

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月15日現在

機関番号：12501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22650030

研究課題名（和文）アクティブ分光照明による実時間分光イメージングシステムの実現とその応用

研究課題名（英文）Realization of Real-time Multi-band Imaging Systems using Active Illuminants and Its Applications

研究代表者

富永 昌二 (SHOJI TOMINAGA)

千葉大学大学院・融合科学研究科・教授

研究者番号：10103342

研究成果の概要（和文）：本研究では、アクティブ分光照明を用いた実時間分光イメージングシステムを実現し、従来の分光放射輝度計や分光測色計などの分光器がもつ本質的な問題点を解決するとともに、幾つかの有用な応用分野を開拓した。まず、波長プログラマブル光源と高速モノクロカメラの同期システムを構築し、出力光源の較正方法および物体の表面反射率の推定方法を考案した。具体的な応用として、(1)視感実験のための分光投影、(2)三刺激値イメージャー、および(3)XYZディスプレイの実現を行った。

研究成果の概要（英文）：In this study, real-time multi-band imaging systems using active illuminants were realized. We constructed the systems for solving essential problems in conventional spectrometers such as spectroradiometers and colorimeters, and pioneered several effective applicable fields. Actually, we developed a synchronous system using a programmable light source and a monochrome camera. Then, we devised a calibration algorithm for controlling the system, and estimation algorithm of surface spectral reflectance. As practicable applications, we realized (1) visual evaluation system under arbitrary illuminant, (2) tristimulus imager, (3) XYZ display.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,400,000	0	1,400,000
2011年度	1,300,000	300,000	1,600,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,700,000	300,000	3,000,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：アクティブ分光照明, 分光反射率, 測色, 実時間色再現, イメージングシステム

1. 研究開始当初の背景

最近、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。これには、次のような本質的な理由がある。第一の理由は、従来のカラーカメラによるビジョン研究の限界として、RGBの3バンドカメラでは人間の等色性を満足させ

ることができないことである。第二の理由は、コンピュータビジョンの問題として、カラーコンスタンシー（色恒常性）の実現が困難なことである。第三の理由は、分光画像そのものを解析する必要性が出てきたことである。従来、照明光の分光分布や物体表面の分光反射率といった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が、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。すなわちシーンの全点の分光情報を求めることができない。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とビジョン応用の研究に取り組んでいる(富永・堀内, H20-H22 基盤研究(B))。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]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]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。

2. 研究の目的

本研究では、アクティブ分光照明を用いた実時間分光イメージングシステムを実現し、従来のマルチバンドイメージング系に存在している「シーン中の一箇所しか分光情報が獲得できない」「イメージングは計測に時間を要する」「フィルタの設計や選択が容易でない」「分光器と比べて分光情報や測色の正確さが大幅に劣る」という問題点を全て解決するとともに、多くの有用な応用分野を開拓することを目的としている。

具体的には、任意の波長を高速に切り替えて照射できる波長プログラマブル光源と高速モノクロカメラとを同期撮影できるシステムを構築する。これによって、[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ことを検証実験によって明らかにする。また、任意光源下でのシーン物体の見えを、ディスプレイ上ではなく、実シーンとして実現できることを示す。さらに、提案システムは可視光域で任意の波長関数を光源として発生させることができるので、等色関数を用いて計算される三刺激値を全画素で、しかも実時間で得ることができるという全く新しい測色の方法論を提案する。

3. 研究の方法

平成 22 年度で、基礎システムを完成させる。はじめに、別途予算で購入済みの照明光源と、本申請で購入するカメラ系のそれぞれが、同期して高速に画像を取得するためのハード系と制御アルゴリズムを組み上げる。そして構築したシステムで、分光画像取得の基本的な特性を調べる。次に、分光関数を高速に推定するアルゴリズムを開発する。

平成 23 年度は、前年度に構築したシステムを用いて、種々のビジョンの応用問題の解決にあたる。具体的には、分光プロジェクト、材質識別、デジタルアーカイビングの課題

に対して適用し、従来のマルチバンドイメージングの結果と比較検討を行う。また、等色関数照射によって、全画素点で高速に測色値を得るシステムを実現し、色再現の性能を実験的に確認する。

(1) 高速マルチバンド画像獲得部の構築

別途経費で購入済みの分光プログラマブル光源と、前年度に設備費で購入したモノクロカメラモジュール一式を用いて、任意の分光波長を高速に獲得するシステムを構築する。このとき、それぞれの獲得タイミングで、照明光源とシャッターの同期を取る工夫を施す。なお、信頼できる分光画像を獲得するために、現有設備を利用して、照明光源とカメラシステム各部の較正を行う。

(2) 統合システムの特性解析

構築したシステムの総合分光感度は、照明光源の分光分布特性とカメラの分光感度で決まる。加えて、それぞれのフレームレートによって、系の特性が変化することが想定される。そこで様々な条件におけるシステムの特性解析と高速画像取得のためのキャリブレーションを行う自動較正系を構築する。

(3) 分光情報獲得処理アルゴリズムの開発

全画素点における分光エネルギー分布と、表面分光反射率を高速に推定するアルゴリズムを開発する。光源のキセノンランプの分光特性、およびモノクロカメラの分光感度から、短波長領域では十分な信号強度を得ることができないと想定される。そこで S/N 比の低い部分ではフレームレートを低くし、高い部分ではフレームレートを高めるように調整するアルゴリズムを組み込む。すなわち、分光情報を波長によらず、安定して推定できるアルゴリズムの構築を目指す。

(4) 効率的な分光系の決定

分光のチャンネル数は、推定精度と時間のトレードオフになるが、これの最適化を検討する。従来研究に基づいて、可視域で 6 から 61 チャンネルまで可変とする予定である。チャンネル数・選択波長帯と分光情報の推定精度の関係を理論と実験によって考察し、効率的なセンサ数とその波長帯を決定する。

(5) 応用研究

統合システムを利用して具体的な応用問題の解決に取り組む。

(5-1) 分光投影による視感実験

最も基本的なビジョン問題として色順応研究への応用を図る。すなわち異なった色温度をもつ照明光の下で、人間の不完全順応度を実験的に求め、順応のモデルを構築する。次に、物体の質感と照明光源の関係を調べる。また人間の皮膚を対象として、見えの評価と解析を行う。

(5-2) 材質の識別

産業界への貢献として、目視に頼っている検査物体の識別を検討する。反射特性は複雑で、

カラー画像では識別が困難であった物体に対して、高速に獲得した分光反射率に基づいた材料判定を可能にする手法を検討する。

(6) 三刺激値イメージャーの開発

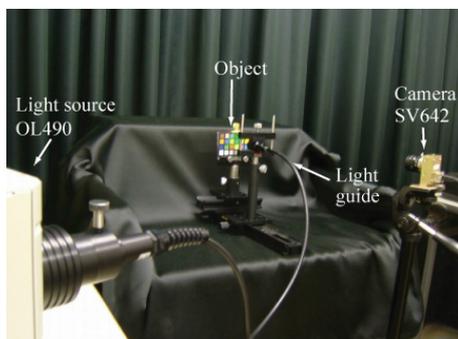
CIE 等色関数を、正確に記述するような分光分布をもつ照明光を生成する手法を開発する。次に、このような照明光を反射物体に均一に照明し、全画素点の三刺激値をカメラ出力値として求める新しい画像測色の方法を確立する。すなわち、積分や掛算といった数値計算をせずに、カメラの画素値として、高速にかつ空間的にも高分解能で測色データが求まるので、色再現とカラー画像再現の新しい世界を開く。

4. 研究成果

(1) 高速マルチバンド画像獲得部の構築

(1-1) 1光源によるシステム構築

既存の分光プログラマブル光源と、新規に購入したモノクロカメラモジュール式を用いて、任意の分光波長を高速に獲得するシステムを構築した。このとき、それぞれの獲得タイミングで、照明光源とシャッターの同期を取る工夫を施した。なお、信頼できる分光画像を獲得するために、現有設備を利用して、照明光源とカメラシステム各部の厳密なキャリブレーションを行うシステムを構築した。なお、安価で高性能なカメラが発売されたため、当初の計画と異なるカメラを購入した。また、光源強度が劣化していたため、光源のランプ交換を行った。



構築したイメージングシステム

(1-2) 2光源によるシステム構築

当初の研究計画には含まれていなかったが、照射範囲を拡大することを目的として、別予算で新規に分光プログラマブル光源を購入し、2台によるイメージングの構築を検討した。用途に応じて、個別のレンズによる照射系と、2分岐ケーブルによる1つのレンズによる照射系を使い分けることとした。

(2) 統合システムの特性解析

種々の条件におけるシステムの特性解析を行い、高速画像取得のためのキャリブレーションを行う自動フィードバック系による較正シ

ステムを構築した。これには(1)分光反射率推定等への応用を想定して高速モノクロカメラを使用するシステム、(2)測色への応用を想定してスペクトロメータを利用するシステム、の2種を構築した。前者はカメラの分光感度は未知でも適用できる。(1-2)に関連して、個体差のある2光源を制御するアルゴリズムも開発した。

(3) 分光情報獲得処理アルゴリズムの開発

全画素点における分光エネルギー分布と、表面分光反射率を推定するアルゴリズムを開発した。後者については、我々はアクティブ照明の時系列を用いることによって、この逆問題を効果的に解くことができた。すなわち、カメラ分光感度の逆関数を時系列として物体表面に投影すれば、表面分光反射率をカメラ出力からの画像時系列をして求めるアルゴリズムを開発した。

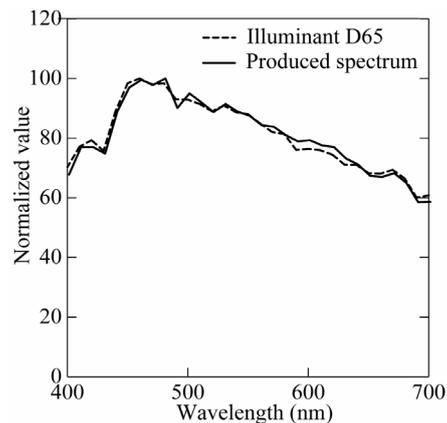
(4) 効率的な分光系の決定

チャンネル数・選択波長帯と分光情報の推定精度の関係を数値解析と実験によって考察した。各種分光画像解析に対して、最も効率的なセンサ数とその波長帯の検討を継続中である。

(5) 応用研究

(5-1) 分光投影による視感実験

伝統的な視感評価実験において、A光やD65光のような標準光源、あるいはそれらの組み合わせがよく使われてきた。そのため、光源の分光分布の形状は、自由に選択することができず限定したものであった。開発した分光イメージングシステムは、任意の分光分布を持つ照明光を現実の実際のシーンで、物体表面に照射して観測することができる。下図に、D65光に対して生成した光源分光分布を示す。



生成した光源分光分布の例

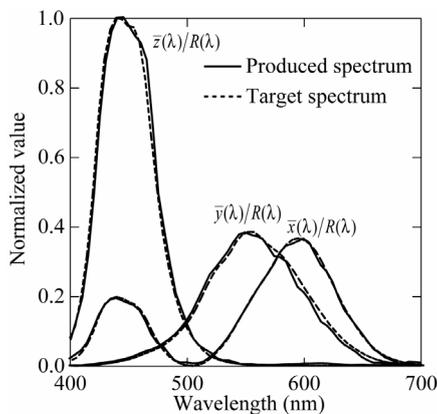
生成した分光分布は目標スペクトルとほとんど一致する程、高精度である。このことから、開発システムは任意照明光源における物体の見えを評価する視感評価実験に、十分活用できることが分かった。

(5-2) 材質の識別

電子回路のプリント基板上の要素を識別する問題を検討した。基礎研究として、アクティブ照明ではなくて、従来のパッシブな分光イメージング系を用いて、基板上の金属線、レジスト、ハンダといった要素の識別を可能にする手法を開発した。

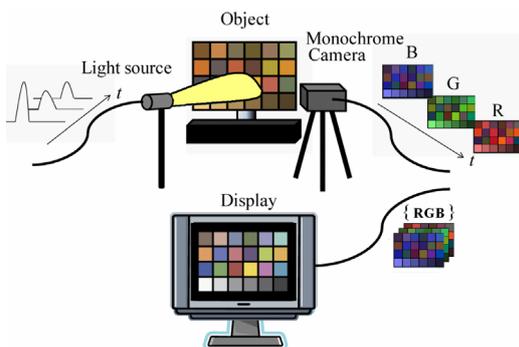
(5-3) 三刺激値イメージャの開発

新しい画像測色法として、CIE 等色関数を、正確に記述するような分光分布をもつ照明光を生成する手法を開発した（下図参照）。そしてこのような照明光を反射物体に均一に照明し、全画素点の三刺激値をカメラ出力値として求める新しい画像測色法を開発した。X-Rite カラーチェッカーを用いて、色差および RMSE によって、良好な精度が得られることを確認した。



生成した光源分光分布

(5-4) XYZ ディスプレイシステムの構築



XYZ ディスプレイシステムの処理過程

任意の分光分布を想定した照明光源を物体に照射したときの色見えを、正確に実時間でディスプレイに表示することを可能とする全く新しい概念の「XYZ ディスプレイシステム」を開発した。このシステムは、設計されたアクティブ分光照明を対象物体に照射することにより、想定した照明光源下での物体全点の三刺激値 XYZ を、高速にディスプレイ上に表示することができる。照明光の投影

からの処理の流れを上図に示す。ここで、一般に設計される分光照明が負値をもつことから、これを補償する方法としてオフセット値を利用することが有効であることを示した。CIE Lab 誤差は D65 光源で 4.3, A 光源で 6.7 となった。精度改善を検討中である。

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 3 件)

① M.Do, A.Kimachi, S.Nishi, S.Tominaga, "Human Skin Color Simulator Using Active Illumination", Proc. IAPR Computational Color Imaging Workshop, 査読有, 2011, pp.75-84.

② S.Tominaga, T.Horiuchi, A.Yoshimura, "An Active Illumination Method for Tristimulus Image Display", Proc. IS&T/SID's 18th Color Imaging Conference, 査読有, 2010, pp.160-165.

③ T.Horiuchi, H.Kakinuma, S.Tominaga, "Effective Illumination Control for an Active Spectral Imaging System", Proc. 12th International Symposium on Multispectral Color Science, 査読有, 2010, pp.529-534.

[学会発表] (計 3 件)

① 西岡大輔, 堀内隆彦, 富永昌治, アクティブ分光照明を用いた XYZ 画像表示システム, 画像センシングシンポジウム, 2011 年 6 月 10 日, パシフィコ横浜.

② 吉村昭彦, 堀内隆彦, 富永昌治, アクティブ分光照明を用いた分光反射率推定法の検討, 第 42 回日本色彩学会全国大会, 2011 年 5 月 15 日, 千葉大学.

③ 富永昌治, デジタルカラーイメージングの研究, 電子情報通信学会パターン認識・メディア理解研究会, 2010 年 11 月 18 日, フェニックスプラザ.

[その他]

ホームページ等

<http://dippix.tp.chiba-u.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

富永 昌二 (SHOJI TOMINAGA)

千葉大学大学院・融合科学研究科・教授

研究者番号：10103342

(2) 研究分担者

堀内 隆彦 (TAKAHIKO HORIUCHI)

千葉大学大学院・融合科学研究科・准教授

研究者番号：30272181