

# デジタル制御型カラーシフトキーイング方式のための 調色制御法に関する研究

7315604 伊形 俊介

## 1 はじめに

### 1.1 可視光通信

近年、発光ダイオード (LED : Light Emitting Diode) は、長寿命や省電力、高速な応答特性などの特性から、次世代の光源として急速に普及している。これに伴い、LED の持つ高速な応答特性を活かし、LED を送信デバイスとして利用する可視光通信 (VLC : Visible Light Communication) に注目が集まっている [1][2][3]。VLC とは可視光帯域の光を用いて情報を伝送する通信方式であり、光の広帯域性による高速通信の実現が可能である。さらに、この VLC を屋内の照明に適用することで、照明機能と通信機能を同時に達成することが可能である。VLC を照明光源に適用する場合、光が人に与える影響として、明るさの制御 (調光)、ちらつきの低減、相関色温度 (CCT : Correlated Color Temperature) や演色性 (CRI : Color Rendering Index) などの色味の調整 (調色) を考慮する必要がある。標準化団体 IEEE 802.15.7 では、複数色のマルチカラー LED を用いることで周波数利用効率が達成可能なカラーシフトキーイング (CSK : Color Shift Keying) 方式が提案されている [4]。

### 1.2 カラーシフトキーイング方式

CSK 方式では、国際照明委員会 (CIE : Commission Internationale de l'Éclairage) によって定義された、光色を表現できる座標系である CIE x-y 色度空間上に信号点を配置する。具体的には、使用するマルチカラー LED の各色の色度座標を頂点とする x-y 色度空間上の多角形の内部に  $M$  個の信号点を配置することで  $\log_2 M$  ビットの情報を表現することができる。色度空間上で選択された信号は、D/A 変換器を用いて駆動電流を制御することで、マルチカラー LED 内の各色の発光強度比を変化させて表現する。情報送信時、発光強度比の変化に関わらず、マルチカラー LED の各色の発光強度の合計は常に一定に揃えられているため、人間の目に知覚されるちらつきは低減されている。また、各信号は高速で切り替わるため、人間の目には各信号の光が平均化された色 (ターゲットカラー) として知覚される。このターゲットカラーは色度空間上の  $M$  個の信号点の位置を変化させることで制御することができる。従来のターゲットカラー制御法としては、連続最適化問題のアルゴリズムである内点法を用いた信号点配置法などが提案されている [5]。しかしながら、CSK 方式では各 LED の駆動電流制御により発光強度を変化させるため、LED の駆動電流に対する発光強度の非線形性や、駆動電流変化により LED の発光スペクトルが変

化するカラーシフトの影響によって信号点を精度良く表現することが困難となり、通信性能の劣化やターゲットカラーのシフトが生じる [6]。

### 1.3 デジタル制御型カラーシフトキーイング方式

CSK 方式の問題を回避する方法として、デジタル制御型カラーシフトキーイング (DCSK : Digital CSK) 方式が提案されている [7]。DCSK 方式では、複数個のマルチカラー LED を協調発光させることで、オンオフのみで CSK 方式の発光強度変化を表現することができる。DCSK 方式では、全てのマルチカラー LED 内の各色の発光強度を一定とし、さらに各マルチカラー LED 内で 1 色を選択して発光させているため、CSK 方式と同様にちらつきが低減されている。このことから、 $N_{Color}$  色のマルチカラー LED を  $N_{Tx}$  個用いた時に表現可能な  $M_{Max}$  個の信号点から  $M$  個を選択することで  $k = \lceil \log_2 M \rceil$  ビットの情報を送ることができる。また、DCSK 方式では信号点を CIE x-y 色度空間上ではなく、マルチカラー LED の各色の発光強度を軸とする信号電力空間上に配置することで通信性能が向上することが従来研究により示されている [8]。しかしながら、DCSK 方式においても CSK 方式と同様に信号点配置を構成する各色の発光強度比に応じてターゲットカラーが変化するものの、デジタル制御であることから表現できる信号点は離散的であり、ターゲットカラーの変化も同様に離散的となる。さらに、DCSK 方式におけるターゲットカラーの制御法については未だに検討されていない。

そこで、本稿では DCSK 方式において所望の光色を実現する方式として、ターゲットカラー制御のための信号点選択法を提案する。本方式では、光色を所望の CCT にすると同時に、照明性能と通信性能が最大となるように信号点を選択する。また、従来の DCSK 方式ではマルチカラー LED の各色の電力を一定とすることでちらつき低減を図っているが、人間の目には標準視感度と呼ばれる、光の波長に対して知覚量 (測光量) が変化する特性があるため、厳密には微小なちらつきが発生してしまう。そこで、本稿では従来の電力一定の条件に加えて、測光量を一定としたときの性能についても評価を行う。さらに本稿では目標の CCT を一般に照明色として用いられる 3000K、5000K、および 6500K とした際の照明性能、および通信性能を理論解析によって評価する。

## 2 提案方式

図 1 に DCSK 方式のシステムモデルを示す。

本稿では、ちらつき低減のためのマルチカラー LED の各

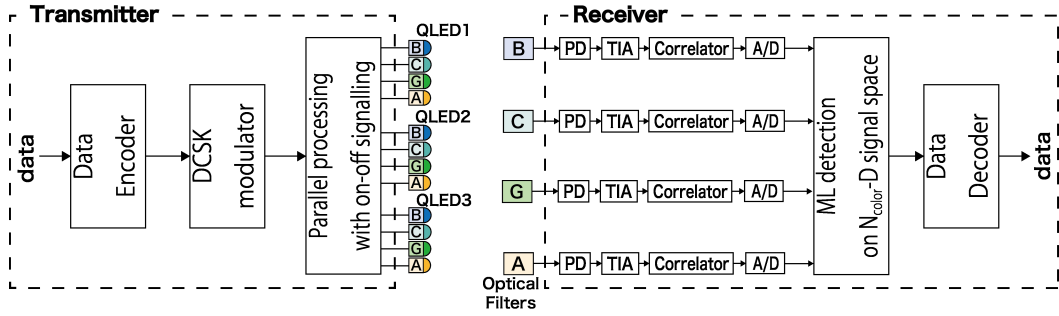


図1 4色マルチカラーLED(Blue, Cyan, Green, Amber)を用いた DCSK 方式のシステムモデル ( $N_{Tx} = 3$ ).

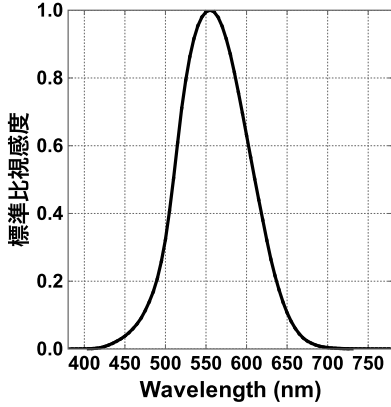


図2 標準比視感度特性.

色の発光強度一定の条件として (A) 電力一定, (B) 測光量一定の2つの条件について考慮する. 従来の DCSK 方式ではマルチカラー LED の各色の電力を一定とすることでちらつきを低減しているが, 人間の目には標準比視感度と呼ばれる, 光の波長に対して知覚する量 (測光量) が変化する特性があり, この影響を受けて各色の知覚量が異なり, 厳密には完全にちらつきを低減することができない [9].

図2に標準比視感度特性を示す. 測光量一定の条件では測光量を一定とするため完全にちらつきを低減することが可能であるが, 各色同士の電力差が生じてしまうため, 通信性能の劣化が予想される.

各色 LED の変換効率  $K_c$  は, LED の波長を  $S_c(\lambda)$ , 標準比視感度特性を  $V(\lambda)$  とすると以下の式で表される.

$$K_c = \frac{683 \int_{\lambda} V(\lambda) S_c(\lambda) \Delta\lambda}{\int_{\lambda} S_c(\lambda) \Delta\lambda} \quad [\text{lm/W}]. \quad (1)$$

各色 LED の測光量を  $\phi$  [lm] で一定としたときの電力  $P_c$  は以下の式で表される.

$$P_c = K_c^{-1} \phi. \quad (2)$$

DCSK 方式では, 常に各マルチカラー LED において1色が選択されて点灯するため, 以下の関係式が成り立つ.

$$\sum_{c=1}^{N_{Color}} N_c^m = N_{Tx} \quad (3)$$

ここで,  $N_{Tx}$  はマルチカラー LED の数を,  $N_c^m$  は  $m$  番目の送信信号を送る際に点灯している  $c$  番目の色の LED の個数を示す. 以上の関係式より,  $m$  番目の送信信号  $s_m$  は以下の式で表される.

$$s^m = \sum_{c=1}^{N_{Color}} P_c N_c^m. \quad (4)$$

CSK 方式では CIE x-y 色度空間上に信号点を配置するのに対し, DCSK 方式ではマルチカラー LED の各色の発光強度を軸とした  $N_{Color}$  次元の信号電力空間上に信号点を配置することで, 必要な送信機数の削減と信号点間距離が大きくなることによる通信性能の向上が従来研究により示されている.  $N_{Tx}$  個の  $N_{Color}$  色マルチカラー LED を用いる際に表現可能な信号電力空間上の DCSK 方式の信号点の数  $M_{Max}$  は以下の式で表される.

$$M_{max} = \binom{N_{Tx} + N_{Color} - 1}{N_{Tx}} \quad (5)$$

ここで,  $\binom{a}{b}$  は  $a$ -元集合から  $b$  個の相異なる元を選択する組み合わせの総数を示す. DCSK 方式では, この  $M_{Max}$  個の信号点の中から  $M$  個を選択することで  $k = \lceil \log_2 M \rceil$  [bit/symbol] の情報量を得ることができる.

受信機側では, フォトダイオード (PD : Photo Diode) の特性の不均衡, 背景光雑音の付加, およびセンサの色間干渉などの経路の特性の影響を受けて送信信号とは異なる値を受信する. この経路の特性であるチャネル行列  $H$  はマルチカラー LED の各色を単色発光させた時の各色の検出器の値を用いて以下の式で表される.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & \dots & h_{1,c} & \dots & h_{N_{Color}, N_{Color}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{c,1} & \dots & h_{c,c} & \dots & h_{c, N_{Color}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{N_{color}, 1} & \dots & h_{N_{Color}, c} & \dots & h_{N_{Color}, N_{Color}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

ここで,  $h_{c,1}$  は  $c$  番目の色の LED に対する 1 番目の色の PD の出力値を示す. 以上より,  $m$  番目の受信信号  $\mathbf{r}^m$  は以

下の式で表される。

$$\mathbf{r}^m = \mathbf{H}\mathbf{s}^m + \mathbf{n}^m \quad (7)$$

ここで、 $\mathbf{n}^m$  は加法的白色ガウス雑音である。

情報送信時には各信号は高速で切り替わるため、人間の目には各信号の光が平均化された色（ターゲットカラー）が知覚される。ターゲットカラーは信号点配置を構成する各色の発光強度比に応じて変化するため、ターゲットカラーのパターンの総数  $N_{TC}$  は  $M_{Max}$  の信号点の中から  $M$  個を選択する組み合わせの数に一致し、以下の式で表される。

$$N_{TC} = \binom{M_{max}}{M}. \quad (8)$$

また、異なる信号点配置であっても、信号点配置を構成する発光強度比が同一となる場合にはターゲットカラーも一致する。

本方式では、照明性能の指標として相関色温度 (CCT) と平均演色評価数 (CRI) を用いる。まず、 $N_{TC}$  通りの信号点配置の中からターゲットカラーの CCT が所望となるものを全て選択する。次に、選択した信号点配置の中からターゲットカラーの CRI の値が最大となるものを選択する。このとき、選択した信号点配置が複数存在する場合には、信号電力空間上における最小信号点間距離が最大となる信号点配置を選択する。

### 3 理論解析

本節では、相関色温度 (CCT)、平均演色評価数 (CRI)、および BER 性能について述べると同時に、算出の手順を示す。

#### 3.1 相関色温度 (CCT)

白色光の色味の数値的指標に色温度がある [10][11]。色温度とは、光源の色味を同等の光を発する黒体（完全放射体）の絶対温度を用いて表されたものであり、この光色と色温度の軌跡を色度空間上に表したものを黒体軌跡という。ほとんどの光色はこの軌跡上には存在しないため、代わりとして光色の色度座標からこの軌跡に下ろした垂線と軌跡の交点の色温度を用いて表現し、このときの色温度を相関色温度 (CCT) として扱っている。

また、人間の目には知覚補正により近似的に同色として感じる色度範囲があり、ANSI C78.377A では 8 つの CCT に対する色度範囲を規格化している [12]。図 3 に ANSI C78.377A により定められた CIE x-y 色度空間上の色度範囲を示す。

ターゲットカラーの相対分光分布  $W(\lambda)$  はマルチカラー LED の  $c$  番目の色の相対分光分布を  $S_c(\lambda)$  とすると、以下の式で表される。

$$W(\lambda) = \sum_{c=1}^{N_{Color}} \sum_{m=1}^M N_c^m S_c(\lambda). \quad (9)$$

人間の目の知覚補正を考慮した三刺激値  $X, Y$ 、および  $Z$  は、人間の目の感度に相当する等色関数  $\overline{x(\lambda)}, \overline{y(\lambda)}, \overline{z(\lambda)}$  を

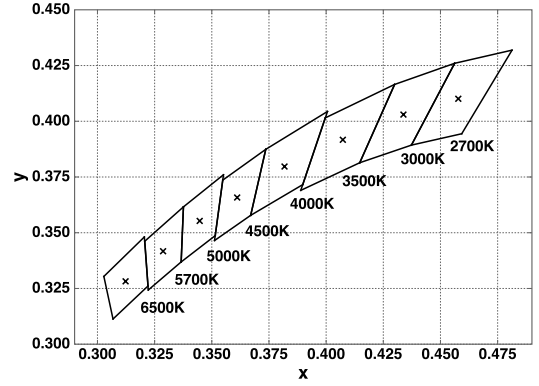


図 3 ANSI C78.377A による CIE x-y 色度空間上の色度範囲。

用いて以下の式で表される。

$$X = K \sum_{380}^{780} W(\lambda) \overline{x(\lambda)} \Delta\lambda \quad (10a)$$

$$Y = K \sum_{380}^{780} W(\lambda) \overline{y(\lambda)} \Delta\lambda \quad (10b)$$

$$Z = K \sum_{380}^{780} W(\lambda) \overline{z(\lambda)} \Delta\lambda \quad (10c)$$

$$K = \frac{100}{\sum_{380}^{780} S(\lambda) \overline{y(\lambda)} \Delta\lambda}. \quad (11)$$

以上の三刺激値  $X, Y$ 、および  $Z$  を用いて、ターゲットカラーの CIE x-y 色度座標は以下の式で表される。

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z}. \quad (12)$$

算出した CIE x-y 色度座標が色度範囲内に存在する場合、そのターゲットカラーの CCT は色度範囲の CCT と近似できる。

#### 3.2 平均演色評価数 (CRI)

平均演色評価数 (CRI) とは、光源の物体の色の再現性を示し、太陽光などの CIE によって定められた基準の光との比較によって表される [13][14]。基準の光には光源と等しい CCT のものが用いられ、CIE の定める 8 色の試験色をターゲットカラーと基準の光の双方で照らした際の色差の平均により算出される [15]。CRI の値は 100 が最大であり、ターゲットカラーの相対分光分布  $W(\lambda)$  によって値が変動する。

光源に照らされた  $s$  番目の試験色の三刺激値  $X_s, Y_s$ 、および  $Z_s$  は、試験色の波長に対する反射率である分光放射輝度  $\beta_s(\lambda)$  を用いて以下の式で表される。

$$X_s = K \sum_{380}^{780} W(\lambda) \beta_s(\lambda) \overline{x(\lambda)} \Delta\lambda \quad (13a)$$

$$Y_s = K \sum_{380}^{780} W(\lambda) \beta_s(\lambda) \overline{y(\lambda)} \Delta\lambda \quad (13b)$$

$$Z_s = K \sum_{380}^{780} W(\lambda) \beta_s(\lambda) \overline{z(\lambda)} \Delta\lambda. \quad (13c)$$

ターゲットカラーと基準の光のそれぞれの下での  $s$  番目の試験色の色差を  $\Delta E_s$  とすると、CRI は次式で表される。

$$CRI = \frac{1}{8} \sum_{s=1}^8 100 - \Delta E_s. \quad (14)$$

### 3.3 ビット誤り率 (BER)

本稿では、通信性能の評価として BER 性能を用いる。信号電力空間上での各信号に対して信号点間距離が最も短い他の信号点の個数を  $N_{n,m}$ 、最小信号点間距離を  $d_{min}$  とすると、BER 性能は以下の式で算出できる。

$$BER = \frac{1}{M \log_2 M} \sum_{m=1}^M \left\{ N_{n,m} Q \left( \sqrt{\frac{d_{min}^2}{2N_0}} \right) \right\} \quad (15)$$

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{u^2}{2}} du \quad (16)$$

ここで、雑音は加法的白色ガウス雑音としている。

## 4 結果

本節では、調色制御法を適用した DCSK 方式の理論解析の結果について評価を行う。

表 1 に理論解析に用いる諸元を示す。解析には、Blue, Cyan, Green, および Amber の 4 色 LED (QLED : Quad LED) を使用し、QLED の各色の分光分布は分光照度計により計測した数値を使用する [16][17][18][19][20]。

また、ちらつき低減のための条件は、(A) 電力一定、および (B) 測光量一定の 2 つの条件を考慮する。図 4, 5 にそれぞれの条件における QLED の分光分布を示す。

ここで、(B) において QLED の各色の測光量を  $\Phi = 1$  とすると、(2) 式より各色の電力比は以下の通りとなる。

$$\begin{aligned} P_B : P_C : P_G : P_A &= K_B^{-1} : K_C^{-1} : K_G^{-1} : K_A^{-1} \\ &= 11.85 : 1.713 : 1.000 : 1.568. \end{aligned} \quad (17)$$

図 6 に多値数を変化させたときの CRI 性能を示す。結果より、全ての CCT において多値数の増加に合わせて CRI 性能が向上していることがわかる。これは、多値数  $M$  を増やすことで表現できる発光強度比が増え、より CRI 値が高

表 1 理論解析諸元。

QLED 数 $N_{Tx}$	5
全信号点数 $M_{Max}$	56
多値数 $M$	4, 8, 16, 32
Blue-LED の型番	LF-SWAEMBGMB (Kingbright)
Cyan-LED の型番	SM1204PGC (Bivar)
Green-LED の型番	SML-012PTT86A (Rohm)
Amber-LED の型番	SML-310YTT86 (Rohm)
分光照度計の型番	IM-1000 (TOPCON)
目標 CCT	3000K, 5000K, 6500K

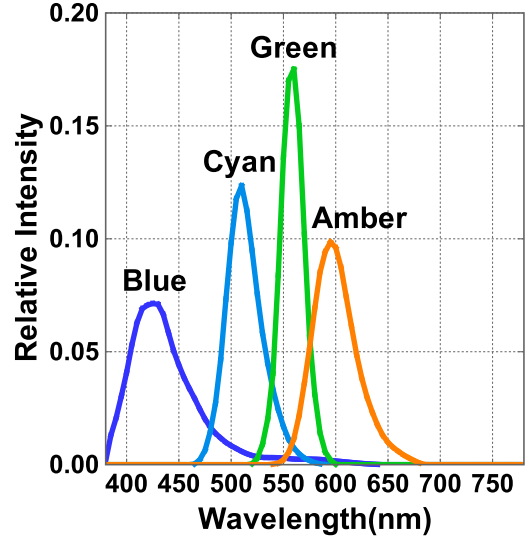


図 4 (A) 電力一定のときの QLED (Blue, Cyan, Green, および Amber) の分光分布。

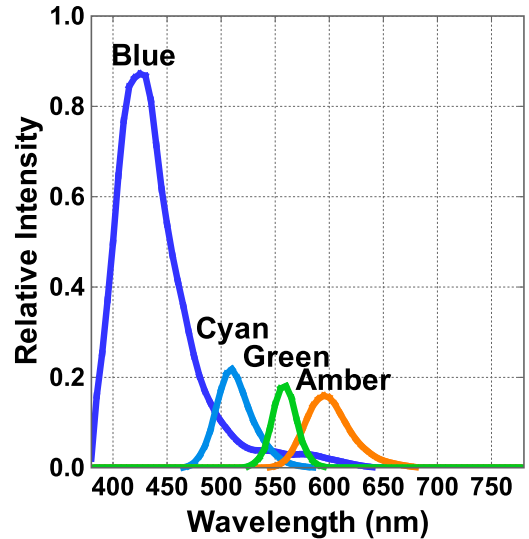


図 5 (B) 測光量一定のときの QLED (Blue, Cyan, Green, および Amber) の分光分布。

い発光強度比を表現することが可能となったためだと考えられる。また、全ての CCT において多値数  $M$  が 16 以降のとき、(A)、(B) の両条件の CRI 値が一致し収束することがわかる。これは、両条件ではちらつき低減のための QLED 各色の発光強度比は異なっているが、多値数が増えることでシステム全体の発光強度比が、使用する QLED で表現できる最大の CRI 値を表現する発光強度比へと収束するためだと考えられる。しかしながら、一般に照明として用いられる光源の CRI の値は 80 以上が求められるが、5000K、および 6500K における CRI の値は 80 未満となるため現時点では照明への適用は困難である。

図 7 に  $M = 8$  のときの BER 性能を示す。結果より、全

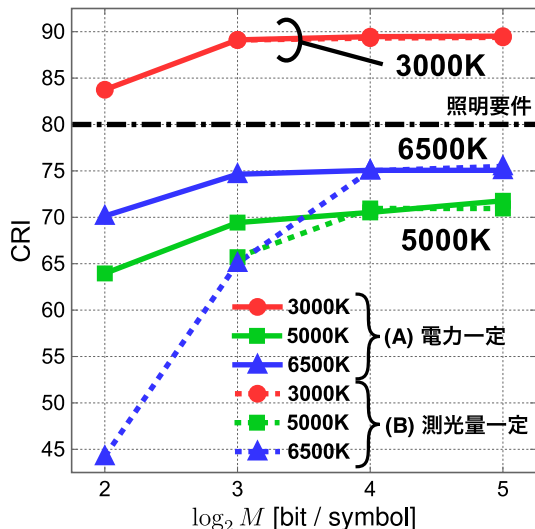


図6 QLEDを用いたDCSK方式の多値数 $M$ に対するCRI性能( $N_{Tx} = 5$ , CCT=3000K, 5000K, および6500K).

でのCCTにおいて(A)に比べて(B)の性能が約3dB劣化していることがわかる。これは、(B)では測光量を一定とするためにQLED各色の電力にばらつきが生じ、信号点間距離が小さくなったためだと考えられる。また、(A)、および(B)の両条件下において、5000K, 6500Kに比べて3000Kの性能が約5dB劣化していることわかる。これは、3000Kは暖色寄りの白色であるため、ターゲットカラーを表現するためにAmberを発光させる信号点を多く選択する必要があり、その結果、最小信号点間距離が小さくなりBER性能が劣化したと考えられる。

## 5 むすび

本稿では照明可視光通信の変調方式であるデジタル制御型カラーシフトキーイング(DCSK)方式に着目し、多彩な光色の表現、および演色性能向上のための信号点配置による調色制御法を提案した。さらに、Blue, Cyan, Green, およびAmberの4色マルチカラーLEDを用いたDCSK方式について、電力、または測光量を一定とするちらつき低減のためのマルチカラーLED各色の発光強度の条件を考慮し、一般に照明色として用いられる相対色温度3000K, 5000K, および6500Kを目標の光色として設定したときの平均演色評価数(CRI)性能、およびビット誤り率(BER)性能を理論解析により評価した。その結果、多値数を増やすことで表現可能な光色が増加し、さらに全ての目標の相対色温度においてCRIの値が向上した。また、ちらつき低減のためのマルチカラーLEDの発光強度についての2つの条件のBER性能を比較した結果、測光量一定に対して電力一定としたときのBER性能が約3dB高いことが示された。

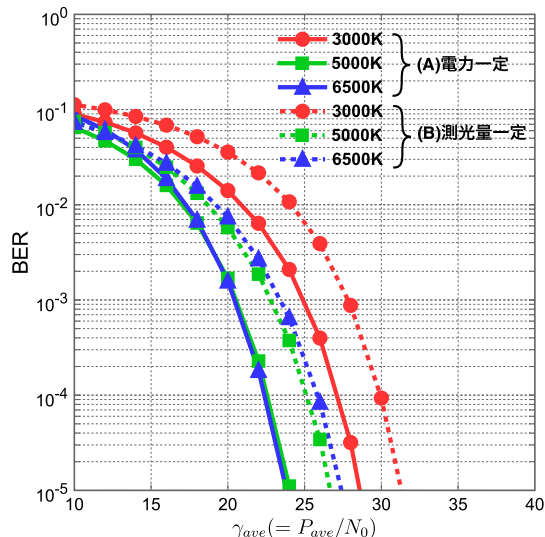


図7 QLEDを用いたDCSK方式の、QLED1つあたりの平均送信電力対雑音電力比 $\gamma_{ave}$ に対するBER性能( $N_{Tx} = 5$ ,  $M = 8$ , CCT=3000K, 5000K, および6500K).

## 参考文献

- [1] Y. Tanaka, S. Haruyama, and M. Nakagawa, "Wireless optical transmissions with white colored LED for wireless home links," in *Proc. 11th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, vol. 2, pp. 325-329, 2000.
- [2] T. Komine and M. Nakagawa, "Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 50, pp. 100-107, Feb. 2004.
- [3] D. O'Brien, L. Zeng, H. Le-Minh, G. Faulkner, J. Walewski, and S. Randel, "Visible Light Communications: challenges and possibilities," in *Proc. 19th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communication (PIMRC)*, pp. 1-5, Sep. 15-18, 2008.
- [4] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light, IEEE Standard 802.15.7, Jun. 2011.
- [5] E. Monteiro and S. Hranilovic, "Constellation Design for Color-Shift Keying Using Interior Point Methods," in *Proc. IEEE Global Communication Conference (GLOBECOM) Workshop*, pp. 1224-1228, Dec. 2012.
- [6] S. Beczkowski and S. Munk-Nielsen, "LED Spectral and Power Characteristics under Hybrid PWM/AM

- Dimming Strategy,” in *Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp 731-735, 2010.
- [7] H. Shimamoto, Y. Kozawa, and Y. Umeda, “An Experimental Evaluation on EVM Performance for 4-CSK (Color Shift Keying) using visible light with multiple multi-color LEDs,” in *Proc. IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS)*, pp. 206-208, Jan. 25-28, 2015.
- [8] N. Murata, Y. Kozawa, and Y. Umeda, “Digital Color Shift Keying With Multicolor LED array,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 8, no. 4, 2016.
- [9] H. Chun, S. Rajbhandari, G. Fulkner, D. Tsonev, E. Xie, J. J. D. McKendry, E. Gu, M. D. Dawson, D. O’Brien, and H. Haas, “LED based Wavelength Division Multiplexed 10 Gb/s Visible Light Communications,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, pp. 3047-3052, 2016.
- [10] K. Wnukowicz and W. Skarbek, “Colour Temperature Estimation Algorithm for Digital Images Properties and Convergence,” *Optoelectronics Review*. 2013; 11(3); 193-196.
- [11] 日本工業規格 JIS Z 8725 : 1999. 光源の分布温度及び色温度・相関色温度の測定方法.
- [12] American National Standard for Electric Lamps - Specifications for the Chromaticity of Solid-state Lighting Products, ANSI C78.377, 2015.
- [13] L. Lohaus, E. Leicht, S. Dietrich, R. Wunderlich, and S. Heinen, “Advanced Color Control for Multicolor LED Illumination Systems with Parametric Optimization,” in *Proc. 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, pp. 3305-3310, Nov. 2013.
- [14] 日本工業規格 JIS Z 8726 : 1990. 光源の演色性評価方法.
- [15] 日本工業規格 JIS Z 8720 : 2012. 測色用の標準イルミナント (標準の光) 及び標準光源.
- [16] *Kingbright* “LF-5WAEMBGMB,” [online]. Available at: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/118829/KINGBRIGHT/LF5WAEMBGMB.html> (Accessed : Feb. 2017).
- [17] *Bivar* “SM1204PGC,” [online]. Available at: <http://www.bivar.com/led-indication/leds/surface-mount-leds/1204?p=SM1204PGC> (Accessed : Feb. 2017).
- [18] *ROHM* “SML-012PTT86A,” [online]. Available at: [http://rohms.rohm.com/en/products/databook/datasheet/opto/led/chip\\_mono/sml-01.pdf](http://rohms.rohm.com/en/products/databook/datasheet/opto/led/chip_mono/sml-01.pdf) (Accessed : Feb. 2017).
- [19] *ROHM* “SML-310YTT86,” [online]. Avail-

able at: <http://www.mouser.com/ds/2/348/sml-31-312817.pdf> (Accessed : Feb. 2017).

- [20] *TOPCON* “IM-1000,” [online]. Available at: <http://www.topcon-techno.co.jp/en/products/opmeas/im-1000.html> (Accessed : Feb. 2017).

## 本研究に対する学会発表など

### (A) 査読付き論文 [0 件]

なし

### (B) 査読付き小論文 [1 件]

- Shunsuke Igata, Yusuke Kozawa, Yohtaro Umeda, Hiromasa Habuchi, “BER performance of Digital Color Shift Keying with Target Color Control,” *10th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS)*, Dec. 2016.

### (C) 査読なし論文 [2 件]

- 伊形俊介, 村田直也, 小澤佑介, 榎田洋太郎, 羽瀨裕真, “デジタル制御型カラーシフトキーイング方式におけるターゲットカラー制御法の一検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 115, No. 247, WBS2015-29, pp. 13-18, Oct. 2015.
- 伊形俊介, 小澤佑介, 榎田洋太郎, “ガウス型スペクトルモデルを用いたデジタル制御型カラーシフトキーイング方式の照明性能に関する一検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 116, No. 236, WBS2016-38, pp. 35-40, Oct. 2016.

### (D) 学会大会などの口頭発表・ポスター発表 [2 件]

- 伊形俊介, 小澤佑介, 榎田洋太郎, “複数4色LEDを用いたオンオフ制御型4-CSK方式におけるターゲットカラー制御法の一検討,” 電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会, A-5-21, pp. 21, Mar. 2015.
- 伊形俊介, 小澤佑介, 榎田洋太郎, “許容色度範囲内ターゲットカラー表現時のデジタル制御型カラーシフトキーイング方式のビット誤り率性能,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, A-9-4, Sep. 2016.

### (E) 特許

なし