

DMD を用いた空間分割型可視光通信の基礎検討

A Basic Study on Position-dependent Visible Light Communication using DMD

北村 匡彦[†]
Masahiko Kitamura

苗村 健[†]
Takeshi Naemura

1 はじめに

近年, 日常的な照明の中に情報を埋め込むことで, 生活シーンに溶け込みつつも, 高出力でも人体に安全で広帯域の情報伝達を行うことができる可視光通信が注目されている [1, 2]. 一方, ディスプレイ映像を人間だけでなく機械に対して提示することで, さまざまな制御を可能にする Display-based Computing(DBC) の考え方が提案されている. 本研究では, DMD(Digital Micromirror Device) を用いることで, 従来の可視光通信を拡張し, DBC の基盤となり得るシステムを提案する.

2 本研究の位置づけ

可視光通信では, 高輝度白色 LED 照明を高速点滅させ, ビット情報を可視光にのせて通信を行う研究が進められている [1]. 高速点灯により時間軸方向に埋め込まれた情報は, 可視光であっても人に直接見えるものではない. 可視光を用いる利点として, 電磁波の人体に与える影響という観点からは可視光は高出力でも安全であり, 電波法の規制を受けずに広帯域を使用可能であるなどの長所を挙げることができる. さらに, 普段使う照明をそのまま使うことができるコピキタ性を兼ね備えており, 信号機や街頭ディスプレイなどの既存の社会インフラにも適用できるため, 実用性が高い. しかし, これまでは主に情報を空間に対して一様に発信する形態での開発が中心であり, 光の指向性を積極的に利用して精細な位置依存性のある通信を実現する検討はまだ進んでいない状況にある. また, 人の目には単なる“明かり”として見えるものがほとんどで, 画像や文字などの映像情報と可視光通信を有機的に結びつけた研究はなされていない.

一方 DBC は, 映像を機械に対して提示し, 計測や制御を能動的に行うというものである [3]. プロジェクタを利用することにより, 空間的に広範囲にわたって同時に多数の機械をダイナミックに操作をすることが可能である. 機械を制御しない位置には人に見せる映像情報を提示する拡張現実感システムも提案されている [4, 5]. DBC は可視光を空間分割し, さらに輝度や色情報をキーにして人にも見える形で機械を制御するための情報を埋め込んでいる. このため, 人と機械のそれぞれに対して同じ位置に別々の情報を提示することが, 現状ではできていないという問題がある.

本研究では, 上記の可視光通信と DBC の長所を併せ持つ新たなシステムを提案し, その基礎的な検討結果について報告する. 具体的には, プロジェクタで広

く利用されている DMD を用いることにより, 下記のようなシステムの実現を目指す.

- プロジェク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
- 人間にはプロジェク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

本稿では, 以上の議論の基礎となる DMD を用いたモノクロプロジェクタを試作し, 一様な輝度に照らし出された平面の中に, 位置に依存した情報を時間軸方向に埋め込む実験を行う. さらに, フォトセンサを介して埋め込み情報を音に変換して取り出す.

今回の実験では, 人の目には同じ輝度に見える状況でも, 画素毎に異なる音情報を埋め込むことができるまでを確認した. 今後は, 意味のある投影画像の中に情報を埋め込み, さらに受信側では受け取ったビット情報をデジタル処理してより高度な処理に適用することを目指す. 本稿の実験システムは, そのための基本部分の実装という位置づけである.

3 DMD を用いた埋め込み情報提示

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り, 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とになる. さまざまなビット列を画

[†] 東京大学大学院学際情報学府, Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, The University of Tokyo

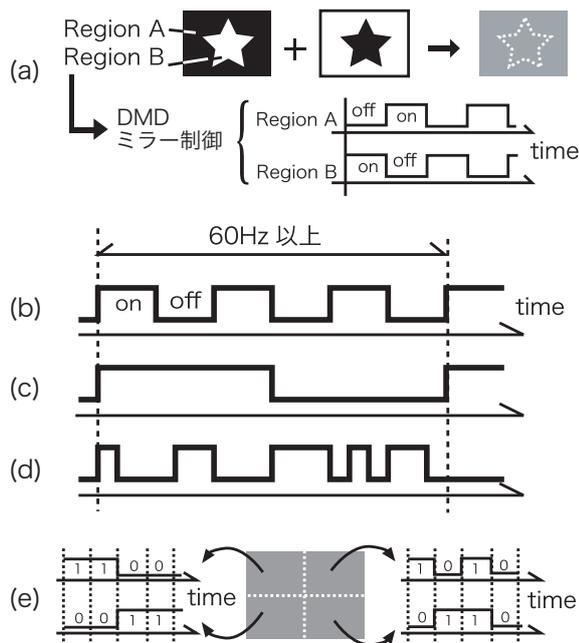


図 1: 提案システムの基本原理

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)) .

以上のような、DMD の高速動作性を応用し、PWM 輝度変調の冗長性を利用して形状計測を行う試みはいくつか報告されている [7, 8] . しかし、いずれも形状計測のためのスリット光を目に知覚されない速さや輝度勾配で表示して、同期したカメラで観測するという手法である . また、DMD を用いるアプローチも既存の DLP 輝度変調方式の中に映像信号としてキー情報を畳み込んでいる . それに対して、本稿の研究では DMD のミラー動作の高い自由度を利用し、受光素子を用いて位置を取得することを目的にしており、以上のような研究とは異なる .

3.2 DMD と埋め込み階調表現

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 (Digital Micromirror Device) 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 [6] .

光源から出た光を DMD のミラー角度によって反射方向を制御する . ON 状態ミラーの画素では光源光をスクリーンに導き、OFF 状態ミラーの画素では光吸収材で光源光を吸収する . ミラー制御を高速に行うことで、スクリーン上では高速な ON/OFF の切り替え表示が可能となる (図 2) . この方式は、光学系を含め

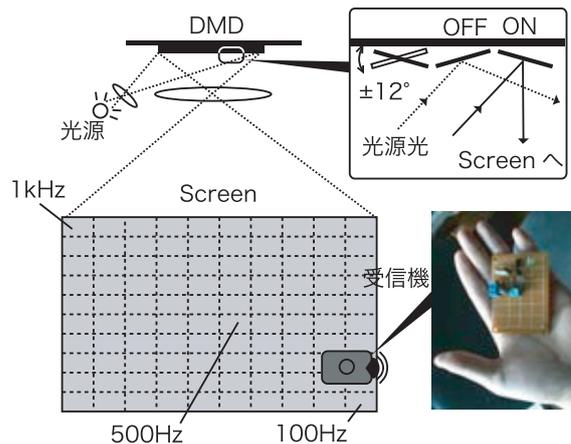


図 2: 試作システムの概要

DLP プロジェクタとほぼ同じであるが、DLP 方式では入力された映像輝度信号に対して一様な PWM 階調表現しか行っていない . これに対して、本稿の提案システムでは PWM を多様化することで階調表現は維持したままビット情報の埋め込みを実現する .

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 . 本稿では、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 周波数を単純に音として取り出すことで、提案システムの可能性を明らかにする .

4 プロトタイプシステムの実装

4.1 システム構成

システムの概要を図 2 に示す . 送信側は基本的に 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 .

4.2 実験結果

はじめに、試作したプロジェクタの投影試験を図 3 に示す . 簡易な光学系で実装しているため、歪みが生じていることが分かる . また、光源輝度に関しても改

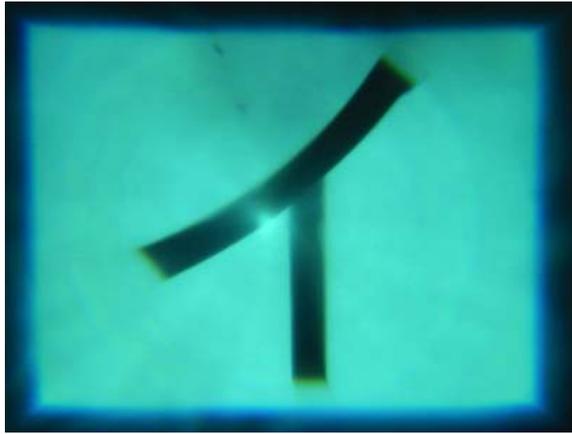


図 3: 試作プロジェクタの試験投影

善の余地がある．これらの問題は光学系と光源をより精密に設計実装することで解消できるものであり，今回の実験においては本質的な問題にはならない．

次に，実験結果を図 4 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タ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．

5 むすび

本稿では，可視光通信と DBC の融合と拡張という位置づけとして，新たなシステムを提案し，プロトタイプを試作した．今後は映像の中に情報を埋め込み，映像と位置情報が協調した応用を目指す．また，センシング側にデジタル処理を施して，さらに柔軟な情報アクセスを実現する予定である．

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．

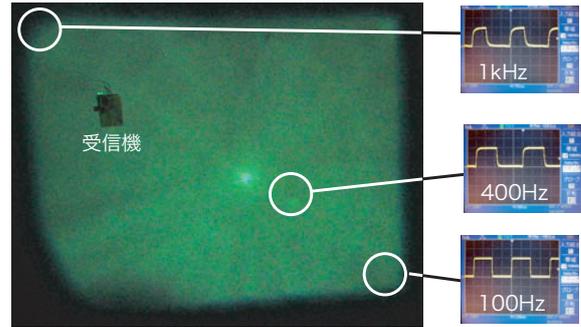


図 4: 実験結果

参考文献

- [1] 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.
- [2] 可視光通信コンソーシアム, <http://www.vlcc.net/>
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] D. Dudley, W. Duncan, J. Slaughter, "Emerging Digital Micromirror Device (DMD) Applications," SPIE Proceedings vol. 4985, 2003.
- [7] D. Cotting, M.Naef, M. Gross, H. Fuchs, "Embedding Imperceptible into Projected Images for Simultaneous Acquisition and Display", Proc. ISMAR2004, pp.100-109, 2004.
- [8] Q. Chen, T. Wada, "A Light Modulation/Demodulation Method for Real-time 3D Imaging", Proc. 3DIM2005, pp. 15-21, 2005.