

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 2 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25330184

研究課題名(和文) 3次元移動物体を対象とした実時間分光イメージングシステムの構築と応用展開

研究課題名(英文) Construction and Deployment of Realtime Multispectral Imaging System for a 3D Moving Object

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：報告者らは先行研究で科学研究費補助金の支援を受け、アクティブ分光照明を用いた分光イメージングシステムの試作に取り組んだ。構築した試作システムは、平面の静止物体の測色や分光反射率推定を可能としたが、実世界の3次元形状を有する移動物体に適用することができなかった。本課題では、実世界のそれらの物体を対象とした分光イメージングシステムを構築し、実シーンを対象とした様々な応用問題への展開を図ることを目的とする。研究の成果として、課題を解決できる分光プロジェクタを構築し、精度確認を行った。さらに、蛍光感知覚に関するビジョン問題への応用に取り組んだ。

研究成果の概要(英文)：We received support from scientific research grants in previous research and worked on trial production of a spectral imaging system using active spectral light. Although the constructed prototype system enabled colorimetry of a stationary object on the plane and estimation of spectral reflectance, the system could not be applied to a moving object having a three dimensional shape in the real world. In this subject, we aim to develop a spectral imaging system for those objects in the real world and to develop various application problems for real scenes. As a result of this study, we constructed a spectral projector that could solve the subject and verified the feasibility of the system. Furthermore, we applied to the vision problem on the perception of fluorescence.

研究分野：色彩情報工学

キーワード：分光画像計測 分光レンダリング 三次元形状計測

1. 研究開始当初の背景

近年、分光画像の必要性が、コンピュータビジョン研究をはじめ多くの分野で高まっている。従来、照明光の分光分布や物体表面の分光反射率などの分光関数を正確に求めるには、分光放射輝度計や分光側色計などの分光器を必要とした。しかし、この方法は装置が可搬でないこと、高価なことに加えて、[問題点1]シーン中の一箇所しか分光情報が獲得できないという原理的な問題があった。報告者らは、この問題点を解決する方法として、マルチバンドイメージング系の構築を行っており、種々のビジョン応用の研究に取り組んできた。このようなマルチバンドイメージング系の大きな問題点は、[問題点2]イメージングは計測に時間を要すること、[問題点3]フィルタの設計や選択が容易でないこと、[問題点4]フィルタによる分光が有限個であるため、分光器と比べて分光情報や測色の正確さが大幅に劣ることである。

報告者らは科学研究費補助金の支援(富永・堀内, H22-H23 挑戦的萌芽)を受け、アクティブ分光照明を用いた分光イメージングシステムの試作に取り組んだ。このシステムによって、[解決法1]カメラで獲得した全画素に対して、[解決法2]実時間で、[解決法3]任意の分光特性によって、しかも[解決法4]高精度に分光情報を獲得できる可能性を、検証実験によって明らかにした。

2. 研究の目的

先行研究(富永・堀内, H22-H23 挑戦的萌芽)において構築した試作システムでは、平面の静止物体を対象とした基礎的な性能評価は可能であったが、3次元形状を有し、移動するような実物体に適用することができなかった。そこで、それらの実物体を対象とした次のステップとして、以下の問題点を解決していく必要がある。

(問題点A)照射範囲の問題

光源の強度が弱く照射範囲が狭いため、計測領域が小さく、適用物体が限定される。また、カメラと照明光源の光軸が一致していないため、それらのジオメトリが計測の精度に影響を及ぼす。

(問題点B)演算速度の問題

最大撮影速度が遅く、移動物体の分光計測に適用できない。

(問題点C)形状獲得の問題

3次元物体の形状を獲得することができない。

本研究では、上記の問題点を解決できる実世界の移動物体を対象とした分光イメージングシステムを構築し、実シーンを対象とした様々な応用問題への展開を図ることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 問題点Aを解決するための第1の方法として、2台のアクティブ分光照明を用いた

システムを構築し、空間的に輝度むらや色むらのない状態で照射範囲の拡大を実現する。

(2) 問題点Aを解決するための第2の方法として、アクティブ分光照明をプロジェクタの光源とした分光プロジェクタを構築し、画素ごとの明るさや色の制御を可能とする。

(3) 問題点Bを解決するために、高速モノクロカメラを導入し、高速カメラと照明光源の同期システム構築を行う。

(4) 問題点Cを解決するために、ステレオ計測、Time of Flight (ToF)による距離画像計測、パターン光投影による距離画像計測など、3次元形状獲得方法の適用を検討する。

(5) 応用研究として、開発したシステムを実シーンのビジョン問題へ適用し、その有用性を検証する。

4. 研究成果

(1) 2台のアクティブ分光照明を用いたシステム構築

アクティブ分光光源2台に対して2分岐ファイバを利用することによって、2光源の混合光学系の構築を行った(図1)。このとき、レンズとファイバを工夫することにより、光の損失を抑え、輝度むらおよび色むらなく光源を混合する工夫をした。



図1 アクティブ分光光源2台を用いて構築したシステム

2台の照明光源の特性が異なることから、それらを独立に制御するためのアルゴリズムとシステムの構築を行った。

構築したシステムを用いて、平面に移動物体を対象として、9種類の光源(図2)を設計し、これを照射することによって、分光反射率をカメラで推定する方法を開発し、システムに実装した。また、光源の分光分布を設定することにより、仮定の平行光源によるリライティングシステムを構築した。さらに、シーン内に既知の反射率物体を設置することにより、任意照明光源下の移動物体シーンに対するリライティングシステムを構築した。モニタ再現精度は、D65光源でX-Rite ColorCheckerにおいて、平均色差6.9であった。布などの一般平面物体に適用して、その有効性を検証した(図3)。

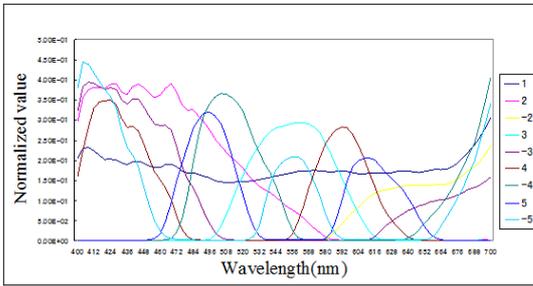


図2 分光反射率推定に用いた光源



A光源下 D65光源下
図3 リライティングの例

(2) アクティブ分光照明を光源とした分光プロジェクタの構築

アクティブ分光照明 (Optronic Laboratories, OL490) の光源の先端を、DLP プロジェクタ (Texas Instrument, DLP Lightcrafter) のライトエンジンとすることによる分光プロジェクタを構築した (図4)。機器間の同期は、DLP Lightcrafter から OL490 とモノクロカメラへ同時にトリガ信号を出力する形で構築した。マルチバンドプロジェクタシステムは、プロジェクタ側の DMD で、光源の各チャンネルに対応した2次元のグレースケール画像を構成し、8ビットの深度を持つ単原色の画像を出力した (図5)。



図4 分光プロジェクタを用いて構築したシステムの概要

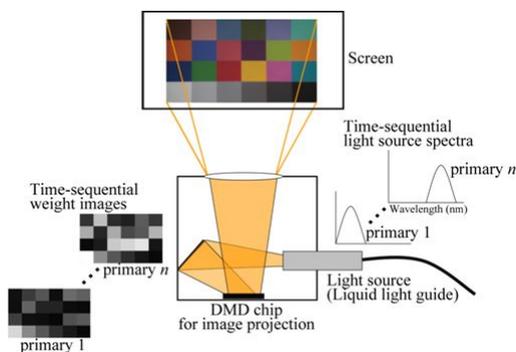
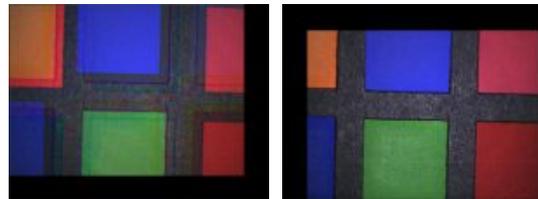


図5 分光プロジェクタを用いた処理過程

(3) 移動物体の測色と三刺激値ディスプレイへの適用

平面の移動物体を対象として、3種類の光源を照射することにより、測色を行う方法を開発し、システムに実装した。ステッピングモータにより等速移動するカラーチャートを用いて、有効性を検証した。計測精度は、A光源で平均色差6.7、D65光源で平均色差4.3であった。

平面の移動物体を対象として、3種類の光源を照射することにより、任意の照明環境において獲得される画像の見えを、ディスプレイ上に正確な三刺激値XYZで再現するシステムを構築した。このとき、エッジ部分に偽色が観察される問題が生じたため、GPU上にオプティカルフローを実装することによって、補正を図った (図6)。



補正前 補正後
図6 移動物体の測色例

(4) 3次元形状の獲得

当初、2台のカメラを用いたステレオ計測を検討したが、光軸のずれや対応点検索などに処理時間を要する問題点が浮かび上がった。また、ToFに基づいたKinectを用いた距離情報の獲得を試みたが、本研究の要求精度を満たすことができなかった。

そこで、パターン光投影を用いることによって、この問題点を解決した。具体的には、9種類の分光反射率計測用光源に加えて、8種類の距離情報獲得用グレーコードパターンを準備し、合計17枚を投影することによって、分光反射率と形状情報の同時獲得を実現した (図7)。同時獲得に要する処理時間は、2.3 secであった。

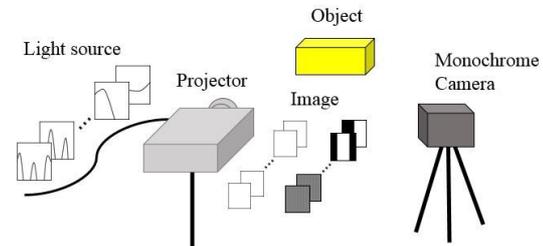


図7 分光情報と距離情報の獲得システム

X-Rite ColorChecker を用いた分光反射率推定精度は、平均色差4.4であった。3次元形状の獲得精度を検証するために、図7のシステムによって計測された距離データのメッシュ化を行い、PBRTを用いて分光レンダリングを行った。前年度まで平面物体で実現していた分光反射率推定およびリライティン

グ処理の有効性を、種々の3次元形状を有する積み木を用いた実験により検証した。

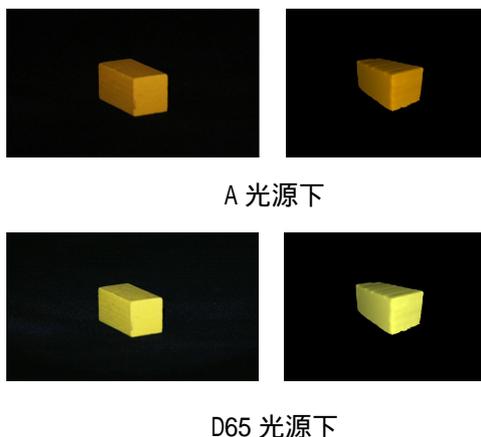


図8 3次元リライティング (左:実物体, 右:レンダリング結果)

平行光源のみならず、指向性のある光源に対するリライティングアルゴリズムを構築した。これにより、3次元形状のシャドー部分など、リアリティのあるレンダリングを実現した。また、移動物体に対しても、形状計測と測色を試み、三刺激値ディスプレイの再現を行った。境界部分の偽色が一部視認されるものの、低速な3次元移動物体に対しても、構築システムが適用可能であることを実証した。

(5) 応用研究例：蛍光感知メカニズム

我々の日常環境下において、多くの物体に蛍光物質が含まれている。蛍光物質は光を吸収し、長波長の光を発光する特性があり、一般の反射物体とは異なる独特の蛍光らしさ（以後、蛍光感と称す）を知覚することができる。先行研究では、実物体とモニタ上の蛍光色の知覚に関する研究が進められ、刺激の三刺激値が等しくても、モニタ再現画像の蛍光感が有意に低下することを発見した。そこで、構築した分光プロジェクションシステムを用いて、蛍光感の質感知覚メカニズムの解明を試みた。

近年、錐体、桿体に加えて、第3の光受容体である光感受性網膜神経節細胞（以後、ipRGCと称す）が発見され、ヒトの明るさ知覚に影響を与えることが報告されている。このことは、三刺激値が等しいメタマー刺激から異なる明るさ知覚を得られることを示唆しており、これが蛍光感に影響するのではないかと考えた。従来研究では、一般に複数のLEDによって刺激が生成されていたが、本研究で構築した分光プロジェクタを利用することによって、より精密な光源制御が可能となった。

実験に使用した刺激例を、図9に示す。これらの刺激は、三刺激値XYZは等価であるが、ipRGCの吸収率のみが異なった刺激である。これらを用いて実験を行った結果、ipRGCへの刺激量の違いによる蛍光感知覚への影響

を、心理物理実験により確認でき、ipRGCへの刺激量の増加にともなって、蛍光感が向上することが示唆された。

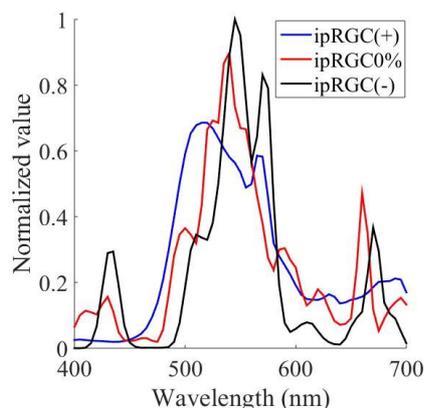


図9 構築した分光プロジェクタで生成した実験刺激

以上の研究により、当初計画していたイメージング系の改善と応用への展開が4年間にわたって実施でき、色彩科学、心理学、光学からコンピュータグラフィックスに至るまで、多くの学際分野において貢献できる成果が得られた。

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)

[雑誌論文](計6件)

K.Hirai, R.Nakahata and T.Horiuchi, "Measuring Spectral Reflectance and 3D Shape using Multi-primary Image Projector", Lecture Notes in Computer Science, LNCS 9680, 査読有, 2016, pp.137-147 (DOI: 10.1007/978-3-319-33618-3_15).

K.Hirai, D.Irie and T.Horiuchi, "Multi-primary Image Projector using Programmable Spectral Light Source", Journal of the Society for Information Display, vol.24, no.3, 査読有, 2016, pp.144-153 (DOI: 10.1002/jsid.422).

K.Hirai, D.Irie and T.Horiuchi, "Photometric and Geometric Measurements based on Multi-primary Image Projector", Proc. Colour and Visual Computing Symposium, 査読有, 2015, pp.1-5 (DOI: 10.1109/CVCS.2015.7274879).

R.Nakahata, K.Hirai, T.Horiuchi and S.Tominaga, "Development of a Dynamic Relighting System for Moving Planar Objects with Unknown Reflectance", Lecture Notes in Computer Science, LNCS 9016, 査読有, 2015, pp.81-90 (DOI: 10.1007/978-3-

319-15979-9_8).

Y.Izumisawa, T.Horiuchi, K.Hirai and S.Tominaga, "An Assessment of Simultaneous Dynamic Range for HDR Rendering", Proc. Asia Color Association Conference (ACA2013), 査読有, 2013.

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 (IS), 査読有, 2013, IM2E.3 (DOI: 10.1364/ISA.2013.IM2E.3).

〔学会発表〕(計6件)

平井経太, 中畑亮佑, 堀内隆彦: マルチスペクトルプロジェクタを用いた分光反射率と3次元形状の高速計測, 日本色彩学会秋の研究会大会, 2016年11月26日~27日, 大阪電気通信大学.

平井経太, 堀内隆彦: 分光プロジェクタの構築・評価とイメージング応用, 電子情報通信学会イメージ・メディア・クオリティ研究会, 2016年5月27日, 千葉大学.

平井経太, 入江大輔, 堀内隆彦: マルチスペクトルプロジェクタの開発と測色への応用, 日本色彩学会測色研究会, 2015年12月18日, タワーホール船堀.

平井経太, 入江大輔, 堀内隆彦: プログラムブル分光光源を用いたマルチスペクトルプロジェクタ, 日本色彩学会第23回視覚情報基礎研究会, 2015年3月21日, 東京造形大学.

中畑亮佑, 平井経太, 堀内隆彦: 反射率が未知の物体に対する動的リライティングシステムの構築, 第45回日本色彩学会全国大会, 2014年5月23日~25日, 九州大学.

中畑亮佑, 平井経太, 堀内隆彦, 反射率が未知の物体に対する動的リライティング, 電子情報通信学会総合大会, 2014年3月18日~21日, 新潟大学.

〔産業財権〕

出願状況(計2件)

名称: 分光プロジェクタ装置
発明者: 堀内隆彦, 平井経太, 入江大輔
権利者: 同上
種類: 特許
番号: 特許願 2014-054238号
出願年月日: 平成26年3月
国内外の別: 国内

名称: 広色域プロジェクタ装置
発明者: 堀内隆彦, 平井経太, 入江大輔
権利者: 同上
種類: 特許
番号: 特許願 2014-018081号

出願年月日: 平成26年1月

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

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