

機能性光源による色弁別補助と検査用照明への応用

中内茂樹

Functional Illuminant for Supporting Color Discrimination

Shigeki NAKAUCHI

Method for designing an illuminant for supporting color discrimination with maintaining the arbitrary illuminant color is demonstrated and applied to the problem of foreign substances detection in blueberry jam. To obtain the optimal illuminant, a spectral dataset of metameric illuminants was constructed and a combination of the metameric illuminants with a given chromaticity was derived to maximize the color differences between the jam and foreign substances (leaf, branch, and stone). The designed illuminant was implemented using a combination of optimal LEDs, which clearly showed that the color difference of jam and foreign substances was enhanced.

Key words: functional illuminant, spectral design, color discrimination

われわれが見る色は対象物の分光反射率によって決まり、例えば長波長帯域の分光反射率が大きな値をもっていれば、対象物は赤みを帯びて見える。一方、照明光も色の見えに大きく影響を与え、青みを帯びていけば、シーン全体が青色に偏ることになる。一般に、シーンの平均色は照明の色と似たものとなり、平均色からのずれは分光反射率に依存しているように見える。

しかしながら、光の分光分布と感覚としての色の間にはメタメリズムとよばれる多対一の関係があり、同じ色に見えてもその分光分布が同じとは限らないことはよく知られている。例えば、同じ色の照明光を照射した場合でも、それらの分光分布が異なれば、シーンの平均色だけでなく、色分布の形状も異なってくる。すなわち、一般に用いられている白色照明がシーンの色分布に与える影響は色温度だけでは決まらず、演色性の概念はここから出てくる。われわれは自然昼光に慣れ親しんでいるため、それを理想光源として、その照明下における色の見えとどれくらい近いのか、という尺度で照明光の「良さ」を定めている。

演色性評価が必要となった背景には、蛍光ランプという人工の白色光源の開発があった。慣れ親しんでいた昼光と比べていかに違和感が少ないか、ということが照明光の良さの指標とされた。そして現在、新しいLED照明がまさ

にわれわれの生活に浸透しており、改めて照明光の質についての議論が盛んである。演色性の見直し、エネルギー効率、グレアなどの不快感の低減など、議論すべき点は多い。

本稿では少し視点を変え、生活照明ではなく、いわば目的志向的な照明として目視検査等における照明について述べる。LEDの出現により照明光の分光設計が可能となったことにより、同じ白色照明であっても、例えば異物検査に特化した設計が可能であり、色弁別の補助に大きな効果があることを示す。

1. 照明光の分光設計

演色性を指標とした照明光の分光分布の設計は古くから試みられている¹⁾が、その他の指標に基づいた分光設計はごく最近試みられるようになった。例えば、自然さや好み²⁾、カラフルネス³⁾に基づいた方法が最近提案されている。われわれは異物検査用の照明設計の枠組みで照明設計を行った。具体的には、ターゲット(異物)とそれ以外(背景)の間の弁別のしやすさを指標として、それを最大とする照明光の分光分布を決定する最適化問題として定式化する⁴⁾。

まず、照明の分光分布を少数のパラメーターによりモデル化する。例えば、スプライン関数の線形和モデル⁵⁾を

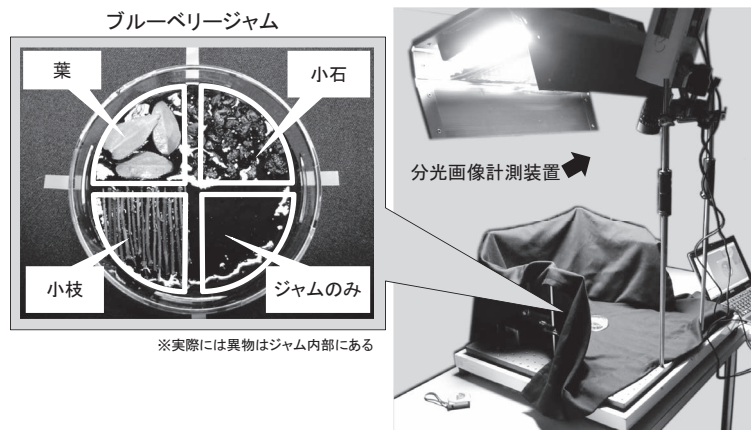


図1 ブルーベリージャムと異物の分光画像計測。

用いてもよいし、実際の狭帯域のLEDのスペクトルの和として表現してもよい。いずれにせよ、少数のパラメータセット \mathbf{p} の関数として照明光の分光分布を $L_\lambda(\mathbf{p})$ と書こう。次に、この照明光下でターゲットと背景の色差を求める。ターゲットも背景も一樣な色とは限らないので、ターゲットの色分布と背景の色分布の距離として記述すればよい。分布形状を考慮したマハラノビス距離を用いてもよいし、単純に平均色間の色差とすることもできる。ターゲットと背景の分光反射率 $\mathbf{R}_T, \mathbf{R}_B$ をそれぞれ事前に計測しておくことで、ある照明光における色差は

$$\Delta E(\mathbf{p}) = f_{\text{aE}}(L_\lambda(\mathbf{p}), \{\mathbf{R}_T\}, \{\mathbf{R}_B\}) \quad (1)$$

として、ターゲットと背景の分光反射率が与えられた条件の下で、照明光の分光分布を規定するパラメータ \mathbf{p} の関数として記述できる。

2. 白色光源の最適化

ここで、最適化すべき照明光の分光分布のうち、白色のものだけに制約することを考える。これは、異物検査や目視評価に使われている照明として、疲労の観点から白色に近いことが望ましいためである。そこで、式(1)の $L_\lambda(\mathbf{p})$ のうち白色だけのサブセットに対して、あらためてパラメトライズすることを考える。

われわれは Schmit の方法⁶⁾ を用いて白色だけの照明分光分布の生成を行った。例えば、さまざまな中心波長、半値幅をもつ狭帯域LEDを考える。これらの組み合わせによって白色光を生成する場合、少なくとも3種類(場合によっては2種類)のLEDを適切な強度比で合成すれば実現できる。そうして生成された n 種類の白色光源の分光分布を、ここで $W_i(\lambda)$ と書こう。これら基底となる白色光源を足し合わせて得られる光源もまた白色になることを利用し、新たに各基底白色光源に対する重みをパラメータ \mathbf{c} として、式(1)の $L_\lambda(\mathbf{p})$ を

$$L_\lambda(\mathbf{c}) = c_1 W_1(\lambda) + c_2 W_2(\lambda) + \dots + c_n W_n(\lambda) \quad (2)$$

と書き直すことができる。ここで、各基底白色光源の輝度(あるいは消費電力)をある値に揃え、重みの総和を一定となるように制約することで、色温度と輝度(消費電力)が同じ白色光源の分光分布をこのモデルによって自由に生成することができる。あとは、式(1)の評価量を最大とするパラメータ \mathbf{c} を最適化すれば、所望の機能を有する光源、すなわち機能性光源の分光分布が得られる。

3. 異物検出用照明への応用

われわれは以上に述べた手法をブルーベリージャム中の異物検出用の照明設計に応用した。ブルーベリージャム中の異物(小石、小枝、葉など)は固いため、間違っただけに入れた場合、単に味を損なうだけでなく、怪我につながることから、その検出は重要視されている。しかしながら、ブルーベリーは光吸収が強く、暗く見えるため、食品異物の検出は比較的難しい。これまでも分光画像計測技術を用いた方法⁷⁾ が提案されているが、装置が高価であったり、目視と比較するとその性能が十分ではないなどの課題も多い。

ここで最大化すべき量はターゲット(異物)と背景(ブルーベリージャム)の色差である。まず、これらの分光反射特性の計測を行った(図1)。ターゲットである異物をブルーベリージャム中にさまざまな深さで置き、ブルーベリージャム越しに分光画像を計測した。その後、計測された分光画像に対して、異物が混入している場所およびジャムのみの場所から分光反射率データ、すなわち $\{\mathbf{R}_T, \mathbf{R}_B\}$ を抽出した。また、照明装置は複数種のLEDの組み合わせによる実装を想定し、ピーク波長が400~700 nm、およそ10 nm間隔のLEDを選定対象として最適化計算を行った。なお、照明光の色度は比較のため等エネルギー白色と一致させた。



図2 試作した異物検査用 LED 照明.

結果として得られた照明光の分光分布は、4種類のLED（ピーク波長は460 nm, 505 nm, 645 nm, 700 nm）の組み合わせとして実現できるものであった。各波長のLEDの個数は得られた分光分布とそれぞれのLEDの発光パワーから算出され、合計1008個のLEDにより実装した。試作した装置の概要を図2に示す。各波長のLEDは独立に光量を調整できるようになっており（4ch）、そのためのコントローラーも試作した。

図3に、設計したLED照明により異物が混入したブルーベリージャムを照射した例を示す。比較のため、LED照明と色度（色温度）と輝度が全く同じ等エネルギー白色による結果も合わせて示す。これら2種類の照明光が同じ輝度・色温度であることは、画像右側に置いたテスト色票の白から黒のグレースケールがほぼ同じように見えることからわかる。しかしながら、試作したLED照明ではブルーベリージャムが透けて、内部にある異物がより鮮明に見える。設計の段階では、照明の色温度とジャムと異物の色差を最大とすることだけを指針としており、具体的な色の見えを決定したものではなかったものの、図3に示すように大きな色差強調の効果を確認することができた。もちろん、評価値は照明の色温度や色差だけでなく、ターゲットや背景の色の見えを直接的にコントロールするように変更でき、目的や対象物に応じた照明分光設計も可能である。

ここで紹介した技術は2つの意味で重要である。1つは可視波長においても、われわれの色覚ではとらえられない情報がまだ眠っているということ、もう1つはそれらの情報を、分光画像計測などの高価な装置を用いなくても、照

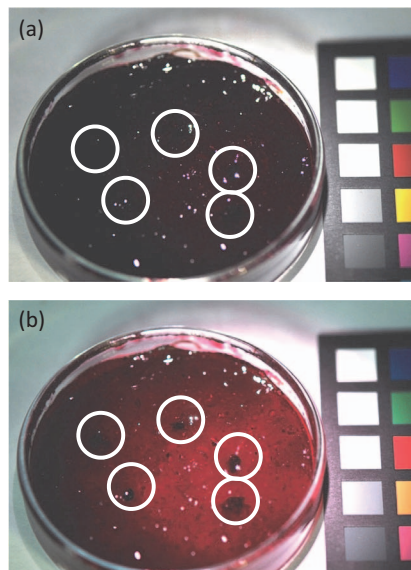


図3 2種類の白色照明による異物の見え方の違い。(a)等エネルギー白色、(b)設計したLED照明.

明光の分光特性を適切に設計することで引き出せることである。異物検査に限らず、さまざまな目視評価が欠かせないものづくりの現場において、目的に特化した照明設計は今後大きな役割を担うものと考えている。

文 献

- 1) N. Ohta and G. Wyszecki: "Designing illuminants that render given objects in prescribed colors," *J. Opt. Soc. Am.*, **66** (1976) 269-275.
- 2) S. M. C. Nascimento and O. Masuda: "Psychophysical optimization of lighting spectra for naturalness, preference, and chromatic diversity," *J. Opt. Soc. Am.*, **29** (2012) 144-151.
- 3) O. Masuda and S. M. C Nascimento: "Lighting spectrum to maximize colorfulness," *Opt. Lett.*, **37** (2012) 407-409.
- 4) S. Nakauchi, T. Himeno and K. Nishino: "Efficient illuminant spectral distribution design method for enhancement of color discrimination," *IS&T 19th Color Imaging Conference* (2011) pp. 304-309.
- 5) N. Matsushiro and N. Ohta: "Theoretical analysis of subtractive color mixture characteristics III—Realistic colorants and single tristimulus dimension," *Col. Res. Appl.*, **30** (2005) 354-362.
- 6) F. J. M. Schmitt: "A method for the treatment of metamerism in colorimetry," *J. Opt. Soc. Am.*, **66** (1976) 601-608.
- 7) M. Tsuta, T. Takao, J. Sugiyama, Y. Wada and Y. Sagara: "Foreign substance detection in blueberry fruits by spectral imaging," *Food Sci. Technol. Res.*, **12** (2006) 96-100.

(2012年12月18日受理)