

# LEDイルミネーションの 視覚特性を考慮した省電力な色変換

田口 博史<sup>1,a)</sup> 栗山 繁<sup>1,b)</sup>

**概要：**LEDの普及に伴い、多くのイルミネーションにLEDが用いられるようになった。また、情報技術の発展によりインタラクティブなイルミネーションも登場しており、著者らは画像からイルミネーションの調光パターンを生成するシステムを開発している。LEDは照明器具として省電力であるという特徴を有するが、大規模な演出では球数の増加に伴い消費電力も増大する。LEDの制御値を下げることで消費電力の削減は可能であるが、制御値をむやみに変化させると見栄えが損なわれてしまう恐れがある。そこで本研究では、人間の視覚特性を考慮し、イラスト画像から変換されるフルカラーイルミネーションの配色を気づかない程度に変化させて消費電力を削減する機構を構築する。

## Power saving color conversion based on visual characteristics of LED illumination

HIROSHI TAGUCHI<sup>1,a)</sup> SHIGERU KURIYAMA<sup>1,b)</sup>

### 1. はじめに

省電力で調光が容易なLEDが安価になり、様々な照明器具の光源として置き換わっている。イルミネーションもその1つであり、従来の光源では製作が難しかった大規模なイルミネーションも登場してきた。著者らは企業と共同でデジタル式のフルカラー調光が可能なイルミネーションシステムを開発している[1]。このシステムでは、イラストなどの画像データを入力とし、図1に示すようにイルミネーションの調光パターンに変換し制御している。

従来の光源と比較して、LEDの消費電力が低いとはいえ、球数が増加すれば消費電力も増大する。例えば、図1のイルミネーションだけでも約5,000球のLEDが使われている。一般に、イルミネーションは長期的に設置されるため、仮に一割消費電力を抑えることができれば、意味のある程度に運転コストの削減が見込める。単純な手法として、LEDの制御値を下げることで消費電力の削減は可能で



図1 豊橋駅のイルミネーション

あるが、輝度を下げるだけでは、イルミネーションの本来の美的機能が失われてしまう。そこで本研究では、輝度の変化よりも色相の変化には鈍感である人間の視覚特性を考慮し、見栄えを保ちつつ消費電力を抑える色変換システムを構築する。

<sup>1</sup> 豊橋技術科学大学  
TUT, Toyohashi, Aichi 441-8580, Japan  
<sup>a)</sup> taguchi@val.cs.tut.ac.jp  
<sup>b)</sup> sk@tut.jp

## 2. 関連研究

液晶ディスプレイや有機 EL ディスプレイでの省電力化に関する研究の一例として Johnson らの手法 [2] がある。この研究では、有機 EL ディスプレイにおいて同程度の明るさで色差が一定以上かつ省電力なカラーセットを選択する手法が提案されている。この研究での色差は人間の視覚特性を考慮した CIE  $L^*a^*b^*$  色空間を用いている。本研究ではこの手法を参考に、CIE  $L^*a^*b^*$  色空間を用いて許容する色差を決定し、その中で最も消費電力の少ない色に変換するシステムを考える。

## 3. LED の特性

実際のイルミネーションで使用されている LED を用いて装置を製作し、LED 制御値と消費電力の関係、表現される色を調査した。

### 3.1 LED イルミネーションの消費電力

LED の消費電力の特性を調査するため、赤・青・緑・シアン・イエロー・マゼンタ・白で点灯させ消費電力を測定し、制御値と消費電力の関係性を調査した。制御値に対する消費電力のグラフを図 2 に示す。単色であれば R が最も電力を消費し、混色の場合は単純な和では推定ができないことが判明した。そのため、RGB の制御値をそれぞれ 16 ずつずらして測定した消費電力データを作成し、未測定の色域に対しては線形補間により消費電力を推定した。

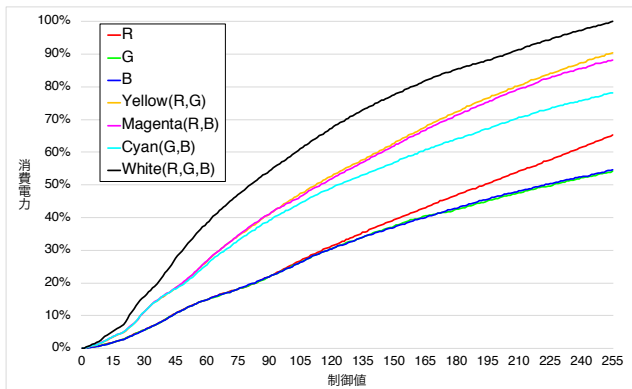


図 2 制御値に対する消費電力のグラフ

### 3.2 LED イルミネーションで表現される色

RGB の制御値をそれぞれ最大にして点灯させ、色彩照度計を用いて CIE XYZ 刺激値を測定した。測定結果を表 1 に示す。この結果をもとに LED の色域を  $xy$  色度図 (図 3) にプロットした。参考までに、sRGB, Adobe RGB の色域もプロットしている。図 3 から、LED は一般的なディスプレイよりも広い色域の色を表現可能であることが確認できる。

表 1 測定結果

	X	Y	Z	x	y
R	288.1	126.1	0	0.696	0.304
G	80.9	367.4	41.6	0.165	0.750
B	180	60	1063	0.138	0.046
W	392.6	409.4	596.4	0.281	0.292

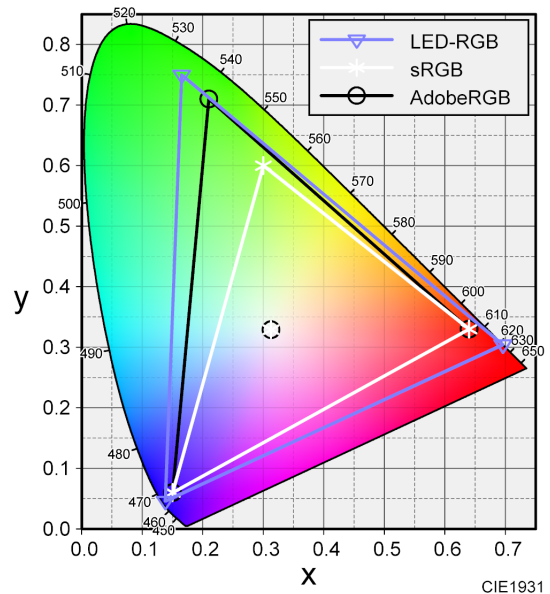


図 3 色域を示した  $xy$  色度図

### 3.3 LED 制御値と CIE $L^*a^*b^*$ 間の変換

制御値 (RGB 値) と CIE  $L^*a^*b^*$  間の変換を行なうには、CIE XYZ 色空間を介する必要がある。本研究では、表 1 の R・G・B での XYZ 刺激値を変換行列として制御値と CIE XYZ 間の変換を行なった。CIE XYZ と CIE  $L^*a^*b^*$  間の変換には白色点を指定する必要がある。表 1 の W における XYZ 刺激値の内、Y の値を固定し D65 光源 [3] の比率と一致するよう調整した値 (389, 409, 445) を白色点として CIE XYZ と CIE  $L^*a^*b^*$  間の変換を行い、LED 制御値を CIE  $L^*a^*b^*$  に変換する。

## 4. 提案システム

提案システムのフローを図 4 に示す。最初に、画像をイルミネーションに合わせてダウンスケーリングする。次に、画像内の代表色を抽出する。抽出後、領域分割を施し隣接関係を求める。その後、各領域に対して近似色 (許容色差内の色) を探索し、その中で最も消費電力が少ない色を選択する。色を選択した後に、隣接する領域間の各色差が閾値以下でなければ、選択された色で省電力な画像を生成する。閾値以下の色差がある場合、色の同化が少なく消費電力が少ない色の組み合わせを探索する。以下に各処理の詳細について述べる。

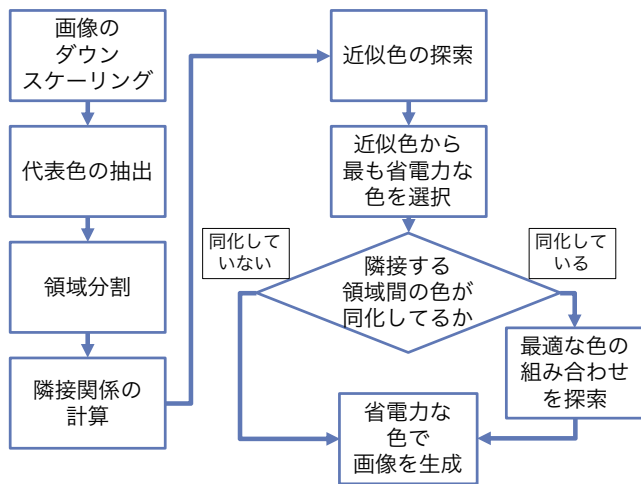


図 4 システムフロー

#### 4.1 画像のダウンスケーリングと代表色の抽出

イルミネーションは一般的なディスプレイと比較して極度に解像度が低いため、適切にダウンスケーリングする必要がある。本研究では Content-Adaptive 法 [4] を用いてダウンスケーリングを行った。その後、画像内の色に対して k-means 法を用いてクラスタリングを行い  $N$  色の代表色を抽出する。ここでの  $N$  の値はユーザが指定する。代表色を抽出後、代表色と各画素における  $L^*, a^*, b^*$  の差分をここで保持し、最後にこの差分を加えることで画像内の微小な差を保持する。

#### 4.2 領域分割と隣接関係の計算

代表色抽出後、各色ごとに連結関係をもとに  $M$  個の領域に分割しラベリングを行なう。ラベルを付与した後に各領域ごとに膨張処理を行いマスク画像として生成する。このマスク画像と重なっている領域を調べることで各領域間の隣接関係を求め以下の式 (1) で隣接行列を作成する。

$$adj(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{領域 } i, j \text{ が隣接している,} \\ 0 & \text{それ以外.} \end{cases} \quad (1)$$

#### 4.3 近似色の探索

各領域の代表色に対して許容色差 ( $d$ ) を指定し近似色 (許容色差内の色) を探索する。近似色を探索するために、各色を CIE  $L^*a^*b^*$  に変換する。色差の計算は式 (2) に示す CIEDE2000 [5] を用いた。抽出された各色を  $C_n$ 、探索し得られた色の集合を  $C_n$  とすると  $C_n$  は式 (3) のように表される。

$$\Delta E_{00}^* = \left\{ \left( \frac{\Delta L'}{k_L S_L} \right)^2 + \left( \frac{\Delta C'}{k_C S_C} \right)^2 + \left( \frac{\Delta H'}{k_H S_H} \right)^2 + R_T \frac{\Delta C'}{k_C S_C} \frac{\Delta H'}{k_H S_H} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$C_n = \{c | \Delta E_{00}^*(C_n, c) < d, L_{C_n}^* \doteq L_c^*\} \quad (3)$$

#### 4.4 省電力な色の選択

探索して得られた色の集合  $C_n$  における各色の消費電力を推定しその中で最も消費電力が少ない色を選択しこれを  $C'_n$  とする。全領域に対して省電力な色の選択を終えた後、隣接する領域間の色差を計算する。

4.2 で求めた隣接行列を用いて隣接する領域間の色差を計算し、閾値以下の組み合わせがあれば、色の同化が生じていると判断して最適な色の組み合わせの探索に移る。ただし、本実験では閾値として経験的に 5 を設定した。

#### 4.5 最適な色の組み合わせ探索

領域数を  $M$ 、各領域での近似色の数を  $m_i$  とした場合、考えられる色の組み合わせ数は  $\prod_{i=0}^{M-1} m_i$  で表される。許容色差が大きくなると  $m_i$  の値が増加し、組み合わせ数も増大する。この中で色の同化具合が低く、省電力な色の組み合わせの探索は、組み合わせ最適化問題となる。本研究では、遺伝的アルゴリズム [6] を用いた。目的関数として、消費電力と色の同化具合の二つについて評価し、どちらも値が低くなるような色の組み合わせを探索する。

消費電力については、各領域の画素数を  $S_i$ 、 $C_i$  内から選択された色を  $c'_i$ 、推定消費電力の割合を  $P(c'_i)$  とし、以下の式 (4) で評価する。

$$Power = \sum_{i=0}^{M-1} S_i P(c'_i) \quad (4)$$

色の同化具合については、4.4 と同じように、 $C_i$  内から選択された色と隣接行列をもとに、隣接する領域間の色差を計算し、以下の式 (5,6) で評価する。

$$Penalty = \sum_{i,j=0}^{M-1} f(i, j) \quad (5)$$

$$f(i, j) = \begin{cases} th - \Delta E_{00}^*(c'_i, c'_j) & adj(i, j) = 1 \cap \Delta E_{00}^*(c'_i, c'_j) \leq th, \\ 0 & \text{それ以外.} \end{cases} \quad (6)$$

以上の処理を経て最終的に求めた省電力な色で画像を生成し、4.1 で求めた各画素の  $L^*, a^*, b^*$  の差分を加えて終了する。



図 5 元イラスト

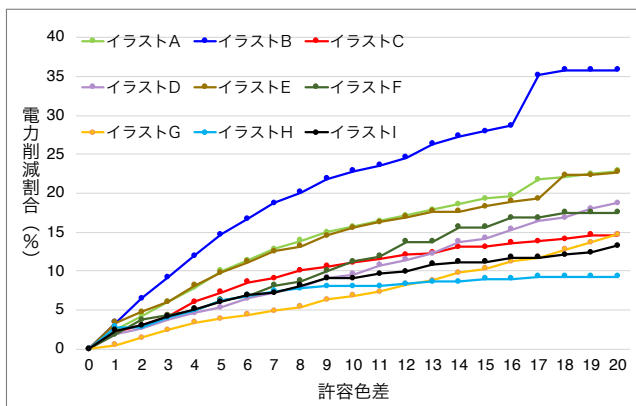


図 6 電力削減割合のグラフ

## 5. 実験

9枚のイラスト(図5)に対し許容色差を1~20の間で省電力化を施し、消費電力を計測した。そのまま点灯させた様子と、許容色差を10として省電力化を施し点灯させた様子を図10に示す。また、各イラストに対して消費電力を削減できた割合をプロットしたグラフを図6に示す。イラストBが最も省電力化の効果が高く、イラストHは許容色差を20としても電力削減割合は10%未満という結果となった。

### 5.1 主観評価実験

被験者10人に対し、省電力を施した場合に違いを感じるか主観評価実験を行なった。一定時間オリジナルの画像

を点灯させ、消灯を挟んで許容色差を1~20の間で省電力化を施した画像もしくは全く同じ画像を点灯させ、これを1パターンとし、合計 $9 \times 21 = 189$ パターン行い、“全く同じ”、“ほぼ同じ”、“色の違いを感じる”、“色の違いをかなり感じる”の4段階で評価させた。順序効果を防ぐため、点灯させる組み合わせの順番はランダムとした。

ほとんどのイラストで、許容色差が8以下であれば“全く同じ”、“ほぼ同じ”、という評価が得られた。しかし、グラデーションのあるイラストDでは許容色差を5で省電力化した場合でも“色の違いを感じる”という評価が得られた。したがって、グラデーションのあるイラストに対する手法を考案する必要がある。

## 6. 考察

イラストによる電力削減割合の違いについて、色による消費電力の傾向と近似色の分布について調査し考察した。

### 6.1 色による消費電力の傾向

明度( $L^*$ )を一定とし、 $a^*$ 、 $b^*$ を変化させ消費電力を推定し色味による消費電力の傾向を調査した。図7に $L^* = 70$ での、 $a^*$ 、 $b^*$ 値による消費電力の傾向をプロットしたグラフを示す。黒い箇所が消費電力が少なく、白い箇所が消費電力が多いことを表している。同程度の明度であれば、 $a^*$ の値が大きく、 $b^*$ の値が小さい色(紫系統の色)は消費電力が多く、 $a^*$ の値が小さく、 $b^*$ の値が大きい色(真緑に近い色)は消費電力が少ない傾向であることが判明した。人間の錐体細胞は波長555nm(緑)で最も感度が高いため、同じ制御値であれば緑が最も明るく感じることになる。たとえば、(R,G,B)=(0,100,0)での明度をGを使わずにRやBで表現するには、それ以上の制御値が必要となり、結果的に緑よりも消費電力が多くなる。

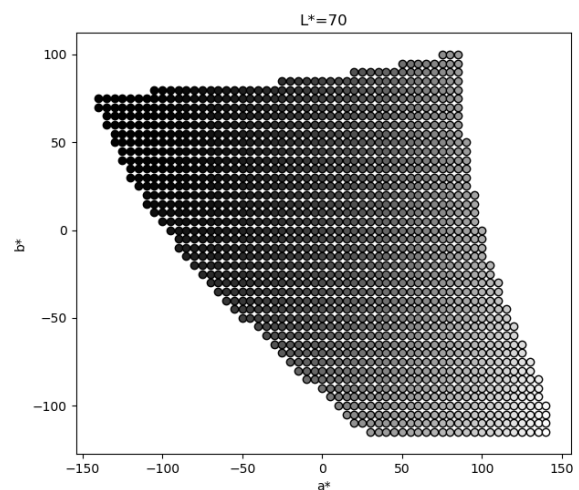


図 7  $L^* = 70$ における消費電力の傾向

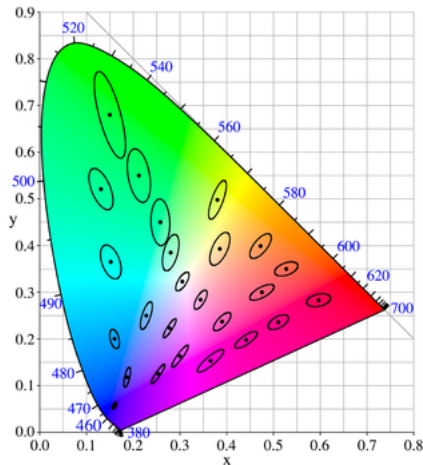


図 8  $xy$  色空間における MacAdam 楕円 [7]

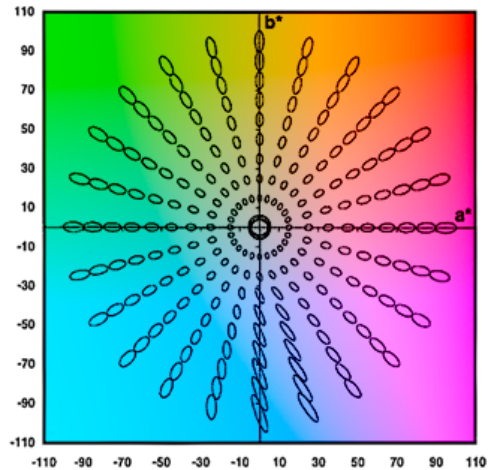


図 9 CIE  $L^*a^*b^*$  色空間における MacAdam 楕円 [7]

## 6.2 近似色の分布

色差の識別限界 (同じ色であると認識できる限界) を表す楕円は MacAdam 楕円 [7] と呼ばれ,  $xy$  色空間における MacAdam 楕円を図 8 に, CIE  $L^*a^*b^*$  色空間における MacAdam 楕円を図 9 に示す.

$xy$  色空間では, 基準色によって楕円の大きさや形状が大きく異なるが, CIE  $L^*a^*b^*$  色空間は人間の視覚に近くなるように考案された色空間であるため,  $xy$  色空間と比較して楕円の大きさと形状の均等性を保っている. しかし, CIE  $L^*a^*b^*$  色空間においても基準色によって楕円の大きさと形状が若干異なる. この問題を考慮した色差の計算式が式 (2) に示した CIEDE2000 である.

楕円の大きさに注目すると, 彩度が高い色ほど楕円が大きく, 彩度が低い色ほど楕円が小さいことが分かる. このことから, 彩度が高い色ほど近似色が多いと考えられる. 楕円の形状 (主に傾き) に注目すると, ほとんどの色で放射状に傾いているが,  $a^*$  が 0 に近く,  $b^*$  が負の色 (青に近い色) は左に傾いていることが分かる. 以上のことから, MacAdam 楕円が左上に伸びている色 (緑, 青, 紫系統の色) は近似色に消費電力の低い色が含まれる可能性が高く, MacAdam 楕円が小さい色 (低彩度な色) や MacAdam 楕円が右上に伸びている色 (シアン, オレンジ系統の色) は近似色に消費電力の低い色が含まれる可能性が低くなると考えられる. そのため, 緑, 青, 紫系統の色が多い画像は省電力化の効果が高く, 無彩色系の色やシアン, オレンジ系統の色が多い画像は省電力化の効果が低くなり, 図 6 のような結果になったと推察される.

## 7. おわりに

### 7.1 まとめ

本研究では, CIE  $L^*a^*b^*$  色空間を用いて省電力な色変換を行う手法を提案した. 許容色差内の色で最も消費電力が少ない色に変換することで見栄えを保ちつつ, 消費電力

を抑えることができた. 特に, 緑, 青, 紫系統の色が多い画像の場合, 省電力化の効果が高いことが確認された. 主観評価実験では, ほとんどのイラストについて許容色差が 8 以下であれば色の違いをほとんど感じないという結果が得られた.

### 7.2 今後の課題

LED におけるカラーマネジメント手法の提案があげられる. 本研究では, 単純な行列変換を用いているが, 任意のフルカラー LED に対するカラーマネジメント手法を提案することで, 制御値と実際に表現される色がより精密に求まり, 色変換の精度向上と厳密な省電力な色変換が可能になるだけでなく, 色の再現性向上にも繋がる.

次に, 目の錯覚, 特に色の錯視 (色の対比や同化, 恒常性など) のモデル化があげられる. 色に関する錯視を取り入れることで, 低彩度な色を鮮やかに見せたり, 暗い色を明るく感じさせることで更なる省電力化が期待できる.

### 参考文献

- [1] 宇根健一郎, 辻春樹, 田口博史, 栗山繁. 拍手音を用いた対話的イルミネーション演出. No. 15, mar 2016.
- [2] Johnson Chuang, Daniel Weiskopf, and Torsten Moeller. Energy Aware Color Sets. *Computer Graphics Forum*, 2009.
- [3] 入倉隆. 視覚と照明 (Vision and Lighting). 裳華房, 9 2014.
- [4] Johannes Kopf, Ariel Shamir, and Pieter Peers. Content-adaptive image downscaling. *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH Asia 2013)*, Vol. 32, No. 6, p. to appear, 2013.
- [5] 秋本眞喜雄, 池田光里, 中野慎也, ポーマンサムエル, 早津勇一, 畑三恵子, 前田憲寿. 皮膚色の評価における CIEDE2000 色差式の有用性. 自動制御連合講演会講演論文集, Vol. 57, pp. 1115-1118, 2014.
- [6] 森 直樹松本 啓之亮. 知能システム工学入門. コロナ社, 8 2002.
- [7] Lab 表色系. <http://w3.kcua.ac.jp/~fujiwara/infosci/lab.html>. (Accessed on 01/27/2018).

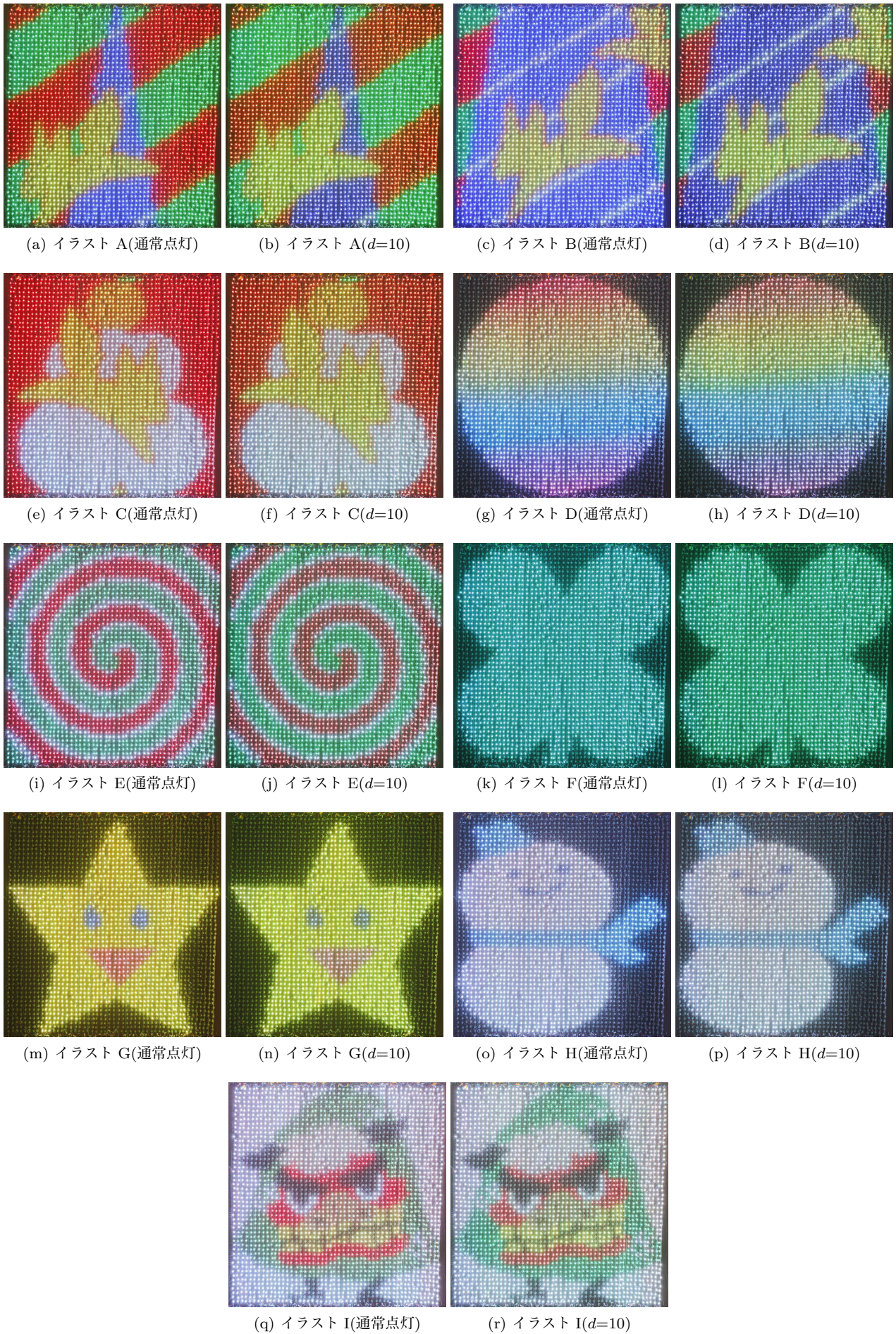


図 10 実験用のイルミネーション装置に投影した様子