This article is a technical report without peer review, and its polished and/or extended version may be published elsewhere.

第 27 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集（2022 年 9 月）

# 不可視の色振動を用いた空中像への情報埋め込み手法の基礎検討

永野里奈 [1)]，服部真吾 [1)]，平木剛史 [2)]
Rina NAGANO, Shingo HATTORI, and Takefumi HIRAKI

1) 筑波大学 情報学群 情報メディア創成学類（〒 305-8550 茨城県つくば市春日 1-2, {nagano, shatto}@pml.slis.tsukuba.ac.jp）
2) 筑波大学 図書館情報メディア系（〒 305-8550 茨城県つくば市春日 1-2, hiraki@slis.tsukuba.ac.jp）

**概要**: 人間には知覚できない 25 Hz 以上の周波数で 2 色の色画像を切り替えて表示し、この不可視の色振動の有無で映像に情報を埋め込む手法が提案されており、拡張現実感システムにおいて使われている。本稿では、LCD ディスプレイと再帰透過光学素子による再帰透過光学系を用いて表示する空中像について、この不可視の色振動を用いて情報を埋め込む手法を提案する。再帰透過光学系を用いた空中像ディスプレイと、色振動を受光するための受光センサ回路を開発し、表示した空中像の光を受光センサ回路で受光し、実際に色振動情報の受信が可能である事を確認した。

**キーワード**： 不可視の色振動, 空中像, 再帰透過光学素子

## 1. はじめに

空中像とは、光学系を用いて、映像を空中に結像することである。この空中像とユーザの手の位置を対応付けることによって、空中像をタッチスクリーンとして利用し映像を操作することや、視覚情報に対応した触覚刺激を提示する手法が注目されている。このような手法において、ユーザの手の位置センシングには、一般的に赤外線カメラや深度カメラを用いるため、視覚ディスプレイと位置センシングは別々の技術で実現される。そのため、映像に対する位置ずれや、計算や通信による時間遅延が発生するという課題が存在する。

この課題を解決するため、映像内の位置に応じて映像に情報を埋め込む手法が提案されている。その 1 つとして、空間分割型可視光通信 (PVLC: Pixel-level Visible Light Communication) を用いて空中像に情報を埋め込む手法が挙げられる [1]。PVLC とは、輝度変調により映像に情報を埋め込む技術である。しかし、この手法を用いるには、全ての画素を高速に点滅させることができる高速プロジェクタが必要である。そこで、通常の LCD ディスプレイを用いて、不可視な色振動によって映像に画素単位の情報を埋め込む手法が提案されている [2]。不可視の色振動とは、人間には知覚できない 25 Hz 以上の周波数で同じ輝度の 2 色の色画像を切り替えて表示することで、この振動の有無で映像に情報を埋め込む手法である。よって、リフレッシュレートが 60 Hz である一般的な LCD ディスプレイで実現可能であるため、高速プロジェクタが不要である。しかし、この手法では LCD ディスプレイへの情報埋め込みを検討しており、空中像への適応は考えられていなかった。

そこで、本研究では不可視の色振動によって空中に表示した映像に情報を埋め込む手法について検討する。色振動を用いることで、映像と埋め込まれた情報が画素単位で一致するため、映像に対する位置ずれや、計算や通信による時間遅延を十分小さくすることが出来、空中像を用いたインタラクションにおいて十分な応答性を持つことができる [2]。

本稿では、色振動により情報を埋め込んだ映像を、LCD ディスプレイと再帰透過光学素子による再帰透過光学系を用いて空中像として表示した。そして、フォトダイオードを用いた受光センサ回路を設計、実装し、この空中像の光を受光することで、色振動によって埋め込まれた情報が受信できることを確認した。

## 2. 提案手法

本稿では、不可視の色振動により情報を埋め込んだ映像を、再起透過光学系を用いて空中像として表示する。また、フォトダイオードを用いた受光センサ回路を開発し、これにより空中像の光を受光、色振動情報の受信を行った。

提案手法は、色振動映像生成、空中像表示、色振動情報受信の 3 つの要素で構成される。本稿で開発した受光センサで空中像において色振動情報を受信している様子を図 1、空中像ディスプレイの外観を図 2、受光センサの外観を図 3 に示す。

### 2.1 色振動画像生成

色振動を用いて情報を埋め込む際に、筆者らが以前に提案した、色振動を構成する色ペアを高速に探索する手法 [3] を用い、色振動映像を生成する。この手法では、指定した色に対して、輝度を固定した色空間（Lab 色空間）におい

© 2022 日本バーチャルリアリティ学会

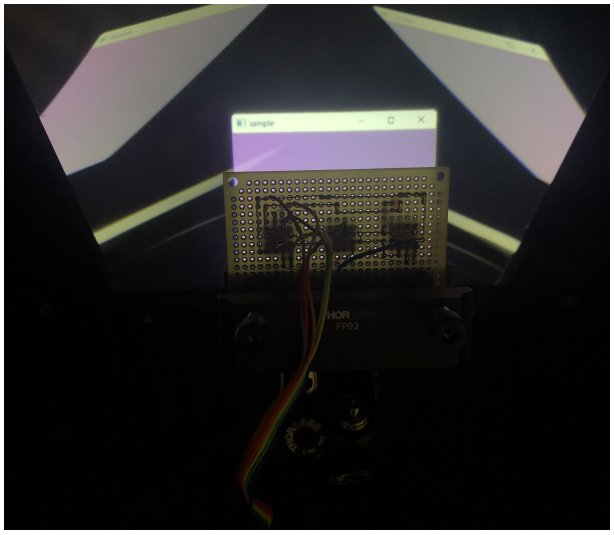


図 1: 空中像において受光センサで色振動情報を受信している様子

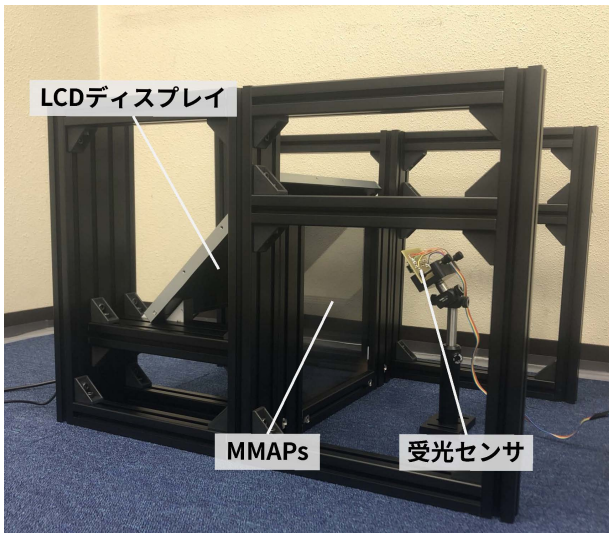



図 2: 空中像ディスプレイと受光センサの全体の外観

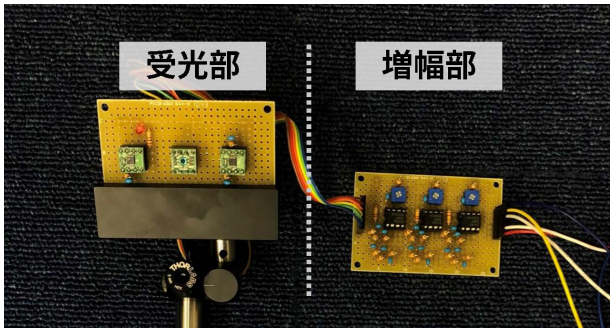



図 3: 受光センサの様子

て対称となる複数の色ペアを配列として生成し、この 2 つの配列中から色振動の条件を満たす色ペアを抽出することで、色振動画像を得る。

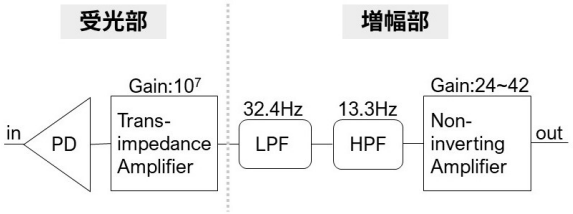



図 4: 受光センサの構成図

### 2.2 空中像表示

再帰透過光学素子 (ASKA3D-250NT, アスカネット, サイズ：250 mm × 250 mm) と LCD ディスプレイ（ULF1505-IX, LITEMAX, 輝度：1000 cd/m$^2$）を用いて、再帰透過光学系による空中像ディスプレイを実装した。再帰透過光学素子とは、入射した光を直交したミラーアレイで反射させることで、光学素子と面対称の位置に空中像を結像することができる光学素子である。以降、本稿ではこの素子を Micro Mirror Array Plates (MMAPs) と呼ぶ。実装した空中像ディスプレイでは、MMAPs と LCD ディスプレイを図 2 のように 45° をなすように設置した。

### 2.3 色振動情報受信

フォトダイオードとオペアンプを用いて、色振動を受信、検出するための受光センサ回路を実装した。30 Hz の色振動の信号と、交流電源による 50 Hz のノイズを分離して色振動信号のみを感度良く検出するために、Sallen-Key 4 次アクティブローパスフィルタを用いた。受光センサ回路の概要を図 4 に示す。受光部の回路基板においては、RGB 光をそれぞれ受光できるフィルタ付きのフォトダイオード（S9032-02, 浜松ホトニクス）で光を受光した後、オペアンプ（AD822ARMZ, Analog Devices）を用いたトランスインピーダンスアンプにより電流–電圧変換を行う。そして、増幅部の回路基板において、オペアンプ（NJM4580DD, JRC）

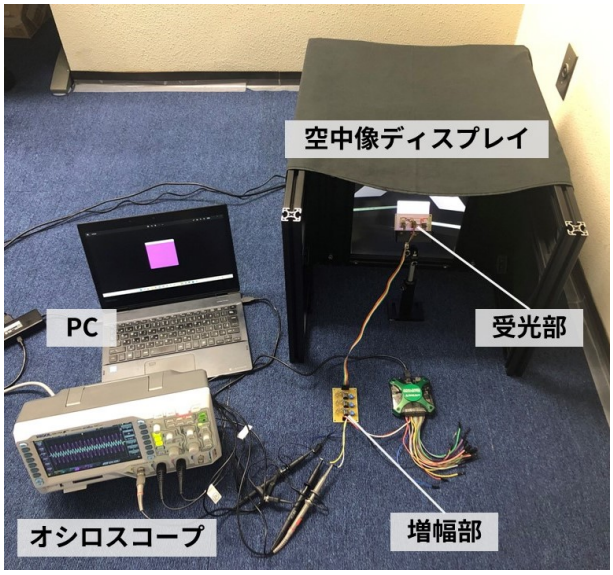



図 5: 実験環境の様子

© 2022 日本バーチャルリアリティ学会

を用いたアクティブローパスフィルタ、CR ハイパスフィルタ、オペアンプ（NJM4580DD, JRC）を用いた非反転増幅回路による増幅を経て電圧が出力される。

## 3. 実験

提案手法において、光信号が埋め込まれた映像を空中像として表示した時、受光センサによって意図した信号を受信できることを確認するため、実験を行った。実験では、本稿で開発した空中像ディスプレイにおける受光センサの出力電圧の波形を観測した。実験の様子を図 5 に示す。

### 3.1 実験環境

本稿では、異なる信号を埋め込んだ 5 種類のマゼンタ色 ((R, G, B) = (240, 100, 240)) の映像を用いた。異なる信号とは、RGB チャネルのそれぞれが、振動するときを 1、振動しないときを 0 としたときの、100、001、101、110、111 の 5 種類となる光信号である。色振動画像を生成する際はその振動強度を決定するパラメータとして VR (Vib Rate) と NVR (Non-Vib Rate) を設定する必要がある。VR、NVR は、例えば信号が 100 である時、色ペアの R チャネルの画素値の差が VR 以上であり、かつ G、B チャネルの画素値の差が VR × NVR 以下であることを意味するパラメータである。本実験で使用する色振動画像については、VR を 100、NVR を 0.25 に設定した。

受光センサ回路の受光部を、MMAPs に関して LCD ディスプレイの面対称の位置（MMAPs との距離が 90 mm、高さが 210 mm の位置）に、空中像と平行になるように 45° に傾けて固定した。そして、受光センサ回路の出力電圧の波形を、オシロスコープ (DS1104, RIGOL) を用いて測定した。また、外乱光の影響を取り除くため、空中像ディスプレイの筐体を暗幕で覆い実験を行った。受光センサ回路への電源供給は、回路測定ツール（Analog Discovery 2, Digilent）を用いた。

### 3.2 結果

オシロスコープで測定した電圧を図 6、その振幅の値を表 1 に示す。表 1 に示した通り、信号 100 を除き、信号 001、101、110、111 において、振動しているチャネルの振幅の最小値（以下、$VA_m$ と呼ぶ。）が 1.72 V 以上であり、振動していないチャネルの振幅の最大値（以下、$NVA_M$ と呼ぶ。）が 1.04 V 以下である。したがって、1.04 V より大きく 1.72 V 未満の値を閾値として設定することにより、4 種類の信号において振動の有無を分別することができる。

信号 100 においては、振動の有無による振幅の差が 0.12 V 程度と小さく、R チャネルのみが振動していると判断できるのに十分な振幅の差ではなかった。これは、この信号で用いられた色ペアの R チャネルの画素値の最大値が 166 である一方、R チャネルが振動する他の信号における、R チャネルの画素値の最大値は 213 以上であったことから、他の信号に比べて信号 100 における R チャネルの輝度が小さかったことが原因であると考えられる。

また、信号 100 において、VR が 100、NVR が 0.25 である時、この条件を満たしたマゼンタ色を再現する色ペアの抽出が困難であったため、再現するマゼンタ色を灰色に近づけることで色ペアを抽出した。これにより、抽出された色ペアを用いた時、再現された色が灰色であった。そこで、色ペアを抽出する際の条件を緩めながらも閾値が変化しないよう、VR=50、NVR=0.5 と設定し、色ペアを抽出した結果、再現された色はマゼンタ色であったため、同じ実験を行った。表 1 に示した通り、$VA_m$ が 1.24 V であり、$NVA_M$ が 0.84 V である。したがって、1.04 V より大きく、1.24 V 未満の値を閾値として設定することにより、5 種類の信号の色振動の有無を分別できる。

なお、色振動を構成する色ペアを生成する際に用いたパラメータ NVR (0.25) に関して、

$$NVA_M \times 0.25 \geq VA_m \tag{1}$$

であることが期待された。しかし、振動するチャネルのみである信号 111 を除き、この式を満たす信号は、110 のみであり、信号 100、001、101 は満たさなかった。これは、LCD ディスプレイのカラーフィルタと受光センサのカラーフィルタの特性が異なることが原因だと考えられる。

したがって、今回の実験設定においては色振動の有無を分別する、振幅の閾値を 1.04 V より大きく、1.24 V 未満の値に設定することで、映像に埋め込んだ 5 種類すべての光信号を振動として観測できることが確認できた。

**表 1**: 実験結果：$VA_m$ は振動しているチャネルの振幅の最小値、$NVA_M$ は振動していないチャネルの振幅の最大値である。

| 信号 | $VA_m$ [V] | | | $NVA_M$ [V] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | R | G | B | R | G | B |
| 100 (VR=100, NVR=0.25) | 0.96 | | | | 0.84 | 0.60 |
| 100 (VR=50, NVR=0.5) | 1.24 | | | | 0.84 | 0.60 |
| 001 | | | 2.76 | 0.84 | 0.44 | |
| 101 | 1.72 | | 3.16 | | 1.04 | |
| 110 | 3.84 | 1.96 | | | | 0.32 |
| 111 | 2.76 | 1.72 | 3.32 | | | |

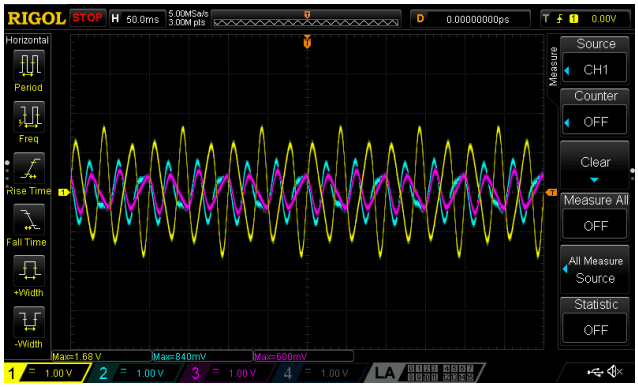
## 4. まとめ

本稿では、不可視の色振動を用いて再起透過光学系を用いて表示した空中像に情報を埋め込み、これを受光センサで受信する手法を提案した。受光センサの出力電圧の波形を測定することで、意図した光信号が空中像に埋め込まれていることを確認した。

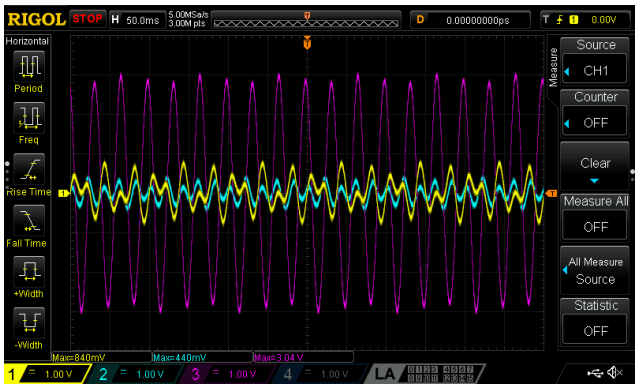
今後の展望として、単色画像以外のコンテンツ映像へ色振動により情報を埋め込み、拡張現実感システムとして応用していきたいと考えている。特に、映像に対応した触覚刺激情報を埋め込み、受信した情報で触覚提示デバイスを制御することで、空中像への触覚刺激重畳の実現に取り組みたいと考えている。

© 2022 日本バーチャルリアリティ学会

(a) 信号 100：VR=100、NVR=0.25 の時

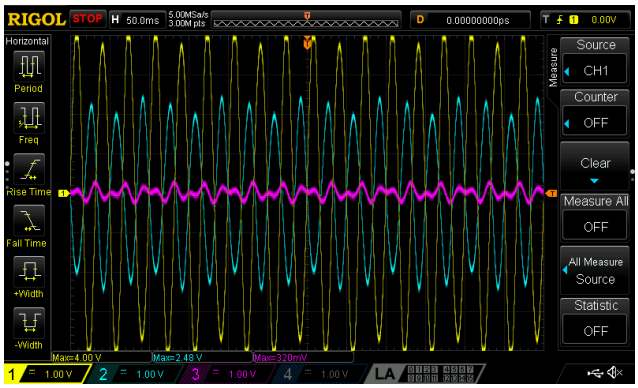



(b) 信号 100：VR=50、NVR=0.5 の時




(c) 信号 001

(d) 信号 101




(e) 信号 110

(f) 信号 111

**図 6**: 実験結果：チャネル 1（黄色）は R、チャネル 2（青色）は G、チャネル 3（赤色）は B に対応している。

**謝辞** 本研究は、JST ACT-X JPMJAX190O の助成を受けたものです。

## 参考文献

[1] 深澤尚史, 前川聡, 苗村健. 可視光通信プロジェクタの通信路における結像光学系の検討 : 位置情報を埋め込んだ映像の空中像提示とプロジェクタ投影. 電子情報通信学会技術研究報告, 第 111 巻, pp. 145–150. 一般社団法人電子情報通信学会, 03 2012.

[2] Satoshi Abe, Atsuro Arami, Takefumi Hiraki, Shogo Fukushima, and Takeshi Naemura. Imperceptible color vibration for embedding pixel-by-pixel data into lcd images. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '17, p. 1464–1470, 2017.

[3] 服部真吾, 平木剛史. 映像への情報重畳のための不可視の色振動の探索高速化と生成可能条件の基礎検討. 情報処理学会 第 84 回全国大会講演論文集, pp. 6ZD–09:1–6ZD–09:2, 3 2022.

© 2022 日本バーチャルリアリティ学会