を計測できないので、ここでは光沢計を利用して鏡面プロファイルを獲得し、鏡面反射のモデル化を行う。

(2) 蛍光は日用品の紙、プラスチック、塗装物、衣類に含まれている。物理的に蛍光物体は反射と発光の 2 次元波長特性をもつので、特殊な場合を除いて測定器は存在しない。我々は分光カメラ系による新しい測定システムを開発し、蛍光解析を行う。

(3) 相互照明効果による見えの変化は著しく、蛍光物体が接近している際に発生する。我々は、相互照明効果をふくむ蛍光物体を解析する。観測分光画像の成分分析を実施し、一枚の分光画像から、任意の照明条件での蛍光物体の見えを再現する手法を開発する。

3. 研究の方法

(1) 金属、プラスチック、セラミックのサンプルを光沢計で測定し、鏡面反射プロファイルを獲得する。またゴニオメータを用いてサンプルの BRDF を計測する。高光沢物体の見えを映像再現するために、鏡面反射プロファイルをレンダリング可能な鏡面関数に適合し、適合性を検証するとともに、新たなモデル関数も検討する。レンダリングには Mitsuba を使用する。

(2) 現有の分光カメラを用い、光源とカメラを移動制御可能にする分光イメージング系を構築する。まず蛍光サンプルの 2 次元分光特性 (Donaldson 行列) を推定し、次に相互照明効果を含む蛍光サンプルを撮影し、相互照明の成分分析を行う。

(3) 相互照明効果を含む平板の蛍光物体について見えを再構築するアルゴリズムを開発する。任意の蛍光素材と任意の照明条件で、蛍光物体の見えを再現し、再現精度を検証する。さらに再構築を自由曲面物体への拡張を検討する。

4. 研究成果

(1) 鏡面反射プロファイルから強い光沢面の見えを計測、解析、再現する方法を考案した。計測システムとして光沢計を使用した。鏡面ローブを表現するために Cook-Torrance モデルを使用し、ゴニオ分光光度計による BRDF 測定と比較して、鏡面反射特性を十分記述できることを示した。レンダリングのために Mitsuba システムを使用した。提案法は 1 つの鏡面ハイライトから見えを再現するための直接的で簡単な方法といえる。

(2) 蛍光物体は発光を含むので一般物体に比べて質感が向上する．相互照明効果を持つ蛍光物体の見えを合成する方法を開発した．この方法では，互いに近接した蛍光物体のリアルな見えをレンダリングすることを目的とした 均一な照明 視線方向 および形状のさまざまな条件下で，2つの蛍光物体の見えを合成した．合成モデルは全体的な見えが5つの成分に分解でき，それぞれが分光関数と陰影項の乗算に展開できることを示した．レンダリングには，モンテカルロシミュレーションに基づく Mitsuba レンダラーを使用した．

(3) ハイライトや光沢を有する不均質誘電体について，未知の複数光源下で撮影した分光画像データから，物体の分光反射率を推定する方法を開発した．まず，ハイライト検出に基づいて，複数の光源の光源スペクトルを推定する方法を示した．次に，物体の表面の広い領域からの分光反射率を推定した．選択領域からの色信号は，照明スペクトル，表面分光反射率，および陰影項を使用して記述される．分光反射率と陰影項の推定には，ドメインが互いに異なることを利用して，それらを繰り返し推定するための反復アルゴリズムを開発した．

(4) 画像を利用する分野ではカメラの分光感度関数の知識は重要である．本研究では携帯電話カメラの分光感度を直接測定および間接的に推定する方法を開発した．まず，分光感度を直接測定するシステムを示し，これを使用してさまざまな携帯電話カメラの分光感度関数のデータベースを作成した．次に，測定した分光感度関数の特徴を主成分分析してその統計的特徴が抽出し，色見本を使用して分光感度を推定する方法を開発した．

(5) RGB デジタルカメラで取得した画像データから物体表面の分光反射率を推定するための新しい方法を考案した．システムとしてマルチ分光画像取得を想定しており，複数光源の下で物体をカメラで撮影する．カメラからの推定値と元の表面分光反射率との間の平均二乗誤差を最小化するために，最適な反射率の推定値を求める線形推定器を開発した．この推定器は，従来良く知られた Wiener 推定器よりも推定精度が向上することを理論的に証明し，さらに実験的にも検証した．

(6) 複数の光源を持つ複雑な照明環境で取得された分光画像データに基づいて，物体の材質の見えを推定および再構築するための手法を考案した．物体は，光沢をもつ不均質誘電体と想定し，物体表面からの色信号は，標準2色反射モデルによって記述できるとした．物体の全体的な見えは，反射率と光源スペクトルに基づく色因子と，表面形状を表す陰影因子の組み合わせによって決まることを見出した．このため，色因子とシェーディング因子の重みを変更することで，新しい物体のアピランスを再構築できることがわかった．見えの推定と再構築は，照明光推定，分光反射率推定，陰影項の推定と領域分割，反射モデルに基づく見えの再構成，の4ステップで構成できる．異なる材質の物体が異なる光源で照明されている実験環境で提案法を検証した．

(7) 局所最適反射率データセットを使用してカメラ応答から表面分光反射率を推定する新しい方法を考案した．これは上記(5)の更なる改善版である．分光反射率データベースを利用して，分光反射率を最適に推定する候補を局所的に決定する．提案した推定法は，局所的に最適な反射率データセットの選択，および 局所的な最適なデータセットのみを使用して最良推定値

を決定する，という 2 段階で構成される．各種スマートホンを使用した実験結果で推定精度が大幅に向上することを示した．最適な推定値を得るには分光反射率データベースのすべてが必要ではなく，小さい局所最適データセットで十分である．この方法は質感研究以外にも，広い応用が考えられる．

(8) これまでの蛍光研究は人工物に焦点を当ててきたが，植物など，蛍光を発する自然物は数多く存在する．ここでは植物の穀物や葉から蛍光発光の推定を検討した．分光カメラの代わりに，市販のカメラをベースに 6 チャンネルの蛍光スペクトルを推定する 2 種類のマルチバンドイメージング系を構築した．一つは米穀物用で，スマホのカメラをマルチバンド化して可視波長領域の蛍光発光を検出した．他方は植物の葉用で，モノクロカメラと追加の光学フィルターを使用して，赤色から遠赤色の波長領域のクロロフィル蛍光を検出した．

(9) 金属のように強いハイライトを含む物体を撮影すれば，イメージセンサーのダイナミックレンジが制限されているため，撮影画像の画素値が飽和してクリップされ，その画像領域の物理情報が失われる．ここでは，金属物体の飽和した LDR 画像から元の HDR 画像を再構成する方法を検討した．8 ビット LDR 画像を HDR に直接マッピングするために、CNN アプローチを採用した．まず HDR 画像データベースを構築した．各 HDR 画像から 8 ビット LDR 画像のセットを作成し，HDR 画像と LDR 画像のすべての対を，トレーニングとテストに使用した．ネットワーク構造はスキップ接続付きの CNN である．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計20件（うち査読付論文 17件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Tominaga Shoji, Horiuchi Takahiko	4. 巻 10
2. 論文標題 High Dynamic Range Image Reconstruction from Saturated Images of Metallic Objects	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Imaging	6. 最初と最後の頁 92 ~ 92
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/jimaging10040092	査読の有無 有
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 Tominaga Shoji, Horiuchi Takahiko	4. 巻 1
2. 論文標題 An HDR image database construction and LDR-to-HDR mapping for metallic objects	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proc. 31st Color and Imaging Conference	6. 最初と最後の頁 138 ~ 143
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 有
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 望月宏祐, 田中法博	4. 巻 3
2. 論文標題 歴史調査に基づく歴史文化財の 3DCG再現	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 色彩学	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 Tominaga Shoji, Nishi Shogo, Ohtera Ryo, Sakai Hideaki	4. 巻 39
2. 論文標題 Improved method for spectral reflectance estimation and application to mobile phone cameras	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Optical Society of America A	6. 最初と最後の頁 494 ~ 494
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/JOSAA.449347	査読の有無 有
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 Tominaga Shoji, Yong Roseline Kim Fong	4. 巻 47
2. 論文標題 Appearance estimation and reconstruction of glossy object surfaces based on the dichromatic reflection model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Color Research and Application	6. 最初と最後の頁 1313 ~ 1329
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/col.22824	査読の有無 有
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 Tominaga Shoji, Sakai Hideaki	4. 巻 9
2. 論文標題 Spectral Reflectance Estimation from Camera Responses Using Local Optimal Dataset	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Imaging	6. 最初と最後の頁 47 ~ 47
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/jimaging9020047	査読の有無 有
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 Tominaga Shoji, Nishi Shogo, Ohtera Ryo, Sakai Hideaki	4. 巻 30
2. 論文標題 Spectral Reflectance Estimation with Smoothness Constraint	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Color and Imaging Conference	6. 最初と最後の頁 141 ~ 146
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2352/CIC.2022.30.1.26	査読の有無 有
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 望月宏祐、田中法博	4. 巻 44
2. 論文標題 歴史建造物の3DCGレンダリングにおける GPUアーキテクチャの比較	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 長野大学紀要	6. 最初と最後の頁 133 ~ 138
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 有
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 Tominaga Shoji, Nishi Shogo, Ohtera Ryo	4. 巻 21
2. 論文標題 Measurement and Estimation of Spectral Sensitivity Functions for Mobile Phone Cameras	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 4985-1 ~ 4985-22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s21154985	査読の有無 有
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 Kikuchi Kumiko, Tominaga Shoji, Hardeberg Jon Y.	4. 巻 65
2. 論文標題 Development of a System to Measure the Optical Properties of Facial Skin using a 3D Camera and Projector	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Imaging Science and Technology	6. 最初と最後の頁 50403-1 ~ 15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2352/J.ImagingSci.Technol.2021.65.5.050403	査読の有無 有
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 該当する

1. 著者名 Tominaga Shoji, Guarnera Giuseppe Claudio	4. 巻 47
2. 論文標題 Appearance synthesis of fluorescent objects with mutual illumination effects	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Color Research & Application	6. 最初と最後の頁 615 ~ 629
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/col.22747	査読の有無 有
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 該当する

1. 著者名 Tominaga Shoji	4. 巻 29
2. 論文標題 Spectral-Reflectance Estimation under Multiple Light Sources	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Color and Imaging Conference	6. 最初と最後の頁 25 ~ 30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2352/issn.2169-2629.2021.29.25	査読の有無 有
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 Tominaga Shoji, Nishi Shogo, Ohtera Ryo, Sakai Hideaki	4. 巻 39
2. 論文標題 Improved method for spectral reflectance estimation and application to mobile phone cameras	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Optical Society of America A	6. 最初と最後の頁 494 ~ 508
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/JOSAA.449347	査読の有無 有
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	4. 巻 60
2. 論文標題 VR技術と反射特性計測に基づいた肌と化粧品の質感表現	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Fragrance Journal	6. 最初と最後の頁 -
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	4. 巻 15
2. 論文標題 AI 技術を用いた肌の反射特性解析と化粧品への応用	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Cosmetic Stage	6. 最初と最後の頁 29 ~ 35
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 Watanabe Shuhei, Tominaga Shoji, Horiuchi Takahiko	4. 巻 3
2. 論文標題 The Difference in Impression between Genuine and Artificial Leather: Quantifying the Feeling of Authenticity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Perceptual Imaging	6. 最初と最後の頁 20501_1 ~ 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2352/J.Percept.Imaging.2020.3.2.020501	査読の有無 有
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 Tominaga Shoji, Hirai Keita, Horiuchi Takahiko	4. 巻 64
2. 論文標題 Spectral Estimation of Multiple Light Sources based on Highlight Detection	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Imaging Science and Technology	6. 最初と最後の頁 050408_1~-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2352/J.ImagingSci.Technol.2020.64.5.050408	査読の有無 有
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 Tominaga Shoji	4. 巻 60
2. 論文標題 Estimation of bispectral characteristics of fluorescent objects based on multispectral imaging data	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optical Engineering	6. 最初と最後の頁 0033102-1~14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/1.OE.60.3.033102	査読の有無 有
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 Tominaga Shoji	4. 巻 2020
2. 論文標題 Estimation Method of Fluorescent Donaldson Matrices Based on Multispectral Imaging Data	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Color and Imaging Conference	6. 最初と最後の頁 227~231
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2352/issn.2169-2629.2020.28.36	査読の有無 有
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 Tanaka Norihiro, Kosuke Mochizuki	4. 巻 2020
2. 論文標題 Computer Graphics Reproduction of Ultraviolet Degraded Materials Using a Multi-spectral Reflection Model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. Kansei Engineering and Emotion Research	6. 最初と最後の頁 1~6
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 有
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 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 田中法博
2. 発表標題 光反射計測と3DCG技術に基づいた文化財デジタルアーカイブ
3. 学会等名 光学系四学会関西支部「光と芸術」（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tominaga Shoji, Sakai Hideaki
2. 発表標題 A method for estimating spectral reflectance from camera responses using local optimal dataset and neural network
3. 学会等名 IS&T International Sympo. on Electronic Imaging 2024, Color Imaging II (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 富永昌二
2. 発表標題 相互照明効果を有する蛍光物体のアピランス生成
3. 学会等名 日本色彩学会 視覚情報基礎研究会 第45回研究発表会（招待講演）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 池野太心, 下田大貴, 小林空美, 望月宏祐, 田中法博
2. 発表標題 3DCG 技術に基づいた化粧シミュレーションアプリの実用化に向けた検証
3. 学会等名 日本色彩学会 画像色彩研究会 2023年度研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 池野太心、西村綾莉、望月宏祐、田中法博
2. 発表標題 化粧品と肌の 3DCG 再現のための光反射モデルの検討と実装
3. 学会等名 日本色彩学会画像色彩研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tominaga Shoji
2. 発表標題 Appearance Reconstruction of Fluorescent Objects - From Spectral Image To Video -
3. 学会等名 The 29th Color and Imaging Conference, Workshop "Color: from images to videos" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tominaga Shoji, Nishi Shogo, Ohtera Ryo
2. 発表標題 Estimating spectral reflectances using mobile phone cameras
3. 学会等名 IS&T International Sympo. on Electronic Imaging 2022, Color Imaging XXVII (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中法博, 望月宏祐
2. 発表標題 光反射モデルに基づいた化粧塗膜の視覚的質感の計測とCG再現
3. 学会等名 情報処理学会第84回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 望月宏祐, 田中法博
2. 発表標題 小諸城の建造物と地形の3次元モデル構築
3. 学会等名 情報処理学会第84回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tominaga Shoji, Nishi Shogo, Ohtera Ryo
2. 発表標題 Estimating Spectral Sensitivities of a Smartphone Camera
3. 学会等名 IS&T International Sympo. on Electronic Imaging 2021, Color Imaging XXVI (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 望月宏祐, 田中法博
2. 発表標題 絹織物の分光反射率計測法と色再現
3. 学会等名 画像電子学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 林風花, 亀山歩, 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内の門の3DCG 復元
3. 学会等名 日本色彩学会画像色彩研究会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西村綾莉, 滝澤楓, 望月宏祐, 田中法博
2. 発表標題 分光放射輝度計を用いた人の肌の変角分光計測
3. 学会等名 日本色彩学会画像色彩研究会研究発表会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究分担者	田中 法博 (Tanaka Norihiro) (90387415)	長野大学・企業情報学部・教授 (23602)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------