

# グローバルシャッター方式イメージセンサを利用した 可視光通信による屋内測位

中澤陽平<sup>1</sup> 牧野秀夫<sup>2</sup>

**概要** : GPS (Global Positioning System) による屋外での位置情報は地図アプリなど広く応用されている一方で、屋内や地下街での高精度な測位手法は確立されていない。我々は輝度変調した光信号を送信する可視光通信 (Visible Light Communication, VLC) 型 LED 照明を測位用ランドマークとして使用し、カメラが受信した VLC 信号に基づいてランドマークの識別を行う屋内測位手法に着目した。本研究では特に撮像面全体を同時に露光するグローバルシャッター型イメージセンサによる VLC 方式を提案する。

**キーワード** : 可視光通信, 屋内測位, 魚眼レンズ, グローバルシャッター, イメージセンサ

## 1. 研究背景

GPS (global positioning system) による屋外での位置情報はカーナビゲーションシステムや地図アプリなど広く応用されている[1]。近年では位置情報はスマートフォンやタブレット端末などのスマートデバイスによるゲームなどのサービスにも利用されている[2]。さらに屋内においても歩行者のナビゲーションや視覚障害者歩行支援、搬送用移動ロボットの制御など位置情報の応用範囲は広い。しかしながら屋内や地下街では GPS 衛星からの信号減衰による精度の低下が問題となる[3]。屋内での測位手法としては様々なものが提案されているものの、位置計測の精度や施設によって利用できる設備やインフラがあるか否かといった制約により、スタンダードとよべる手法はいまだに確立されていない[4]。Wi-Fi や Bluetooth などの電波による測位は屋内での測位手法の候補の一つである。端末が受信した電波強度を計測することでアクセスポイント (AP) までの距離を推定する手法では、実環境での電波強度の反射・減衰により測距精度が影響を受ける。特にモバイル機器を使用する際には端末の向きによって受信電波強度が変動することが分かっている。また、環境中の電波強度地図をあらかじめ作成しておくフィンガープリンティングと呼ばれる手法では、周囲の AP の増減などにより精度が経年劣化するという問題も存在する[3]。

照明器具から輝度変調した光信号を送信する可視光通信 (visible light communication, 以下 VLC) [5] は屋内測位にも応用可能な技術である。LED (light emitting diode) 照明を測位用ランドマークとして使用し、カメラで受信した VLC 信号に基づいてランドマークの識別を行うことができる。照明器具を利用した VLC では、信号送信のための輝度変調をかけることで照明器具の品質に影響を与える可能性がある。数十 Hz 程度の点滅は人の目にちらつきとして知覚されることが知られており[6]、通常の 30Hz~60Hz のフレ

ームレートのカメラで信号をサンプリングできるビットレートで信号を送信することは実用上問題がある。そのため照明器具での VLC には kHz オーダーの高速な光信号を送受信できることが望ましい。

ローリングシャッター (以下 RS) 方式のイメージセンサ (以下, IS) による信号受信手法[7]では、スマートデバイスに標準搭載されたカメラで高速な光信号を受信できるという利点がある。しかしながら、RS 方式では面光源が必要なので、遠方の点光源を利用するのが難しいという問題がある。また、ローリングシャッター現象という副作用を利用するという特性上、今後モバイル端末に撮像面全体を同時に露光するグローバルシャッター (以下 GS) 方式の IS が搭載されるなどにより RS 現象が改善された場合には原理上この手法は利用できない。

そこで本研究では GS 方式の IS でも利用可能な VLC 信号受信手法を提案する。第 2 節で提案手法の方法を説明する。第 3 節では提案手法の性能を調べるため実験を実施し、第 4 節で実験結果に対する考察を行い、第 5 節で結論を述べる。

## 2. 方法

測位用ランドマークである LED 照明にはそれぞれを識別するための ID が割り当てられ、ID データを LED の輝度を制御することで光信号としてデータを送信する。FPGA (field programmable gate array) やマイコンで固定長  $m$  ビットの ID データを生成し、輝度を平均化したとき照明器具の明るさが一定になるよう、4PPM (pulse position modulation) [10][11]または 2PPM で符号化した ID 情報を送信する。送信ビットレートを  $f_b$ 、カメラのフレームレートを  $f_s$  としたとき  $n = f_b / f_s$  が整数になるよう  $f_b$  と  $f_s$  を設定する。ここで、 $m$  ビット内の特定のビット上で受信のタイミングが同期してしまうのを防ぐため、 $n$  と  $m$  が互いに素となるよう、 $m$  と  $f_b$  と  $f_s$  を適切に選択する必要がある。

<sup>1</sup> 高千穂大学  
Takachiho University  
<sup>2</sup> 新潟大学  
Niigata University

受信側では GS 型のカメラを利用することで、画像上の画素ごとに光信号を受信・復号を行う。各画素の輝度を複数フレームにわたりサンプリングすることで、その画素上の光信号を受信する。カメラの露光時間を十分に短く設定したうえで、フレームレートより高い周波数で送信される光信号の受信を行う。撮影フレームのある画素(x, y)に対して、過去  $m$  フレーム分の同じ位置の画素データを並べることで、 $i$  フレーム目における画素 (x, y) 上での受信信号とする。輝度値のデータはアンダーサンプリングされているため、サンプリングしたデータ列の順序を入れ替えることで元のデータを復元する[8]。GS 方式 IS により全画素上で復号処理が可能のため、RS での受信手法とは違い 1 画素でも光源が見えていれば信号の受信が可能である。

その後、あらかじめ用意したランドマークの ID と 3 次元座標との対応関係のデータベースを用いて、受信した ID を元にランドマークの空間座標を取得する。各ランドマークの空間座標と画像上での座標よりカメラの位置と姿勢を求めることが可能である[9]。

### 3. 実験

第 2 節で示した手法により、光信号受信を正しく行うことができるか確認するための実験を実施した。実験概要を図 1 に示す。VLC 送信機とカメラを距離  $L$  の間隔で向かい合わせに設置し、画像上の各画素で光信号の復号を行う。特に今回は、近接する位置に LED を 4 個配置した際に画像空間上で各 LED の ID を正しく識別できるか、送信機とカメラ間の距離  $L$  を変化させながら確認する。

#### 3.1 実験方法

VLC 送信機を図 2 (a)に示す。送信機には直径 5mm の砲弾型 LED が 10mm の間隔で 4 個設置されている。送信機は 5V の AC アダプタから給電することで動作する。送信機内部には ID 信号生成用の FPGA と ID 信号に基づいて LED を駆動するためのドライバー回路が含まれる。距離を 0.5m 刻みに変化させながら各距離において 2,000 フレームを撮影する。そして、保存した画像列に対しオフラインで復号処理を施す。

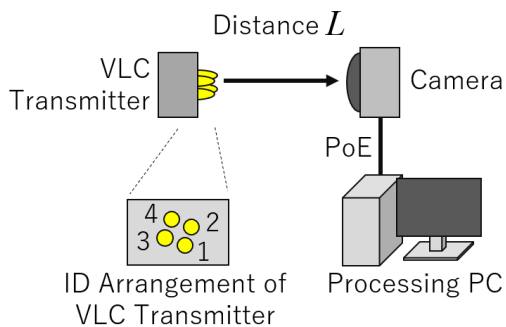


図 1 実験概要  
 Figure 1 Experiment.

表 1 に送信 ID とバイナリデータの一覧を示す。今回はカメラのフレームレート  $f_s$  を 720fps, 送信ビットレート  $f_b$  をその 2 倍の 1,440bps と設定した。また,  $n=2$  に対し, 互いに素となるよう送信 ID のビット長  $m=13$  と設定した。4 個の各 LED には 2PPM で符号化したペイロードデータにデータの先頭を表すプリアンプルとチェックサムを含めた 13 ビットの ID データを割り当てた。提案手法では送信機同士の同期が不要なため, LED 毎に送信開始のタイミングを 3 ビットずつずらしておく。輝度データ受信後は表 2 の入れ替えテーブルに基づいて元の ID データを復元する。

#### 3.2 使用機器

送信データ生成用の FPGA ボードの仕様は表 3 の通りである。FPGA の内部クロック周波数 133MHz より,  $133,000,000 / 1,440 = 92,361$  をカウントすることで, ビットレート 1,440bps の送信信号を生成する。ただし FPGA の内部クロック周波数には, 個体差として最大で  $\pm 5\%$  の誤差が含まれる[12]。そこで, 133MHz のクロック信号の波長をオシロスコープ (DS1104Z, Rigol Technologies Inc., 最大 1GSa/s) で実測し, あらかじめ上記カウント数を加減することでビットレートのキャリブレーションを行った。今回使用した FPGA ボードでは,  $-2.66\text{MHz} (-2\%)$  の補正を行った。

撮影用カメラの外観を図 2 (b)に示す。カメラの各パラメータを表 4 に示す。Genie Nano C640 は GS 方式の CMOS (complementary metal-oxide semiconductor) 型 IS である PYTHON300 を搭載し,  $640 \times 480$  画素の画像を最大 720fps で撮影が可能である。PoE (power over ethernet) で接続が可能で, PoE 対応のスイッチングハブや NIC (network interface card) を使用することで LAN ケーブルのみでデータ転送と電源供給を行うことができる利点がある。広範囲の視野を確保するため, カメラには魚眼レンズ(表 5)を装着する。カメラとレンズを組み合わせた時の重量は約 130g である。また, 画像の撮影と復号処理については表 6 の環境で開発を行った。

表 1 送信 ID 一覧

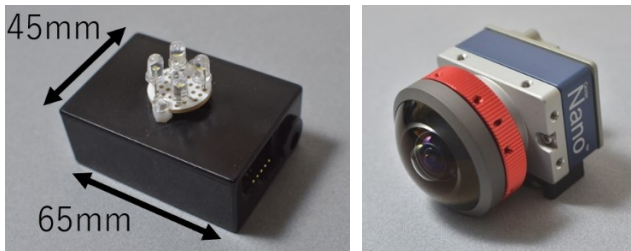
Table 1 ID list.

| ID | Preamble (7) | Payload (4) | Checksum (2) |
|----|--------------|-------------|--------------|
| 1  | 1111000      | 0110        | 01           |
| 2  |              | 1001        | 10           |
| 3  |              | 1010        | 10           |
| 4  |              | 0101        | 01           |

表 2 入れ替えテーブル

Table 2 Swapping table.

| Original index | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6  | 7 | 8  | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|----------------|---|---|---|---|---|----|---|----|---|----|----|----|----|
| Swapped index  | 1 | 8 | 2 | 9 | 3 | 10 | 4 | 11 | 5 | 12 | 6  | 13 | 7  |



(a) VLC 送信機 (b) GS 方式カメラ

図 2 使用機器

Figure 2 Experimental equipment.

表 3 送信データ生成用 FPGA ボード

Table 3 FPGA Board.

|             |                   |
|-------------|-------------------|
| 名称          | TinyFPGA AX2 [13] |
| ロジック数       | 1200LUT           |
| 内部クロック最大周波数 | 133MHz            |
| ボードサイズ      | 30×18 mm          |

表 4 GS 方式カメラ

Table 4 Global shutter camera.

|           |   |
|-----------|---|
| 名称        | Genie Nano C640<br>(Teledyne DALSA Corp.) |
| 画素数       | 640×480                                   |
| 最大フレームレート | 720fps                                    |
| 最小露光時間    | 34us                                      |
| サイズ       | 21×29×44 mm                               |

表 5 魚眼レンズ

Table 5 Fish-eye lens.

|      |   |
|------|---|
| 名称   | Fisheye M12 220<br>(Entaniya Co., Ltd.) |
| 射影方式 | 等距離射影                                   |
| 画角   | 220°                                    |
| F 値  | 2.0                                     |
| 直径   | 40 mm                                   |

### 3.3 結果

0.5m と 2.0m の距離での撮影画像の例を図 3 に示す。0.5m では各 LED がはっきり区別できる。一方 2.0m では、隣接する LED からの光が混在し LED を区別するのは難しい。

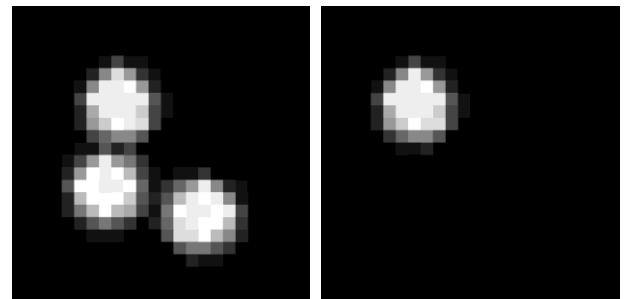
つづいて復号した ID 情報を画像上に配置したものを図 4 に示す。画像中の網掛け部分は信号が存在しかつ復号に成功した画素を示し、黒い部分は信号が存在しないもしくは復号に失敗した画素を表す。0.5m の距離では各 LED に 16～31 ピクセル程度の受信成功画素が存在した。これが 1.0m では 7～11 ピクセル、1.5m では 2～4 ピクセル、2.0m では 0～3 ピクセルとなった。図 3 で識別困難だった LED も周辺部分の画素では正しく復号可能なことが確認できる。

また、複数フレームにわたり図 5 のような画像全体での受信失敗が 2,000 フレームの間に 3～6 回発生した。

表 6 復号処理用 PC

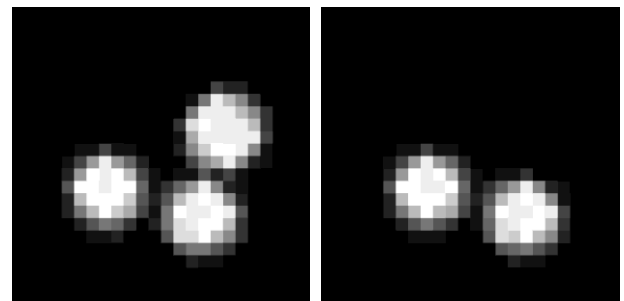
Table 6 Processing PC.

|      |   |
|------|---|
| OS   | Windows 10 Pro 64bit                    |
| CPU  | Intel i5-6600 3.30GHz                   |
| RAM  | 32GB                                    |
| 開発環境 | Visual Studio 2017,<br>C# + OpenCVSharp |



Frame 208

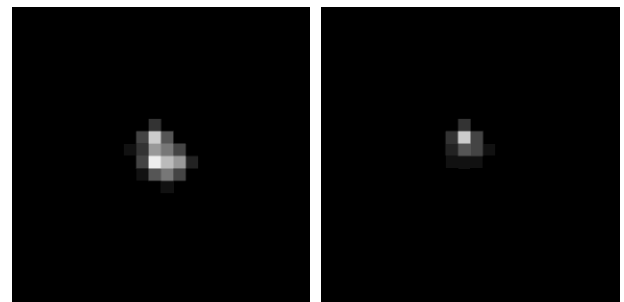
Frame 209



Frame 210

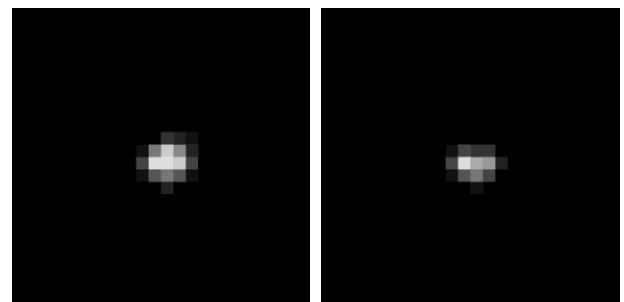
Frame 211

(a) 0.5m



Frame21

Frame22



Frame23

Frame24

(b) 2.0m

図 3 撮影画像の拡大図 (24×24 pixels)

Figure 3 Enlarged images.

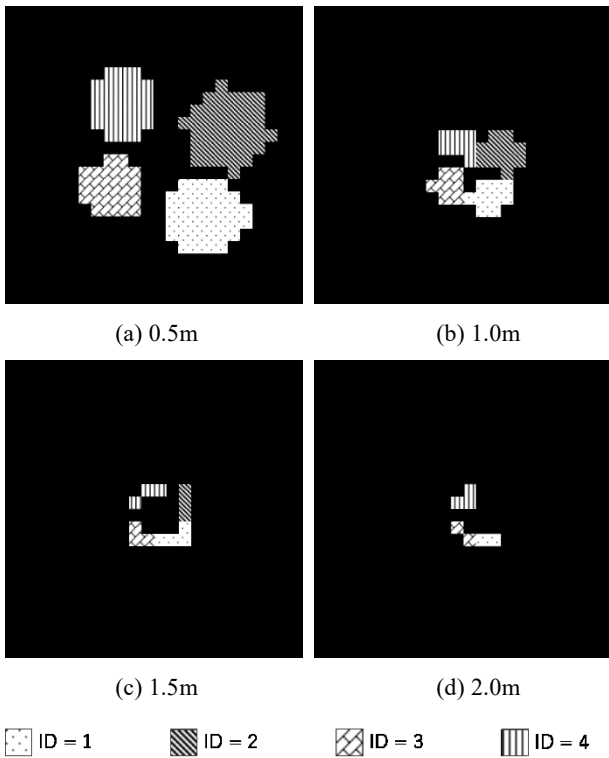


図 4 復号した ID をプロットした画像 (24×24 pixels)  
Figure 4 Examples of received ID images.

#### 4. 考察

図 4 より、1.5m までの範囲では 4 個全ての LED が 1 画素以上で正しく復号できており ID の識別が可能であることが分かった。天井高 3m の環境で床面から程度 1.5m の高さで利用する場合、端末から天井までの距離は 1.5m であり、より高輝度な照明器具を設置することを想定すれば、本手法により信号の受信が十分可能と考えられる。

図 5 のような受信失敗例について、提案手法での信号サンプリングのタイミングを図 6 に示す。ここで  $T_b$  は送信データの 1 ビット当たりの送信期間 ( $=1/f_b$ ),  $T_s$  はサンプリング周期 ( $=1/f_s$ ) である。このとき、各ビットの中央をサンプリングすれば輝度値から正しいビット列を取得することが可能である (Exposure 1)。しかしながら、実際のカメラでの光信号サンプリングには露光時間  $T_{exp}$  が存在し、撮影のタイミングによっては輝度が移行する区間で露光することがある (Exposure 2)。この場合には正しい信号のサンプリングができず、最終的に ID の復号に失敗する。今回、カメラは最小露光時間である  $34\mu\text{sec}$  に設定しており、1 ビット当たりの送信時間は  $1/1,440 = 694\mu\text{sec}$  である。すなわち  $694 / 34 = 4.8\%$  の確率で復号の失敗が発生すると考えられる。

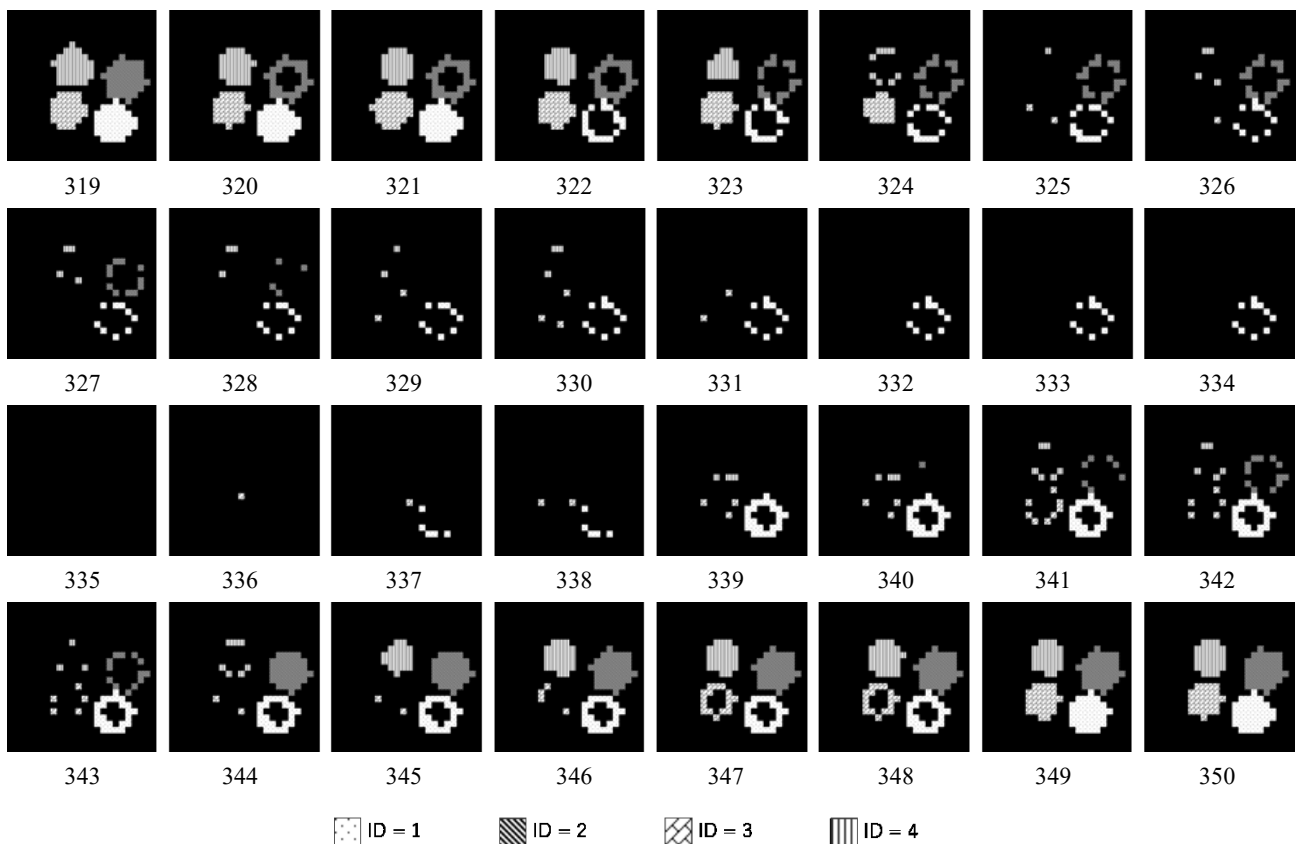


図 5 0.5m での受信失敗例 (frames 319-350)  
Figure 5 Examples in ID receiving failure at distance of 0.5m.

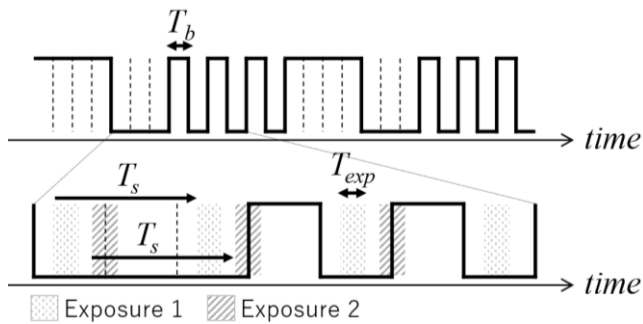


図 6 カメラによる信号サンプリング例

Figure 6 Examples of signal sampling using the camera.

事前に送信機のビットレートのキャリブレーションを行っているものの、カメラのフレームレートとの間のわずかな差により撮影中にサンプリングのタイミングがずれていくことで、図5のような受信失敗フレームが定期的が発生する。発生頻度としては0.5~0.9秒に1度の計算であるため、成功時のデータのみ使用することで実用上は問題なく測位が可能と考えられる。また、最小露光時間をさらに短く設定できるISを利用することでも、受信失敗の発生頻度を抑えることが可能である。

今回は送信機・カメラ共に固定した状態での実験のため、手振れの影響は考慮されていない。実際の使用時には端末を手で把持したことによる画像上での光源の移動を加味する必要があると考えられる。手振れの補正にはジャイロセンサや加速度センサによるものや画像処理に基づくものが存在し[14]、提案手法への手振れ補正の適用は今後の検討課題の一つである。

## 5. まとめ

我々は屋内での高精度位置計測を念頭に、輝度変調した光信号を送信するVLC型LED照明を測位用ランドマークとして使用し、撮像面全体を同時に露光するGS方式のISによるVLC信号受信手法を提案した。実験結果より、定期的にIDの受信が失敗するという制約があるものの、約1.5mまでであれば正しく信号の受信が可能であった。屋内での高精度な位置情報の取得が可能になれば歩行者のナビゲーションやロボット制御といった幅広い分野への応用が可能となる。今後は本受信手法により求めたランドマークIDに基づく高精度な屋内位置計測とその応用方法について検討する。

**謝辞** 本研究の一部は、科学研究費(17K01557)の助成を受けた。

## 参考文献

- [1] A. Küpper, "Location-Based Services: Fundamentals and Operation," John Wiley & Sons, USA, Sep. 2005.
- [2] D. Leorke, "Location-Based Gaming - Play in Public Space," Palgrave Macmillan, United Kingdom, 2019.
- [3] S. Frattasi and F.D. Rosa, "Mobile Positioning and Tracking: From Conventional to Cooperative Techniques," Wiley-IEEE Press, USA, Aug. 2017.
- [4] 西尾 信彦, "図解よくわかる 屋内測位と位置情報," 日刊工業新聞社, 2018.
- [5] S. Haruyama, "Visible light communication," J. IEICE, vol. 94, no.12, pp.1055-1059, Dec. 2011.
- [6] 照明学会, "照明ハンドブック," オーム社, 2003.
- [7] Y-S. Kuo, P. Pannuto, K-J. Hsiao and P. Dutta, "Luxapose: Indoor positioning with smartphones and visible light," In Proc. Int. Conf. Mobile Computing and Networking (MobiCom'14), pp.447-458, Maui, Hawaii, U.S., Sep. 2014. DOI:10.1145/2639108.2639109
- [8] Y. Nakazawa and H. Makino, "Azimuth Detection Using Flicker-Free Visible Light Communication with a Low Frame-Rate Camera," Proc. International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, France, Sep. 2018.
- [9] 中澤陽平他, "ナビゲーションを目的とした可視光通信による屋内歩行者位置計測法," 電子情報通信学会論文誌(D), vol.J99-D, no.2, pp.165-177, Feb. 2016.
- [10] CP-1222 visible light ID system, Standard of Japan Electronics and Information Technology Industries Association, 2007.
- [11] CP-1223 visible light beacon system, Standard of Japan Electronics and Information Technology Industries Association, 2013.
- [12] Lattice Semiconductor, "MachXO2 sysCLOCK PLL Design and Usage Guide," Technical Note TN1199, May 2014.
- [13] "TinyFPGA A-Series User Guide," < <https://tinyfpga.com/a-series-guide.html> >
- [14] 中澤陽平, 前田義信, 牧野秀夫, "ジャイロセンサと回転不変位相限定相関法(RIPOC)を用いた可視光測位のための手振れ補正," 電子情報通信学会総合大会, 早稲田大学, 2019.