

マルチチップ LED 照明を用いた可視光 ID 送信機の検討

Investigation of visible light ID transmitter with multi-chip LED illumination

坂根頌梧[‡] 大柴小枝子[‡]
Shogo Sakane Saeko Oshiba

1. はじめに

近年, GPS(Global Positioning System)の信号を取得することが困難である屋内において, 屋内位置情報サービスや, 屋内移動体などの需要の高まりから, 屋内位置推定手法の検討が広くなされている. 特に, LED(Light Emitting Diode)照明器具の急速な普及に伴い, LED 照明からの可視光(波長:380~780nm)を用いた可視光通信に基づく位置推定手法の提案がなされている[1]~[4]. 従来の屋内測位技術である無線 LAN, 赤外線, 超音波を用いるものと比較して, 高い精度を持つ, 電波干渉が無い, 既存インフラとの互換性があるといった利点がある. 提案されている手法において, 位置情報を表わす ID(Identification)(以下, 可視光 ID)を, LED 照明を識別することにより取得する必要がある. つまり, LED 照明が可視光 ID 送信機となる.

照明器具を送信機として使用する場合, 送信機能を付加しても, 照明としての機能が失われないようにすることが重要である. 具体的には, 使用用途に合わせた高い演色性を持たなければならない. 演色性とは, 光源が色の見え方に対する性質を表わすものであり, 演色性が高い光源ほど照らされる物体の色の再現性が高くなる. さらに, 近年, HCL (Human Centric Lighting)の普及により, LED 照明の調光調色を行うことでヒトのサーカディアンリズムに働きかけることが可能な照明設計が普及している. サーカディアンリズムとは, 約 24 時間周期の体内リズムであり, 体温やホルモンの分泌などの体内環境の調整を担っている. 光がサーカディアンリズムに与える影響は大きく, 夜間に昼間と同等の照明光を浴び続けるとサーカディアンリズムに乱れが生じ, 睡眠障害や生活習慣病などの様々な病気の原因にもなる. サーカディアンリズムに影響を与える光の明るさを定量的に捉える単位として, 2014 年に Lucas らにより提唱されたメラノピック照度がある[5]. メラノピック照度を制御し, サーカディアンリズムを整える働きをもつサーカディアン照明の需要が高まっている. このような照明の実現のために, マルチチップ LED 照明を使用することで照明光のスペクトルを調整し, メラノピック照度を制御することが可能でありながら, 高い視覚性能も持ち合わせる照明の設計が提案されている[6]~[9].

我々のグループでは, 8 色のマルチチップ LED で構成される LED 照明の各 LED の強度比を変化させることで, 照度, 色温度が同一でメラノピック照度を制御できる可視光 ID 送信機の実現性を明らかにした[4][10]. 本論文では, さらに演色性を考慮に入れ, 送信機がより実用的なサーカディアン照明としての実現性をシミュレーションにより検討した.

2. 可視光 ID 送信機

2.1 構成

可視光 ID 送受信システムの模式図を図 2.1 に, マルチチップ LED 照明を構成する各 LED の基準となる相対スペクトル分布を図 2.2 に示す. 送信データである ID を, 送信機を構成する各 LED の強度比 k_n ($n = 1 \sim 8$)を変化させることで発生させる. この各 LED の強度比が光符号となる. 強度比に対応した電圧を LED に印加し, 拡散板により混色させることで生成された照明光により ID 通信を行う. 生成された光源のスペクトル分布 $S(\lambda)$ は, (2.1)式により表わされる. 受信機には分光器を使用し. 分光器からの出力値 $P(\lambda)$ を解析することにより LED1~8 の強度比を認識し, 対応する ID 情報を復号する. 従って, 送信機のスペクトル分布で ID を送信することが可能となる.

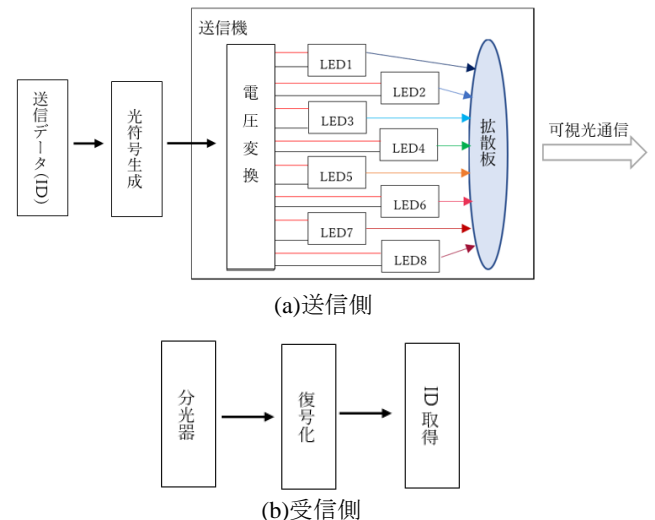


図 2.1 光 ID 送受信システムの模式図

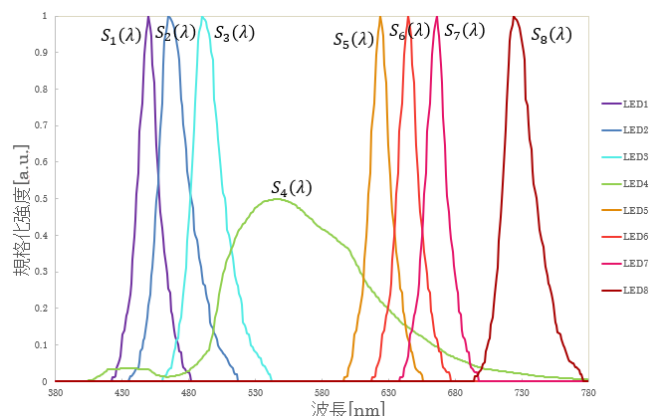


図 2.2 マルチチップ LED 照明のスペクトル分布

[‡] 京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科
Graduate School of Science and Technology, Kyoto Institute of
Technology

$$S(\lambda) = k_1S_1(\lambda) + k_2S_2(\lambda) + k_3S_3(\lambda) + S_4(\lambda) + k_5S_5(\lambda) + k_6S_6(\lambda) + k_7S_7(\lambda) + k_8S_8(\lambda) \quad (2.1)$$

また、図 2.2 に示したような LED1~3, 5~8 が 1.0, LED4 が 0.5 の強度で発光しているときの各 LED の照度 $E_1 \sim E_8$ の照度, および LED1~8 のピーク波長 λ_n ($n = 1 \sim 8$) を表 2.1 に示す. λ_n の単位は nm, E_n は lx である.

表 2.1 LED1~8 の照度・ピーク波長

n	1	2	3	4	5	6	7	8
λ_n	450	465	490	546	624	645	666	724
E_n	0.82	3.21	28.2	128.2	16.1	8.49	4.33	0.57

送信機を構成する各 LED の強度比 k_n は, 受信機における雑音の影響を考慮し, 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 の 6 段階で変化させる. なお, LED4 は, 照明の演色性を高めるために広いスペクトル領域をカバーできる LED を用い, 常に 0.5 の強度となるよう設定した. 従って, 最大で 279936=67 通りの光符号 ID を生成できる.

2.2 設計

本システムの送信機は, 可視光 ID 送信機であると同時にサーカディアン照明としての要件を満たすことを目的であり, 照明としての視覚的性能, およびメラノピック照度制御能力を有している必要がある. そこで, 本研究では, 視覚的性能として, 以下の 3 つの条件を設定する.

- ① 平均演色評価数 $R_a \geq 80$
- ② 照度が一定
- ③ 送信機の光源色が ANSI C78.377 で規定される相関色温度の範囲内に存在

①について, 平均演色評価数は照明の演色性を定量的に示した数値であり, 一般照明器具にも演色性を表わす指標として導入されている. ②について, 本研究では, 人間が明るさの変化を知覚しない範囲を照度一定と見なす. 一定とする照度を E_x とすると,

$$0.92E_x \leq E \leq 1.06E_x \quad (2.2)$$

を満たす照度 E を送信機が持つとき, 送信機の照度が一定であるとして [11]. 送信機の照度 E は (3.2) 式により計算する.

$$E = k_1E_1 + k_2E_2 + k_3E_3 + E_4 + k_5E_5 + k_6E_6 + k_7E_7 + k_8E_8 \quad (2.3)$$

③について, 一般に, 照明光の色を表わす相関色温度は ANSI C78.377 の規格に基づき 2700K~6500K を 8 段階に分けられ [12], CIE 1931 xy 色度図上の 8 段階の相関色温度と, そのばらつきの許容範囲が示されており, 図 2.3 に示す. 従って, 照明として使用するには, 送信機の光源色が許容範囲内に入っている必要がある.

次に, メラノピック照度について, 送信機のメラノピック照度の大きさは CIE S 026/E:2018 において定義されている MELR (Melanopic Efficiency of Luminous Radiation) という (2.3) 式により表わされる値により評価する. $N_z(\lambda)$ はメラノプシンの分光感度特性, $V(\lambda)$ は標準比視感度, K_m は標準

視感効率が $K_m = 683 \text{ lm/W}$, $S(\lambda)$ は送信機の光源のスペクトル分布である.

$$MELR = \frac{\int_{380}^{780} S(\lambda)N_z(\lambda)d\lambda}{K_m \int_{380}^{780} S(\lambda)V(\lambda)d\lambda} \quad (2.3)$$

MELR が許容範囲を ± 0.05 とし, 0.5~1.2 の 8 段階を設定する.

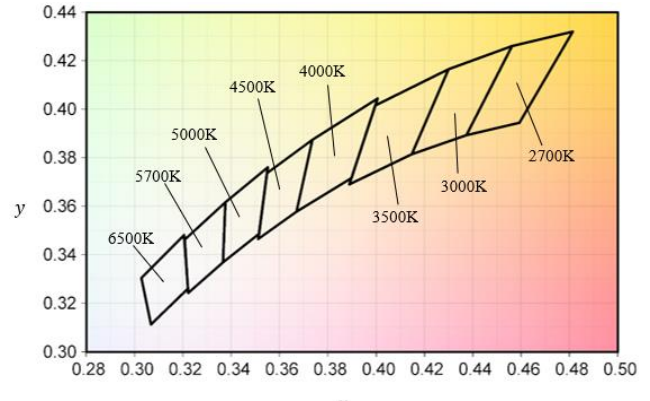


図 3.2 ANSI C78.377 の色度図上の色温度の範囲

3. シミュレーション評価

送信機が生成可能な 279936 通りの光符号には, 2.2 節で示した照明としての視覚性能を持ち合わせていないものも含まれる. そこで, すべての光符号に対して前節で述べた条件を満たすかどうか, シミュレーションによる評価を行い, サークディアン照明として使用可能な可視光 ID 送信機の実現性を検討する.

3.1 内容

作成したシミュレーションのアルゴリズムについて述べる. 図 3.1 にシミュレーションの処理フローを示す.

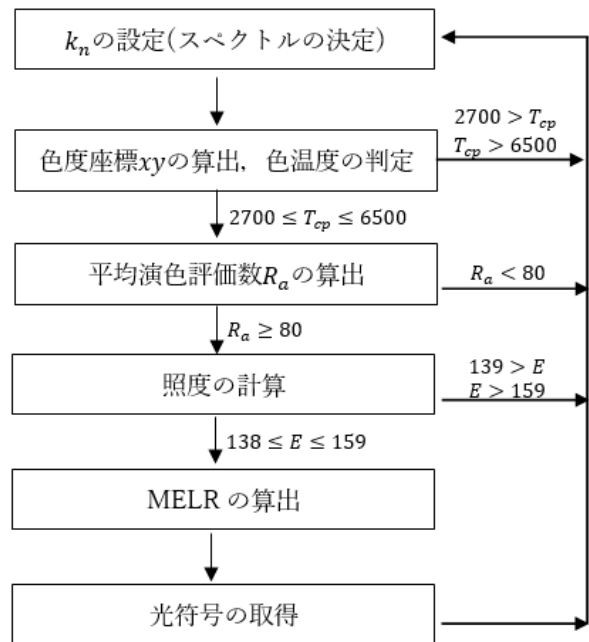


図 3.1 シミュレーションの処理フロー

まず、送信機を構成する各 LED の強度比 k_n を決定し、生成される光源のスペクトル分布を得る。得られた送信機のスペクトル分布より、CIE 1931 色度座標 xy を算出する [13]。得られた色度座標 xy に対して、ANSI C78.377 で定義される各相関色温度色温度の範囲内に存在しているかを判定する。2700K~6500K と判定された光符号に対して、平均演色評価数 R_a を算出 [14] し、 $R_a \geq 80$ であればその照明光の照度 E を (2.2) 式より算出する。そして、得られた照度 E に対して、照度が一定であるかを判定する。本シミュレーションでは、一定とする照度を $E_x = 150 \text{ lx}$ と設定した。従って、138~159 lx が照度一定と見なす範囲となる。最後に、以上の条件を満たした光符号に対して、(2.3) 式より MELR を算出する。

3.2 結果

3.1 節で示したシミュレーションにより 279936 通りの光符号を評価し、8 段階の MELR と 2580K~7040K における相関色温度 T_{cp} について、視覚性能として定めた条件①~③を満たす光符号を MELR- T_{cp} 特性にプロットしたものを図 3.2 に示す。また、図 3.2 について、ANSI C78.377 で定められた 8 段階の相関色温度と 8 段階のメラノピック照度を区画に分け、各区画内の光符号数を表 3.2 に示す。

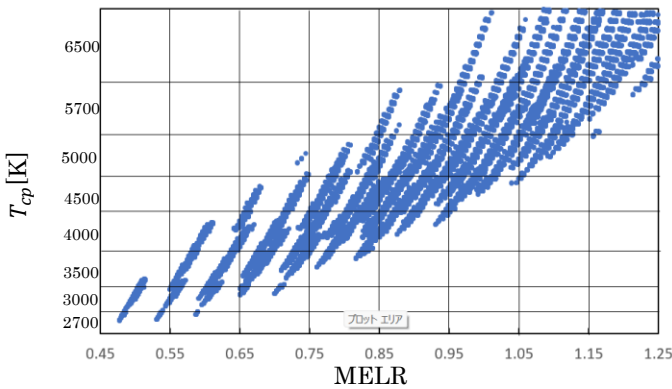


図 3.2 MELR- T_{cp} へのプロット図

ここで、本システムの応用例として、屋内におけるドローンのウェイポイント飛行のための自己位置情報の送受信を本システムで行うことを考える。ドローンに設定可能な最大ウェイポイント数が 99 個未満 [15] であるとする、光

符号が 99 個以上生成できれば十分な数の ID を送信できる。先行研究 [4][6] では、色温度を同一としており、先行研究 [1][3][4] においては、複数の LED 照明、すなわち送信機を同じ空間内で同時に使用する必要がある。よって、相関色温度が同一であることが望まれる。表 3.2 より、各色温度において十分な数の ID を送信できる MELR の取り得る範囲を表 3.3 に示す。表 3.3 より、相関色温度が同一で 2~4 段階の MELR の値を取り得ることができる。しかし、サーカディアン照明の一例 [16] で示された MELR の範囲をとりうるには、ひとつの相関色温度だけでは本送信機では不可能であり、3000K と 4500K の 2 つのように、調色を伴うことでその範囲を達成できる。

表 3.3 各相関色温度における MELR の範囲

相関色温度 [K]	MELR
2700	
3000	0.5~0.7
3500	0.6~0.7
4000	0.6~0.9
4500	0.7~1.0
5000	0.8~1.1
5700	0.9~1.2
6500	1.0~1.2

以上より、条件①~③を満たす十分な数の光符号を生成し、ひとつの相関色温度のみのサーカディアン照明は実現できないことがわかる。そのため、サーカディアン照明として実現するためには、調色が必要であることがわかる。

4. まとめ

本研究では、8 色のマルチチップ LED 照明を光源とする可視光 ID 送信機の検討を行った。送信機が生成可能な光符号を、シミュレーションにおいて演色性、照度、相関色温度の観点を取り入れ、より実用的な照明として使用可能となる光符号の評価を行った。また、その光符号についてメラノピック照度を算出することで、送信機の照度、相関色温度を一定としてメラノピック照度を変化できるようなサーカディアン照明としての実現性の検討を行った。その結果、屋内におけるドローンのウェイポイント飛行のための自己位置情報の送受信を本送信機の応用例とした場合、十

表 3.2 各 MELR, 相関色温度における光符号の個数

		MELR							
		0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2
相関色温度	6500	0	0	0	0	0	419	1636	1888
	5700	0	0	0	17	568	1896	1783	346
	5000	0	0	15	641	1572	1823	572	12
	4500	0	0	382	1249	1753	886	9	0
	4000	0	333	1295	1999	594	12	0	0
	3500	80	1037	1228	316	0	0	0	0
	3000	306	493	113	0	0	0	0	0
	2700	95	10	0	0	0	0	0	0

分な数の光 ID をひとつの相関色温度のみでは十分な範囲の MELR を得ることができず、メラノピック照度調整が可能なサーカディアン照明として使用するには、調色が必要であることを明らかにした。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 23K03853 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Canyu Xie, Weipeng Guan, Yuxiang Wu, Liangtao Fang, Ye Cai “The LED-ID Detection and Recognition Method Based on Visible Light Positioning Using Proximity Method,” IEEE Photonics Journal, Volume 10, Number 2, (2018)
- [2] Weipeng Guan, Shihuan Chen, Shangsheng Wen, Zequn Tan, Hongzhan Song, Wenyuan Hou “High-Accuracy Robot Indoor Localization Scheme Based on Robot Operating System Using Visible Light Positioning”, IEEE Photonics Journal, Volume 12, Number 2, (2020)
- [3] Heqing Huang, Aiyang Yang, Lihui Feng, Guoqiang Ni, Peng Guo, “Indoor Positioning Method Based on Metameric White Light Sources and Subpixels on a Color Image Sensor,” IEEE Photonics Journal, Volume 8, Number 6, (2016).
- [4] 大柴 小枝子, 井下 竜之介, 青木 茜, “LED 照明光通信と移動体位置認識への応用,” 6G/7G のキーデバイス, pp.89-97, (2023).
- [5] R. J. Lucas, S. N. Peirson, D. M. Berson, T. M. Brown, H. M. Cooper, C. A. Czeisler, et al., “Measuring and using light in the melanopsin age,” Trends Neurosci, vol. 37, no. 1 (2014).
- [6] Jingxin Nie, Zhizhong Chen, Fei Jiao, Chengcheng Li, Jinglin Zhan, Yifan Chen, Yiyong Chen, Xiangning Kang, Yongzhi Wang, Qi Wang, Weimin Dang, Wentian Dong, Shuzhe Zhou, Xin Yu, Guoyi Zhang, Bo Shen, “Tunable LED Lighting With Five Channels of RGCWW for High Circadian and Visual Performances,” IEEE Photonics Journal, Volume 11, Number 6, (2019).
- [7] J. Cerpentier, Y. Meuret “Fundamental Spectral Boundaries of Circadian Tunability,” IEEE Photonics Journal, Volume 13, Number 4, (2021).
- [8] YI JIAU SAW, VINEETHA KALAVALLY, CHEE PIN TAN, “The Spectral Optimization of a Commercializable Multi-Channel LED Panel With Circadian Impact,” IEEE Access, Volume 8, (2020)
- [9] TINGZHU WU, YUE LIN, HONGHUI ZHU, ZIQUAN GUO, LILI ZHENG, YIJUN LU, TIEN-MO SHIH, ZHONG CHEN, “Multi-function indoor light sources based on light-emitting diodes—a solution for healthy lighting,” Optics EXPRESS, Volume 24, Number 21, (2016).
- [10] 青木茜, 大柴小枝子, “メラノピック照度制御によるサーカディアンリズムを考慮した LED 照明の評価,” 信学技報, vol. 121, no. 395, (2022)
- [11] 鹿倉智明 森川宏之 中村芳樹 “オフィス照明環境における明るさの変動知覚に関する研究,” 照明学会誌, 第 85 巻, 第 5 号, (2001)
- [12] ANSI C78.377 Electric Lamps Specifications For The Chromaticity Of Solid State Lighting Products” (2015)
- [13] JIS Z 8781 測色
- [14] JIS Z 8726 (Z8726:1990) 光源の演色性評価方法
- [15] 株式会社システムファイブ, 製品仕様, <https://info.system5.jp/dronefaq/archives/4318>, (参照: June 2023)
- [16] E-N Madias, E Patrikios, C Grigoropoulos, L Doulos, “DESIGN AND DEVELOPMENT OF A SUSTAINABLE ENVIRONMENTALLY FRIENDLY AND HUMAN CENTRIC LUMINAIRE,” IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, (2022)