

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 24 日現在

機関番号：12501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25540063

研究課題名(和文)分光画像を用いた蛍光物体の特性解析とビジョン応用

研究課題名(英文) Analysis of Characteristics of Fluorescent Objects Using Spectral Images and Its Vision Application

研究代表者

富永 昌二 (Tominaga, Shoji)

千葉大学・大学院融合科学研究科(研究院)・特任研究員

研究者番号：10103342

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、蛍光物体の2分光特性、2方向特性、見え特性及び相互反射特性といった種々の特性を解析する技法を開発することを目指した。

まず、蛍光物体の2分光特性の精密な計測のための2分光器システムと、カメラとLCTフィルタからなる分光イメージングシステムを構築した。第二に、連続分光分布を有する2つの光源を用いて、蛍光物体の2分光ドナルドソン行列を推定する方法を開発した。第三に、蛍光物体の2方向特性を計測してモデル化するための方法を提案した。第四に、視感評価実験に基づいて蛍光色の見えを評価し、物体色との見えの違いを分析した。最後に、密接して存在する複数蛍光物体から観測される相互反射現象を検討した。

研究成果の概要(英文)：This project aimed at developing the technology to analyze a variety of characteristics of fluorescent objects, such as the bispectral characteristic, the bidirectional characteristic, the appearance characteristic, and the interreflection characteristic.

First, we constructed a bispectrometer system for precise measurement of the bispectral characteristics of fluorescent objects, and a spectral imaging system using a camera and a LCT filter. Second, we developed a method to estimate the bispectral Donaldson matrices of fluorescent objects using two illuminant projections with continuous spectral-power distributions. Third, a method was proposed for measurement and modeling of bidirectional characteristics of fluorescent objects. Fourth, we evaluated appearance of fluorescent color based on visual experiment and analyzed the appearance difference from object color. Finally, we studied the interreflection phenomenon observed from closely apposed fluorescent objects.

研究分野：視覚情報学

キーワード：蛍光物体 分光画像 蛍光励起 蛍光感 蛍光分光特性

## 1. 研究開始当初の背景

カラー画像解析やコンピュータビジョンの分野で取り扱われてきた物体は、おもに反射物体であった。最近はこのような反射物体に加えて、蛍光物体が身近になりつつある。蛍光物体には、自発光の要素があるので、通常の反射物体と比べて、より明るくて鮮やかな質感を与える。実際、我々の日常生活において、文房具、衣類、塗料を含む多くの物体は蛍光成分を含んでいる。このように蛍光物体が身近な存在となったため情報科学的な学術研究が着手されている。今後蛍光発光の新しい材料開発とともに蛍光情報の利用が促進されるので、蛍光発光物体の特性解析とそのビジョン応用に関する研究は重要となった。

## 2. 研究の目的

シーンに存在する物体の反射特性と蛍光特性の2分光(bispectral)特性を記述する表現法を定め、この特性を正確に求める計測法を確立する。次に数理モデルを考案し、分光イメージング系を用いて観測した分光データから、bispectral 特性を推定する高性能アルゴリズムを開発する。また反射・発光の方向(bidirectional)特性を解析し、分光特性に加えて、幾何特性を記述する数理モデルを確立する。心理知覚研究として、蛍光色と物体色の見えの違いを視感評価実験に基づいて明らかにする。応用研究として画像解析とレンダリングを検討する。

## 3. 研究の方法

(1) 蛍光の分光特性の基礎研究を実施する。まずモノクロメータと分光放射計で、厳密な2分光特性測定系を構築し、さらにカメラによる分光イメージング系を構築する。

(2) 分光器に基づいて Donaldson 行列を正確に求める方法、および数理モデルに基づいて、分光画像データから効率よく Donaldson 行列を推定する方法を開発する。

(3) 幾何学的特性を調べるために、ゴニオ測光システムを構築し、モデルを決定する。

(4) 蛍光色と物体色の見えの違い(蛍光感)を視感評価実験に基づいて解析する。

(5) 相互反射の影響をもつ蛍光物体の分光解析の方法を開発する。応用研究として、蛍光物体の画像解析と画像生成に取り組む。

## 4. 研究成果

### (1) 蛍光分光特性測定系の構築

蛍光物体の分光特性は2分光ラディアンズファクター(bispectral radiance factor)という用語で記述される。このラディアンズファクターは2種類の波長、入射光の励起(excitation)波長と出射区光の発光/反射(emission/reflection)波長を変数とする関数である。このような2次元特性は図1のようDonaldson (Donaldson) 行列としてまとめられる。この行列は蛍光物体の2分光特性

の詳細を表し、光源に依存しない行列である。

2 分光ラディアンズファクターを直接計測するには、通常2つの分光器を入力側と出力側に用いることになり、計測システムとして高価で時間が掛かるという問題があった。そこで本研究では、簡略化した2分光器系による直接計測法を開発した。このシステムの機器構成は、入力側にモノクロメータ、ハロゲンランプ、拡散ガラス板、校正用に標準白色板を用い出力側に2つの分光放射輝度計を用いるものである。なお波長範囲は蛍光励起を考慮して、可視域より広くとり、[350, 700nm]とした。出力波長域も、[350, 380 nm]と[380, 700 nm]に分けて分光分布計測し、結果を結合した。図1は開発した簡略化2分光器系で、黄色の蛍光塗装物体を計測して得られたDonaldson行列である。

次に、分光器を用いずに、通常の照明光を用いて効率よくDonaldson行列を推定する分光イメージング系を構築した。これには冷却モノクロCCDカメラと液晶チューナブルフィルタを組み合わせて構築し、測定波長域は可視域[400, 700nm]で、5nm間隔でサンプルし、61チャンネルの分光画像を獲得した。システム校正のために、分光プログラマブル光源と分光放射輝度計を利用して厳密なキャリブレーションを実施した。(論文)

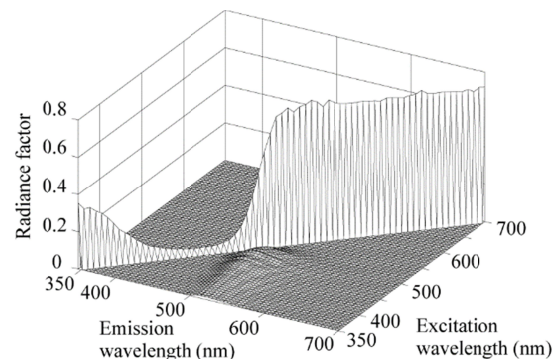


図1 直接法によるDonaldson行列の計測例

### (2) 2光源によるDonaldson行列推定

本研究では、連続的な分光分布をもつ一般の光源2つを用いて、蛍光物体の2分光Donaldson行列を推定する方法を開発した。まず、簡略化した2分光器系で幾つかの蛍光物体のDonaldson行列を計測し、蛍光ラディアンズファクターが励起波長成分と発光波長成分に分離できることを示した。このときDonaldson行列は、拡散反射、蛍光励起、蛍光発光の3成分に分解できた。

次に、反射成分と蛍光励起成分の関係を記述するための物理モデルを考案した。この際、反射、蛍光励起、蛍光発光のどの成分についても分光分布の形状を仮定せず、分布形状は任意とした。我々の計測スタイルは従来の1分光器法と類似であるが、複雑なフィルタ操作は必要でなくて、2つの光源を物体に投影するだけで操作は極めて簡便である。

2つの光源下で観測した蛍光物体の分光センサ出力の分光データ(2種類)に基づい

て、ドナルドソン行列の全要素を推定するアルゴリズムを開発した。このアルゴリズムは分光放射輝度計からの分光データ、および狭帯域特性をもつ分光イメージング系からの分光画像データに適用できる。このアルゴリズムの背景は、2光源下における見かけの分光反射率 (apparent reflected radiance factor) の変化は、蛍光発光における差のみにより生じるという特性に基づく。本アルゴリズムでは、蛍光励起、蛍光発光、拡散反射の順に、3分光成分を逐次推定している。

開発した推定法の特長は、データ量の大幅削減と処理速度の高速化である。従来の方法でドナルドソン行列を作るとすれば、一つの蛍光物体に対して  $5041 (= 71 \times 71)$  の分光データあるいは  $4331 (= 71 \times 61)$  の画像データが励起波長と発光波長において必要となり、従来法は現実的には困難な手法といえる。一方開発した我々の方法では、わずか  $142 (= 71 \times 2)$  の分光データあるいは  $122 (= 61 \times 2)$  の画像からドナルドソン行列を求めることができるのである。

開発した方法の妥当性は幾つかの蛍光サンプルを用いて実験的に検証した。図2は実験に使用した白熱電球光源と人工太陽光源の分光分布である。我々は推定した分光ラディアンسفアクターとドナルドソン行列を、2分光器法による結果と比較した。推定精度を数量化して、分光的にも色彩的にも十分な精度であることを確認した。図3は、図1と同じサンプルの推定結果であり、図1と比較して良好な推定精度が得られている。

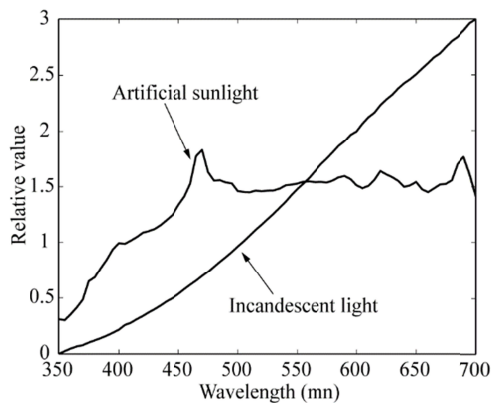


図2 実験に使用した光源の分光分布

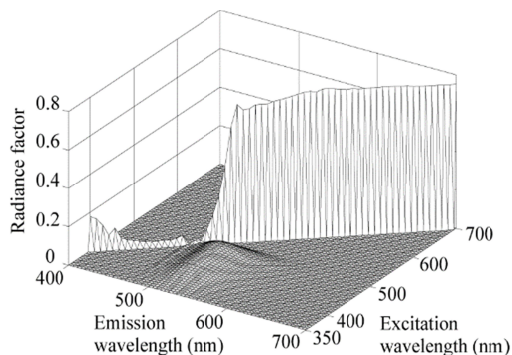


図3 提案法によるドナルドソン行列の推定結果

なお、ドナルドソン行列の推定精度は使用した光源の分光分布に大きく依存する。そこで光源依存性を調べるために、異なった色温度の黒体放射を用いた模擬実験を実施した。結果として、分光分布が大きく異なる、すなわち大きく離れた色温度をもつ光源の組み合わせが良好な推定精度につながるということが明らかになった。また短波長においてより大きなエネルギーをもつ光源は、蛍光発光を効率的に励起することがわかった。(論文)

### (3) 反射・発光の幾何特性のモデル化

通常物体の空間反射特性はよく研究されているが、蛍光物体の反射や発光の空間幾何学的発光特性 (bidirectional 特性) はよく知られていない。そこでこの特性を調べるために、図4のような2自由度のゴニオ測光システムを製作した。このために現有の光学ベンチ上に、回転台、アーム、光学系を用いて、入射角と受光角各1自由度をもつ測光システムを構築した。光源にはブラックライト、輝度計測には分光放射輝度計を用いた。

まず蛍光発光成分の角度依存性を調べた。このためゴニオ測光システムからの輝度データを用いた。受光角および入射角を、それぞれ鉛直方向から数度ごとに変化させて発光輝度データを得た。画像撮影にマルチバンドカメラを用いて、輝度データの角度特性を計測し、角度依存性及び点広がり特性を解析した。

次に具体的モデル化のために、蛍光塗料を平板に塗布し、蛍光平板サンプルを複数作成した。構築したゴニオ測光システムを用いて、反射・発光角を変えてラディアンسفアクターを計測して、特性を記述する数学モデルを検討した。反射特性は表面物体材料に依存し、蛍光発光特性は拡散放射で、強度は入射角度に依存することがわかった。(論文)

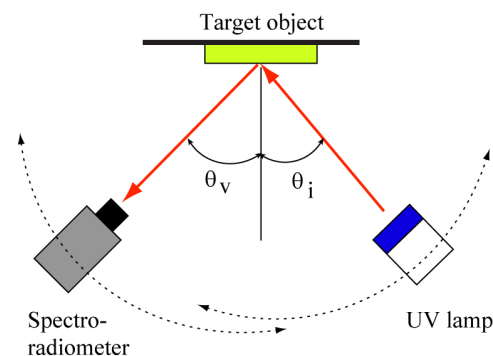


図4 ゴニオ計測システム

### (4) 蛍光色の見えの解析

蛍光物体は通常の可視光による光反射に加えて、紫外光・可視光を吸収・励起し、励起光よりも長波長側の光を発光するという蛍光発光特性をもっている。この蛍光発光特性によって、ヒトは蛍光らしさ「蛍光感」を感じると考えられる。本研究では、蛍光色と物体色の見えの違いとその要因を、視感評価実験に基づいて検討した。

はじめに、LCD モニタ上に表示されたパッチ色に対する心理物理実験を通じて、モニタ上で蛍光色およびネオン色が知覚されるかを調べ、それらと色の見えのモードとの関係、および色名との関係を解析した(論文, 発表)。その結果、人間の視知覚において、モニタ上でも蛍光色とネオン色が知覚されることを明らかとした。また、それらは光源色として知覚されることや、色名が大幅に制約されることなどを明らかにした。

次に、蛍光の実刺激とモニタ再現における「蛍光感」の違いに関して、心理物理実験を通じて解析した(論文, 発表)。その結果、刺激とその周囲色の CIE  $Y_{xy}$  が等しくても、刺激の周囲を画用紙で覆うか否かによって、蛍光感が変化することを発見した。図 5 は実験設定の模式図を示している。図 5 の左に示されるように、モニタの蛍光刺激の周囲を、実刺激と同じ画用紙で覆った場合に、実刺激とほぼ等価な蛍光感が得られ、図 5 の右に示されるように、モニタの周囲をそのまま提示した場合に、実刺激より蛍光感が低下した。このことにより、周囲を覆う画用紙の有する質感が、蛍光刺激の蛍光感に影響することが明らかとなった。

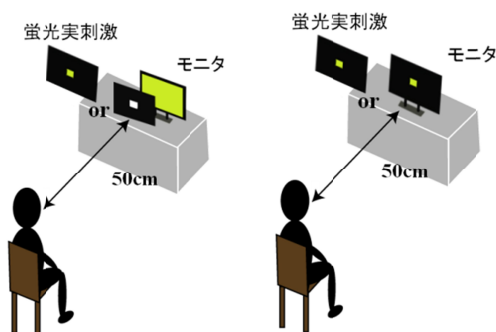


図 5 蛍光感評価実験。

(左)モニタ刺激の周囲を実画用紙で覆った場合。  
(右)モニタ刺激の周囲もモニタとした場合。

### (5) 蛍光物体の相互反射の解析

複数の蛍光物体が接近して存在するとき、相互反射 (interreflection 或いは mutual illumination) と呼ばれる現象が物体表面で観測され、物体の見えに影響を及ぼす。このとき物体を照明する成分は2つからなり、光源からの直接照明光と他の物体からくる間接照明光である。相互反射の解析問題は、これまで色彩科学、画像科学、コンピュータ視覚、コンピュータグラフィックスといった分野で研究されてきたが、蛍光物体が解析されたことはほとんどなかった。

本研究では、相互反射の影響をもつ2つの蛍光物体について分光解析の一つの方法を開発した。2つの蛍光物体間の相互反射現象は、光反射と蛍光発光の2種類の相互反射からなり、相互反射の分光成分は2つ蛍光物体のドナルドソン行列の積によって決まることを示した。解析の結果、観測画像の分光成分は、(1)

拡散反射、(2)拡散 - 拡散反射、(3)蛍光自発光、(4)蛍光照明による相互反射、の4つの成分で構成されることがわかった。

次に、2つの物体の分光反射率と蛍光発光スペクトル、および光源の分光分布が既知として、観測画像から上記の4つの分光成分を推定するアルゴリズムを開発した。このアルゴリズムは安定で、線形最小自乗法に基づく。

応用として、相互反射の影響をもつ2つの蛍光物体の画像解析を実施した。2つの物体は異なった物体色と蛍光色をもつが、各物体の表面は均一で、テクスチャーはなく、蛍光材料は一つ、すなわち蛍光発光ピークは単一と想定した。実験の結果、観測画像は4つの分光成分に分離でき、物理モデルの妥当性を明らかにした。さらにレンダリング応用として、同一の相互反射をもつ蛍光物体を異なった光源下で観測した際の映像を精度良く生成できることを可能にした。すなわち任意の照明光源における見えを実現できることがわかった。(論文)

### 5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計11件)

S.Tominaga, K.Kato, K.Hirai and T.Horiuchi, "Bispectral Interreflection Estimation of Fluorescent Objects", Proc. CIC23, 査読有, 2015, pp. 111-115.

S.Tominaga, K.Hirai and T.Horiuchi, "Bispectral Estimation of Fluorescent Objects", Proc. OSA Imaging and Applied Optics Congress, 査読有, 2015, paper IT2A.1 (DOI:10.1364/ISA.2015.IT2A.1).

S.Tominaga, K.Hirai and T.Horiuchi, "Estimation of bispectral Donaldson matrices of fluorescent objects by using two illuminant projections", The Journal of the Optical Society of America A, vol.32, no.6, 査読有, 2015, pp.1063-1067 (DOI: 10.1364/JOSAA.32.001068).

S.Tominaga, S.Nakamoto, K.Hirai and T.Horiuchi, "Estimation of Surface Properties for Art Paintings Using a Six-band Scanner", Journal of the International Colour Association, vol.12, 査読有, 2014, pp.9-21.

S.Tominaga, K.Hirai and T.Horiuchi, "Measurement and Modeling of Bidirectional Characteristics of Fluorescent Objects", Lecture Notes in Computer Science, vol.8509, 査読有, 2014, pp.35-42, (DOI: 10.1007/978-3-319-07998-1\_5).

K.Hirai, M.Yamaguchi, T.Horiuchi and S.Tominaga, "Comparison of Fluorescent Color Perception using Real Objects and LCD Monitor", Proc. AIC2014 Interim Meeting, 査読有, 2014, pp.563-566.

S.Tominaga, D.Watanabe, K.Hirai and T.Horiuchi, "Spectral analysis of

omnidirectional color signals in natural scenes", Proc. 25th IS&T/SPIE Symposium on Electronic Imaging, 査読有, 2014, pp. 901503 (DOI:10.1117/12.203592)

S.Tominaga, D.Nishioka, K.Hirai and T.Horiuchi, "An Integrated Spectral Imaging System or Exact Color Image Production", Proc. OSA Imaging Systems and Applications, IM2E.3, 査読有, 2013 (DOI: 10.1364/ISA.2013.IM2E.3).

M.Tanaka, T.Horiuchi and S.Tominaga, "Visual Perception of Fluorescent and Neon Colors on an LCD Monitor", Proc. Congress of the International Colour Association (AIC), 査読有, 2013, pp. 1053-1056.

S.Tominaga, K.Hirai and T.Horiuchi, "Estimation of Bispectral Matrix for Fluorescent Objects", Proc. The Colour and Visual Computing Symposium (CVCS 2013), 査読有, 2013, pp.1-4 (DOI: 10.1109/CVCS.2013.6626269).

K.Hirai, T.Tanimoto, K.Yamamoto, T.Horiuchi and S.Tominaga, "An LED-based Spectral Imaging System for Surface Reflectance and Normal Estimation", Proc. IEEE Workshop on Colour and Multispectral Imaging in SITIS 2013, 査読有, 2013, pp.441-447 (DOI: 10.1109/SITIS.2013.78)

〔学会発表〕(計7件)

久万悠紀子, 富永昌治, 堀内隆彦, 平井経太, Kubelka-Munk 理論の二定数法を用いた水彩画の分光反射率推定, 日本色彩学会第22回視覚情報基礎研究会, 2014年12月6日, 中央大学(東京都・文京区).

山本一矢, 平井経太, 堀内隆彦, 富永昌治, LEDを利用した油彩画の表面特性獲得システムの構築, 画像関連学会連合会第一回秋季合同大会, 2014年11月20日~21日, 京都工芸繊維大学(京都府・京都市).

富永昌治, 美術絵画のデジタルアーカイビング, 日本色彩学会公開シンポジウム「色彩が奏でる芸術と科学(招待講演)», 2014年10月11日, 国立新美術館(東京都・港区).

泉澤裕介, 平井経太, 堀内隆彦, 富永昌治, 画像の対照比較における色知覚への影響, 日本写真学会年次大会, 2014年5月26日~27日, 千葉大学(千葉県・千葉市).

大沢直人, 平井経太, 堀内隆彦, 富永昌治, 全方位分光画像計測システムの時空間特性の改善, 日本色彩学会第18回視覚情報基礎研究会, 2013年12月7日, 中央大学(東京都・文京区).

山口美香, 平井経太, 堀内隆彦, 富永昌治, 蛍光実物体とLCDモニタを用いた蛍光感知覚の比較, 第1回日本色彩学会秋の大会, 2013年11月15日~17日, 倉敷公民館(岡山県・倉敷市).

田中緑, 堀内隆彦, 富永昌治, LCDモニタ上の蛍光色とネオン色の知覚に関する一考察, 第44回日本色彩学会全国大会, 2013年5月25日~26日, 早稲田大学(東京都・新宿区).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

富永 昌二 (TOMINAGA, Shoji)  
千葉大学・大学院融合科学研究科・特任研究員  
研究者番号: 10103342

### (2) 研究分担者

堀内 隆彦 (HORIUCHI, Takahiko)  
千葉大学・大学院融合科学研究科・教授  
研究者番号: 30272181  
平井 経太 (HIRAI, Keita)  
千葉大学・大学院融合科学研究科・助教  
研究者番号: 30583405