

# 分光感度特性と時間応答特性の差異に 基づく高精度な多重画像投影

山田 浩樹<sup>1,a)</sup> 坂上 文彦<sup>1,b)</sup> 佐藤 淳<sup>1,c)</sup>

**概要:** 本稿では、人間の視覚系において色の知覚に関わりのある分光感度特性と時間応答特性の両方に着目し、これらの差異に基づいた多重画像投影の実現法を提案する。提案法では、2つの視覚特性を包含した新たな特性として色時間応答特性を定義し、この色時間応答特性の人ごとの違いを利用することで、観測者それぞれに異なった画像を観測させる多重画像投影を実現する。また、マルチバンドプロジェクタを用いた実環境での実験により提案法の有効性を示す。

## 1. 背景と目的

プロジェクタなどの表示系から単一の動画像を提示するだけで、複数の観測者それぞれに全く異なる画像を観測させる多重画像投影は、運転者支援、エンターテインメントなど幅広い応用が考えられ、近年研究が行われている [1], [2], [3], [4], [5], [6]。これらの多重画像投影の技術の中でも人間の視覚特性に基づいた方法 [4], [5], [6] は観測時の制約が少なく利便性の高い方法であるため、さらなる発展が望まれている。しかし、この方法は視覚特性の個人差を利用した方法であるため、利用する視覚特性の差異が小さい場合に意図した画像とは異なる画像が観測されてしまうという問題がある。

そこで本研究では、個々の人間の視覚特性の差異が小さい場合にも観測者に適切な画像を観測させるために、人間の視覚特性に基づく従来法 [4], [5], [6] で着目されていた分光感度特性、時間応答特性の両方を利用する方法を提案する。この2つの視覚特性を併用することで、個々の特性の差異が小さい場合でも観測者が適切な画像を観測可能になると期待でき、また人間の視覚特性に基づく従来法 [4], [5], [6] と同様に観測者の利便性を損なわない多重画像投影を実現可能であると考えられる。

## 2. 色時間応答特性に基づく多重画像投影

### 2.1 人間の視覚における分光感度特性

人間の視覚系には様々な特性が存在するが、特に色に関

する知覚は分光感度特性と時間応答特性に依存している。分光感度特性とは光の分光分布、つまり光に含まれる電磁波の波長に対してどのくらいの応答量があるかを示すものであり、色を知覚する錐体細胞の特性により決定される。このとき、各錐体細胞で発生する刺激値は以下の式で表すことができる。

$$\begin{aligned} X &= K \int_{400}^{700} E(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y &= K \int_{400}^{700} E(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z &= K \int_{400}^{700} E(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (1)$$

ここで  $\lambda$  は波長を表し、 $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  は CIE の等色関数を表す。また、 $E(\lambda)$  は入射光の分光分布、 $K$  は正規化定数で  $Y$  値が測光量に一致するように定める係数である。このようにして得られる3刺激値  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  により、色に関する知覚が表現される。そのため、入射した光の分光分布が異なる場合でも、この刺激値が等しければ同一の色として知覚されることとなる。

### 2.2 人間の視覚における時間応答特性

次に時間応答特性について述べる。時間応答特性とはある1時刻に人間の眼に入射した光がその後どのくらい知覚に影響を与えるかを示すものであり、光インパルスに対する応答（インパルス応答）により記述される。このインパルス応答は、以下の式で表すことができる [7]。

$$S(t) = aH(t, \tau_1, n_1) - bH(t, \tau_2, n_2) \quad (2)$$

ここで、 $a, b$  は時間応答の立ち上がりと減衰の重み付けをする定数である。またガンマ分布  $H(t, \tau, n)$  は時間に関する

<sup>1</sup> 名古屋工業大学  
Nagoya Institute of Technology, Nagoya, Aichi, Japan  
a) yamada@cv.nitech.ac.jp  
b) sakaue@nitech.ac.jp  
c) junsato@nitech.ac.jp

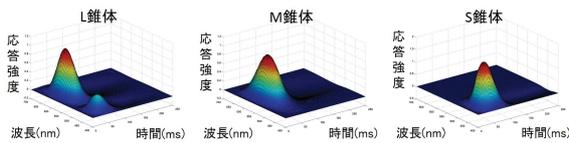


図 1 人間の色時間応答特性の例

る定数  $\tau$  とガンマ関数を決定するために用いられる定数  $n$  より成る次式に示す関数である.

$$H(t, \tau, n) = \frac{1}{\tau^n (n-1)!} t^{n-1} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3)$$

このように定義される時間応答特性  $S(t)$  は, ある時刻に入射した光の影響が一定時間影響を与え続ける (残効) ことを示している. これにより, この時間応答特性  $S(t)$  を用いることで, ある時刻  $t$  における観測値は, 過去の刺激による時間応答の和として以下の式で表現できる.

$$y_t = \int_{t-T}^t S(t) z_t dt \quad (4)$$

ここで,  $z_t$  は時刻  $t$  で発生した刺激値を表す.

### 2.3 人間の視覚における色時間応答特性

本稿では分光感度特性と時間応答特性の2つの特性が互いに独立であると仮定し, 2つの特性からなる新たな特性として色時間応答特性を定義する. 色時間応答特性は, 先に述べた両者の特性を包含する特性であり分光感度特性  $x(\lambda)$ , 時間応答特性  $S(t)$  により  $H(\lambda, t)$  として以下の式で定義される.

$$H(\lambda, t) = S(t)x(\lambda) \quad (5)$$

この式が示すとおり, 色時間応答特性は波長, 時刻のそれぞれに関する2次元関数であり, 図1のように表現される. また, 色時間応答特性を決定する分光感度特性と時間応答特性は, 人間の視細胞の中で色を知覚する役割を果たす錐体の種類ごとに異なるため, 色時間応答特性も同様に L, M, S, 各錐体細胞それぞれについて定義される. さらに, これまでの研究により分光感度特性と時間応答特性には個人差が存在することが確認されていることから, 色時間応答特性についても個人ごとに特性が異なり, これにより多重画像投影への応用が期待できる.

### 2.4 色時間応答特性に基づく観測値

次に, 上述の色時間応答特性に基づく観測のモデル化を行う. ここでは, 提示装置として  $N$  バンドの光が投光可能なマルチバンドプロジェクタを使用した場合を考える. マルチバンドプロジェクタの第  $i$  バンドの光の分光分布が  $E_i(\lambda)$ , 時刻  $t$  で投光される光の強度が  $p_{ti}$  で表されるとする. この光を色時間応答特性が  $H_j(\lambda, t)$  である人間の錐体細胞  $j$  により観測すると, 時刻  $t$  での観測値は以下の式で表すことができる.

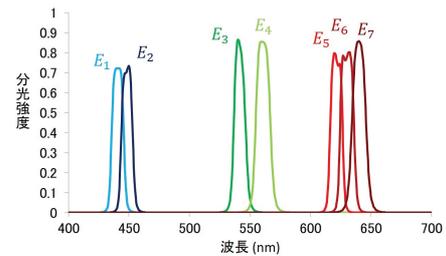


図 2 実画像実験で使用したマルチバンドプロジェクタの分光分布

$$y_{tj}(p_{ti}) = \sum_{k=1}^T \sum_{i=1}^N h_{ki}^j p_{t-k+1,i} \quad (6)$$

$$h_{ki}^j = \int_{\lambda} H_j(\lambda, t) E_i(\lambda) d\lambda dt \quad (7)$$

ここで,  $h_{ki}^j$  はバンド  $i$  の光の分光分布により離散化された錐体細胞  $j$  の色時間応答特性を表している.

さらに, この観測モデルに基づき色時間応答特性の差異に基づく多重画像投影を行うための投影画像の算出法を示す. いま, 異なる色時間応答特性を持つ  $M$  人の観測者に対して連続した  $T$  秒間に目標とする映像を観測させることを考える. 観測者  $l$  の時刻  $t$  に観測する値が  $y_{tj}^l$  で表され, 観測者  $l$  に観測させたい画像の輝度が  $\hat{y}_{tj}^l$  で表されるとすると, 投影すべき画像は  $y_{tj}^l$  と  $\hat{y}_{tj}^l$  が等しくなるような画像として決定される. よって, 以下の評価関数  $E$  を最小にする投影画像  $p_{ti}$  を求めればよい.

$$E = \sum_{l=1}^M \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^3 (\hat{y}_{tj}^l - y_{tj}^l(p_{ti}))^2 \quad (8)$$

このようにして求められた画像をマルチバンドプロジェクタから投影することで, 複数の観測者に多重画像投影を実現することができる.

## 3. 色時間応答特性に基づく多重画像投影実験

### 3.1 実験環境

提案法を用いて実環境で多重画像投影が行えるかどうかを確認した結果を示す. この実験では2台のカメラを色時間応答特性の異なる観測者とし, 画像の提示装置として7バンドのマルチバンドプロジェクタを使用した. このマルチバンドプロジェクタの分光分布を図2に示す. このマルチバンドプロジェクタの分光分布により, 各カメラの離散化された色時間応答特性は図3のようになった. この図は, マルチバンドプロジェクタの各バンドからの投影が, 各時刻において各錐体細胞にどれだけの影響を与えるかを示している. このような環境を用いてそれぞれのカメラに異なる画像を観測させるように投影画像を決定した.

### 3.2 実画像実験

3.1節で述べた環境を用いて多重画像投影実験を行った

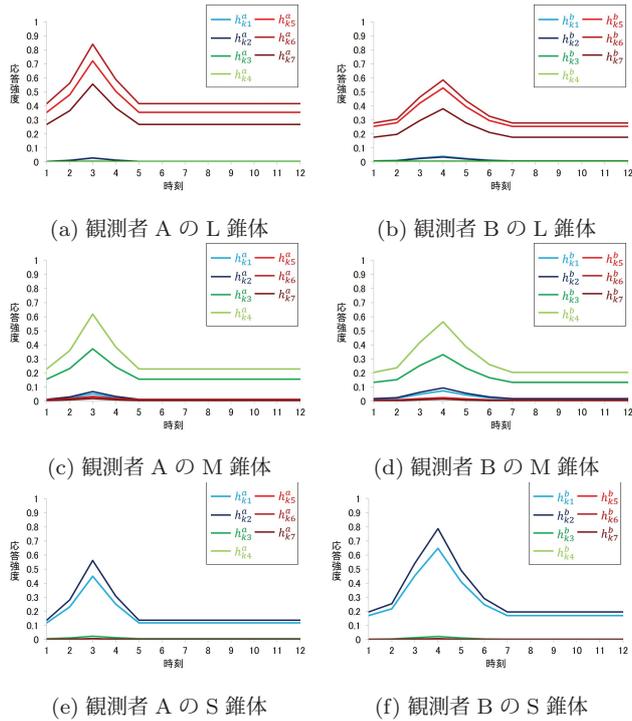


図 3 観測者 A, B の色時間応答特性

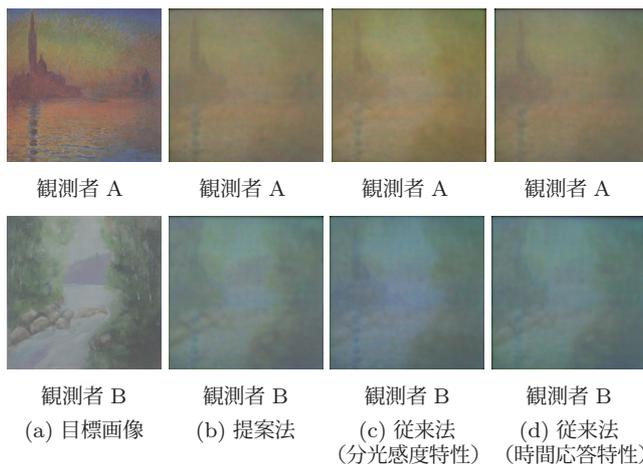


図 4 従来法との比較 (観測結果 1)

結果を示す。図 4 と図 5 の (a) に目標画像を、(b) から (d) に提案法と 2 つの従来法の観測結果を示す。目標画像と観測結果から、全ての方法で 2 人の観測者にそれぞれ異なる画像を観測させられていることが確認できる。しかし、従来法の観測の一部では、完全な画像分離が行えておらず、一部誤った画像が観測されている。これに対し、提案法の観測結果ではこれらを完全に分離できていることがわかる。以上の結果から、色時間応答特性を利用した提案法は、分光感度特性および時間応答特性をそれぞれ独立に用いる 2 つの従来法に比べてより高精度に多重画像投影を実現可能であることが確認できた。

#### 4. まとめ

本研究では、人間の視覚特性に基づく従来法で利用され

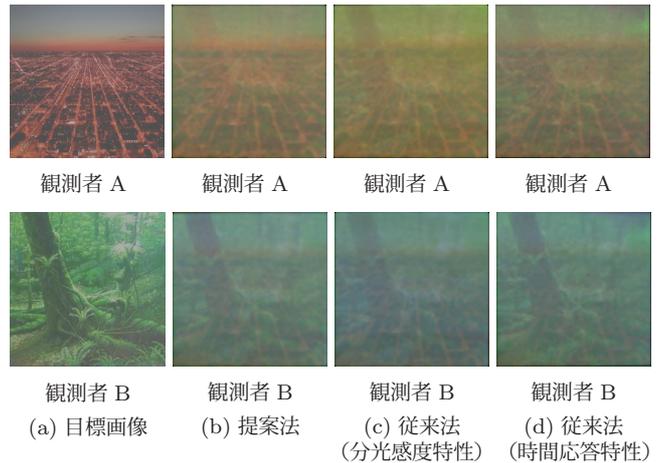


図 5 従来法との比較 (観測結果 2)

ていた、2 つの人間の視覚特性を併用した新たな多重画像投影の方法を提案した。提案法では、人間の分光感度特性と時間応答特性を包含した新たな視覚特性として色時間応答特性を定義し、この色時間応答特性が人ごとに異なることを利用し、人ごとに異なった画像を観測させる。そのために、色時間応答特性に基づく観測について説明し、次にそれを用いた多重画像投影技術の方法を示した。またこの方法を用いて異なる色時間応答特性を持つ 2 人の観測者を模した 2 台のカメラに対して、提案法が従来法よりも高精度に多重画像投影を実現できることを確認した。

#### 参考文献

- [1] Hamada, T., Nagano, K. and Scritter, T.: A multiplexed image system for a public screen, *Proceedings of Virtual Reality International Conference (VRIC) Laval Virtual ReVolution 2010*, pp. 321–323 (2010).
- [2] 宇津木健, 長野光希, 谷中一寿, 白井暁彦, 山口雅浩: 多重化映像表示における隠蔽映像生成アルゴリズム, *Image Hiding Algorithm for Multiplex Projection*, 第 15 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集 (2010.9. 15) (2010).
- [3] Kakehi, Y., Iida, M., Naemura, T., Shirai, Y., Matsushita, M. and Ohguro, A.: Lumsight table: An interactive view-dependent tabletop display, *Computer Graphics and Applications, IEEE*, Vol. 25, No. 1, pp. 48–53 (2005).
- [4] Nonoyama, M., Sakaue, F. and Sato, J.: Multiplex Image Projection Using Multi-band Projectors, *The IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV) Workshops* (2013).
- [5] Muramatsu, K., Sakaue, F. and Sato, J.: Estimating Spectral Sensitivity of Human Observer for Multiplex Image Projection, *International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP2016)*, Vol. 4, pp. 183–191 (2016).
- [6] 池場大樹, 坂上文彦, 佐藤淳: 視細胞の時間応答の差異を用いた多重画像投影, 第 19 回画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2016) (2016).
- [7] Cao, D., Zele, A. J. and Pokorny, J.: Linking impulse response functions to reaction time: Rod and cone reaction time data and a computational model, *Vision Research*, Vol. 47, No. 8, pp. 1060–1074 (2007).