

LED サーカディアン照明を用いた VLP(Visible Light Positioning) システム用光 ID の評価 Visible Light Positioning system using LED circadian lighting

坂根 頌悟[†]
Shogo Sakane

大柴 小枝子[†]
Saeko Oshiba

1. はじめに

近年、物流の現場や工場、倉庫において設備点検等様々な用途に向け屋内移動体の自律的な移動が期待されている。移動体の自律的な移動は、移動体の移動ルート上にウェイポイント(Way Point)と呼ばれる地点情報をあらかじめ設定しておき、移動体が取得する自己位置情報に基づいて次々とウェイポイントを通過するという手法が用いられている[1][2]。屋外では GPS(Global Positioning System)による自律的な位置情報の取得が可能であるが、屋内では GPS の電波が遮断されてしまい、自律的な位置情報の取得が困難となる。そのため、GPS に代替する屋内での位置推定手法が重要となっている。我々のグループでは、LED(Light Emitting Diode)照明を用いた屋内位置推定手法である VLP(Visible Light Positioning)に着目し検討を進めてきた[3][4]。VLP では、LED 照明と受信機からなる光 ID 送受信システムを用いており、LED 照明を光 ID(Identification)送信機として使用し、受信機で LED 照明を識別することで位置情報を表わす光 ID を受信する。

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、メラノピック照度が提唱されている[5]。屋内で、人が作業等で長時間メラノピック照度が高い照明光にさらされることで体は意図せず覚醒し、サーカディアンリズムの乱れを引き起こす。そのため、VLP システムに用いる照明には、メラノピック照度を状況に応じて調整可能であるサーカディアン照明の使用が望まれる。我々は、マルチチップ LED 照明を使用し、メラノピック照度を変化させても色が変わらないサーカディアン照明について検討してきた[6]~[8]。

そこで我々は、このマルチチップ LED で構成されるサーカディアン照明を VLP における光 ID の送受信へ応用することに着目した。光 ID を送信するとき、マルチチップ LED 照明を構成する各 LED の強度比を変える。そのため、色や演色性といった視覚的性能が低下し、サーカディアン照明としての要件を満たさなくなる可能性がある。本研究では、サーカディアン照明を用いた光 ID 送受信システムを試作し、光 ID 送信時の送信機となるサーカディアン照明の照度、演色性、メラノピック照度の評価を行い、試作システムがサーカディアン照明として使用しつつ光 ID を送受信可能であることを実験的に実証する。

2. 光 ID 送受信システム

2.1 システム構成

本研究における光 ID 送受信システムの構成を図 2.1 に示す。本システムは送信機に 8 色の異なる色で発光するマルチチップ LED 照明を使用し、各 LED の強度比を変化させ

[†] 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

ることで光符号を生成する。強度比に対応した電流を各 LED に印加し、拡散板により混色させ生成された照明光で ID 通信を行う。受信機には分光器を使用し、分光器からの出力値を解析して LED1~8 の強度比を認識し、対応する光 ID を復号する。本システムを応用する際、照明の位置をウェイポイントと設定する。そのため本研究では、事前に番号付けされた光 ID を順に連続で送受信することとする。

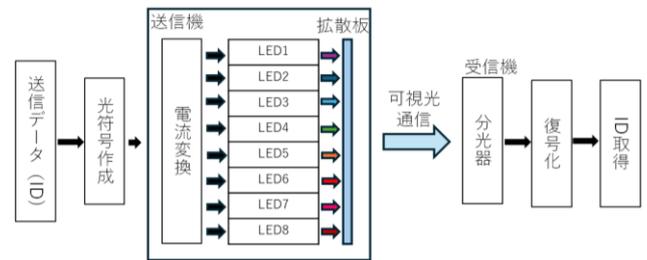


図 2.1 光 ID 送受信システムの構成

2.2 サーカディアン照明を用いた光 ID 送信機

本システムの光 ID 送信機には、光 ID 送信機能とサーカディアン照明機能の両方を持つ必要がある。以下に、本研究で送信機に課す要件について述べる。

2.2.1 光 ID 送信数の要件

本システムはドローンの自律飛行への応用を目的とする。想定する小型ドローンの設定できる最大ウェイポイント数が 99 個未満[9]であることから光 ID 送信に関する要件は、「99 個の光 ID を送信可能」とする。

2.2.2 サーカディアン照明の要件

先行研究[7][8]で示されている条件に基づき、本研究では以下の 4 つのサーカディアン照明の要件①~④を満たすことを要件とする。

- ① 光源色が JIS 規格で定義される白色の範囲内[10]
- ② 平均演色評価数 R_a が 80 以上[11]
- ③ 照度 E が E_x で一定 ($0.88E_x \leq E \leq 1.13E_x$) [12]
- ④ CAF(Circadian Action Factor) が表 2.1 に示す範囲内

2.2.3 光 ID 符号化方法

本システムで送信機として使用しているマルチチップ LED 照明には、表 2.2 に示す OSRAM 製チップ LED が複数個搭載されている。また、図 2.2 に送信機を構成する各 LED の基準スペクトル分布を示す。各 LED の強度比を kn ($n=1\sim 8$) とし、送信機の光源色のスペクトル $\hat{S}(\lambda)$ を (2.1) 式で表わす。 kn は、LED4 のみ常に $k_4=0.5$ の強度とし、その他の LED 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。 $\hat{S}(\lambda)$ 、照度を評価し送信機が①~④を満たすような光符号数を表 2.1 に示す。

2.2.1 と併せると、4 段階それぞれの CAF において 99 個ずつの光符号を選択し、光 ID を送信する。

$$\hat{S}(\lambda) = k_1\hat{S}_1(\lambda) + k_2\hat{S}_2(\lambda) + k_3\hat{S}_3(\lambda) + \hat{S}_4(\lambda) + k_5\hat{S}_5(\lambda) + k_6\hat{S}_6(\lambda) + k_7\hat{S}_7(\lambda) + k_8\hat{S}_8(\lambda) \quad \dots (2.1)$$

表 2.1 CAF の範囲と光符号数

CAF 範囲	光符号数	分類名
0.71688 < CAF ≤ 0.81602	2730	W-N
0.61088 < CAF ≤ 0.70469	4617	W-W
0.52414 < CAF ≤ 0.61088	2156	W-WW
0.40034 ≤ CAF ≤ 0.52414	354	W-L

表 2.2 LED1~8 の仕様

番号	型番	ピーク波長 [nm]	照度 [lx]
1	GD CSSPM1.14	450.1	0.82
2	GB QSSPA1.13	466.3	3.21
3	GC VJLPE1.13	492.8	28.2
4	GG VJLPE1.F3	560.2	128.2
5	LA H9PP	625.6	16.1
6	LS H9PP	639.8	8.49
7	GH CSSRML.24	658.6	4.33
8	GF CSSRML.24	731.9	0.57

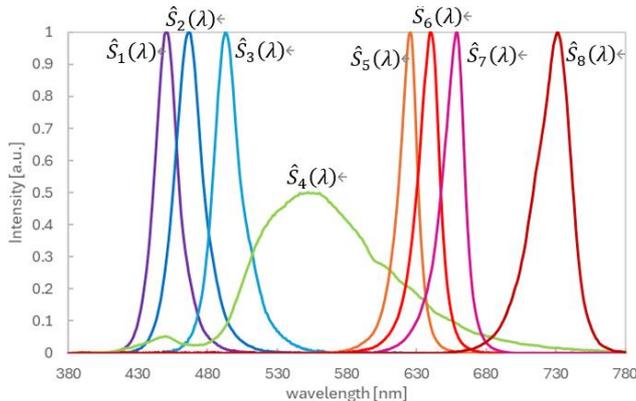


図 2.2 LED1~8 の基準スペクトル分布

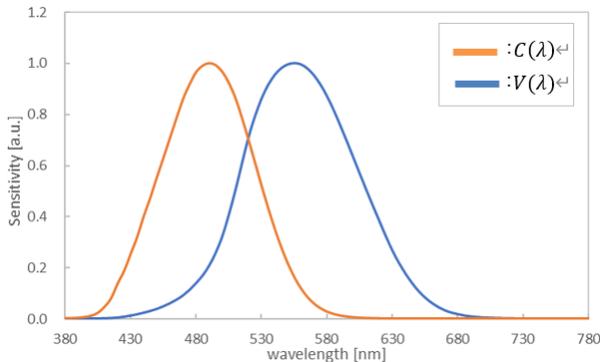


図 2.3 メラノプシン感度曲線, 標準比視感度

CAF は(2.2)式で定義されるメラノピック照度を評価する値である。ただし、 $C(\lambda)$ をメラノプシン感度曲線、 $V(\lambda)$ を

標準比視感度とし図 2.3 に示す。

$$CAF = \frac{\int S(\lambda)C(\lambda)d\lambda}{\int S(\lambda)V(\lambda)d\lambda} \quad \dots (2.2)$$

2.3 光 ID 受信

受信機には分光器(浜松ホトニクス製 C13555MA)を使用し、出力されたスペクトル情報を MATLAB により解析することで光 ID の復号を行う。分光器からの出力値 $X_{out}(\lambda)$ に対して式(2.3),(2.4)に示す前処理を行い得られた $X_r(\lambda)$ を受信スペクトルとして扱う。ただし、 $I_{dark} = 3874.49$ であり分光器の暗電流成分である。また、 $t(\lambda)$ は図 2.4 に示す分光器の相対分光感度特性である。

$$X_0(\lambda) = \frac{X_{out}(\lambda) - I_{dark}}{t(\lambda)} \quad \dots (2.3)$$

$$X_r(\lambda) = \frac{X_0(\lambda)}{2X_0(560.2)} \quad \dots (2.4)$$

本システムでは、送信する 99 個ずつの光 ID に対応する強度比から生成される基準スペクトル $\hat{S}_m(\lambda)$ を既知とし、 $\hat{S}_m(\lambda)$ と受信スペクトル $X_r(\lambda)$ との平均二乗誤差 MSE から光 ID を復号する。(2.5)式より $MSE_1, MSE_2, \dots, MSE_{99}$ を求め、 MSE_m を最小とする m から $X_r(\lambda) = \hat{S}_m(\lambda)$ とする。 $\hat{S}_m(\lambda)$ から対応する光 ID を復号できる。

$$MSE_m = \sum_{\lambda=380}^{780} \{\hat{S}_m(\lambda) - X_r(\lambda)\}^2 \quad (2.5)$$

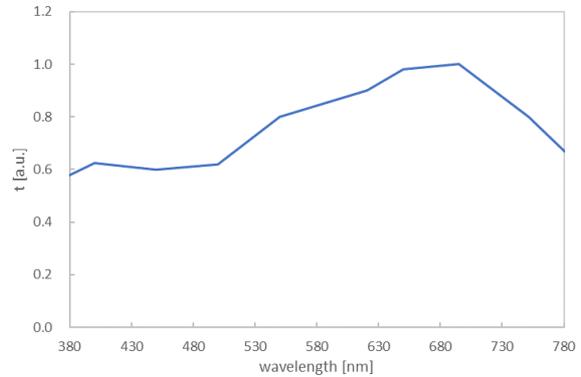


図 2.4 分光器の相対分光感度特性

受信の精度は(2.6)式に示す光 ID 認識率 P を用いて評価する。ただし、 U を受信数、 d を正しく復号できた個数とする。本システムは一つの受信地点で複数個の光 ID を受信する。得られた光符号すべてに対して復号を行い、最も個数が多い光 ID をその位置における受信 ID とする。そのため、認識率が 50% を超えていれば正しく光 ID を受信することができる。

$$P = 100 \times \frac{d}{U} \quad \dots (2.6)$$

3. 実験

3.1 実験系

実験系の模式図を図 3.1 に示す。送信機と測定機器との間隔は 1m である。照度計は FUSO 製 TM-209M を使用した。送信機の LED1-8 には、それぞれ直流電源(松定プレシ

ジョン製 PL-18-2)が接続されており, 図 3.2 に示す各 LED の強度-電流特性に基づき, 光符号を構成する強度比となるよう各 LED に電流を印加する. ただし, LED4 は常に 270mA 印加する. なお, 電流値の設定精度を表 3.1 に示す.

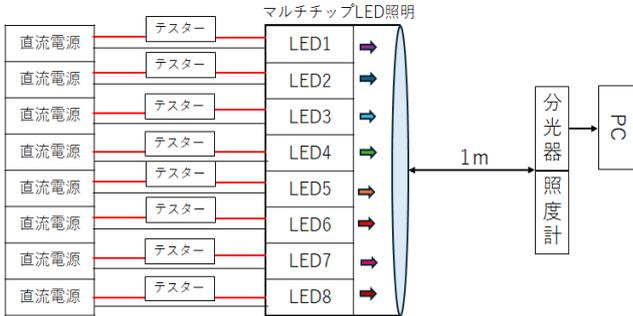


図 3.1 実験系模式図

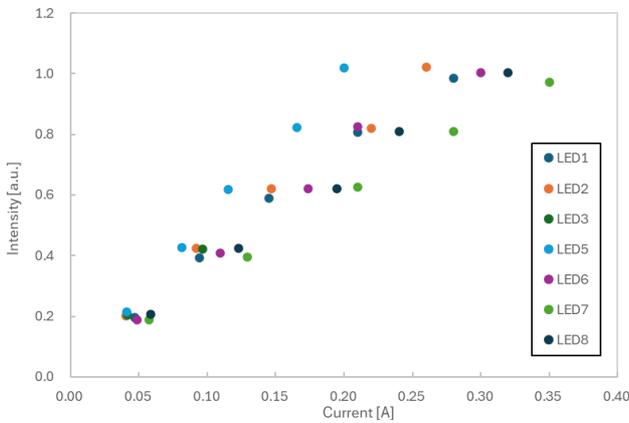


図 3.2 LED1-3, 5-8 の電流強度特性

表 3.1 電流値の設定精度

電流値	分解能	精度
200 mA 未満	0.1mA	±(1.5%+5)
200 mA 以上	10mA	±(3.0%+10)

3.2 実験結果

4 段階の CAF の範囲における 99 個の光 ID 送受信の実験結果を図 3.3~3.6 に示す. 受信数 $U=1000$ 個である. 本実験結果では, すべての光 ID で認識率が 50%を超えており, 本システムで正しく ID を受信できる.

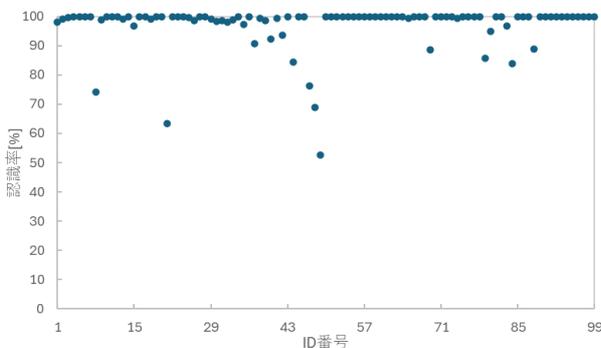


図 3.3 W-N の光 ID 認識率

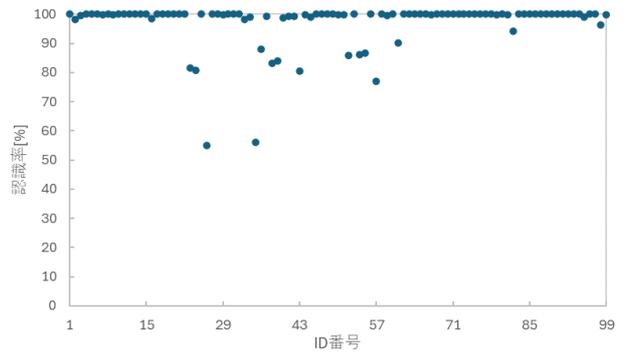


図 3.4 W-W の光 ID 認識率

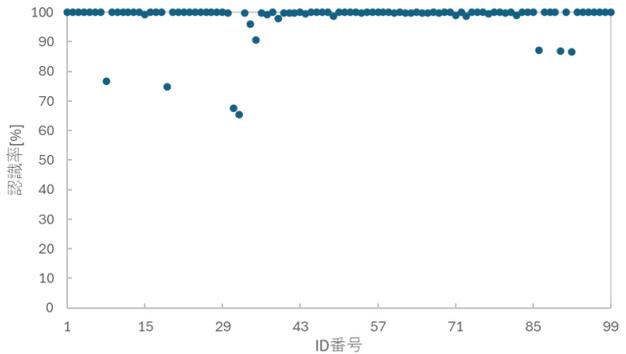


図 3.5 W-WW の光 ID 認識率

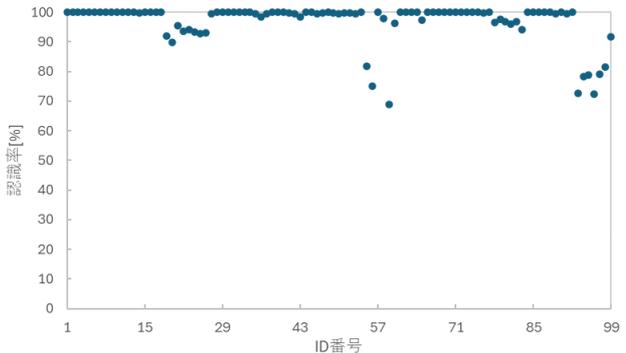


図 3.6 W-L の光 ID 認識率

次に, 照度の測定結果を図 3.7 に示す. 一定とする照度を 200 lx とすると, 照度一定の範囲は 176lx~226lx となり, 測定されたすべての光符号で照度が一定である.



図 3.7 照度の測定結果

最後に、測定した光符号の平均演色評価数 R_a 、CAFを算出した。結果を図3.8~3.11に示す。なお、計算に用いた送信機のスペクトルは、受信した1000個の $X_0(\lambda)$ から各波長における平均値を用いる。

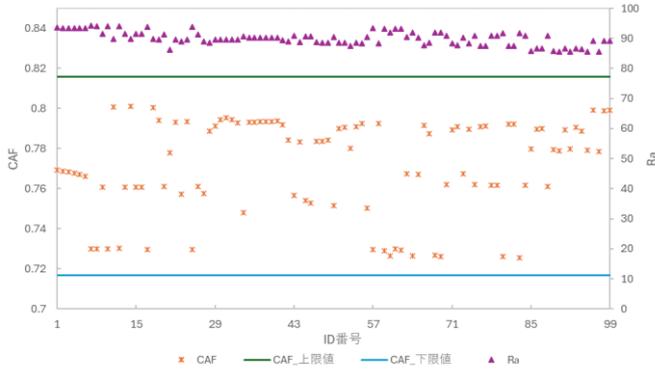


図 3.8 W-N の R_a 、および CAF

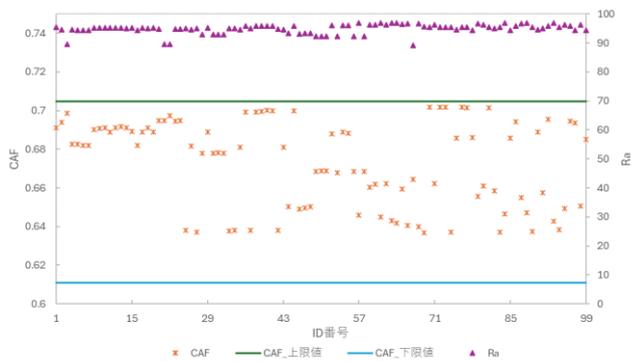


図 3.9 W-W の R_a 、および CAF

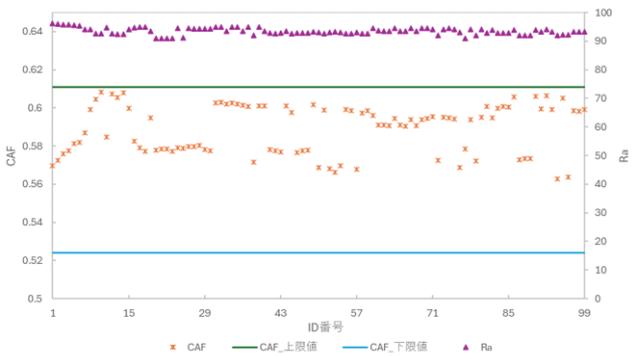


図 3.10 W-WW の R_a 、および CAF

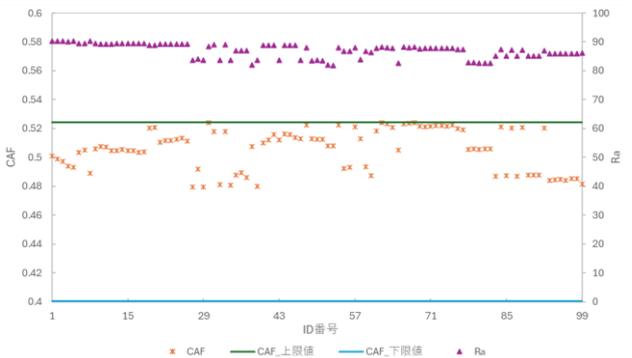


図 3.11 W-L の R_a 、および CAF

図 3.8~3.11 より、すべての光符号で $R_a \geq 80$ 、および CAF が表 2.2 に示した範囲内である。以上より、本システムの送信機が、サーカディアン照明の要件②~④を満たす。

4. まとめ

8色のマルチチップLEDから構成されるサーカディアン照明を用いた光ID送受信システムを試作し、光ID送信時の送信機となるサーカディアン照明の照度、演色性、メラノピック照度の評価を行った。試作システムで、4段階の異なるサーカディアン照明レベルCAFでの光ID送受信実験を行った。結果、99個の光IDすべてで認識率が50%を超え、正しく光IDを受信可能であった。この時、光ID送信時のスペクトルと照度を評価し、すべての光IDで $R_a \geq 80$ 、照度が一定、適切なCAFを保っていた。このことからサーカディアン照明として使用しつつ光IDを送受信可能であることを実験的に実証した。

謝辞

本研究はJSPS科研費JP23K03853の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 下ノ村和弘, "ドローンの技術的側面-現状および課題と展望-", 国際交通安全学会誌, Vol.44, No.2, pp.16-23, Oct.2019年.
- [2] 清水尚吾, 藤野雄介, 齋藤政伸, 木内健太郎, 横田隆之, 齋藤隆仁, 黒田洋司, "屋内外環境にシームレスな自律移動ナビゲーションシステム," 計測自動制御学会論文集, vol.51, No.8, pp.545-550, Aug. 2015年.
- [3] Ryunosuke Inoshita, and Saeko Oshiba, "3D VISIBLE LIGHT POSITIONING METHOD FOR DRONES WITH TILT CONSIDERATION," 14th Asia Lighting Conference, pp32-39, Tokyo, Japan, Aug.2023.
- [4] 井下竜之介, 大柴小枝子, "照明とイメージセンサを用いたドローンの3次元自己位置推定手法に関する研究," 信学技報, vol. 123, no. 439, CS2023-110, pp. 35-40, March 2024.
- [5] Rober J. Lucas et al., "Measuring and using light in the melanopsin age," Trends Neurosciences vol.37, iss.1, pp.1-9, Jan. 2014.
- [6] 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, CS2021-84, pp. 46-49, March.2022.
- [7] Shogo Sakane, and Saeko Oshiba, "VISIBLE LIGHT ID TRANSMITTER USING HIGH CIRCADIAN AND VISIBLE PERFORMANCES LED LIGHTING," 14th Asia Lighting Conference, pp130-135, Tokyo, Japan, Aug.2023.
- [8] 坂根頌悟, 大柴小枝子, "マルチチップLED照明を用いたサーカディアン照明による光ID送受信システムの検討," 信学技報, vol. 124, no. 30, CS2024-4, pp. 5-10, May 2024年
- [9] 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)
- [10] JIS Z9112 蛍光灯・LEDの光源色及び演色性による区分
- [11] JIS Z 8726 (Z8726:1990) 光源の演色性評価方法
- [12] Tomoaki Shikakura, Hiroyuki Morikawa, Yoshiki Nakamura, "Perception of Lighting Fluctuation in a Luminous Offices Environment." Journal of Light & Visual Environment, Vol.27, No.2, pp.75-82, 2003