

分光スペクトル修飾に基づく機能性 LED 照明に関する研究

Functional LEDs illuminant based on spectral modification

2031901



研究代表者

豊橋技術科学大学大学院
工学研究科

教授

中内 茂樹

[研究の目的]

これまで照明として一般に利用されてきた蛍光灯や白熱電球は、色温度の選択は可能であったが、基本的に照明光スペクトルを変更することはできず、またその必要性も認知されていなかった。現在広く用いられるようになった LED は、様々な照明スペクトルを持つものが安価で入手可能であり、それらを組み合わせることによって照明光スペクトルを自由に設計することが可能となっている。我々は、こうした特徴に着目し、製品の中の異物夾雑物の見えを目立たせたり、傷を検出し易くするなど、目視評価のパフォーマンスを向上させたり、物体の質感を変更する照明など、目的に特化した LED 照明（機能性照明）の分光設計手法について提案してきた。

しかしながら、これまでの方法では、機能性照明を設計するために高価な分光輝度計測器やスペクトルカメラなどによって、対象物の分光情報を測定する必要があり、さらには分光シミュレーションによる設計値と実際の LED の分光特性の違いが、設計照明によって実際に照射した場合の効果に与える影響を推定することが困難であった。そこで本研究課題では、様々な分光特性の LED を用いてプログラマブルに照明光スペクトルを設定でき、またその照明装置とキャリブレーションされたカメラ（XYZ カメラ）を組み合わせることによって、対象物を呈

示するだけで分光計測と LED 照明設計を自動的・迅速に実施できるシステムの開発を行うことを目的とする。

[研究の内容, 成果]

1. 機能性光源の原理

対象物の色（色彩値）は、次式のように分光反射率および照明光スペクトルの内積によって決まる。

$$C_i(x, y) = \int c_i(\lambda) S(\lambda, x, y) I(\lambda) d\lambda$$

ここで、 $C_i(x, y)$ は物体表面の位置 (x, y) における色彩値、 $c_i(\lambda)$ は等色関数 ($i=1, 2, 3$)、 $S(\lambda, x, y)$ は物体表面の分光反射率、 $I(\lambda)$ は照明光のスペクトルである。このように、物体の色はその物体表面の反射率のみならず、照明光のスペクトルによっても変化し、これが分光スペクトル修飾に対応する。

機能性光源とは様々な位置における $C_i(x, y)$ で定義される評価量 $E[\{C_i(x, y)\}]$ を最大化（あるいは最小化）するように設計された $I(\lambda)$ をスペクトルとする照明光源を指す。

$$I(\lambda)_{func} = \arg \max_{I(\lambda)} E[\{c_i(x, y)\}]$$

ここで、評価量 E に関しては、例えば、ある領域の平均彩度や、2つの領域の平均色の色差など、目的に応じて設計することが可能である。

一方、設計対象である照明光スペクトル $I(\lambda)$ については、ブロードなスペクトルを有する白色光源前面に分光透過率を変更できるフィルタを設置したスペクトルシンセサイザ等を用いることで、自由にスペクトルを生成することが可能ではあるが、装置が大型化すること、LEDを用いた実利用を想定した場合に、設計時との照明光スペクトルの差が性能に影響を与える可能性があることが懸念される。

本研究では、これらの問題を解決するとともに、機能性光源をより簡便に設計、実装可能とするために機能性光源自動設計システムを開発することを目的とする。また、本システムを用いて、具体的にいくつかの例について機能性光源を設計・実装した例について示す。

2. 開発した装置の仕様と概要

本装置の外観を図1に示す。本装置は、対象画像の画素毎に CIE 三刺激値である XYZ 値を取得可能なカメラ、分光的にも空間的にも異なる照明強度分布を得るための積分球（直径 12in）、積分球内部の赤道上に設置した LED（17種類）で構成される。カメラを積分球の北極位置に設置し、南極位置には LED によって生成された照明を対象物に照射し、かつ上部カメラによって撮像するための穴（直径 10 cm）を開けた。搭載した 17 種類の LED の色度を図2に示す。可視波長帯全域をカバーするようピーク波長を選択しており、全ての LED を照射した場合に白色となるようにしている。また

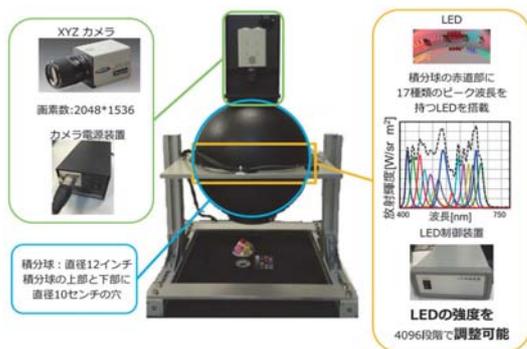


図1 装置外観と概要

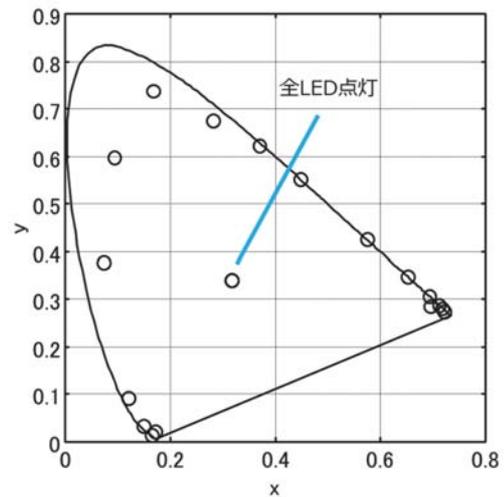


図2 各LEDの色度

十分に彩度が高い LED を選ぶことで、極めて広い色域を実現した。

3. 照明設計の例

3.1 対象物の彩度を変調する照明

対象物の質感をコントロールする照明の例として、対象物の鮮やかさを修飾する照明を本システムにより設計した。ここで、対象物中の無彩色点は、全種類の LED を点灯させた基準白色照明 W を照射した際と変化しないように制約し（白色照明制約）、それ以外の色（あるいは特定のターゲット）のみの平均彩度を上昇、降下させる白色照明を設計する。このように、対象物の無彩色点を固定した状態で全体の彩度を変更することが可能となれば、異物夾雑物などの発見を補助する照明や、さまざまなディスプレイ照明における新しい演出効果として利用することができる。

本実験では、食品サンプル（基準白色照明下）を撮影し、無彩色点を固定しつつ、食品サンプルを上部から撮影した際の平均彩度を変化させることとした。

設計手順は以下の通りである。

1. 17 種類の LED を単独で照射した際の XYZ 画像を取得する。
2. 17 種類の LED から、任意の 3 種類の LED ($1 \leq i, j, k \leq 17$) を選び、これらを

組み合わせた照明によって、同時に撮影したカラーチェッカーの無彩色の三刺激値が基準白色照明下での X_w, Y_w, Z_w と一致するように、各3種のLEDの輝度比率 (C_i, C_j, C_k) を求める。すなわち、

$$\begin{bmatrix} C_i \\ C_j \\ C_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_i & X_j & X_k \\ Y_i & Y_j & Y_k \\ Z_i & Z_j & Z_k \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix}$$

ここで、 X_*, Y_*, Z_* ($*=i, j, k$) は各LEDの色彩値である。

これら3種類のLEDの組み合わせにより作成された白色照明の分光スペクトルは

$$P(\lambda) = C_i l_i(\lambda) + C_j l_j(\lambda) + C_k l_k(\lambda)$$

により得られる。ここで、 $l_i(\lambda), l_j(\lambda), l_k(\lambda)$ はそれぞれ i, j, k 番目のLEDのスペクトルである。

- 全てのLEDの組み合わせについても同様に手順2より輝度比率を求め、機能性白色照明群を作成する。このとき、輝度比率が負になるものについては、物理的に実現できない照明として対象から除外する。
- 手順3により得られた照明群について、それぞれを照射した際のターゲットの平均彩度 (CIELAB) を計測し、最小および最大のものを設計照明スペクトルとする。

図3に設計した白色照明群のうち、ターゲットの平均彩度を最大化、最小化する場合について結果を示す。マクベスカラーチェッカーの無彩色は変化しておらず、ターゲットの彩度が大きく変化していることが確認できる。特に、赤



図3 照明光による彩度変化
(左：最小彩度照明，右：最大彩度照明)

色のソース部分は彩度を最大化する照明下では、蛍光色のように自発光しているような印象を与えるほどである。またマクベスカラーチェッカーについても、いくつか有彩色の彩度が上がっており、設計した照明光によって、特定の色の彩度を効果的に変調できることが確認された。

3.2 対象物の色弁別を変調する照明

次に対象物の色弁別の容易さを変調する照明光スペクトルを設計した。ここでは、石原色覚検査色票をターゲットとして選び、数字部分と背景部分の群間色差 (複数色同士の色差をマハラノビス距離で定義したもの) を最小化および最大化する照明光をそれぞれ設計した。

図4に結果を示す。白色照明光下 (図左) では (色覚正常の場合) 中央に「2」を判読できるが、この文字部分のコントラストが変調されることで、ほとんど読めなくなったり (図右上)、逆に判読しやすくなったり (図右下) する様子が確認できる。特に色弁別を最大化する照明 (図右下) は、色覚のタイプによらず、カラー表記された様々な情報を伝えるためのカラーユニバーサルデザインを促進するためのツールとして応用できるものと考えている。

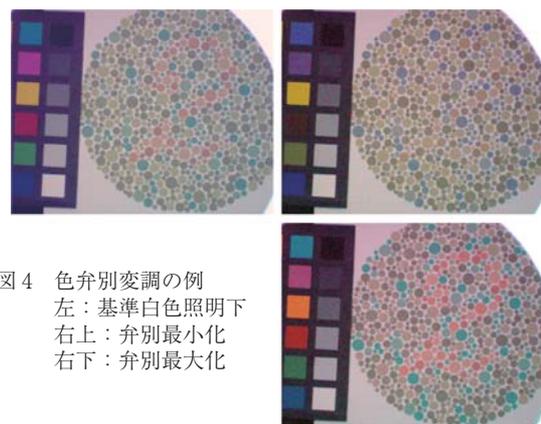


図4 色弁別変調の例
左：基準白色照明下
右上：弁別最小化
右下：弁別最大化

[今後の研究の方向，課題]

本システムを用いて、目的に応じて評価関数を設定さえすれば、上述した例に依らず、様々

な事例に応用することが可能である。今後は本手法および設計した機能性照明の社会実装に注力したいと考えている。すでにそのいくつかについては取り組みを開始しており，腕の静脈を強調するような照明（図5）や干渉色のような真珠質感（図6）の違いを強調するような照明をすでに設計している。今後はこれらの性能評価とさらなる機能向上・社会実装を進めたい。



図5 静脈の弁別を補助する照明
（上：基準白色照明，下：設計照明）



図6 真珠干渉色の弁別を補助する照明
（上：基準白色照明，下：設計照明）

[成果の発表，論文等]

- 谷 和信，中内茂樹：機能性光源のための自動分光設計装置，日本色彩学会第2回大会，pp.408-409，2014
- K. Ito, Y. Ota, H. Higashi, S. Nakauchi, Spectral-Difference Enhancement Illuminant for Improving Visual Detection of Blood Vessel, The 2015 International Conference On Advanced Informatics: Concepts, Theory And Application (ICAICTA 2015), Chonburi, Thailand (to appear).