

可視光通信プロジェクトにおける複数光源の点滅制御

小泉 実加[†] 平木 剛史^{††} 福嶋 政期[†] 苗村 健[†]

[†] 東京大学大学院 情報理工学系研究科 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

^{††} 東京大学大学院 学際情報学府 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

E-mail: †{mkoizumi, hiraki, shogo, naemura}@nae-lab.org

あらまし DMD を用い、画素ごとに独立した可視光通信を行う可視光通信プロジェクトに関しては、その投影データの転送速度高速化や多重化といった性能向上の提案及び、多様なアプリケーションの開発が行われてきた。しかし、従来の可視光通信プロジェクトの光源は依然として白色 LED が常時点灯するのみで、その色の変更や点灯タイミングの制御は行われてこなかった。そこで本稿では、可視光通信プロジェクトの光源を複数のカラー光源に置換し、光源自体の点滅の制御を実装することで、映像のカラー化と送信信号の効率化が可能になることを確かめ、今後の応用可能性について考察を行う。

キーワード 可視光通信, 空間分割型可視光通信, DMD

Blinking Control of Light Sources on Pixel-level Visible Light Communication Projector

Mika KOIZUMI[†], Takefumi HIRAKI^{††}, Shogo FUKUSHIMA[†], and Takeshi NAEMURA[†]

[†] Graduate school of Information Science and Technology, The Univ. of Tokyo Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo,

^{††} Graduate school of Interdisciplinary Information Studies, The Univ. of Tokyo Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo,

E-mail: †{mkoizumi, hiraki, shogo, naemura}@nae-lab.org

Abstract A PVLC (Pixel-level Visible Light Communication) projector using DMD enables every pixels to do independently visible light communication. Although many researches about a PVLC projector have been done (e.g. rapid data transfer, multiplexing of projections) and various applications have been developed, light source of these projectors were still monochrome and always turning on during projection. In this paper, we realized color projection and efficient signal transfer using a PVLC projector by replacing the light sources and controlling those blinking.

Key words Visible Light Communication, Pixel-Level Visible Light Communication, DMD

1. はじめに

映像とインタラクションを行う手法は近年広く研究されており、人間の動きを入力として映像が変化するインタラクションだけでなく、映像からデバイスやロボットなどに情報を送り、それらを映像と協調して動かす手法も数多く提案されている。その際、赤外光やカメラなどを用いた煩雑なシステムを使わず、映像から直接デバイスに情報を送信するという考えに基づいて提案されたのが、ディスプレイ上に映像と共に可視光マーカを表示することでデバイスを制御する Display-Based Computing である [1]。しかし、ユーザにとって意味のない映

像マーカが投影されてしまうこと、デバイスとの通信のためにデバイスとマーカの位置合わせを事前に行う必要があった。

そこで、人の目には知覚できない情報を映像に埋め込むことができる空間分割型可視光通信 (Pixel-level Visible Light Communication: PVLC) プロジェクトが研究されてきた。これは、プロジェクトの投影光の各画素の点滅パターンを画像情報とデータ部分に時分割することにより、人間が知覚できる画像や動画に、画素ごとに独立した知覚できないデータを重畳して投影することを可能とする [2]。PVLC プロジェクトに関しては、PC からのデータ転送高速化の研究や多様なアプリケーションの検討がなされてきた。

しかし、どのシステムにおいても光源は白色 LED のみで常時点灯しておりその色の変更や制御は行われてこなかったため、投影画像はグレースケールで表現力に乏しかった。また、データ転送は投影映像の随時更新が可能な程度には高速化したが、DMD (Digital Micromirror Device) の最大更新速度に対してはまだ低速であり、信号の送信効率を向上させる必要がある。

そこで本研究では、光源の置換及びその柔軟な点滅制御が可能なフレームワークを構築し、光源の多波長化及び、DMD による空間分割型可視光通信と、DMD の更新より高速な光源自体の点滅による画面全体への可視光通信のハイブリッド方式による信号送信の効率化を提案する。本稿で実装したのは、光源を RGB3 色の LED に置換し、その点灯タイミングを制御することによる映像のカラー化と、光源を DMD の更新速度より高速に点滅させることによる同期信号の効率化である。また、このシステムを用いて受光器のトラッキングを行い、投影面の受光器の操作から PC を操作するアプリケーションを実装した。

2. 関連研究

2.1 PVLC プロジェクタの概要と原理

可視光の点滅でビットパターンを送信する通信方式が可視光通信であり、点滅の周波数が十分高ければ点滅は人間に知覚されず、フォトトランジスタなどの受光素子にのみその瞬間の光点滅パターンの情報を送信できる。十分に高い周波数で点滅する光源は、その輝度の時間平均が人間が知覚する輝度となり、これは ON/OFF の順序には依存しない。この事実を利用し、ON/OFF の割合が同じであるが順序の異なる点滅パターンを用いることで、輝度を維持しながら異なるビットパターンを送信可能である。

これを利用して、光の投影空間を分割し、領域ごとに異なる輝度の表現、異なるビットパターンの送信を可能にしたのが北村らの提案した PVLC である。PVLC には、映像と情報の位置ずれが原理的に発生しないため、

- キャリブレーションの必要がない。
- 位置計測用に別系統でカメラ等を設置する必要がなくシステム構成がシンプルになる。
- 画面全体に常に情報を送っているため、受信端末の数が増えてもシステムの負荷が増大しない。

といった利点がある。PVLC は DMD を用いたプロジェクタによって実装され、画素ごとに不可視のビットパターンを重畳できることを示した。以降でこのプロジェクタのことを PVLC プロジェクタと呼称する。

2.2 PVLC プロジェクタにおけるデータ転送高速化

従来の PVLC プロジェクタにおいては、映像データをあらかじめ DMD 制御を行う FPGA 内部のメモリに転送しておきそれを繰り返し投影するか、市販の DMD 制御ボードに搭載されている低速なデータ転送インターフェースを介して PC から映像データを随時 FPGA へ転送することで動画の投影を行ってきたが、より高速なデータ転送が可能な RPVLC (Reconfigurable framework for Pixel-level Visible Light Communication Projector) フレームワークの提案が周らによって行われた [3]。

RPVLC プロジェクタは、TEXUS INSTRUMENTS 社製の the DLP®Discovery™4100 development kit 上で開発が行われた。これに搭載されているフレームワークでは、PC から随時データを転送する場合、まず PC から FPGA 上の信号制御回路にデータを送り、信号制御回路がデータを管理し制御信号とともに DMD 制御回路へ送信することで DMD が更新される。

ここで用語の定義を行う。まず、DMD の 1 度の更新によって投影される二値画像のことをバイナリフレームと呼び、これが DMD の更新によって高速で切り替わる。このバイナリフレームの一続きの並びをフレームと呼び、1 フレームには 3 種類のバイナリフレーム列が含まれる。それは、受光器にフレームの開始を知らせる同期信号部、不可視データ部、そして知覚できる画像を表現する輝度表現部である。

開発キットでは、PC からの FPGA へのデータ転送に最大速度 480 Mbps と低速な USB2.0 規格が利用されていたが、これを用いて 1024×768 の画像を転送する場合、1 秒間で転送されるバイナリフレームの数は $\frac{480 \times 10^6}{1024 \times 768} \approx 610$ 枚となり、40fps で映像を更新するには 1 フレームあたり 15 バイナリフレームの構成となる。これはなめらかな映像の投影を行うには十分ではない。USB2.0 規格の代わりに DVI 規格を用いた製品として Digital Light Innovations (DLi) 社製 D2D DVI-DMD Interface があり [5]、1 秒間に 1440 枚のバイナリフレームを転送できるが、RPVLC ではより高速な HDMI1.0 規格を用いた転送回路を実装し、動画に対応できる高速転送を実現した。

RPVLC では、投影画像を投影時のバイナリフレームの順番に応じたビット列にあらかじめ PC 側で変換する。PC モニタへの出力がそのまま HDMI 経由で FPGA へ転送されるため、転送ビット列の 24 ビットずつを、1 画素あたり 24 ビットの情報を持つ 24 ビットカラー画像の 1 画素として表現し、これを PC モニタに出力することで複数のバイナリフレームが 1 度に転送できる。つまり、PC モニタに出力される画像は投影画像とは一致せず、人間にとっては意味のない画像となる。1 枚の 24 ビット画像に何枚のバイナリフレームが対応するかは PC モニタの解像度及びプロジェクタの解像度の設定に依存する。プロジェクタの解像度を 1024×768 としたとき、1 枚の 24 ビット画像が持つバイナリフレームの枚数 N_{BF} は、PC モニタの画素数を $Pixels_d$ とすれば、

$$N_{BF} = 24 \times \frac{Pixels_d}{1024 \times 768} \quad (1)$$

である。ここで、PC モニタの解像度は N_{BF} が自然数となるように選ぶ。PC モニタとプロジェクタの解像度が一致すれば、1 枚の 24 ビット画像は 24 枚のバイナリフレーム、PC モニタの解像度が 1280×1024 であれば 40 枚のバイナリフレームを持つ。このときバイナリフレームの更新速度は、PC モニタのフレームレートが 120 fps のとき前者が 2880 枚/秒、75 fps のとき後者が 1 秒 3000 枚/秒である。

このフレームワークと、投影画像を 24 ビット画像に変換して PC モニタへ出力を行うソフトウェアを利用することで、データ及び可視画像の更新をリアルタイムで行うことが可能となつ

た。しかし、DMD の最大更新速度が 32552 回/秒であるので、RPVLC フレームワークは依然としてその 1/10 以下の性能しか発揮できていない。

2.3 DMD と光源制御

PVLC において光源は常時点灯していたが、DMD プロジェクタと光源の点滅制御を組み合わせさせた研究である [4] は、DMD プロジェクタの光源に可視光と赤外光の両方を用い、時分割で可視光映像と赤外光の情報を交互に提示した。例として、赤外光にてグレイコードパターンを送って赤外線センサを搭載した物体に位置情報を送信し、投影面やデバイスの位置を検出できることを示した。しかしその可視映像はグレースケールであり、投影情報の転送速度は低速なものであった。

また、RGB3 色のカラー光源付き DMD 開発キット (STAR-07 RGB Projection Module HP-LED-OM-07-RGB, ViALUX 社製) が販売されており、DMD の更新の度に 3 色のうち任意の LED の点灯を指定できる API が搭載されている。この API では DMD の更新と LED の制御が同期しており、独立に制御することはできない。また、投影情報の転送速度は the DLP®Discovery™4100 development kit と同様であるため、リアルタイムで変化するカラー映像の投影は難しい。

2.4 本研究の位置づけ

従来の PVLC プロジェクタのデータ転送速度の改善はなされているものの、現状ではその通信速度は通信規格や PC モニタの仕様によって制限されており十分とは言いがたく、より一層の高速化と並び、データ送信の効率化が必要である。本稿ではその手段として、DMD による空間分割型可視光通信と、DMD の更新より高速な光源自体の点滅による画面全体への可視光通信のハイブリッド方式を提案する。例えば同期信号のように空間分割の必要ない信号に関しては、DMD で全画素を ON にした上で、DMD の更新速度より速い LED の独立点滅によって効率的に信号を送ることが可能である。また、PVLC プロジェクタの映像は依然として白黒であり、色表現を可能にすることが必須の課題である。そこで、RPVLC 上に光源制御機構を実装することで、随時更新可能なカラー映像及び、より効率的な信号転送方法を提案し、表現力と通信速度の向上を目指す。

3. 提案システム

3.1 システム設計

RPVLC 上に構築する光源制御機構の要件として、

- 多様な光源に対応可能
- 任意のタイミングで任意の光源の点滅を制御可能

を設定した。光源の多様性に関しては、カラー LED による色表現に加え、赤外光によるデータ付加など、多様な波長の光を用いたアプリケーションの作製への対応を考えたものである。光源の自由な制御に関しては、点灯する光源の順番や点灯時間の自由な設定や DMD の更新より高速な点滅の切り替えを想定しており、3.2 で述べる、3 色の LED の同時点灯による白色光源化や光源点滅による同期信号の送信などの応用可能性を考慮したものである。

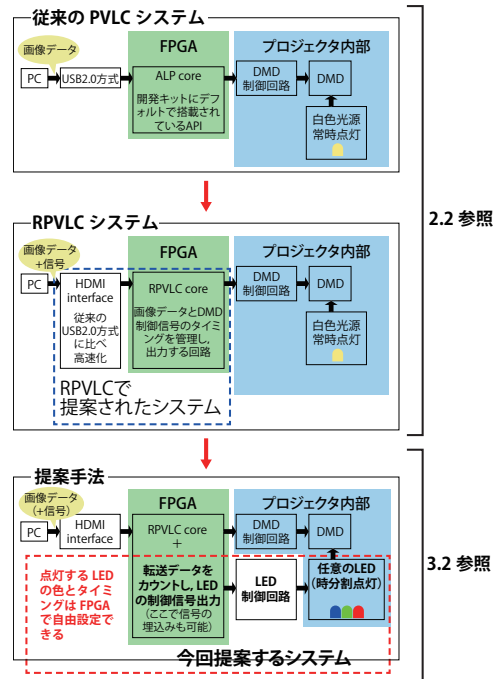


図 1 光源制御のフレームワーク

Fig. 1 The framework of blinking control of light sources.

3.2 光源制御フレームワークの概要

市販の DMD 開発キットに設置されている DMD は 1 つのみなので、光源の切り替えは時分割で行う。従来の RPVLC プロジェクタの光源を換装し、HDMI を経由したデータ転送のタイミングに合わせて LED の点灯制御信号を出力する機能を FPGA 上の制御回路に実装し、その信号を用いて LED の ON/OFF を制御する回路を作成した。どのタイミングでどの光源に信号を出力するかは、FPGA のコードを書き換えることで柔軟に設定できる。FPGA のコードで指定された光源の点灯タイミングに沿うように、PC 側でバイナリフレームを並び替えてからデータ転送を行う。そのため、バイナリフレームと LED の点滅の対応は一度 FPGA にプログラムの書き込みを行ったら、再度書き換えるまでは変更することができない。その概要を図 1 に示す。

3.3 システム実装

光源は、カラー画像の投影を行うために RGB3 色の LED を利用した。光源制御は DMD 開発キット付属の FPGA 上に制御回路を作成した。今回、使用した機器の構成は以下である。

- DMD とその制御システム：the DLP®Discovery™4100 development kit
- FPGA：XILINX 社製 Virtex-5 XC5VLX50
- HDMI 基板インターフェース IC：ANALOG DEVICES 社製 AD9381
- 高輝度 LED：LUMINUS 社製 SBM-160

3.3.1 LED 制御信号

本稿にて作成したシステムにおいては、PC の PC モニタの解像度は 1280 × 1024、プロジェクタの解像度は 1024 × 768 とした。PC モニタへの出力がそのまま HDMI 経由で FPGA へ

転送されるため、式 (1) より、1 フレームは 40 バイナリフレームを持つ。データの送信開始を受信機に知らせる同期ビット、不可視データビット、そして輝度調整ビットに用いるバイナリフレーム数をそれぞれ S, D, B とすると、 $S + D + B = 40$ の条件のもとで自由に割り振ることができる。不可視データを送らず映像のみを表示するのであれば、 $B = 40$ であり、単色映像ならば 0 から 40 の 41 階調、カラー映像ならば例えば R と G に 13 枚ずつ、B に 14 枚をあて、元画像の R と G の輝度を 0 から 13 の 14 段階、B の輝度を 0 から 14 の 15 段階に変換し、PWM 制御で色を表現する。不可視データを送信する場合、 S, D が増え、その分 B が減る。データ量が多い場合は、数フレームにわたって分割したデータを埋め込むことも可能である。同期ビットとデータビットは輝度に影響がないよう、全体で一定輝度となるように設定した。この構成において、PC モニタのフレームレートを 75 fps としたため、DMD の更新速度は $75 \times 40 = 3000$ 回/秒である。

FPGA の制御回路は転送されてくるデータがフレームの開始から何ビット目かを数えており、現在何バイナリフレーム目なのかが分かるため、FPGA のプログラムで何枚目のバイナリフレームの転送時にどの色の LED を点灯させるかの指定を行う。上のカラー画像の例の場合ならば、1 枚目のバイナリフレームの転送が開始したら R、14 枚目の転送が開始したら G、27 枚目の転送が開始したら B を点灯させ、それ以外の色は消灯させるようプログラムを書く。そして、その LED 点灯の順序に合わせてソフトウェア側でバイナリフレームを並び変えて転送データを作成する。

3.3.2 LED 駆動回路

FPGA からの信号を用いて LED の制御を行う回路を図 2 及び図 3 に示す。汎用性を考慮し、LED 点灯制御基板と LED の電流制限用抵抗基板を分離した。高電圧、高電流、高速なスイッチングに対応するため、スイッチング素子には N-ch MOSFET (Fairchild Semiconductor 社 FDS5680) を使用した。その最大定格は 60V/8A であり、立ち上がり、立ち下がり時間の合計は 60ns 程度と DMD の更新速度に対して十分高速である。MOSFET のスイッチングには、汎用ロジック IC である TC74VHCT541AF を使用し、5V のロジック電圧へのレベル変換を行うと同時に FET 駆動に必要な電流を得た。

3.3.3 受光器

受光器には、受光素子としてフォト IC (コーデンシ社製 PIC0103SL) を用いた。受光器の回路を図 4 に示す。

3.4 機能の実装

3.4.1 映像カラー化

3.3.1 で述べたように、RGB3 色の LED の点灯制御を行うことでカラー映像が投影できる。各色に割り振るバイナリフレームの枚数によってその色の階調数が決まり、表現できる色数が増える。

3.4.2 同期信号の効率化

同期ビットは、他の部分では出現しない 1 と 0 の並びである必要がある。同期ビットが長くなればその分データビットと輝度調整ビットが減るため、可能な限り短くすることが望ましい。

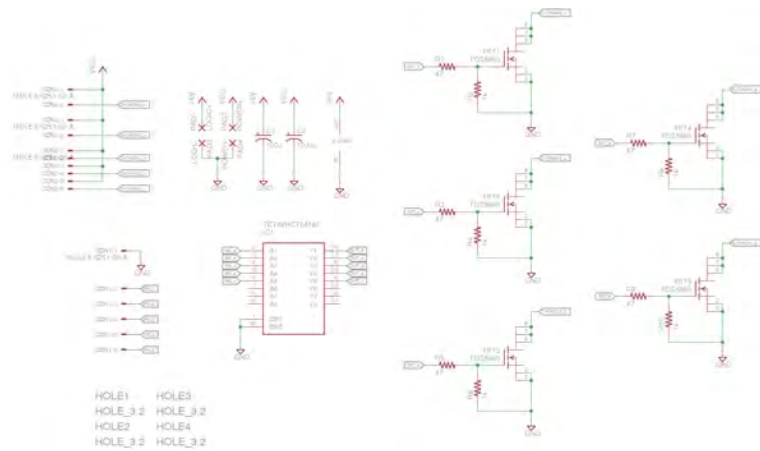


図 2 LED 点灯制御回路

Fig.2 The circuit diagram of LEDs blinking control.

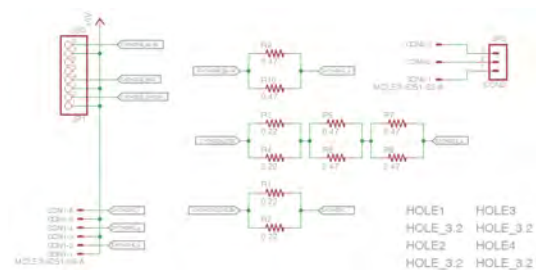


図 3 LED 用抵抗回路

Fig.3 The circuit diagram of resistances for LEDs.

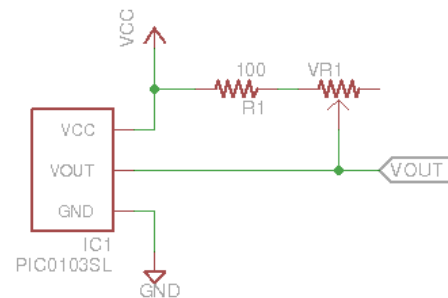


図 4 受光器回路

Fig.4 The light receiver circuit diagram.

また、データを送信するタイミングは、受信機が複数の画素に対応した光を同時に受信することを考えると、画面全体で揃っている必要がある。従来の PVLC では、同期のために DMD の更新による画面全体の ON と OFF の連続信号を用いていたが、今回のシステムにおいては DMD と同期しない LED 制御が可能となったため、DMD の更新速度よりも高速に LED を点滅することで、データ部及び輝度調整部には速度で ON と OFF の切り替えが可能となり、同期ビットに用いるバイナリフレーム数を減らすことが可能になった。今回の実装では、1 枚のバイナリフレームのデータの半分の量のデータが転送されてくるごとに LED に点滅の信号を送ることで、DMD 更新速度の 2 倍の速度で LED を点滅させた。また、同期ビット部分では、LED を 3 色とも点滅させ白色光を投影することで、色のバランスに影響がでないようにした。図 5 に方式の概要を示す。

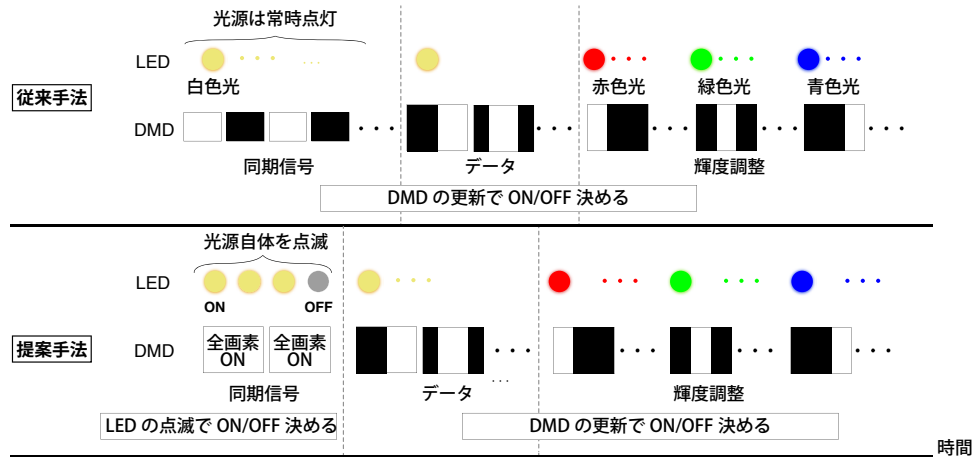


図 5 同期信号の送り方

Fig. 5 The framework of synchronization signal.

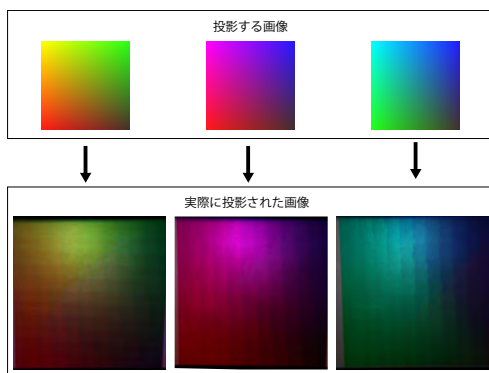


図 6 グラデーションの表現

Fig. 6 The projection of gradation images.

同期ビットが2ビットあるのは、DMD 全画素が完全に ON になってから LED を点滅させなければいけないが、DMD の切り替えは全画素一斉に行われるわけではないため、同期ビットの最初のビットは、LED は点灯させたままで、DMD の全画素を ON にすることに使用したためである。また、データが複数あったり長いデータを送信する場合は同期ビットが複数になることがあるが、同期ビットの同じパターンが現れる周期が長くなると、画面のちらつきの原因となる。

4. 評価

4.1 カラー化の確認

提案手法を用いて望んだ色表現が行われているかを確認するため、R と G、G と B、B と R の組み合わせについて、それぞれ輝度 0 から 255 までのなめらかなグラデーションを交差させた図 (図 6 上段) をプロジェクションした様子を示す (図 6 下段)。各色 256 階調で表されている図を、各色 14 及び 15 階調で表しているため、グラデーションはなめらかなものではなく、実写や精緻なイラストの投影には色数が不足しているが、そうではないイラストやアニメーションの表現には十分な程度の色表現ができています。

4.1.1 本システムにおける表現可能な色数

RPVLC システムを用いたカラー化において、表現可能な色数について述べる。まず、RPVLC システムを利用しない場合に、利用した DMD 自体が表現可能な色数の上限を計算する。本研究にて使用した DMD の最大更新速度は、32552 回/秒である。プロジェクタのフレームレートを 60 fps とした場合、これを用いて表せる色数の最大数を計算する。1 フレーム中の DMD 更新回数は $\frac{32552}{60} \approx 542$ 回であり、RGB の各色に割り振られるのは $\frac{542}{3} \approx 180$ 回であるため、表せる色数は $181^3 = 5929741$ 色である。

一方、RPVLC で用いられている方法では、2.2 で述べたように、PC 上のソフトウェア側で送りたいカラー画像を DMD に読み込ませるための複数枚の二値画像に変換し、その二値情報を DMD に読み込ませる順に 24 ビットずつまとめて 1 画素で表した。これによって FPGA 側でのデコードが必要なくなったが、1 フレームあたりのバイナリフレーム数は式 (1) で表されるように DMD の限界値の 1/10 以下である。PC モニタの解像度を上げることでバイナリフレーム数は増やすことができるが、使用している HDMI インターフェースの入力が対応しているのは解像度 1280×1024 で 75 fps までであったため、1 フレームあたり 40 バイナリフレームがこの構成における最大の更新速度となっている。

4.1.2 同期信号の効率

図 7 に受光素子を用いて観測した同期信号の様子を示す。同期信号における信号の変化が、DMD の更新による信号の変化よりも高速であることが分かる。

従来の PVLC プロジェクタでは、データの種類が増えデータ部が長くなるに従い、そこに出現しないパターンである同期信号も長くなる。また、RPVLC システムでは、信号と信号の間に発生する遅延を用い、遅延の後 1 ビットの信号を送ることで同期信号を短縮したが、それはシステム依存の方法であり常に使えるわけではない。一方提案手法では、同期信号が 1 種類であれば、データの長さにかかわらず DMD の更新 2 回分の時間で同期信号を送信することができる。今回は DMD 更新速度の

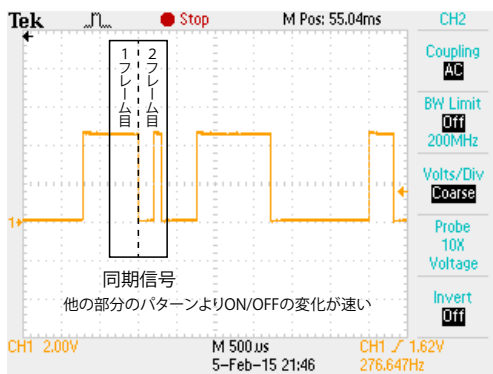


図 7 同期信号

Fig. 7 The synchronization signal.

2倍の速度でLEDを点滅させたが、LEDの点滅を更に高速化すれば、同じ時間で複数種類の同期信号の送信も可能だろう。

4.2 アプリケーション

今回実装したシステムを用いて、受光器のトラッキングを行い、投影面での受光器の操作からPCを操作するアプリケーションを実装した。位置情報として、 x 及び y 方向を256分割するグレイコードを用いた。256分割を行うためのグレイコードは8ビットであり、加えてその輝度補正が必要であったため、複数フレームに分割して位置情報を埋め込み、一方向の位置情報につき2フレーム、計4フレームを用いて位置情報を表現した。また、どちらの方向の情報であるかを区別するため2種類の同期信号を用いた。位置情報は静的なので、PCからは画像情報のみ転送し、信号の埋め込みはFPGA側で行った。

受光器にはプッシュスイッチを搭載し、電子黒板のように、受光器の場所に対応してカーソルが動き、受光器のスイッチを押すことでマウスの左クリックを行うことができるようにした。スクリーンのような平面だけでなく、凹凸のある場所でも位置情報を取得することができるため、ペイントソフトを起動しておけば、凹凸のある物体に直接描画を行うようなインタラクションも可能である。アプリケーションの様子を図8に示す。



図 8 受光器をマウスのように使い、投影面上でPCの操作をする様子

Fig. 8 The application of color RPVLC using the light receiver as input device for PC.

5. 結 論

5.1 本研究のまとめ

本稿では、RPVLC プロジェクタにおける光源多重化及び、

DMDによる空間分割型可視光通信と光源点滅による画面全体への可視光通信のハイブリッド方式を提案し、実装としてRPVLC プロジェクタへのRGB3色の光源の設置とその点灯の時分割制御を行い、カラー表現及び効率的な同期信号送信を可能にした。このシステムの最大性能はフレームレート 75 fps、バイナリフレームレート 3000 枚/秒である。

5.2 今後の展望

本稿では光源自体の点滅を同期信号に利用したが、データの送信にあたっては、DMDを用いた空間分割型の通信に、光源自体のより高速な点滅による画面全体への通信を組み合わせることで、より高速な通信が可能になると考えられる。

今回実装したフレームワークは、フレームレート 75 fps、バイナリフレームレート 3000 枚/秒であった。DMDの最高更新速度は32552回/秒なので、これはDMDプロジェクタとしては非常に低速であり、実写など色数の多い映像の投影を行うには色数が不足する。RPVLCは、PC側で転送画像を複数枚の二値画像に変換してDMDに送る順に並び替え、そのビット列の24ビットずつをまとめて1画素として出力するため、1フレームを N 枚のバイナリフレームで表し、PCモニタのフレームレートを F fpsとした場合、1秒間にPCからプロジェクタに転送すべきデータ量は、 $1024 \times 768 \times N \times F$ ビットとなる。4.1.1で述べたように、DMDの性能を最大まで引き出す場合、フレームレート60 fpsとしたとき1フレームあたりのバイナリフレームは542枚となり、送るべきデータ量は2.98GB/秒と膨大になる。したがって、より高速転送可能なインターフェースを用いるか、あるいは画像データをPC側でエンコードせずにFPGAに転送し、FPGA内の回路でエンコードするなどして、より豊かな色表現を行っていききたい。

光源は今回使用したRGB3色のLEDに限らず、赤外光や遠赤外光などの不可視光を用いて可視映像との重畳を行い、新たなインタラクションをもたらすことが可能である。

文 献

- [1] 稲見昌彦, 杉本麻樹, 新居英明, “Display-Based Computingの研究第一報:画像提示装置を主体とした実世界指向情報システム,” 第10回日本バーチャルリアリティ学会大会予稿集, pp. 441442, 2005.
- [2] 北村匡彦, 苗村健, “DMDを用いた空間分割可視光通信:メタメディア情報を埋め込んだ映像投影,” VR論, vol.12, no.3, pp.381388, Sept. 2007.
- [3] L. Zhou, S. Fukushima and T. Naemura, “Dynamically reconfigurable framework for pixel-level visible light communication projector,” Proc. SPIE 8979, Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications VI, 89790J, Mar. 2014.
- [4] J. Lee, S. Hudson and P. Dietz, “Hybrid infrared and visible light projection for location tracking,” UIST '07 Proceedings of the 20th annual ACM symposium on User interface software and technology, pp.57-60, Oct. 2007.
- [5] Digital Light Innovations (DLi), “D2D DVI-DMD Interface,” <http://www.dlinnovations.com/products/dev-kits/dli41xx-series/d2d-dvi-dmd/>, June 2015.