エネルギー効率と光品質を向上させる可能性を秘めた、スペクトルの最適化

アルプ・ダーマス

エクスペリエンスを高めるためのインテリジェントな照明システムによって、色彩科学と視覚の研究成果を融合するという、統合型照明の目的を達成する、最適化されたスペクトル出力に基づくSSLシステムについて解説する。

電気照明は、建物の消費エネルギーの大きな割合を占めている。エネルギー需要の高まりに伴い、消費エネルギーに占める照明の割合はますます大きくなることが予想される。このエネルギー需要の高まりを受けて、各国政府やメーカーはこの数十年間で、電気照明を生成するための代替策を検討せざるを得ない状況に追い込まれた。一般照明に対して固体照明（Solid State Lighting：SSL）デバイスが提供されたことなど、照明業界における有望な進歩は、大きな影響をもたらした。SSLデバイスには、サイズが小さく、寿命が長く、指向性を備え、効率が高く、光出力が制御しやすく、光品質が高いなど、これまでの照明技術に勝る複数のメリットがある。

放射出力を波長の関数で表したスペクトルパワー分布（Spectral Power Distribution：SPD）は、光源の発光効率と、光品質の定量化に不可欠な要素である（https://bit.ly/3kkjuNj）。物体の発色は、光源のスペクトル、物体のスペクトル反射、人間の視覚系によって決まる。物体は、入射光の一部を表面で反射し、観測者に到達したその反射光が、物体の色として認識される。しかし、光の一部は物体によって吸収されて熱に変換され、吸収されたエネルギーは、照明目的に使用されることなく無駄となる。SSLデバイスは、光源のスペクトル出力をよりきめ細かく制御できるため、身の回りの物理的な物質に吸収されるエネルギーを減らすようにスペクトルを最適化することによ

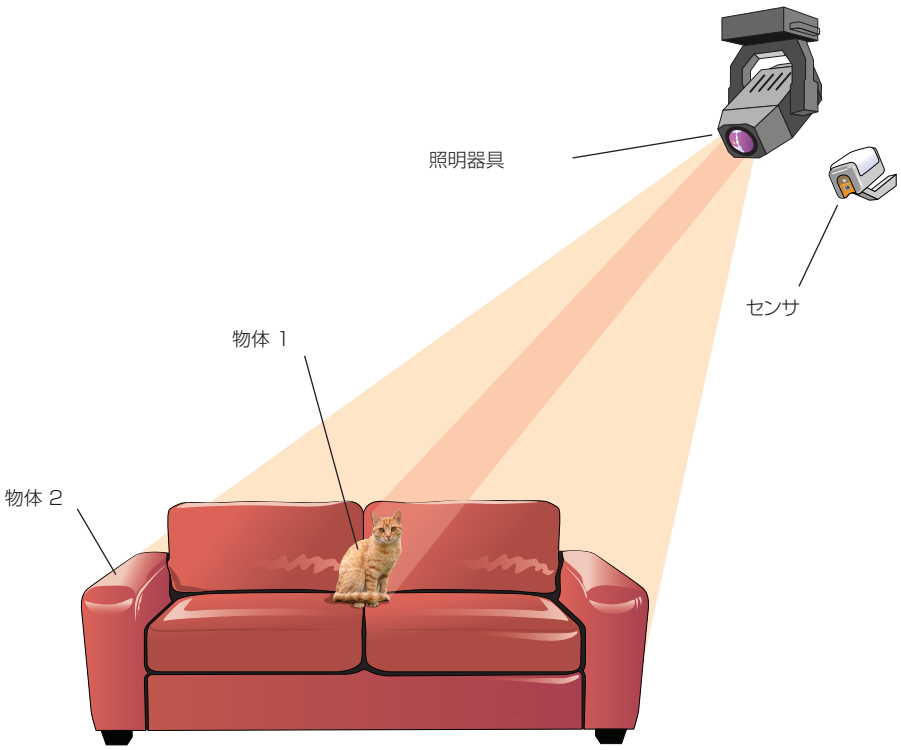

図1　スペクトルが最適化可能な照明システムの潜在的実装例。物体からの反射を検出して、各物体のスペクトルにチューニングされた光を照射することにより、リアルな色と細部をレンダリングするという処理における、センサの役割が示されている。画像出典：グラフィックコンセプトはドルカルプ・ダーマス氏、描画はマイク・リーダー氏（Mike Reeder）。

り、光品質を維持しつつ、かなりの量のエネルギーを節約できる照明システムを考案することができる。

このシステムの潜在的な実装例を**図1**に示す。スペクトルが最適化可能な照明システムは、センサによって物体の反射特性を検出し、投射（プロジェクション）システムによってチューニングされた光を各物体に照射する。三次元のリアルタイム応用が最終的な目標だが、初期段階では、ギャラリー、美術館、歴史的建造物の絵画やファサードといった二次元構造を照らす照明システムを目指すことが考えられる。

SSLデバイスの接続性は、リアルタイムの光最適化を実現するうえで重要な役割を担う。私たちは今、最大224 Gbpsの速度でデータを転送するためにLEDを活用できる時代に生きている[1]。建物におけるインテリジェントな照明制御システムの利用は増加しており、それらをセンサと組み合わせることにより、消費エネルギーを抑えて、占有者に対して良好な照明ソリューションを維持することが行われている。近い将来、先進的な照明制御とセンサの配備によって、物体の色に対して光源が最適化されるようになると、想像することができる。この概念は、LEDなどの既存の照明技術に限定されるものではない。接続性と正確なスペクトル制御を備えた任意の照明デバイスを、このシステムで活用することができる。

研究成果

物体反射に対してスペクトルを最適化するための概念的及び理論的基盤を構築することを目的とした、初期調査を行った。これまでの研究成果として、物体反射に対して理論的な光源スペクトルを最適化すると、知覚可能な色変化を起こすことなく、38～44%のエネルギーが削減できることが示されている[2]。この研究では、それ以上の色シフトが許容されるならば、43～62%というさらなるエネルギー削減が可能であることも明らかになっている。この研究では、反射特性（すなわち物体の色）は、そのスペクトル形状に基づいて分類されている。当然ながら、緑色の物体は、比較的高いエネルギー削減効果を示した。人間の視覚は、緑色の波長に対する感度が高いためである。類似の手法で、理論的な2ピークのテストSPDを使用したところ、色シフトを生じることなく、最大71%のエネルギー削減が得られることが示された[3]。

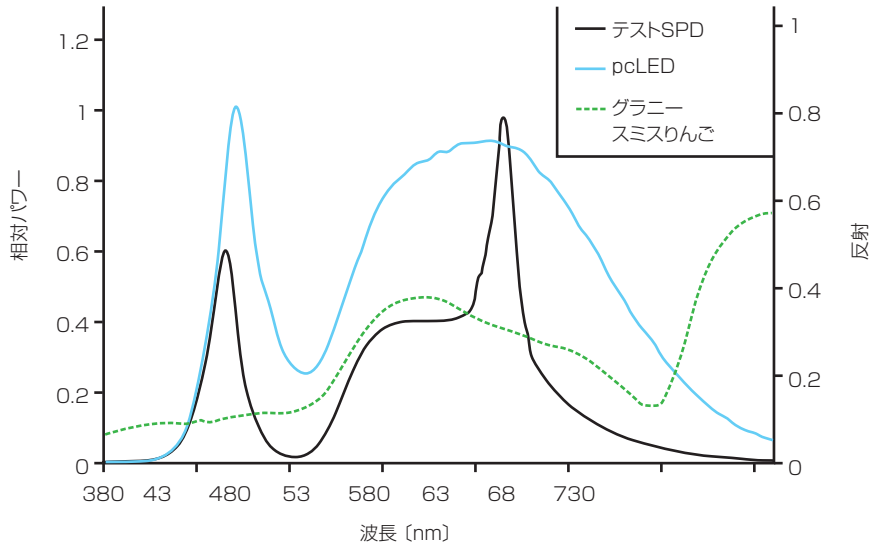

図2　テストSPDを示すグラフ。3つの狭帯域LEDを組み合わせることにより、発色における少しの色シフトを許容すれば、白基準のpcLEDと比べて17%のエネルギーが削減できる。画像出典：参考文献4から引用。

これらの研究結果に基づき、次の研究では、この概念が実際の環境に適用可能であることを実証することを目的とした。理論的なスペクトルと色付けされたテストサンプルの代わりに、狭帯域のLEDと実際の物体を使用して、エネルギー削減効果と色シフトの定量化を行った。

商用提供されている9つの狭帯域LEDを最適化して、各色を象徴する一般的な物体（赤色に対してはコカコーラ缶とトマト、橙色に対してはミカンとニンジン、黄色に対しては3Mのポストイットとレモン、緑色に対してはグラニースミスりんごとライム、青色に対してはニベアクリームの容器とブルーベリー）を照らした。複数ステップで9つのLEDを徐々に混合することによってスペクトルを生成するための手順を導入した。蛍光体変換型LED（pcLED）、または蛍光体変換型LEDに赤を加えた照明（pcLED+red）（基本条件）と、混合された狭帯域照明（テスト条件）の下でのこれらの果物や野菜の発色の違いを計算し、**図2**に示す結果を得た。

この結果は、狭帯域LEDの最適化によって、発色を維持しつつエネルギー吸収を抑えられることを示している。エネルギー削減効果（2～15%）は、元の研究結果と比べると小さいが、技術にかかわらずエネルギーは削減されるという概念は実証された[4]。気にならない程度に少しの色シフトが許容さ

図3　スペクトルが最適化可能な照明システムの潜在的実装例。物体からの反射を検出して、各物体のスペクトルにチューニングされた光を照射することにより、リアルな色と細部をレンダリングするという処理における、センサの役割が示されている。画像出典：グラフィックコンセプトはドルカルプ・ダーマス氏、描画はマイク・リーダー氏（Mike Reeder）。

れるならば、最大19%という、それよりも高いエネルギー削減が可能である。もちろん、完全にテーラーメイドのスペクトルを使用すれば、さらに高いエネルギー削減効果が期待できる。

この研究では、スペクトルを最適化した光源の下での発色に対する人間の判断も調査した。（一定のレベルまでは）色がある程度異なっていても、参加者は、果物や野菜などの実際の物体を、同じように自然で魅力的だと認識した。これにより、さらなるエネルギーの削減が可能である。ただし、唯一の例外がトマトだった。トマトの光を透過する性質が、参加者の判断を厳しくさせる要因となった。これは、半透明の物体に関するさらなる研究が必要であることを示している。

より最近の研究として、この概念を芸術品に適用することにより、光放射によるダメージを低減することが行われている。光投射システムのプロトタイプは、CCDカメラ、RGBプロジェクター、コンピュータで構成された。ホアキン・ソローリャ（Joaquin Sorolla）の絵画である「Women Walking on the Beach」を、RGBプロジェクターによってピクセル単位で照らすことにより、その外観を視覚的に復元し、将来のダメージが最小限に抑えられている[5]。

課題と技術的見通し

光源スペクトルの最適化を調査する取り組みではこれまでのところ、スペクトル成分と個々の色に着目している。複雑なシーンにおいて物体の色を検出し、有色光をそれらの物体に照射することが、このようなシステムに求められるのは明らかである。それには、演算能力、高精度な光学系、反射の復元がリアルタイムで必要となる。この投射システムに求められる精度、スペクトル制御、速度はかなり高いように思われるが、提案するこの概念に利用できる、センシングと投射の技術分野のいくつかの進歩に着目することが重要である。例えば、屋内測位システム（Indoor Positioning System：IPS）は、モバイル機器から収集したセンサ情報を基に、建物内の物体や人間の位置を特定する（http://bit.ly/2ZqFIqg）。全地球測位システム（Global Positioning System：GPS）は、屋根や壁などの物体で信号が散乱するために屋内には適さないことから、Wi-Fi、Bluetooth、RFID（radio-frequency identification）といった無線技術を利用して、物体の位置や向きが特定される。

物体の位置、向き、速度は重要な要素だが、この提案システムにおいては、物体の光学的な表面特性のほうが基本的な要素である。幸い、このテーマに

対する関心は高まりつつある。実際の物体の表面反射関数は、これまでにマルチスペクトルカメラ[6]、カラーエンコードプロジェクション[7]、ハイパースペクトルイメージング[8]によって推定されている。これらの研究において、物体と光源は固定されていた。しかし、リアルタイムのモーション及び表面認識[9]、リアルタイムの物体追跡とマッピング[10]、さまざまな照明条件と視点の下での色推定[11]についても、研究者らによって成功が達成されている。

チューナブルで高精度な投射システムも、スペクトルが最適化可能な照明システムの主要要素である。プロジェクションマッピング（ビデオマッピングとしても知られる）は、実世界の複雑な物体に光を当てる、非常に人気の高い手法である。「Vivid Sydney」照明フェスティバルにおけるシドニー・オペラハウスは、プロジェクションマッピングの最も有名な例の1つといえるだろう（**図3**）。デザイナーやビデオアーティストが、対象エリアの表面を空間的にマッピングし、照明プロジェクションやアニメーションをデザインして、光のイリュージョンを追加したり、次元や奥行きを強調したり、静的な表面に動きの概念を加えたりする。

次世代のプロジェクターは、65000ルーメン、100万：1のダイナミックコントラスト比、7680×4320ピクセルもの表示解像度を提供することができる[12]。投射システムの解像度は重要だが、表示画像の品質においてより重要な役割を担うのは、色の再現である。研究者らは、既存の照明条件、物体の色や質感、プロジェクターの位置、輝度とは独立して、投射システムを制御することに成功している[13]。別の研究では、CCTが一定のRGB投射システムを使用して、それぞれ80cmと120cmの投影高さで、約1cm^{2}と2.5cm^{2}の表面領域に光を当てることが行われた[14]。光学系の分野におけるさらなる進歩により、得られる照明条件をさらにきめ細かく制御できるようになる。

結論

吸収を最小化するためのスペクトルの最適化は、消費エネルギーを低減するための技術に依存しない手法であり、人間の色覚における光源スペクトルの役割を利用するものである。量子ドットやレーザといった未来の新しい照明技術も、このような照明システムに採用されると期待できる。スペクトルを最適化可能な照明システムは、物体の発色を維持しつつ、消費エネルギーを著しく削減することができる。ただし、センシング及び投射システムの技術的能力の向上が不可欠である。センシング及び投射システムの技術的能力が、将来的に向上することは間違いないが、空間的及び時間的側面のさらなる研究調査も重要である。

参考文献

(1) A. Cuthbertson, “LiFi Internet Breakthrough: 224 Gbps Connection Broadcast with an LED bulb,” International Business Times（2015）.
(2) D. Durmus and W. Davis, “Optimising Light Source Spectrum For Object Reflectance,” Opt. Exp., 23, 11, A456–A464（2015）.
(3) D. Durmus and W. Davis, “Absorption-Minimizing Spectral Power Distributions,” Light, Energy and the Environment, OSA Tech. Dig., paper JTu5A.2（2015）.
(4) D. Durmus and W. Davis, “Object color naturalness and attractiveness with spectrally optimized illumination,” Opt. Exp., 25, 11, 12839–12850（2017）.
(5) D. Vázquez et al., “Energy optimization of a light projection system for buildings that virtually restores artworks,” Dig. Appl. in Archaeol. and Cultural Heritage, 16, e00128（2020）.
(6) R. Shrestha, A. Mansouri, and J.Y. Hardeberg, “Multispectral imaging using a stereo camera: Concept, design and assessment,” EURASIP J. Adv. Sig. Processing, 1, 57（2011）.
(7) S.Y. Chen, Y.F. Li, Q. Guan, and G. Xiao, “Real-time three-dimensional surface measurement by color encoded light projection,” Appl. Phys. Lett., 89, 11, 111108（2006）.
(8) M.E. Klein et al., “Quantitative hyperspectral reflectance imaging,” Sensors, 8, 9, 5576–5618（2008）.
(9) R.A. Newcombe et al., “KinectFusion: Real-time dense surface mapping and tracking,” in Mixed and augmented reality（ISMAR）, 2011 10th IEEE Int. Symp., 127–136（October 2011）.
(10) R.A. Newcombe, S.J. Lovegrove, and A.J. Davison, “DTAM: Dense tracking and mapping in real-time,” in Computer Vision（ICCV）, 2011 IEEE Int. Conf., 2320–2327（November 2011）.
(11) N. Birkbeck, D. Cobzas, P. Sturm, and M. Jagersand, “Variational shape and reflectance estimation under changing light and viewpoints,” Computer Vision – ECCV 2006, 536–549（2006）.
(12) G. Tarr, “CEDIA Turns Up the Resolution on 8K Future,” HD Guru（2018）.
(13) O. Bimber and A. Emmerling, “Multifocal projection: A multiprojector technique for increasing focal depth,” IEEE Trans. on Vis. and Computer Graphics, 12, 4, 658–667（2006）.
(14) C.C. Hung, “Development of the RGB LEDs color mixing mechanism for stability the color temperature at different projection distances,” Technol. and Health Care, 24, s1, S271–S280（2016）.

著者紹介

ドルカルプ・“アルプ”・ダーマス（DORUKALP “ALP” DURMUS）は、ペンシルベニア州立大カレッジ・オブ・エンジニアリング（Pennsylvania State University College of Engineering）の建築工学部助教授。色彩科学、視覚、インテリジェントな照明システムの間の関係をテーマに、複数の学術誌や、照明、電子工学、光電子工学関連の国際会議で研究成果を発表している。イスタンブール工科大（Istanbul Technical University：ITU）で電気工学学士号、スウェーデン王立工科大（Royal Institute of Technology：KTH）で建築照明設計の修士号、シドニー大（University of Sydney）で建築工学博士号を取得している。URL: https://www.ae.psu.edu

LEDJ