

ProCam システムのための DMD を用いた 空間分割型可視光通信の検討

北村 匡彦[†] 苗村 健[†]

[†]東京大学大学院 学際情報学府

{kitamura, naemura}@hc.ic.i.u-tokyo.ac.jp

従来の可視光通信は空間に対して一様な情報伝達を目的として用いられているが、我々は光スイッチアレイとして働く Digital Micromirror Device(DMD) を用いて位置に依存した可視光通信を提案してきた。さらに、PWM 輝度変調技術を応用し、人間に対しては映像を、機械に対してはビット情報を同時に提示する Display-based Computing(DBC) システムを実装してきた。本稿では、ProCam システムを形状計測、通信、DBC という 3 分野から捉え、これらの関連研究を言及しつつ、本研究の位置づけを行う。そして、DMD を用いた空間分割型可視光通信の基本原則を説明し、PWM を用いた静止画像へのビット情報埋め込みアルゴリズムを提案する。最後に応用利用として、日本地図が映し出されている中にフォトセンサを組み込んだ受信機を用いて、その場所における天気予報のピクトグラムを取り出すシステムを構築した。これによって場所に応じた可視光通信が実現できることを確認した。

A Study on Position-dependent Visible Light Communication using DMD for ProCam

Masahiko Kitamura [†] Takeshi Naemura [†]

[†]Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, The University of Tokyo

{kitamura, naemura}@hc.ic.i.u-tokyo.ac.jp

We developed position dependent visible light communication using Digital Micromirror Device (DMD), which can displays image for human and bit for sensor at the same time and position. In this paper, we indicate the purposes and relations between the our system and the others studies of ProCam at first. Secondly, we describe the basic idea how to communicate with visible light that depends on position. Thirdly, we developed an algorithm of embedding bit signals to control machines into static image such as a photo. This algorithm use pulse width modulation (PWM) to express the tone of color with digital signals. The ideas are demonstrated using DMD, which acts as the switch of light. We implemented the projector using DMD, and test the position dependent communication by visible light. Finally, as an application of this system, we implement a receiver and small display (8x8 LED dot matrix) module that can receive and decode the ceded projection light. As a result, we made sure that the position dependent visible light communication with DMD is useful.

1 はじめに

今日において、携帯電話をはじめ様々な端末が日常生活空間に混在している。さらに近い将来にはロボットなどの情報機械がわれわれの生活に入り込んでくると予想できる。こうした状況下においては、人間と同時に、機械に対しても情報提示する必要性が出てくる。機械に対しての情報提示としてはバーコードや QR コードなどが典型である。これ

らは日常でもよく見かけるが、この情報はわれわれに見える必要がなく、むしろわれわれが見る情報の後ろに隠れていた方がよい。こうした動機から筆者らは人間には通常の映像を提示しつつ、同時に、機械に対しても制御情報を提示することが可能である空間分割型可視光通信を提案してきた [1, 2].

一方で、空間分割型可視光通信はプロジェクタから投射されるコードパターンをフォトセンサを用

いて受信する ProCam システムと捉えることもできる。実際、ProCam システムの立場で見た場合、関連研究は多い。そこで、本稿ではまず、ProCam システム枠組みにおいて、筆者らが提案してきた空間分割型可視光通信の位置づけをする。続いて、Digital Micromirror Device(DMD) を用いた空間分割型可視光通信の基本原則、そして Pulse Width Modulation(PWM) 輝度変調を利用した静止画像へのビット情報の埋め込みアルゴリズムを述べる。最後にこれらを用いた応用利用として地図映像の中に天気予報ピクトグラムを埋め込み、ディスプレイ受信機によって取り出すシステムの実装実験を説明する。

2 Active Light, ProCam システム

ProCam システムは数多くの応用例が挙げられるが、高速光スイッチなどの素子を用いて Active Light を利用したシステムに限れば、その目的によっていくつかに分類できる。ここでは、われわれの提案する DMD を用いた空間分割型可視光通信の関連研究を形状計測、通信、Display-based Computing(DBC) の 3 分野に分けて、位置づけしたい。

2.1 形状計測

CV において形状計測を実現するには、カメラのみを用いる受動法と投影された参照光をカメラで撮影する能動法がある。後者では、スリット光やグレーコードパターンを複数回にわけて投影、撮影することで形状を計測するため計測に時間がかかる問題があった。これを高速化する手法として、Chen らは DMD という光スイッチを用いてリアルタイムに形状計測を行うシステムを提案している [17]。参照光光源前と、撮影カメラ前の 2 つに同期された DMD を置き、参照光の投影および撮影を高速化している。これは単純に高速スイッチを用いて従来の能動パターン法を高速化しているものである。

DMD などの高速光スイッチを用いれば、人間に知覚できない速度でグレーコードパターンを投影できる。Daniel Cotting らは DLP プロジェクタを用いて、投影映像の中にグレーコードパターンを畳み込み、人間には映像を提示しつつも形状計測を同時に行うシステムを提案している [16]。形状計測をユーザインタフェースに応用することで、デバイスフリーに機械入力できるシステムを可能にしておき、Augmented Reality を実現している。ここでは映像の輝度を変調することで DMD 制御しているため、映像の中に参照光パターンを完全に埋め込むことはしていない。

2.2 情報通信

近年、光デバイスとして LED を手軽に使うことが可能になった。その高速動作性を利用することで、通信を行う研究がなされている。中川らは白色 LED を高速点滅させ、人間にとっては照明として働きつつも、投射された光をセンサで受信しデジタル伝送路として利用する可視光通信を実現してきた [3, 15]。電波を用いた場合に比べて可視光を用いる場合の利点はいくつか挙げられる。電波では障害物体を容易に回折、反射、透過する性質を持つものに対して、可視光ではそのような特性はなく指向通信が可能となる。また、電波法の制限を受けることなく自由に通信することが可能である。さらに、医療現場や水中など電波が使えない状況下でも利用することが可能である。特に照明光通信では、通信路としての LED 光が照明として働くため、家庭内の照明や、信号機など従来から社会で用いられているインフラに容易に溶け込めるユビキタス性を持ち合わせる。

ここでは、LED 光は単なる“明かり”である。また、最近では、送信機である LED をアレイ状に並べることで情報伝送の並列化を図っているが [6]、伝送する情報は空間に対して一様である。それに対して、本稿で提案するシステムは光の指向性を積極的に利用して、可視光通信を空間的に分割し各位置に依存した通信を行うシステムと考えられる。

一方では、受信側のセンサに注目し、環境にある LED 光源を平面的に受信する試みもなされている。香川らは CMOS センサを改良し、家庭内に分散している家電から発信された LED 点滅パターンを CMOS 上で位置依存的に受信できる“オプトナビ”システムを提案している [11]。従来では 1 対 1 送受信であったリモコン通信を 1 対多送受信できるように拡張している。ここでは LED 点滅パターンは人間にとっては無意味な情報でしかない。

2.3 Augmented Reality における ProCam システム

近年、ディスプレイを用いて情報提示する際に、人間だけでなく機械に対しても情報を提示し、機械制御を行う試みが盛んになされている。稲見らは、プロジェクタ投影スクリーンに輝度パターンを投影し、それをセンサで受信し位置計測に利用する Display-based Computing を提案している [7]。ここでは機械制御パターン以外の領域に通常の映像情報を提示することで、人間と機械への情報提示を同時に実現している [8]。可視光プロジェクタや PDP などの従来ディスプレイを用いることができ、さらに位置に応じた情報提示が可能であるため、キャリブレーションなしでピクセル精度の位置

計測が実現できる。投影映像の中でロボットを制御する Augmented Coliseum [9] や、ディスプレイ上の点を正確に指し示すことができるライトペン [10] などが報告されている。しかし、人間が見る位置には機械信号は提示できないことや人間にとっては無意味な機械制御の信号が見えてしまう性質がある。

新居らは再帰性反射材を用いた通信の研究の中で LED アレイの 프로젝タを実装し、映像を投影しつつ、各領域ごとに異なった情報パターンを提示している [12]。これにより、人間への映像情報提示をしつつ、全く同じ位置に機械情報も埋め込むことが可能になり、筆者らの目指すものと一致する。ここでは可視光通信を各領域ごとに独立に行えるようにして、さらに各領域をピクセルとして利用することで映像を提示できるというアプローチである。それに対して筆者らの研究では、 프로젝タ映像を出発点とし、映像の中にビット情報を埋め込むというアプローチで研究を進めてきた。

以上の研究はいずれも光の指向性を積極的に利用しているが、この利点を従来の研究に適應する試みもなされている。Ramesh Raskar らは RFID にフォトセンサを組み込み、リーダー側から 프로젝タで位置パターンを投影することで位置に依存したタグ情報処理を可能にした Radio Frequency Identity and Geometry (RFIDG) を提案している [13]。応用利用として 프로젝タではコンピュータ画面を投影し、RFIDG タグが付いた室内の物体をあたかもコンピュータデスクトップのオブジェクトとして扱える Augmented Reality を実現している。

このように ProCam システムの応用研究では、人間の知覚特性を利用して、普段の生活で目にするものに付加情報を埋め込む手法が提案されており、これは情報ハイディングの1つといえる。今まで言及してきた研究において、情報を隠す手法として時間方向に埋め込む手法が主であった。一歩では周波数方向に着目した手法もいくつか報告されている。木村らは赤外光と可視光を用いて人間に対しての情報を提示しつつも、それと同時に機械提示情報を提示するシステムを提案している [18]。赤外線は目に見えないので、可視光と同時に用いることで DBC が可能になる。

2.4 空間分割型可視光通信

本稿で提案する空間分割型可視光通信とは可視光通信と DBC の長所を持ち合わせるシステムである。すなわち、

- 프로젝タ映像の画素単位の位置精度を持つ位置依存型の可視光通信
- 人間には 프로젝タ映像の空間的なパター

ンを、機械には時間軸方向に埋め込んだ情報をそれぞれ同じ位置に提示できる DBC

を目指す。特にわれわれは、映像提示メディアである 프로젝タを出発点として、その映像光の中の時間方向に機械を制御する付加信号をのせるという立場で研究を進めている。換言すれば、映像の中に人には知覚できない機械制御信号を埋め込み、人間には通常の映像を提示しつつ、同時に機械を制御できるシステムである。

映像などのメディアコンテンツの中に情報を埋め込み利用する技術としては電子透かし (ウォーターマーク) がある。この技術では各メディアの静的表現を前提として情報を埋め込む。これに対して、われわれの提案するシステムでは時間軸方向に情報を埋め込む手法を用いており、電子透かしとは異なった技術である。それゆえ、本システムでは電子透かし技術も同時に活かすことも可能である。

3 DMD を用いた空間分割型可視光通信

本章では、空間分割型可視光通信の基本原理解説する。さらに DMD を光スイッチとして用いた 프로젝タを試作し、各領域に異なる ON/OFF 周波数を送信し、フォトセンサを用いた受信機で受信する基礎実験について説明する。

3.1 基本原理

基本原理を図 1 に示す。図 1(a) 左に示すようなパターンを交互に高速で切り替え表示することで、視覚の残像効果によって図 1(a) 右のような平均輝度映像が人には知覚されることになる。このとき、各画素には 2 種類の点滅パターンが存在し、これを画素ごとの時間軸方向の情報として機械に与えることができる。映像を切り替えると視覚的なちらつき (フリッカ) が問題になる。人の可視光視覚特性は波長によって異なるが、おおよそ 60Hz 程度であり、それ以上では一般にフリッカは知覚されないとされている。よって、映像の切り替えは 60Hz 以上にする必要がある。ON/OFF の連続時間がこの周期以下でなければならない。

スクリーン上の任意の点において人の目が見る映像の輝度は、ある一定時間内の光が当たっている (ON) 時間と当たっていない (OFF) 時間の割合で制御することができる。高速パルス信号を用いれば任意の輝度を厳密かつ容易に表現できる (Pulse Width Modulation: PWM)。このとき ON/OFF の割合が合うようにすれば ON/OFF 順序を入れ替えても問題にならない。この冗長性を利用してビット列を埋め込むことが提案手法の核となる。例えば図 1(b-d) は人の目にはいずれも同じ輝度情報しか持たないが、機械には異なった情報を提示しているこ

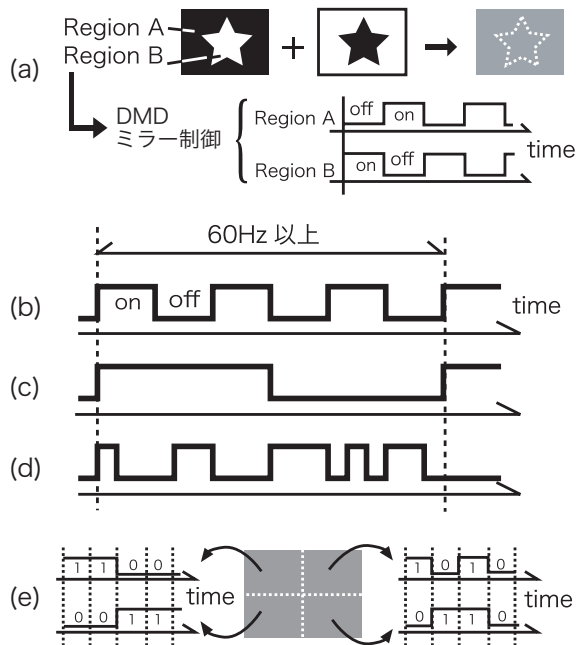


図 1: 提案システムの基本原理

とになる。さまざまなビット列を画素ごとに割り当てることで、空間を分割する可視光通信が可能となる (図 1(e))。

3.2 DMD

3.1 で述べた手法を実現するには映像の高速な切り替えが必須であり、本研究では DMD を用いてそれを実現する。

DMD とは米 Texas Instruments 社が開発した MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) であり、マイクロミラーが XGA (1024 x 768) アレイ状に並び、高速に角度を制御することができるユニークなデバイスである。その特性として、ミラー角度は $\pm 12^\circ$ の 2 値を取り、最大で 8kHz で動作する高速性を持ち合わせている。DMD は主に DLP (Digital Light Processing) プロジェクタエンジンとして普及しており、その応用利用も近年盛んである [14]。

ビットを埋め込む方式に関しては、システムの受信側の用途によって異なる。例えば、埋め込み情報によって位置に依存する ID 情報を割り当てる場合には、シーケンスフレームの始まりを表す信号を挿入する必要がある。

3.3 周波数埋め込み基礎実験

本節では、まず、これらの高度な情報伝達の予備段階として、ビットシーケンスの 0/1 周波数を投影光の中に埋め込む実験を行う。そして、それを単純に音として取り出すことを試みる。

システムの概要を図 2 に示す。送信側は基本的に

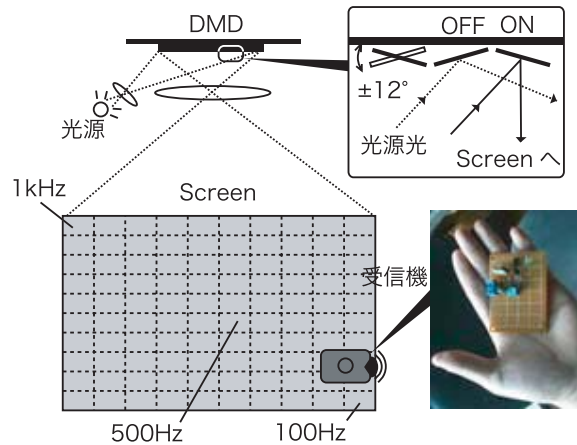


図 2: 試作システムの概要

DLP プロジェクタと同じ構成をとるが、本稿では、まずモノクロプロジェクタとして実装する。受信側ではフォトセンサを用いてビットを取り出す。

本稿のプロトタイプシステムを用いて、人の目には平坦で一様に照らし出された状況にしか見えないが、その中でセンサを介すことにより位置に応じた音情報を取り出せることを実験的に確かめた。ここでは、同じ輝度の画像 (画素ごとの ON 時間と OFF 時間が等しい画像) の中に、位置に依存した波形周波数 (0/1 周波数) 信号を埋め込む。つまり、ON/OFF は規則的に等しく切り替えた。スクリーンを縦横に各々 10 分割し、100Hz から 1kHz まで 100Hz ごとに順に割り当てた。受信側ではフォトセンサを用いて受信し、アナログ回路を通してスピーカーに出力した (図 2)。可視光領域フォトダイオードとして、今回は容易に入手できる LED をフォトセンサとして用いた。また、受信した信号波形をオシロスコープでも観測した。

3.4 実験結果

実験結果を図 3 に示す。受信側では高周波になるほどフォトセンサの容量成分が大きくなり、波形にやや歪みが生じている。今後はセンサ素子を含めてさらに高速かつ正確に信号を受信する仕組みを検討する必要がある。オシロスコープを使わなくても、一様な照明下で位置に応じて埋め込まれた情報から異なる音を鳴らすことができている。

埋め込み周波数間の境界付近では波形の乱れが観測された。これは、隣り合う領域の光が干渉しているためだと考えられる。今回試作したプロジェクタの光学系では十分な解像度を実現できず、境界付近ではボケが生じたのが原因である。今後は、プロジェクタを精密設計するとともに、受信センサを含めて情報を埋め込むことが可能な解像度の限界に

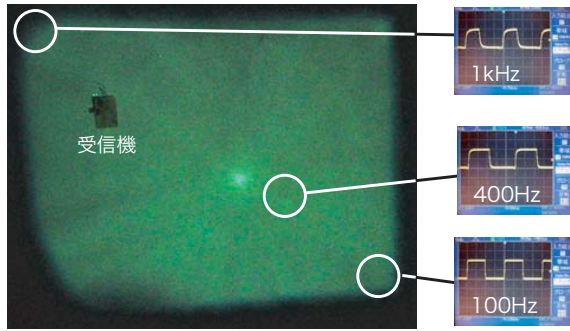


図 3: 周波数埋め込み実験結果

についても評価する必要がある。

視覚的なちらつきはスクリーン全体ではまったく感じられなかった。ただし、提案システムにおけるフリッカ周波数特性は、画面全体での高速切り替えによるフリッカではなく、画素ごとの点滅パターンによるフリッカである。また、人間の視覚のちらつき感度は網膜に入射する光の明るさの対数に比例するが、今回の試作プロジェクトでは十分な明るさが得られなかったためにちらつきが感じられなかった可能性もある。これらの点を踏まえて、本システムでのちらつきなどの視覚特性を評価実験などにより定量化する必要があると考えられる。

4 PWMを用いた静止画へのビット情報埋め込み

3.3 では同じ輝度に異なる ON/OFF 周波数を埋め込んだが、本節ではこれを異なる輝度ピクセルに拡張することで静止画へビット情報を埋め込みことを考える。

4.1 静止画への埋め込み原理

本節では輝度階調に合わせて 256 フレームを 1 周期として PWM 制御を行うことにした。いま、輝度 $L_{i,j}$ であるピクセル (i, j) に注目する。このピクセル (i, j) を PWM で表現するには 256 フレーム中、ON が $L_{i,j}$ フレーム (bit), OFF が $(256 - L_{i,j})$ フレームとなるように DMD を制御する必要がある。ここで、ON-OFF フレームの順序を考えると、 $L_{i,j}$ を表現する方法は ${}_{256}C_{L_{i,j}}$ 通りある。すなわち、 $\log_2({}_{256}C_{L_{i,j}})$ bit の情報を埋め込むことが可能である。DMD の動作速度は 8kHz であるので、ピクセル (i, j) における単位時間あたりの埋め込み情報量 (伝送速度) $I(i, j)$ は以下の式で表される。

$$I(i, j) = \frac{8000}{256} \log_2({}_{256}C_{L_{i,j}}) \quad \text{bit/sec} \quad (1)$$

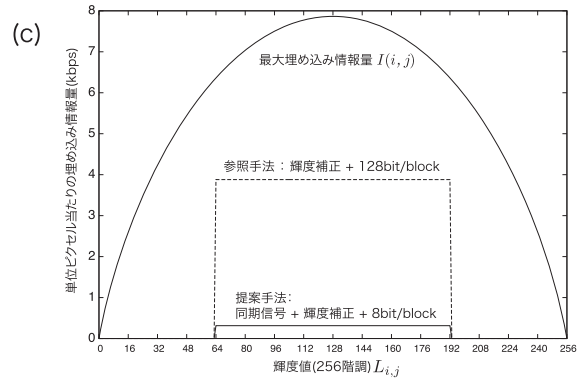
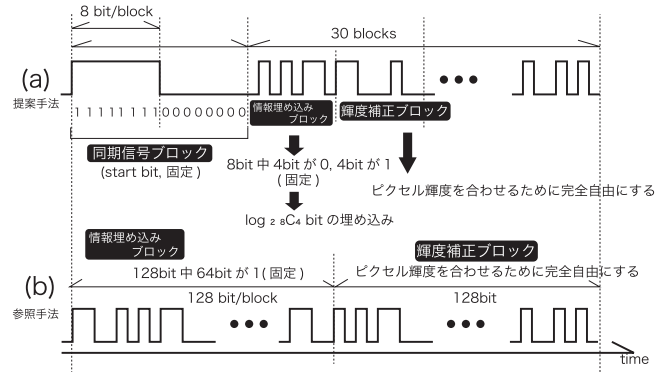


図 4: 埋め込み手法と埋め込み情報量

埋め込み可能な情報量はピクセル輝度によって異なり、輝度値 128/256 で最大値 7.86kbps, 0/256, 256/256 で最小値 0bps を取る (図 4-c)。

4.2 埋め込み提案手法

本システムの伝送方式は OOK であり、変調法としてベースバンド変調や副搬送波変調などがある。これらは先行研究が豊富であるが、本システムでは実際に伝送路である可視光が人間の視覚には知覚されてはいけないという制限を考慮しなければならず、従来方式を拡張するのは難しい。また、照明光通信の変調方式についても、反転パルス位置変調 (I-PPM) や副搬送波反転パルス位置変調 (SC-I-PPM) などノイズを考慮した方式が提案検討されているが [5], これらは LED が DMD 方式よりも高速に動作できる特性と、輝度ができるべく明るく、かつ、一定であればという条件を利用しており、本システムのような異なる輝度ピクセル間に情報を埋め込む方式には拡張しにくい。

そこで、4.1 の埋め込み原理に従って送信情報を符号化する方法を検討したい。まず、本システムの使用目的によって、符号化方法はいくつか考えられる。例えば、輝度が中間値 128/256 に近い範囲にのみ多くの情報を埋め込むという局所の方策や、逆に、投影範囲に全体に埋め込む大局の方策などが

考えられる。一般的に、埋め込める情報量と輝度範囲(ダイナミックレンジ)はトレードオフの関係にある。本稿のシステムでは、映像全範囲に渡ってピクトグラム情報埋め込むアプリケーションを想定しているため、特に以下のような条件を必要とする。

- i. 同期信号が含まれること
- ii. デコーダがシンプルであること
- iii. 画面全体が一樣に情報を埋め込めること
- iv. ちらつきが知覚されないこと

iはどのタイミングで送信ビット列が開始されるのかをプロジェクトン信号の中に入れるために必要である。iiは受信側の計算コストに関わってくる。例えば、埋め込みの原理で言えば輝度128のピクセルには ${}_{256}C_{128}$ 通りの情報が埋め込み可能であるが、その分の膨大なルックアップテーブル(対応表)が必要になる。受信側でマイコンで処理を実装する場合、こうした膨大なテーブルを用意するのは得策ではない。また、実現するアプリケーションによって求められる埋め込み情報量が異なる。本稿のシステムでは実質的に64bit程度の情報量を埋め込めればよいので、そこまでの情報量は必要はない。iiiは投影範囲全体に一樣な方式で情報を埋め込むための条件である。スクリーン上で受信する埋め込み情報の解像度は理想的には投影映像の単位ピクセルが好ましいが、実質的にはプロジェクトン解像度や受光センサの受光面積などの影響により、受信解像度は低くなる。この理由により、ピクセルの近隣にも同じ情報を埋め込めることが必須である。周辺のピクセル群を一つの情報埋め込み単位として扱えれば、プロジェクトンや受光センサの性能に対して柔軟に対応できる。ivは、ON/OFFの切り替え周期が60Hz以上になるように配置することと同値である。

以上の4つの観点から、以下のような埋め込みアルゴリズムを提案する(図4-a)。まず、256フレーム(bit)を8bitづつ32ブロックに分割する。この32ブロックは3種類の要素に分類される。すなわち、2個の同期信号ブロック、15個の情報埋め込みブロック、15個の輝度補正ブロックである。それぞれについては以下のようにON/OFFを振り分ける。

- **同期信号ブロック(2ブロック)**: 送信ビット列の始まりを示す信号。
- **情報埋め込みブロック(15ブロック)**: 情報を埋め込むブロック。8bit中、4bitをON、4bitを

OFFとして割り当てる。すなわち、1ブロックには $\log_2({}_8C_4) = 6.13$ bitの信号が埋め込める。

- **輝度補正ブロック(15ブロック)**: そのピクセル輝度に合わせて、8bitに自由にON/OFFを割り当てるのが可能。例えば、輝度が低いピクセルの場合にはすべてOFFを割り当てる。また、受信側ではこのブロックは無視される。

ブロックの順序は、始めに同期信号ブロック、残りのブロックについては情報埋め込みブロックと輝度補正ブロックを交互に繰り返す。この手法では、輝度値が64-192のピクセルに一樣に情報が埋め込み可能である。また、この範囲外のピクセルに関しては情報埋め込みを行わない。さらに、情報埋め込みブロックと輝度補正ブロックを交互に配置することでON/OFF周波数が1kHz以上になるようにして、視覚的ちらつきを抑えるという狙いがある。

本提案手法の埋め込み情報量と4.1で述べた最大埋め込み情報量について比較した(4-c)。また、比較検討のために本提案手法の条件を緩和した参照手法(図4-b)も図に含めてある。この参照手法と提案手法の相違は同期信号がないことと、128bitを1ブロックとして扱う(デコーダが複雑になる)ところにある。

埋め込み情報量という点だけを比較すれば、本提案手法が際立って小さい。また、輝度64-192の範囲に渡って一定である。一方、参照手法を見ると、同期信号をなくしてデコーダを複雑にすれば、埋め込み可能な輝度範囲を保ったまま埋め込み情報量が大きく上がることがわかる。先にも述べたように今回の応用利用ではこの程度の情報量が埋め込めれば十分であるが、しかし、今後はさらに埋め込み情報量を求められることは必至である。システムアプリケーションを含めた埋め込み手法の改善が必要であると考えられる。

4.3 応用利用

DMDのミラー制御は4.1で述べた手法を適用する。DMDはPCで制御し、動作速度8kHzとして、256フレームを単純に繰り返すようにした。受信機では可視光フォトダイオードで受信し、コンパレータとデコーダを介してLEDディスプレイにピクトグラムを出力した(図6)。

実験結果を図7に示す。場所に応じて、異なったパターンのピクトグラムが受信できている。試作したプロジェクトンの光学系精度の問題で、鮮鋭な画像を提示するには至らなかった。このため、情報埋め込みが可能な解像度が犠牲になっている。この問題

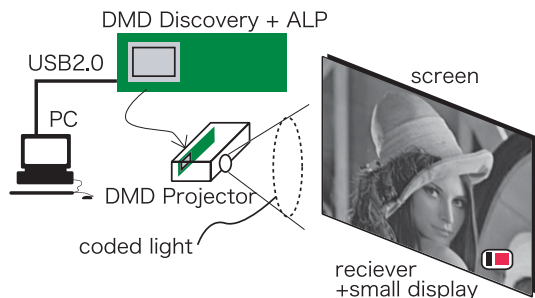


図 5: 試作システム

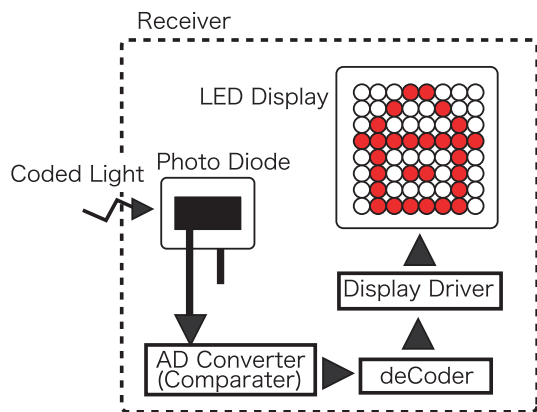


図 6: 受信機の構成

は、プロジェクタ光学系の再設計によって改善されるものであり、本手法の本質的な問題ではない。

5 むすび

本稿では、ProCam システムとしての空間分割型可視光通信の位置づけを行った。また、基礎実験として、ON/OFF 周波数の送受信実験を通して、位置に依存した可視光通信が行えることを確認した。その上で、映像の PWM 制御の冗長性を利用した静止画への情報埋め込み手法を提案、実装し、プロジェクタ静止映像の中にピクトグラム情報を埋め込

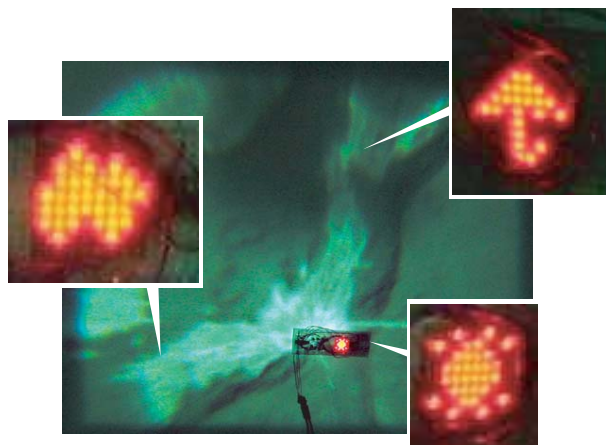


図 7: 実験結果

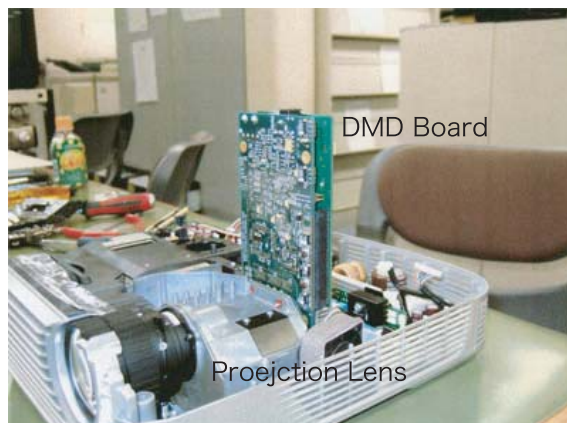


図 8: 開発中の DMD プロジェクタ



図 9: 開発中のプロジェクタによる投影映像

めることを確認した。これらの結果より、DMD を用いた空間分割型可視光通信が有効であると考えられる。

本稿の実験では、DMD プロジェクタの光学の不精度によってロバスト性がやや欠けていた。現在は、DMD プロジェクタの光学系を改良している段階である。開発中の DMD プロジェクタとこのプロジェクタによって投影した映像を図 8, 9 に示す。

今後は、受信機側に複数のフォトセンサを用いることで、構造的に空間を捉える方向で研究を進めていく予定である。

最後に、有益な助言を頂いた東京大学原島博教授に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 北村匡彦, 苗村健, “DMD を用いた空間分割型可視光通信の基礎検討”, 情報科学技術レターズ, Vol.5, LK-010, pp.293-295 (2006)

- [2] 北村匡彦, 苗村健, “DMD を用いた空間分割可視光通信による静止画への情報埋め込み”, 日本バーチャルリアリティ学会第11回大会, pp. 502 - 505 (2006)
- [3] Y. Tanaka, S. Haruyama and M. Nakagawa, “Wireless optical transmission with the white colored LED for the wireless home links,” Proc. PIMRC 2000, pp.1325 - 1329 (2000)
- [4] 可視光通信コンソーシアム, <http://www.vlcc.net/>
- [5] 杉山英充, 春山真一郎, 中川正雄, “可視光通信に適した変調方式の実験的検討”, 信学技報, OCS2005-19, pp.43-48 (2005)
- [6] 石田正徳, 宮内聡, 小峰敏彦, 春山真一郎, 中川正雄, “2次元送受信機による高速な並列空間可視光通信システムの設計”, 信学技報, OCS2005-20, pp.49-54 (2005)
- [7] 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VR大会論文集, pp.441-442 (2005)
- [8] 中村亨大, 杉本麻樹, 小島稔, 新居英明, 稲見昌彦, “Display-Based Computing の研究 第二報: 画像提示装置を用いた一姿勢計測”, 第10回VR大会論文集, pp.455-456 (2005)
- [9] 小島稔, 杉本麻樹, 中村亨大, 富田正浩, 新居英明, 稲見昌彦, “Display-Based Computing の研究 第三報: 小型ロボットを用いたMRゲーム環境の構築”, 第10回VR大会論文集, pp.451-454 (2005)
- [10] 小島稔, 児玉和樹, 中村亨大, 杉本麻樹, 稲見昌彦, “Display-Based Computing の研究 第五報: ライトペンの試験的実装”, 情報処理学会研究報告, 2006-HI-118, pp.53-55 (2006)
- [11] 香川景一郎, 檀野隆一, 山本幸司, 前田勇希, 三宅康也, 田邊英樹, 政木康生, 布下正宏, 太田 淳, “ネットワークを利用した携帯型情報家電マルチリモコン「オプトナビ」システムの基本実証”, 映像情報メディア学会誌, 2006年6月号, p. 897 (2006)
- [12] 新居英明, 稲見昌彦, “再帰性光通信技術の研究”, 第8回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp.539-542 (2003)
- [13] R.Raskar, P.Beardsley, J.V.Baar, Y.Wang, P.Dietz, J.Lee, D.Leigh, T.Willwacher, “RFIG Lamps: Interacting with a Self-Describing World via Photosensing Wireless Tags and Projectors”, ACM Transactions on Graphics (TOG), Volume 23, Issue 3, pp. 406-415 (2004)
- [14] D. Dudley, W. Duncan, J. Slaughter, “Emerging Digital Micromirror Device (DMD) Applications,” SPIE Proceedings vol. 4985 (2003)
- [15] DLP technology, <http://www.dlp.com/>
- [16] D. Cotting, M.Naef, M. Gross, H. Fuchs, “Embedding Imperceptible into Projected Images for Simultaneous Acquisition and Display”, Proc. ISMAR2004, pp.100-109 (2004)
- [17] Q. Chen, T. Wada, “A Light Modulation/Demodulation Method for Real-time 3D Imaging”, Proc. 3DIM2005, pp. 15-21 (2005)
- [18] 木村 翔, 筧 康明, 苗村 健: “赤外可視変換素材を用いた選択的情報提示に関する基礎検討”, FIT2006 第5回情報科学技術フォーラム 情報科学技術レターズ, vol. 5, LK-009, pp. 289-291 (2006)