

機関番号：12501
研究種目：基盤研究（C）（一般）
研究期間：平成30年度～令和2年度
課題番号：18K11347
研究課題名（和文）分光プロジェクタを用いた表面反射特性の計測と実物体の見え操作
研究課題名（英文）Measurement of surface reflection characteristics and appearance editing of real objects using a multi-primary image projector
研究代表者 平井 経太 (HIRAI, Keita)
千葉大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：30583405
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）：

本研究では、先行研究において構築した分光プロジェクタの実応用として、物体表面における光反射特性の新たな計測手法の確立を目的とし、分光プロジェクタを用いた物体表面への重畳投影により、実物体の見え操作に関する新たな技術の構築を実施した。具体的には、①分光プロジェクタ・カメラシステムの構築、②空間変調かつ波長変調させた光照射による蛍光物体・構造色物体・人間の肌の反射特性の計測手法の構築、③上述した実物体3種の見え操作手法の構築を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、コンピュータビジョンや複合現実感に関する研究分野において、多大なる貢献が期待される。また、空間変調かつ波長変調に基づく光照射技術は、コンピュータグラフィックス、色彩科学、光学などの視覚メディアや光計測に関わる学術分野において、創造的な次世代研究を産み出す潜在能力を秘めている。さらに、皮膚科学などの医療分野や塗料・化粧品などの化学分野における計測と見えシミュレーションへの発展・波及も期待できる。

研究成果の概要（英文）：

In this study, as an actual application of the multi-primary image projector constructed in our previous study, we developed a new measurement method for the reflectance characteristics on the object surface. Then we conducted an appearance editing of real objects by superimposing projection on the object surface using the multi-primary image projector. Specifically, the following items were performed: (1) construction of a multi-primary image projector - camera system, (2) construction of a method for measuring fluorescent objects, structural color objects, and reflection characteristics of human skin by spatially-modulated and wavelength-modulated projection, and (3) construction of appearance editing method for those three types of objects.

研究分野： 知覚情報処理

キーワード： 分光プロジェクションマッピング, 構造色, 蛍光発光, 分光計測, 形状計測, 化粧肌, 肌計測, 分光反射率

1. 研究開始当初の背景

コンピュータビジョンなどの研究分野において、物体に照射する光を変調させ、表面光学特性を計測する手法が確立されてきた。例えば、プロジェクタによる空間的な変調光を用いて、物体表面の散乱特性や相互反射特性に関する計測方法が提案されてきた。また、多色 LED やプログラマブル分光光源による波長的な変調光を用いて、表面分光反射率の計測方法が提案されてきた。これら成果により、表面光学特性に関するビジョン研究の発展が加速した。しかしながら、既存手法では正確な計測が困難な物体表面も未だ多く存在する。例えば、実世界に多く存在する蛍光物体は、表面反射光と蛍光発光を有するために波長制御に基づく計測が必須である。さらに、蛍光発光は空間的な広がりをもつため、空間的に制御した照射光による計測も必要とされる。同様に、構造色を有する物体(構造色物体)や人間の肌なども、空間的な光反射特性と波長的な光反射特性の双方の計測を必要とする物体である。これらの日常に有り触れた物体の表面反射特性を計測するためには、空間変調と波長変調を同時に可能とする光照射技術が求められるが、それらは未だ確立されておらず学術的な課題が残っている。

拡張現実感などの研究分野では、変調させた光を物体に重畳投影することにより、実物体の見えを操作する手法が確立されてきた。特に、プロジェクションマッピングによる物体の見え操作は広く知られている。近年では、材質表面の質感や相互反射などの複雑な光学特性も考慮したプロジェクションマッピング技法も提案されている。さらに、多色 LED による波長制御ライティングを用いた顔画像の見え再現も行われている。しかしながら、実物体の見え操作に関しても、照射光の空間変調と波長変調を同時に制御する技術は確立されていない。そのため、蛍光物体、構造色物体、人間の肌などの空間的かつ波長的な制御を考慮すべき実物体を対象とした場合には、それらの見え操作に関する研究の学術的課題は残されたままである。

表面反射特性の計測や実物体の見え操作の未解決課題を打開するためには、空間変調と波長変調が同時に可能な光照射技術は必要不可欠である。これら課題解決にむけた基盤技術の確立こそが、本研究課題の核心をなす学術的「問い」である。

2. 研究の目的

本研究では、先行研究において構築した分光プロジェクタの実応用として、物体表面における光反射特性の新たな計測手法の確立を目的とする。さらに、分光プロジェクタを用いた物体表面への重畳投影により、実物体の見え操作に関する新たな技術の構築を実施する。右図に示す分光プロジェクタは、任意の分光分布をもつ光を画素毎に照射可能であり、空間変調かつ波長変調が可能な光照射システムと見なすことができる。空間的かつ波長的に考慮すべき物体表面の光学特性計測や見え操作に関する学術的課題の多くが、分光プロジェクタの発展的利用により解決できる。具体的には、①分光プロジェクタとカメラを同期させた分光プロジェクタ・カメラシステムの構築、②空間変調かつ波長変調させた光照射による蛍光物体・構造色物体・人間の肌の反射特性の計測手法の構築、③上述した実物体 3 種の見え操作手法の構築に関する課題解決に取り組む。

3. 研究の方法

(1) 分光プロジェクタ・カメラシステムの改善

物体表面の光反射計測や実物体の見え操作には、分光プロジェクタ・カメラシステムが必要となる。応募者の先行研究において、一般物体の分光反射率と 3 次元形状を計測する分光プロジェクタ・カメラシステムを試作した。計測や見え操作を実現するためには各機器と物体との間の位置合わせが必要であるが、先行研究は可視光カメラのみを利用していただけのため、位置合わせのために照射するパターン光も可視光に限られていた。本研究では、平成 30 年度前期に分光プロジェクタ・カメラシステムの改善を行う。分光プロジェクタの光源は赤外域も含むため、人間には不可視な位置合わせ用のパターン光照射が可能である。そこで、可視光カメラに加え、赤外カメラも利用することにより、計測や見え操作の可視光に、位置合わせ用の不可視な赤外パターン光を埋め込むことが可能なシステムを構築する。

(2) 光反射特性の計測

空間制御かつ波長制御させた光照射を必要とする計測対象として、以下が挙げられる。

- ① 蛍光物体：表面反射光と蛍光発光の両者を有するが、これらは特定の入射波長に対する出射波長の特性が異なる。さらに、蛍光発光は点拡がり関数のような空間的特性をもつ。
- ② 構造色物体：白色光の入射に対して、物体表面での干渉・回折・散乱が生じるため、出射光の波長は空間的な位置に依存する。
- ③ 人間の肌：人間の視覚システムは、顔や肌の色の微妙な違いや変化を見分けられるように進化してきたとも言われている。実際に肌画像計測の分野では、肌の分光反射率や内部散乱特性は重要な計測対象であり、それらの計測手法が提案されてきた。

以上の物体表面の計測には、空間変調かつ波長変調した光照射を必要とするが、既存手法ではそれぞれ独立に照射していたため、計測の長時間化や異なる実験ジオメトリで撮影したデータ間の位置合わせが課題としてあげられた。本研究では、平成 30 年度後期から平成 31 年度中頃にかけて、分光プロジェクタ・カメラシステムにより、空間変調かつ波長変調した光照射を同時に

行い、上記物体の光反射特性を計測する手法を確立する。特に、空間的かつ波長的な光反射特性を、単一な計測ジオメトリで計測することで、データ間の位置合わせが不要な短時間計測手法を実現する。

(3) 実物体の見え操作

既存のプロジェクションマッピングは、空間的な変調や時間的なレイテンシーに注視されており、表面反射自体は比較的単純な反射を仮定していた。そのため、先に述べた実物体の見え操作を適切に制御することは困難であった。本研究では、平成31年度中頃より、空間的かつ波長的な光反射特性を考慮した重畳投影することにより、上述の実物体3種の見え操作手法を確立する。特に、皮膚医療や化粧品・塗料などの正確な見えが求められる開発現場におけるシミュレータとしての利用を想定し、RGBプロジェクタや多色LEDでは不可能であった見え操作システムを構築する。

4. 研究成果

(1) 分光プロジェクタ・カメラシステムの改善

物体表面の光反射計測や実物体の見え操作には、分光プロジェクタ・カメラシステムが必要となる。応募者の先行研究において、一般物体の分光反射率と3次元形状を計測する分光プロジェクタ・カメラシステムを試作した。計測や見え操作を実現するためには各機器と物体間の位置合わせが必須であるが、平成30年度の研究において、分光プロジェクタの特性を活かした自動位置合わせ手法を開発し、現状の分光プロジェクタ・カメラシステムの改善を実現した。

(2) 光反射特性の計測

(1)において構築したプロジェクタ・カメラシステムを用いて、実際の蛍光物体、構造色物体、肌と分光プロジェクションマッピングを行った蛍光物体、構造色物体、肌の分光計測を行い、それらの分光分布や色差を比較した。実験結果より、分光プロジェクションマッピングによる見えは実際の数値的に近い結果が得られた。

(3) 実物体の見え操作

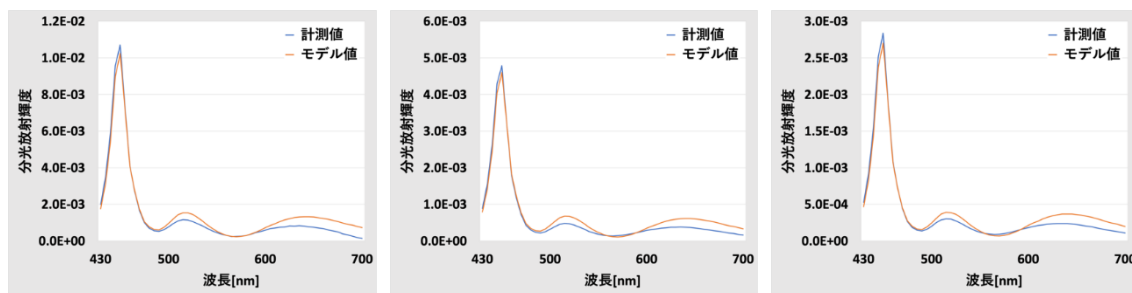
(2)において計測したデータをもとに、物体の見かけを分光的に操作するプロジェクションマッピング技術の構築した。分光波形に基づいた客観評価および主観的に有効性を検証し、基礎技術を確認した。

① 蛍光物体

光物体のバイスペクトルドナルドソン行列の推定問題を、分光イメージングシステムによる観測の残余誤差が最小化される最適化問題として解決した。反射、発光、および励起のスペクトル関数は、基底関数近似を使用せずに各波長で推定される。推定効率を向上させるために、出力可視範囲は2種類の波長範囲に分割した。次に、波長セグメンテーションと物理的励起モデルに基づいて反復アルゴリズムを開発し、異なる蛍光物体と照明を使用した画像の再構成へ応用し、見え操作の効果を検証した。

② 構造色物体

薄膜干渉による構造色物体の分光反射率を計測し、その計測結果をもとに、二乗誤差を最小化する膜厚と屈折率の組を全探索することで、構造色物体の膜厚と屈折率を推定した。その推定パラメータをBRDFモデルに代入することで、高い精度で構造色サンプルの分光反射率を再現することができた。また、薄膜干渉による構造色物体の形状計測を目標とした法線・膜厚・屈折率の同時推定も行った。以下に、異なる角度から観測した際の構造色の再現例を示す。赤線が重畳投影結果であり、青線が実際の化粧品である。



25°

28°

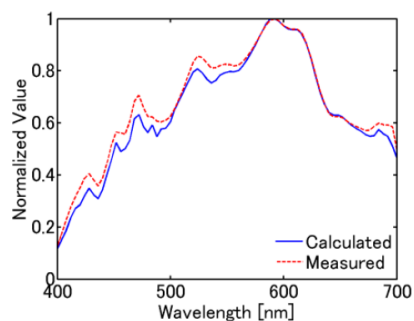
30°

Purpleの構造色に対する再現

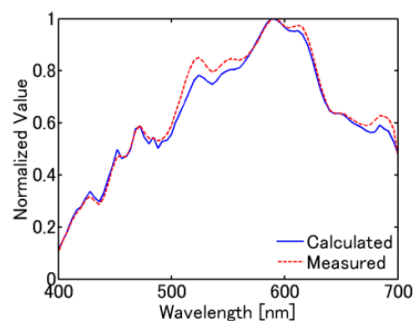
③ 人間の肌

様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

以下のアルゴリズムを開発した。事前情報と素肌の分光反射率を基にモデル式によって投影スペクトルを計算する。空間的に異なる多数の投影スペクトルを非負値行列因子分解(NMF)アルゴリズムによって、いくつかの基底スペクトルと空間重み画像を生成する。基底スペクトルと空間重み画像を用いて、投影対象の素肌に重畳投影する。以下に、異なる化粧肌の実現例を示す。青線が重畳投影結果であり、赤線が実際の化粧肌である。



(a) クリームベージュ



(b) ダークオークル

本課題へアプローチする既存手法の多くは、Red・Green・Blue (RGB) 制御のプロジェクタを用いることにより、色や表面下散乱に関する物体表面の光反射特性を計測していた。プラスチックや陶器などの物体においては測色的に正しく計測できるが、分光的に特有な性質をもつ物体に対しては物理的に適切な計測ができなかった。また、現在のプロジェクションマッピングも RGB 制御に基づいており、反射率や表面化散乱特性を波長レベルで考慮した見え操作は実現できていない。一方、本研究において開発した分光プロジェクタは、画素毎に分光特性を制御できるプロジェクタである。これによって、RGB プロジェクタでは実現不可能であった計測や見え操作が可能となる。本研究により、新たな計測手法や見え操作手法の基盤技術が確立され、今後コンピュータビジョンや複合現実感に関する研究分野において、多大なる貢献が期待される。また、空間変調かつ波長変調に基づく光照射技術は、コンピュータグラフィックス、色彩科学、光学などの視覚メディアや光計測に関わる学術分野において、創造的な次世代研究を産み出す潜在能力を秘めている。さらに、皮膚科学などの医療分野や塗料・化粧品などの化学分野における計測と見えシミュレーションへの発展・波及も期待できる。

/

様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計9件)

1. 著書名 Hiroki Shirasawa, Keita Hirai, Takahiko Horiuchi	4. 巻 11418
2. 論文標題 Makeup Skin Appearance Reproduction by Spectral Projection Mapping	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の項 304-317
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1007/978-3-030-13940-7_23	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. 著書名 白澤裕喜, 平井経太, 堀内隆彦	4. 巻 42
2. 論文標題 分光プロジェクションマッピングによる肌の見かけの操作	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本色彩学会第49回全国大会予稿集	6. 最初と最後の項 24-25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.15048/jcsaj.42.3_24	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. 著書名 平井経太, 堀内隆彦	4. 巻 29
2. 論文標題 分光プロジェクタの構築と光計測技術への展開	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 光アライアンス	6. 最初と最後の項 37-43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://iss.ndl.go.jp/books/R100000002-I000000075729-00	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. 著書名 平井経太	4. 巻 57
2. 論文標題 分光照明・分光投影に基づくイメージングシステム	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 光技術コンタクト	6. 最初と最後の項 4-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://iss.ndl.go.jp/books/R100000002-I000000049890-00	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 —

様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

1. 著書名 Shoji Tominaga, Keita Hirai, Takahiko Horiuchi	4. 巻 36
2. 論文標題 Spectral Reconstruction of Fluorescent Objects with Mutual Illumination Effects	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of the Optical Society of America A	6. 最初と最後の項 1512-1522
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/JOSAA.36.001512	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. 著書名 平井経太	4. 巻 30
2. 論文標題 分光プロジェクションに基づくイメージングシステムの現状と今後	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 光アライアンス	6. 最初と最後の項 44-48
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. 著書名 Yuki Kojima, Keiki Kishikawa, Shuji Ichikawa, Jun Matsui, Keita Hirai, Yukishige Kondo, Michinari Kohri	4. 巻 3
2. 論文標題 Stimuli-Responsive Biomimetic Metallic Luster Film Using Dye Absorption and Specular Reflection from Layered Microcrystals	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Applied Polymer Materials	6. 最初と最後の項 1819 ~ 1827
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsapm.0c01396	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスである	国際共著 -

様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

1. 著書名 Michinari Kohri, Akari Kobayashi, Taku Okoshi, Hiroki Shirasawa, Keita Hirai, Kazuya Ujiie, Takashi Kojima, Keiki Kishikawa	4. 巻 50
2. 論文標題 Bright Solvent Sensor Using an Inverse Opal Structure Containing Melanin-mimicking Polydopamine	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemistry Letters	6. 最初と最後の項 106-109
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.200626	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスである	国際共著 -

1. 著書名 Shoji Tominaga, Keita Hirai, Takahiko Horiuchi	4. 巻 64
2. 論文標題 Spectral Estimation of Multiple Light Sources Based on Hightlight Detection	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Imaging Science and Technology	6. 最初と最後の項 106-109
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ある	国際共著 -

[学会発表] (計8件)

1. 発表者名 白澤裕喜, 平井経太, 堀内隆彦
2. 発表標題 分光プロジェクションマッピングによる肌の見かけの操作
3. 学会等名 日本色彩学会第49回全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 白澤裕喜, 平井経太, 堀内隆彦
2. 発表標題 化粧肌の質感再現を目的とした分光プロジェクションマッピングの基礎検討
3. 学会等名 質感のつどい・第4回公開フォーラム
4. 発表年 2018年

様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

1. 発表者名 平井 経太
2. 発表標題 分光照明・分光投影に基づくイメージングシステム
3. 学会等名 視聴科学技術コンソーシアム (招待講演)
4. 発表年 2019 年

1. 発表者名 Keita Hirai
2. 発表標題 Spectral Projection Mapping
3. 学会等名 IEEE VR 2019 Tutorial
4. 発表年 2019 年

1. 発表者名 Shoji Tominaga, Keita Hirai, Takahiko Horiuchi
2. 発表標題 Appearance Reconstruction of Fluorescent Object based on Reference Geometric Factors
3. 学会等名 The 27 th Color and Imaging Conference (国際学会)
4. 発表年 2019 年

[図書] (計 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)	所属研究機関名・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	堀内 隆彦 (Horiuchi Takahiko) (30272181)	千葉大学・大学院工学研究院・教授 (12501)	

様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関名・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	津村 徳 (Tsumura Norimichi)		

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。