



赤外領域まで拡張した可視光通信プロジェクトの開発

亀井郁夫¹⁾, 平木剛史²⁾, 福嶋政期³⁾, 苗村健³⁾

1) 東京大学工学部電子情報工学科 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, kamei@nae-lab.org)

2) 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, hiraki@nae-lab.org)

3) 東京大学 大学院情報学環 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, {shogo, naemura}@nae-lab.org)

概要: 筆者らは、映像のすべての画素に高速点滅で不可視の情報を埋め込む可視光通信プロジェクトの研究を進めてきた。しかし、従来の手法では、可視光源のみで同期処理とデータの送信をしていたため、投影映像の画質劣化が生じていた。そこで、プロジェクトに赤外光源を追加し、赤外領域で画素単位での不可視のデータ転送を行うことで、投影映像の画質向上につながることを期待される。本稿ではこれを実現するためのプロジェクトを開発し、その映像投影及び信号送受信性能の確認を報告する。

キーワード: 可視光通信プロジェクト, 赤外線レーザー, DMD, Augmented Reality

1. はじめに

筆者らは、DMD を用いて各画素を高速に点滅させて付加情報を埋め込む PVLC (空間分割型可視光通信: Pixel-level Visible Light Communication) の設計とその実装を進めており、人間に提示する映像の上に不可視の情報を時分割に重畳し、受光機が信号を取り出すことでデバイスに対する情報提示を可能にした [1]。しかし、従来の PVLC では可視光を高速に変調することで情報を送信していたため、原理的に画質の劣化が避けられなかった。また、デバイスが信号を受信する際には投影映像をフィルタリングする必要があり、デバイス側での信号処理が負担となっていた。

そこで本稿では、PVLC を赤外領域にまで拡張し、デバイスに対する情報提示を赤外光を用いて行う手法を提案する。これによって投影する映像の画質の向上が見込めるほか、赤外領域と可視領域で役割を分担することにより情報の送信プロセスが大幅に簡略化され、さらに受信側での投影映像のフィルタリングが不要となる。

2. 関連研究

2.1 可視光を用いた映像と情報の重畳投影

ディスプレイを人間に対して映像などの情報を提示する媒体としてだけではなく、ロボットなどのデバイスに対しても制御信号や位置計測信号などの情報を提示するものとして捉える、DBC (Display-Based Computing) という概念が提案されている [2]。ディスプレイを機械に対する情報提示装置として用いる利点として、ピクセルごとに異なる情報を提示できるため位置に依存する情報の送信が容易であることや、位置合わせのためのキャリブレーションが原理上不要であること、さらに複数の端末に対して同時に情報を提示することが容易であることが挙げられる。ただし、こ

の研究においてはデバイスに対する情報が容易に目に見えるため、映像の外観を損ねるといった課題があった。

Rasker らが開発した [3] は、カメラとプロジェクトが一体となったシステムを考案し、カメラによって姿勢を検出したのちプロジェクトで信号を指向的に送信する手法を用いていた。

新居らは、可視光 LED をシート状に並べ、各 LED を点滅させるタイミングをずらすことで、受光素子の信号のパターンから位置を取得する手法を考案した [4]。しかし、これは、解像度が 20px と極めて低く、細かな位置情報を取得するのに適していなかったうえ、単色の表示に限られた。

筆者らが設計と実装を進めてきた PVLC とは、DMD の高速な ON / OFF を利用し、映像を高速に点滅させることで、受光素子にしか検出できない情報を人間に見える映像に埋め込んで投影するシステムである [1]。投影される映像の点滅する速度が十分速くなると、人間の目はその点滅を知覚することができず、映像の輝度の平均値を知覚することがわかっている。これを利用し、映像と情報を時分割に投影し、情報の投影によって乱れた輝度を調整することで人間の目には違和感のない映像が見えることになる。

図 1 に PVLC の概念を示す。PVLC では図 2 に示すようなデータ構造を用いて映像と情報の投影を行っており、同期フレーム部でデバイスに情報送信の開始を伝え、データフレーム部で情報を送信し、輝度調整フレーム部で人間の目に自然な映像として見えるよう輝度を調整している。しかし、PVLC では映像に情報を重畳するために同期フレーム部やデータフレーム部が加わるため、通常のプロジェクトで映像を投影するのに比べてコントラストが劣化するほか、信号の受信機は投影される映像も受信するため、信号のみをフィルタリングによって抽出する処理が必要であった。

Ikuo KAMEI, Takefumi HIRAKI, Shogo FUKUSHIMA, and Takeshi NAEMURA

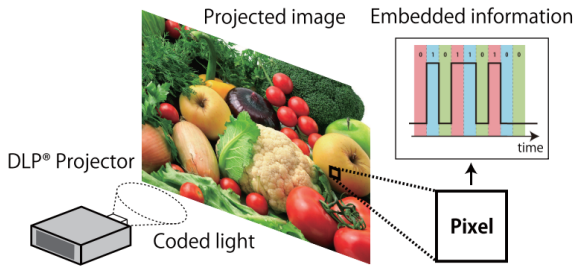


図 1: PVLC の概念図

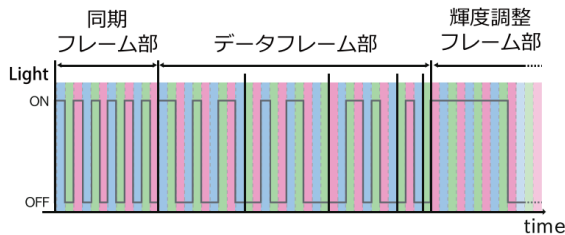


図 2: PVLC のデータ転送

2.2 赤外光を用いた映像と情報の重畳投影

白井が提案した秘影プロジェクタは、赤外線を用いることで情報を不可視にしておき、赤外線プロジェクタを用いてマーカを投影し、ユーザは携帯端末をかざすことによって追加の情報を得られる [5]。この方法では可視の映像を提示するためには別のプロジェクタが必要となり、それらの位置を合わせておく必要がある。また、Lee らは、物体の位置情報を取得するために赤色 LED と赤外線 LED を組み合わせたプロジェクタを開発し、赤色 LED では人間の目に見えるパターンを、赤外線 LED ではグレイコードと呼ばれるパターンを投影し、赤外線の受光素子でデコードすることで位置情報を取得した [6]。しかし、これらの手法で投影できる映像は単色に限られ、映像の表現力に課題があった。

3. 提案手法

映像投影に加えデバイスに情報提示を行うこれまでのプロジェクタは、映像の質を落とさず情報提示を行うことが困難であるという課題を抱える。そこで、本章ではこの課題を解決するためのプロジェクタの設計とそのプロトタイプを示す。

3.1 システムの概要

図 4 に提案するシステムの概要を示す。本システムは、DMD および DMD コントローラと、コントローラからの LED 点滅信号を適切に変換する信号変換ボード、そして可視光と赤外線の光源およびそれらのドライバからなり、これらはすべて電気的に接続される。

緻密な情報提示と高品質な映像投影を両立させるために、このシステムでは可視光を映像の投影のみに、そして赤外光を情報の投影のみに使い、映像と情報を光の波長の上で分割する。

図 3 にこのシステムのデータ転送のタイムチャートを示

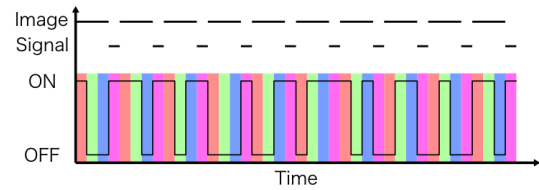


図 3: 提案システムのデータ転送

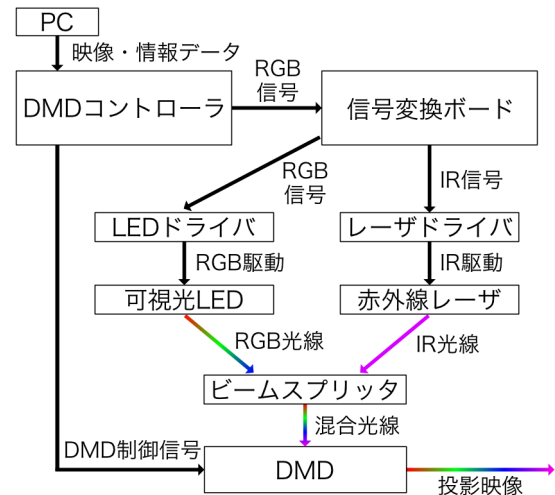


図 4: 提案システムの概要

す。可視光と赤外光は DMD を共有するため、映像と信号は時分割に投影される。可視光には映像のみが、赤外光には信号のみが反映されるため、人間の目に知覚される映像にデバイスへの信号が加わることがなくなり、情報の投影による映像のコントラストの劣化が原理上起こらない。

可視光のみを用いて情報を伝送する従来の PVLC においては、全体のフレーム数を n 、オンのフレーム数をそれぞれ n_{on} とすると、表現される輝度 $\frac{n_{on}}{n}$ に依存して送信できる情報量 $\log_2 \left(\frac{n}{n_{on}} \right)$ bit が異なってしまうのを避けるため、情報伝送のみを行うデータフレームを設け、その内部では $n_{on} = \frac{1}{2}n$ とし、オンとオフのフレーム数を同一にしていた。しかし、これによって表現できる輝度範囲は制限され、コントラストの劣化が生じていた [7]。これに対し、デバイスへの情報提示をすべて赤外領域で行うことでこれらの処理は不要となり、映像のコントラストを改善することができる。

また、受光素子で受信する信号は、適切に可視光をカットすることで赤外光の点滅のみとなるため、送信する情報のエンコード方法によっては同期が不要となる。これにより、映像のコントラストの表現力が通常のプロジェクタと同等になる。

3.2 システムの動作プロセス

次に、提案するシステムの動作プロセスを説明する。投影する映像と送信する信号はあらかじめ PC から DMD コントローラに送信される。投影する際には、DMD コント

表 1: 信号変換ボードの真理値表

	R _{in}	G _{in}	B _{in}	R _{out}	G _{out}	B _{out}	IR
①	F	F	F	F	F	F	F
②	F	F	T	F	F	T	F
③	F	T	F	F	T	F	F
④	T	F	F	T	F	F	F
⑤	F	T	T	F	F	F	F
⑥	T	F	T	F	F	F	F
⑦	T	T	F	F	F	F	T
⑧	T	T	T	T	T	T	F

ローラからは DMD の制御信号と LED の制御信号が出力され、このうち DMD 制御信号はそのまま DMD に伝達され、DMD を制御する。一方、LED の制御信号は、まず信号変換ボードに到達する。ここでは、R、G、B 三色の ON / OFF 信号の組み合わせから、R、G、B、IR の 4 色の ON / OFF 信号の組み合わせに変換し、ここで可視光源と赤外光源の制御信号を生成する。信号の変換により各光源の ON / OFF 信号が出力され、この信号は各光源のドライバに到達して光源を駆動する。2 つの光源から発せられた光線はビームスプリッタにより統合されて DMD に達し、反射された光線はレンズを通して投影面に投影される。

ここで、信号変換ボードの動作について述べる。通常の DMD コントローラには RGB の 3 色の光源制御の出力があるが、提案するシステムでは RGB に加えて赤外線の光源制御が必要となり、3 つの出力では赤外光源の制御ができない。しかし、ここでは通常映像を投影するときには RGB の順番に 1 つずつ切り替えるため RGB の二色以上を同時にオンにすることはなく、3 つの信号の ON / OFF の組み合わせ $2^3 = 8$ 通りのうち各々の色がオンの状態とすべてオフの状態の合計 4 通り以外は使われないことに着目した。この未使用の 4 通りのうち 1 通りを可視光の代わりに赤外光源を点灯する信号と読み替えることによって、すべての光源を制御することが可能となる。このときの真理値表を表 1 に示す。①は消灯状態で、②、③、④は RGB のうち 1 色を点灯させるもので映像の投影に用いられ、⑦は IR を点灯させるもので情報の送信に用いられる。

3.3 実装

上で述べたシステムの有効性を確認するために、実際に提案するシステムのプロトタイプを製作した。完成した全体像を図 5 に示す。なお、DMD は EKB 社の DLP LightCrafter E4500 MKII IR Laser に内蔵の DLP4500FQE を用いた。DMD コントローラは、Keynote Photonics 社の LC4500 Controller を用いた。信号変換ボードは表 1 に基づき回路を実装した。LED には Luminus Devices 社の超高輝度 4 色



図 5: 提案するプロジェクタのプロトタイプ。

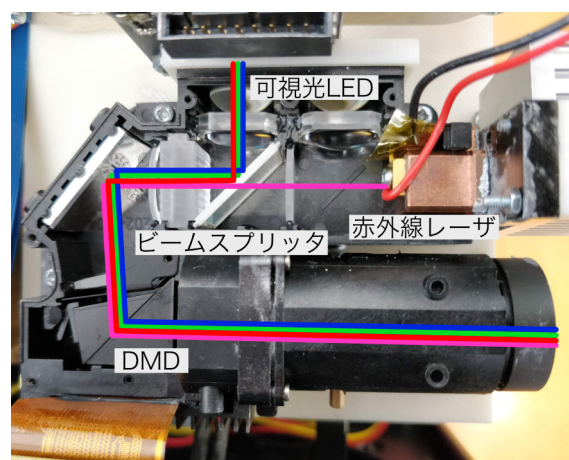


図 6: 製作した光学系。赤外光源と可視光源からの光線が統合されて投影される。

LED, SBM-160 を、赤外線レーザーには前述の DLP LightCrafter E4500 MKII IR Laser に内蔵されていた 10W の 808nm レーザを用いた。LED のドライバには N-ch MOSFET を用いたドライバを使用し、赤外線レーザーのドライバには前述の DLP LightCrafter E4500 MKII IR Laser に付属のものを用いた。ビームスプリッタには Edmund Optics 社のプレート型ビームスプリッタ 75R/25T 12.5x17.5 を用い、光学系は LightCrafter E4500 MKII IR Laser を改造したものを用いた。図 6 に作成した光学系を示す。この光学系により、可視光源と赤外光源からの光線が統合され、同一の光源として映像投影と情報提示を行うことが可能となる。

4. 実験

4.1 映像投影の確認

製作したプロジェクタで、可視光と赤外光による投影がそれぞれ行えることを確認した。可視光では図 7 の画像を、赤外光では図 8 のパターンを投影した。実験は外部の光が入らないよう消灯した夜の実験室で行い、撮影は赤外画像の撮像が可能なスマートフォン (OnePlus 5T) のカメラで行った。

PC からデータをプロジェクタに送信し、それぞれ図 9,

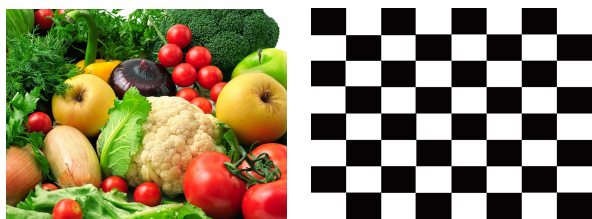


図 7: 可視光源用の投影テスト画像



図 9: 図 7 を可視光源で投影している様子

図 10: 図 8 を赤外線光源で投影している様子

図 10 のように投影できることを確認した。

4.2 情報送受信の確認

製作したプロジェクタで赤外線を用いて ON / OFF 信号を送信し、受光素子で実際に受信できることを確認した。

実験室内で投影面からプロジェクタを 40 cm 離して設置し、プロジェクタ側から赤外線信号を 1.5 ms 毎に ON / OFF を繰り返すように設定して壁面にパターンを投影した。一方、壁面には赤外線受光器を設置し、その出力信号の波形をオシロスコープ TDS2024C で計測した。赤外線受光器にはフォトダイオード S6775-01 を用いた。このフォトダイオードは可視光をカットするため、赤外光の信号のみを受信できる。出力信号の波形は図 11 のようになった。図より、オンオフの間隔が 1.5 ms になっていることが確認でき、これよりプロジェクタから送信した信号を正しく受信できることがわかる。

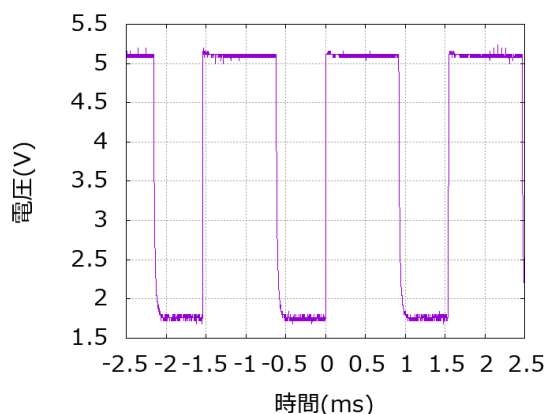


図 11: 赤外線信号の送受信確認

5. おわりに

本稿では、可視の映像と不可視の情報を画質の劣化なく重畳して投影するため、赤外線を用いて不可視の情報提示を行う手法を提案し、実際にこれを実現するプロジェクタを製作して正しく投影と信号の送受信が可能であることを確認した。

今後の展望として、インタラクティブな映像と情報の投影を可能にすることで、不可視の光源を複数用いることで不可視の情報の多重化ができるようにすること、提案システムを用いたアプリケーションを制作することが考えられる。謝辞 本研究は、JSPS 科研費 JP16H01739, JSPS 特別研究員奨励費 JP17J04216 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 北村匡彦: “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, **5**, pp. 293–295 (2006).
- [2] 稲見, 杉本, 新居: “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”, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, **10**, pp. 3C1–1 (2005).
- [3] R. Raskar, P. Beardsley, J. van Baar, Y. Wang, P. Dietz, J. Lee, D. Leigh and T. Willwacher: “RFIG lamps”, ACM Transactions on Graphics, **23**, 3, p. 406 (2004).
- [4] H. Nii, M. Sugimoto and M. Inami: “Smart Light-Ultra High Speed Projector for Spatial Multiplexing Optical Transmission”, 2005 Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05) - Workshops, Vol. 3, IEEE.
- [5] 白井良成: “秘映プロジェクタ: 不可視情報による実環境の拡張”, 第 11 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ, pp. 115–122 (2003).
- [6] J. Lee, S. Hudson and P. Dietz: “Hybrid Infrared and Visible Light Projection for Location Tracking”, Proceedings of the 20th annual ACM symposium on User interface software and technology - UIST '07, p. 57 (2007).
- [7] 北村, 苗村: “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”, 日本バーチャルリアリティ学会論文集, **12**, 3, pp. 381–388 (2007).