

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 4 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25280057

研究課題名(和文) 明るさ解析と色解析の統一：任意光源環境における見えの理解・認識・生成に向けて

研究課題名(英文) Image Understanding, Recognition, and Synthesis under Multispectral and Multidirectional Light Sources

研究代表者

岡部 孝弘 (Okabe, Takahiro)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・准教授

研究者番号：00396904

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、従来独立に研究されることの多かった明るさ解析と色解析の統一を目指して、任意の空間分布・任意の分光分布を持つ光源環境における物体の見えに関する研究を行った。具体的には、(1)多波長・多方向光源装置の作製、(2)多波長・多方向光源下の画像集合に内在する構造の解明、および、(3)効率的な画像獲得手法の開発に取り組んだ。また、画像の理解・認識・生成に関する応用として、(4)形状・反射率の推定、(5)材質認識、および、(6)照明シミュレーションにも取り組んだ。

研究成果の概要(英文)：We studied a set of images of an object taken under multispectral and multidirectional light sources in order to unify shading analysis and color analysis. Specifically, we (1) developed multispectral light stages, (2) showed the structure inherent in the set of images under multispectral and multidirectional light sources, and (3) developed a method for efficiently acquiring the set of images. In addition, we tackled some applications to image understanding, recognition, and synthesis such as (4) shape and reflectance recovery, (5) material recognition, and (6) image-based relighting.

研究分野：総合分野

キーワード：コンピュータビジョン コンピュータグラフィックス パターン認識 コンピュータショナルフォトグラフィ

## 1. 研究開始当初の背景

実世界センシングや写実的画像生成に対するニーズの高まりから、任意光源環境における物体の見えの理解・認識・生成に関する研究が活発に行われている。物体の見え、つまり、物体表面上で観察される明るさと色は、光源の空間的な分布だけでなく分光的な分布にも依存して大きく変化する。ところが、従来、空間分布に関しては明るさ解析の分野で、分光分布に関しては色解析の分野で、ほぼ独立に研究が行われていた。

## 2. 研究の目的

本研究では、任意の空間分布・分光分布を持つ光源環境における物体の見えを扱うための統一的枠組み、ならびに、実験環境を構築して、明るさ解析と色解析の統一を目指す。さらに、構築した統一的枠組みに基づいて、画像の理解・認識・生成への応用にも取り組む。

具体的には、(1)実験環境の構築、(2)統一的枠組みの構築、および、(3)効率的な画像獲得手法の開発に取り組む。また、応用として、(4)形状・反射率の推定、(5)材質認識、および、(6)照明シミュレーションにも取り組む。

## 3. 研究の方法

任意の空間分布・分光分布を持つ光源環境における物体の見えを解析するにあたり、実データ、つまり、様々な方向から様々な波長の光源により照らされた実物体の画像を獲得する必要がある。そこで、被写体の周囲に様々な波長・方向(位置)の光源を配置したマルチスペクトルライトステージと呼ばれる光源装置を作成する。

マルチスペクトルライトステージを用いて撮影した画像を解析することで、多波長・多方向光源下の画像に内在する構造を明らかにする。また、得られた知見に基づいて、多波長・多方向光源下の画像を用いた画像の理解・認識・生成を行う。

## 4. 研究成果

### (1)実験環境の構築

#### ①マルチスペクトルライトステージの作成

32方向×9色のLEDからなるKyutech Light Stage I (図1)と、128方向×16色のLEDからなるKyutech Light Stage IIの2つのマルチスペクトルライトステージを作製した。前者では半球面上に、後者では球面上に多数のLEDを配置している。また、ライトステージを用いて撮影した画像の解析に必要な幾何学的・光学的特性(光源の方向・強度・分光分布、カメラの分光感度)の較正を行った。

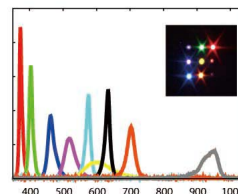
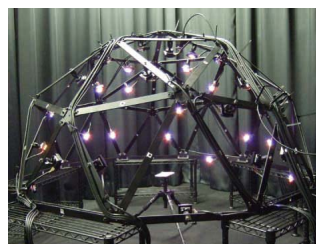


図1: Kyutech Light Stage I

### ②多波長・多方向光源下の画像の獲得

一般に、各々のLEDのみを点灯して撮影を行うと、照度が十分ではないために画質が低下してしまうという問題がある。そこで、多重化センシングに基づいて、複数のLEDを一斉に点灯した符号化照明の下で画像を撮影し、その画像を復号化することで、単一LED下における高SN比の画像を獲得した(図2)。

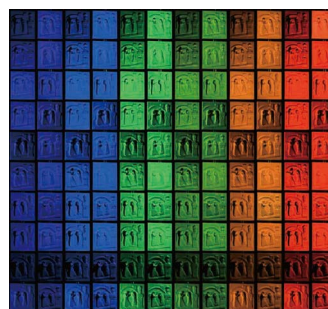


図2: 多波長・多方向光源下の石膏レリーフ

### (2)統一的枠組みの構築

#### ①多波長・多方向光源下の画像の構造の解明

多波長・多方向光源下の画像集合は、画素・光源波長・光源方向の3つを軸とする3次元データとして捉えることができる。画像が拡散反射成分と鏡面反射成分で構成されるとき、光源の波長と方向が変化するときの画素値からなる行列(画素を固定したときの3次元データの断面)がランク2になることを示した。また、画素と光源方向が変化するときの拡散反射成分の画素値からなる行列(光源波長を固定したときの3次元データの断面)のランクが3になること、および、少数の光源方向の下でのみ観察される鏡面反射成分がスパースであることを確認した。

②拡散反射成分と鏡面反射成分の分離  
上記の構造に基づいて、多波長・多方向光源下の画像を拡散反射成分と鏡面反射成分に分離する手法を開発した。具体的には、画素固定の断面においてスパース NMF

(Non-negative Matrix Factorization: 非

負値行列因子分解)を、波長固定の断面において外れ値を考慮した SVD (Singular Value Decomposition: 特異値分解) を交互に適用することで、低ランク性とスパース性を満たすように反射成分を分離した (図 3)。

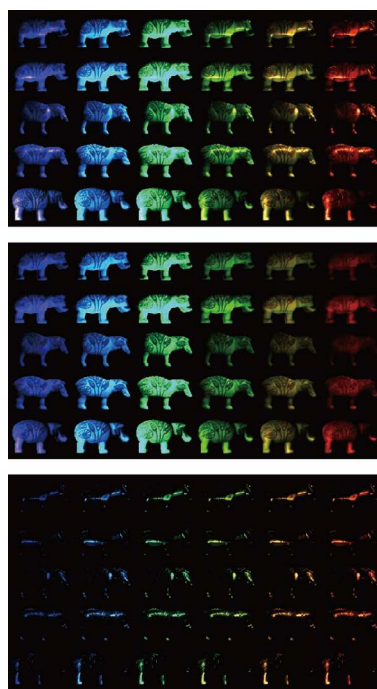


図 3: 反射成分の分離. 入力画像 (上段), 拡散反射成分 (中段), 鏡面反射成分 (下段).

### (3) 効率的な画像獲得手法の開発

#### ① 辞書学習による圧縮センシング

多波長・多方向光源下の画像をスパースに記述する辞書を作成することで圧縮センシングを行った. 提案手法では, 拡散反射成分と鏡面反射成分からなる画素値が分光項と幾何学項の積和で表現されることから, 独立に学習した分光項と幾何学項の辞書のクロネッカー積により, 辞書を効率的に作成した.

#### ② 低ランク性に基づく圧縮センシング

(2) で明らかにした低ランク性に基づいて圧縮センシングを行った. 先行研究では各画素独立に圧縮センシングを行っていたが, 提案手法では, 近傍の画素では法線や分光反射率が類似していることに着目して, 複数画素の画素値を同時に復元することでさらなる効率化を図った.

### (4) 形状・反射率の推定

#### ① 少数の画像からの推定

多波長光源下の画像を解析する分光イメージングと多方向光源下の画像を解析する照度差ステレオを統合して, 物体表面の法線と分光反射率を同時に推定する手法を開発した. 推定に必要な画像の枚数を明らかにするとともに, 画素値のノイズを考慮して最適な光源の波長と方向を選択する手法を提案し, 9 枚という少数の画像から法線と分光反射率を安定に推定できることを示した (図 4).

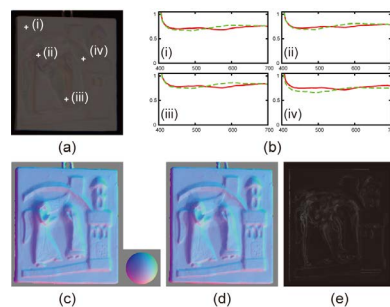


図 4: 法線と分光反射率の推定結果

#### ② 非ランバート面への拡張

ランバートモデルを仮定した照度差ステレオや分光イメージングでは, 鏡面反射成分により推定精度が悪化してしまう. そこで, ロバスト推定を用いて鏡面反射成分を除去することで, 法線と分光反射率を頑健に推定する手法を提案した.

#### ③ 照明シミュレーション

推定した法線と分光反射率を CG の物体モデルとして用いて画像を生成した. 従来手法が方向と波長のどちらか一方が任意の光源下の画像しか生成できないのに対して, 提案手法では方向も波長も任意の光源下の写実的な画像を生成できることを示した (図 5).

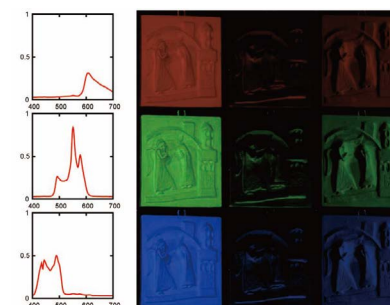


図 5: 照明シミュレーションの結果

### (5) 材質認識

画像に基づく非接触・非破壊の材質識別において, 被写体を照明する光源の波長と方向を最適化する手法を提案した. 従来手法が 2 枚の入力画像を必要としていたのに対して, 提案手法では, 線形識別面を SVM (Support Vector Machine: サポートベクターマシン) を用いて求める際に非負値拘束を課すことで, ワンショットの画像のみから材質識別を行った. これにより, 動物体の材質識別が可能になる.

### (6) 照明シミュレーション

#### ① イメージベースライティング

ハイパースペクトルカメラを用いて, シーンの全方位光源環境を獲得した (図 6). 獲得した光源環境を CG の光源モデルとして用いて画像を生成し, 波長分解能と色再現性の関係を調べることで, 蛍光物体のレンダリング

には光源の分光分布が有用であることを示した。

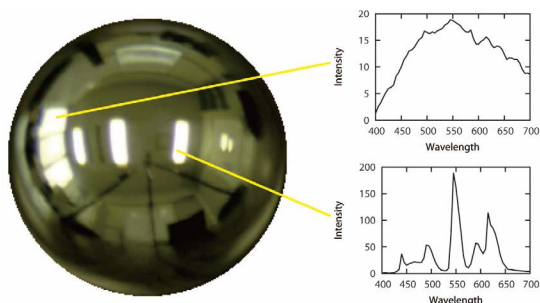


図 6 : 獲得した全方位光源環境

## ②イメージベーストレンダリング

多波長・多方向光源下の画像を、上記の光源環境に応じた重みで組合せることで、方向も波長も任意の光源下の写実的な画像を生成する手法を提案した。拡散反射物体と鏡面反射物体の各々に関して、写実的な画像を生成するのに必要な光源数を実験的に明らかにした。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 15 件)

(1) 小屋松孝治, 岡部孝弘, 多波長・多方向光源下の画像を用いた拡散・鏡面反射物体の写実的画像生成, 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究会, 2016 年 5 月 12 日~13 日, 立命館大学 (大阪府茨木市)

(2) 宮崎祥一, 岡部孝弘, ワンショット画像に基づく材質識別のための照明の最適化, 電子情報通信学会 2016 年総合大会, 2016 年 3 月 15 日~18 日, 九州大学 (福岡県福岡市)

(3) 小林直人, 岡部孝弘, 低ランク性とスパース性に基づく多波長・多方向光源下の画像の反射成分の分離, 情報処理学会 第 78 回全国大会, 2016 年 3 月 10 日~12 日, 慶應義塾大学 (神奈川県横浜市) (学生奨励賞)

(4) Megumi Miura, Takahiro Okabe, and Imari Sato, Is Spectral Lighting Environment Necessary for Photorealistic Rendering?, The 14th ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications in Industry (VRCAI2015), 2015 年 10 月 30 日~11 月 1 日, 神戸ポートアイランドセンター (兵庫県神戸市)

(5) 北原雅啓, 岡部孝弘, 少数の画像からの物体表面の分光反射率と法線の推定, 第

14 回情報科学技術フォーラム (FIT2015), 2015 年 9 月 15 日~17 日, 愛媛大学 (愛媛県松山市) (FIT 奨励賞)

(6) 小林直人, 岡部孝弘, 辞書学習を用いた圧縮センシングによる多波長・多方向光源下画像の効率的な獲得, 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究会, 2015 年 5 月 18 日~19 日, 日本科学未来館 (東京都江東区)

(7) 三浦恵, 岡部孝弘, ハイパースペクトル光源環境の計測と効率的表現, 情報処理学会 第 77 回全国大会, 2015 年 3 月 17 日~19 日, 京都大学 (京都府京都市) (学生奨励賞)

(8) Masahiro Kitahara, Takahiro Okabe, Christian Fuchs, and Hendrik P. A. Lensch, Simultaneous Estimation of Spectral Reflectance and Normal from a Small Number of Images, The 10th International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP2015), 2015 年 3 月 11 日~14 日, ベルリン (ドイツ)

(9) 森孝昌, 岡部孝弘, 低ランク構造に基づく多波長・多方向光源下における画像の効率的な獲得, 電子情報通信学会 2015 年総合大会, 2015 年 3 月 10 日~13 日, 立命館大学 (滋賀県草津市)

(10) 北原雅啓, 岡部孝弘, 光沢のある物体表面の分光反射率と法線の推定, 第 14 回情報科学技術フォーラム (FIT2014), 2014 年 9 月 3 日~5 日, 筑波大学 (茨城県つくば市)

[その他]

ホームページ等

<http://www.pluto.ai.kyutech.ac.jp/~okabe/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岡部 孝弘 (OKABE, Takahiro)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・准教授

研究者番号 : 00396904

### (2) 研究分担者

佐藤 洋一 (SATO, Yoichi)

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号 : 70302627

### (3) 研究分担者

佐藤 いまり (SATO, Imari)

国立情報学研究所・コンテンツ科学研究系・教授

研究者番号 : 50413927