

紙面への発色型映像投影技術の多色化

西村 光平^{*1}

小泉 直也^{*1}

橋田 朋子^{*2}

苗村 健^{*1}

Multiple Color Representation on Projection Based Color-forming Display

Kohei NISHIMURA^{*1}, Naoya KOIZUMI^{*1}, Tomoko HASHIDA^{*2} and Takeshi NAEMURA^{*1}

Abstract – Paper is thin, light, portable and written on freely. This paper augments computing technology on paper with maintaining these advantages. Our past proposal was the system to display additional contents in natural print-like colors on paper by using UV projector and photochromic material which represents color when accepts UV light. To realize multiple color representation on this monochrome system, we introduce a new inkjet photochromic material and realize gradation by PWM and CMY representation by juxtaposition color mixture. Besides, to calculate limitation of this system and to demonstrate the fundamental directions, we discuss conditions in the situation where the external stimuli to control color locates separately to the pixels on display. Finally, we present practical applications.

Keywords : paper computing, photochromic material, reflective display

1 はじめに

紙は薄く軽く、可搬性に優れており、自由な書込が可能である、明所での視認性が高い等の利点がある。このような紙の利点をさらに引き出すために、筆者らは紙に情報技術を付加することを検討している。紙に対し情報を出力する方法として日常的にはプリンタが用いられるが、紙の使用時と印刷時の切り替えは時間的にも空間的にも断続的であり、これをシームレスにつなぐことにより連続的で効率のよい作業を行うことができる。これまで同様の目的ではプロジェクタやディスプレイ等で情報を重畳する研究が行われてきたが、印刷や手描きが外部からの光を反射して色を呈するのに対し、プロジェクタやディスプレイは自らが発光して色を呈するため見え方が異なる。そこで印刷のように発色型で表示しつつ、自由に情報を変化させる技術が求められる。

筆者らはこれまでに、紫外光に反応するフォトクロミック材料を紙面上に塗布し、紫外プロジェクタを用いて任意のパターンを提示する研究を行ってきた。本手法は非接触に解像度や即時性の高い制御が可能であるが、二値かつ単色しか表示できなかった。広く、発色制御に非接触な外的刺激を要する手法は単色でのみ実現されている例が多く [1][2]、多色化の実現にはいくつかの課題がある。

本稿ではまず関連研究を踏まえ、多色化における課

題を述べる。次に本研究で用いてシステム構成と、それを利用した階調表現と CMY 表現の実現手法について述べる。そして表示面上の画素を非接触な外的刺激によって制御する際の条件について基礎的な検討を行うことで、本システムにおける制約条件を求めるとともに、多色化のための指針を示す。最後に実装の結果と、本技術を用いた応用例について述べる。

2 関連研究

閲覧、筆記作業時に近い環境として、筆者らは情報重畳中も目視や書込が可能である非接触な発色制御が適切であると考え、非接触に発色制御を行なった先行事例について述べる。次に本研究の基盤となる発色型映像投影について触れ、本研究の目的について述べる。

2.1 クロミック材料の利用

発色型で情報を変化させるためには、クロミック材料が用いられる。クロミック材料とは熱や光、電荷といった外部の刺激に反応して物質そのものの色が変わる材料である。ここでは特に、非接触に制御可能なクロミック材料として、熱に反応するサーモクロミック材料と光に反応するフォトクロミック材料を用いた事例について述べる。

サーモクロミック材料を非接触に制御する技術としては、発熱機構としてカーボンペーストを用いたもの [3] や、ペルチェ素子 [4] や赤外 LED [5] をアレイ状に並べたものなどがあるが、非接触性や解像度という観点ではレーザを用いた、筆者らの AR-eLaser [6] や Saakes らの Shader Printer [1] が適している。またフォトクロミック材料の制御に関しても、紫外 LED をアレ

^{*1}東京大学

^{*2}早稲田大学

^{*1}The University of Tokyo

^{*2}Waseda University

イ状に並べた竹田らの手法 [7] は階調表現を実現しているが、解像度に関しては紫外レーザを用いた Saakes らの Slow Display [8] が優れている。しかしレーザは画素毎に一定時間ずつ照射する必要があるため、処理に数分の時間を要する。それに対し筆者らは紫外 DLP プロジェクタを用い、非接触かつ高解像度でありながら一面を同時に発色制御する手法を開発してきた [9]。これを発色型映像投影と呼ぶ。

2.2 発色型映像投影

筆者らの発色型映像投影技術は、対象面に塗布したフォトクロミック材料に対し DLP プロジェクタで任意の紫外光パターンを照射し、部分的に発色させる技術である [9][10]。本研究は数秒で全面的発色が制御でき即時性に優れるが、単色かつ二値しか表現できていない。提示できる色は紙に塗布したフォトクロミック材料に依存するが、これは発色制御に非接触な外的刺激を要する手法にとって共通の特徴と言える。先に述べた Shader Printer [1] や、インクジェットプリンタから出力する水分によって発色を制御する Sheng らの研究 [2] など、単色でのみ実現されている例は多いが、多色化の実現にはいくつかの課題がある。各ドットを電気的に制御する一般的なディスプレイと異なり、制御対象が連続的であり、画素と制御系が 1 対 1 で対応しないことから、発色対象画素を発色できなかつたり、発色非対象画素を発色させてしまつたりといったことが起こり得る。これはキャリブレーションの難しさに加え、制御系における精度限界や収差、表示面における着弾、浸透、表面下散乱などの影響が大きい。また出力ドットを重ねる前提で色を表現する印刷技術とも異なり、各ドットは重なることなく整列する必要がある。また出力される色が保証されない状態では、ハーフトーンにおける議論を適用することも難しい。

本研究では階調表現と CMY 表現を実現するとともに、表示面上の画素を非接触な外的刺激によって制御する際の条件について基礎的な検討を行うことで、本システムにおける制約条件を求めるとともに、多色化のための指針を示す。

3 システム設計

本章では、本研究で用いるシステム構成について詳細を述べた後、多色化に向け今回新たに導入したインクジェット印刷可能なフォトクロミック材料について述べる。

3.1 システム構成

図 2 にシステムの構成を示す。システムは紫外プロジェクタと RGB カメラ、フォトクロミック材料が印刷された紙からなる。紙をプロジェクタの前にかざすと、カメラで紙面の様子を撮影し、紙面の位置を推定

することで発色制御を行う。アプリケーションにおける紙面上の情報取得にも同カメラを用いる。

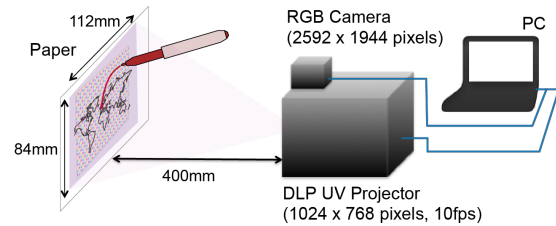


図 1 システム構成

図 2 System configuration

紫外光を自由に照射可能なプロジェクタは市販されておらず、本プロジェクタは独自に開発したものである。これまで筆者らが用いてきたものと同一であるが、必要な情報を述べておく。本プロジェクタは 365nm の紫外光を使用し、1024 × 768 画素の二値画像を 10fps で切替えて投影することができる。投影角は横方向で 16.1°、縦方向で 13.7° であり、400mm の距離でおよそ 112mm × 84mm の投影面となる。また同距離における放射照度は、中心部で約 1680 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 、4 隅で約 360 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ である。紙との距離は近いほど強い発色が得られるが、その分投影領域は狭くなる。十分な投影領域を得るため、以降プロジェクタと紙との距離は全て 400mm とする。

3.2 紙への印刷

今回多色化の実現に向け、インクジェット印刷可能なフォトクロミック材料、Solar Print (SKI-SOC-K69, M69, C69, Y69; SO-KEN 社) を新たに導入した。同材料は通常は無色透明だが紫外光に反応して有色に変化し、照射を止めて約 1 分後にはまた無色透明に戻る。図 3 にその様子を示す。本材料は 2013 年に発売されたものであるが、長期的に色が保持されるフォトクロミック材料においてもインクジェット印刷可能となることが期待される。

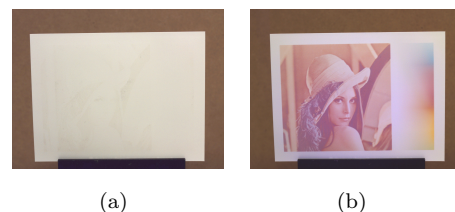


図 3 印刷された Solar Print (a) とその発色 (b)

Fig.3 Printed Solar Print ink and its color representation

紙は蛍光増白剤が含まれず、かつインクジェット印刷に対応したストーンペーパーを用いた。また CMYK

のうち K のみ通常のインクを用いることで、一時的に出したい動的情報のみならず、常に出しておきたい静的情報も同時に、ずれなく印刷することが可能となる。プリンタとして SO-KEN 社の推奨するセイコーエプソン社の PX-105 を用い、動的領域と静的領域、また必要に応じてキャリブレーション用のマークを同時に印刷する。

4 提案手法

発色型映像投影の多色化は、階調表現と CMY 表現をそれぞれ実現することで達成される。CMY 表現とは、減法混色の基本色であるシアン (C)、マゼンタ (M)、イエロー (Y) の 3 色を表すことを指すとする。本章では階調表現の提案・実装と、CMY 表現についての提案を行う。

4.1 階調表現の実現

階調表現の実現には、紫外プロジェクタの各画素によるパルス幅変調 (PWM) を利用する。フォトクロミック材料は照射する紫外光の放射照度によって発色濃度の収束値が変化するため、照射デューティ比の調整で実効値を制御することで階調表現が可能だと考えられる。実際に 15 枚の二値投影画像を 10fps で切り替えることで 16 段階の階調表現を実装した結果を図 4 に示す。左のグラフは、異なるデューティ比で紫外光を照射した際の、 $L^*a^*b^*$ 色空間上の色の变化率をデューティ比 1 を基準に示したものであり、右はその際の発色の様子である。CMYK それぞれ濃い領域から薄い領域まで、階調表現が実現できていることが分かる。

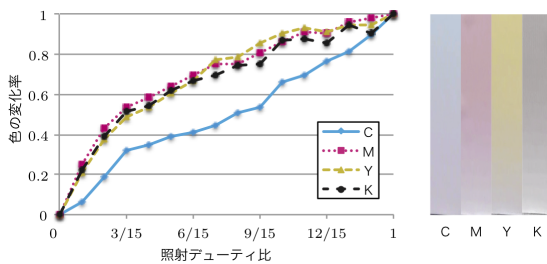


図 4 16 段階の階調表現 (左: 照射デューティ比と $L^*a^*b^*$ 色空間上の色の变化率の関係, 右: 各デューティ比における発色)

Fig. 4 16 steps of gradation expression

4.2 CMY 表現の実現

通常のプリンタでの印刷が可能になったことで、フォトクロミック材料を用いた多色かつ精細なパターンをユーザ自身で印刷できるようになる。そこで数色からなるパターンを印刷し、紫外プロジェクタを適切に制御することで併置混色により色彩を表現する手法を提案する。候補としては図 5 のような 3 通りが考えられ

る。図 5(a) は領域毎に異なる色を印刷し、場所によって表示可能な色を変化させる手法である。図 5(b) は複数色の線を交互に印刷し、また図 5(c) は CMY の点を並べて印刷し、個別に制御することで異なる色を表示する手法である。それぞれ面分割、線分割、点分割による選択的発色制御と呼ぶ。面、線、点と分割が細くなるほど色域は広がるが、ずれや後述のにじみの影響が大きくなる。また単色の表示であれば、分割がないほど細部の表現が可能である。よって必要な色やその提示箇所などに応じて、これらの手法を使い分ける必要がある。以降では特に点分割による手法について、必要な要件と検討事項について詳細を述べる。

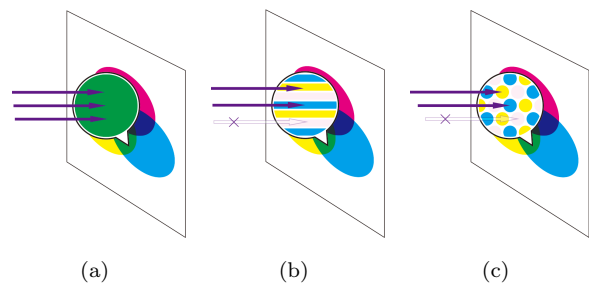


図 5 CMY 表現の 3 方式. (a) 面分割, (b) 線分割, (c) 点分割

Fig. 5 3 ways of CMY expression. (a) area division, (b) line division, (c) dot division

5 CMY 表現に関する検討

本章では、表示面上の画素を非接触な外的刺激によって制御する際の条件について基礎的な検討を行うことで、本システムにおける制約条件を求めるとともに、多色化のための指針を示す。まず紙面に印刷する画素を CMY 画素、紫外プロジェクタから投影する画素を投影画素と呼び、本手法で用いる適切な CMY 画素配列について検討を行う。次に実装にあたり問題となるにじみをモデル化し、にじみを考慮した制約条件について検討する。

5.1 適切な CMY 画素配列の検討

通常の印刷は出力ドットを重ねる前提で色を設計・表現するが、今回用いる CMY 画素配列は各ドットが重なることなく整列する必要がある。そこで既存のディスプレイや撮像素子で用いられるストライプ配列、ダイアゴナル配列、レクタングル配列、デルタ配列といった画素配列を元にした、図 6 のような 4 種のパターンを候補とし、それぞれ矩形 1, 2, デルタ 1, 2 とする。ここで w_c は CMY 画素の径、 d は CMY 画素間の距離、 w_p は投影画素の径である。ここでは本システムに適した画素配列を選択するため、2 つの指標を用いて評価する。

指標 1: 解像度 単位長さ辺りの CMY 画素数。高いほ

ど精細な表示が可能になる。

指標 2: 占有面積率 CMY 画素が占める面積率。高いほど表示可能な色空間が広がる。

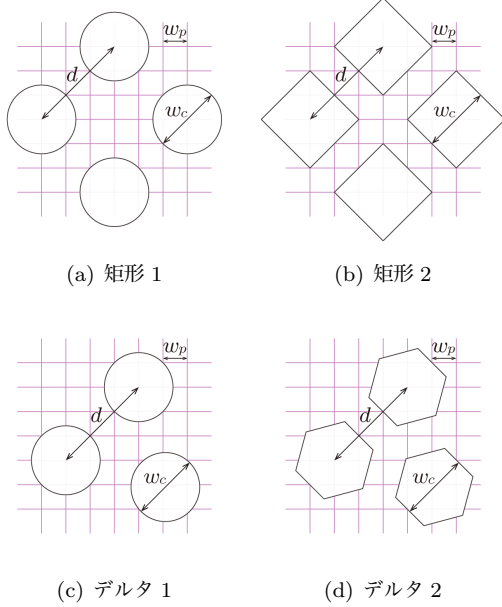


図 6 画素配列の候補
Fig. 6 Candidate dot patterns

表 1 画素配列候補の評価
Table 1 Evaluation of dot patterns

	解像度	占有面積率
矩形 1	$\frac{1}{d}$	$\frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{w_c}{d}\right)^2$
矩形 2	$\frac{1}{d}$	$\left(\frac{w_c}{d}\right)^2$
デルタ 1	$\sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}}} \cdot \frac{1}{d}$	$\frac{\pi}{2\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{w_c}{d}\right)^2$
デルタ 2	$\sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}}} \cdot \frac{1}{d}$	$\left(\frac{w_c}{d}\right)^2$

4 種のパターンそれぞれについて計算した結果を表 1 に示す。なおデルタ状配列の解像度は、単位面積辺りに含まれる画素数の平方根として求めた。解像度に関してはデルタ状 2 種の方が優れており、また占有面積率に関しては、矩形 2, デルタ 2 の 2 種が優れる。これより、以下ではデルタ 2 の配列を CMY 画素配列として用いる。

Neugebauer の方程式 [11][12] によれば、併置混色によって得られる三刺激値 X, Y, Z は、CMY 画素の面積率とそれぞれの三刺激値の線形和として次のように表すことができる。

$$X = \sum_i A_i X_i, \quad Y = \sum_i A_i Y_i, \quad Z = \sum_i A_i Z_i \quad (i \in c, m, y, o) \quad (1)$$

ここで X_i, Y_i, Z_i は、CMY に対応する c, m, y と地の色に対応する o , 計 4 色それぞれの三刺激値である。 A_i はそれぞれの面積率であり、以下の式が成り立つ。

$$A_o = 1 - (A_c + A_m + A_y) \quad (2)$$

本システムの画素幅が十分に小さければ、先に定義した占有面積率を s , 階調表現における濃度を r_i とすると、本システムの色域は以下の式で近似される。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix} + \frac{s}{3} \sum_{i \in c, m, y} r_i \begin{bmatrix} X_i - X_o \\ Y_i - Y_o \\ Z_i - Z_o \end{bmatrix} \quad (r_i \in [0, 1]) \quad (3)$$

この式により表される色域は平行六面体であり、その体積は占有面積率 s の 3 乗に比例する。また今回の画素配列において

$$s = \left(\frac{w_c}{d}\right)^2 \quad (4)$$

であるから、CMY 画素の径と CMY 画素間の距離の比に対し色域の体積は 6 乗に比例する。

5.2 にじみを考慮した制約条件

発色型映像投影では図 7 に見られるように、投影領域外の画素が発色するような現象が確認されていた。以降この現象をにじみと呼び、にじみを考慮した制約条件および制約条件について検討する。



図 7 観測されるにじみ (左: 投影領域, 右: 発色の様子)

Fig. 7 Observed bleeding (left: projection area, right: actual color forming)

まず、先に述べた色域を保証するには、以下の 2 つの条件を満たす必要がある。

条件 1 発色対象画素には必ず全面に光を当てる

条件 2 発色非対象画素には一切光を当てない

そこで観測に基づき、にじみを図 8 のようにモデル化する。投影画素を $n \times n$ 画素投影しようとした場合の、必ず発色する領域を投影領域、発色する可能性のある領域をにじみ領域と定義し、それぞれの径を w, W とする。投影画素の径 w_p を用いれば $w = n w_p$ である。またインクジェット印刷のドット形成における

にじみ率の定義 [13] に倣い、にじみ率 $B(w)$ を以下のように定義する.

$$B(w) = W/w \quad (5)$$

なおこのモデルでは、 n が増加した際 $B(w)$ は小さくなることが予想され、これは実際の観測結果にも即する.

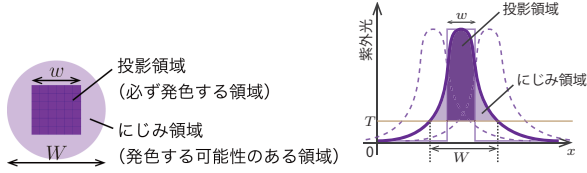


図8 にじみのモデル化
Fig.8 Model of bleeding

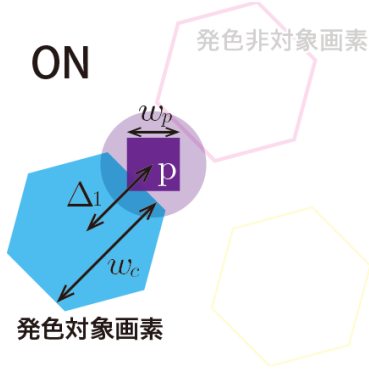


図9 条件1に基づく1投影画素の点灯条件. 投影領域が発色対象画素に重なった場合は点灯
Fig.9 The dot whose projection area overlaps a target cmc dot must be on.

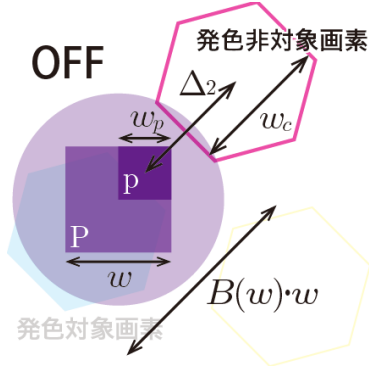


図10 条件2に基づく1投影画素の消灯条件. にじみ領域が発色非対象画素に重なった場合は消灯
Fig.10 The dot whose bleeding area overlaps a non-target cmc dot must be off.

このモデルを用いて、ある1投影画素 p の点灯・消灯条件を考える. 投影領域が広がるほどにじみ領域も広がることから、1画素の消灯条件を考えるには

隣接する他の画素の点灯状況を考慮する必要があるため、 p を頂点とする $n \times n$ の投影領域を P とする. 条件1を満たすには、図9に示すように、 p が発色対象画素に重なった場合に点灯すればよい. また条件2を満たすには、図10に示すように、 P のにじみ領域が発色非対象画素に重なった場合に消灯すればよい. 各条件を表した式が、それぞれ式(6)及び式(7)である.

$$\Delta_1 \leq \frac{1}{2}w_c + \frac{\sqrt{2}}{2}w_p \quad (6)$$

$$\Delta_2 \leq \frac{1}{2}w_c + \frac{\sqrt{2}}{2}w_p + \frac{1}{2}(W - \sqrt{2}w) \quad (7)$$

両条件をどちらも満たさない場合の点灯状況は任意であるが、占有面積率の観点から、CMY画素間の距離は短い方が望ましい. 一方両条件をどちらも満たすような状況が生じた場合、先に述べた色域を保証することができない. そこで両者を同時に満たすことのないう設計する必要がある.

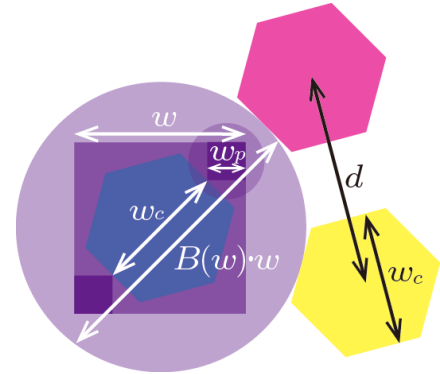


図11 設計上実際に投影される最大幅
Fig.11 Max projection area that fulfills conditions

全ての投影画素が式(6)を満たすような最大の正方投影領域は図11のようになり、この時投影領域の幅 w は、以下のように表される.

$$w = \frac{w_c}{\sqrt{2}} + 2w_p \quad (8)$$

よってCMY画素間の距離の最小値 d は以下のように計算される.

$$\begin{aligned} d_{min} &= w_c + \sqrt{2}w_p + \frac{1}{2}(W - \sqrt{2}w) \\ &= \frac{1}{2}B(w) \cdot w + \frac{1}{2}w_c \end{aligned} \quad (9)$$

また

$$\alpha = \frac{w_c}{w_p} \quad (10)$$

と置けば、 d/w_c の最小値をにじみ率から算出することができる.

$$\frac{d_{min}}{w_c} = \left(\frac{1}{2\sqrt{2}} + \frac{1}{\alpha} \right) B(w) + \frac{1}{2} \quad (11)$$

次節では、本システム固有のにじみ率 B を求める.

5.3 本システムにおけるにじみ率の計測

本システムにおけるにじみの要因は、紫外プロジェクタの収差にある。そのため投影面中の位置によってにじみ率が異なり、このことは投影面に到達する紫外光の観測からも確認されている。本プロジェクタは独自に開発したものであるが、紫外領域に対応する光学系は限られており、よりよい設計を行うことは困難である。

以下では、にじみ率をカメラでの観測から推定する。今回用いたフотクロミック材料の反応は色が薄く、時間変化するなど観測に向かないため、赤色蛍光板に照射した際の蛍光を RGB カメラで観測し、R 値がある閾値以上になった領域をにじみ領域とする。閾値としては、許容色差の分類 [11] から、2 級の許容色差（実用色差 a）を利用する。許容色差とは 2 つの色をほぼ同等と判定する際に用いられる基準であり、2 級の許容色差は $L^*a^*b^*$ 色空間中の色差 $\Delta E_{ab}^* = 1.2$ に当たる。フотクロミック材料に照射した際、紙の色から色差 1.2 を呈する放射照度は、蛍光板に照射した際に R 値 0-255 中 29 を示した。よって以降閾値 $R_T = 29$ とする。

まず、プロジェクタの全画素を図 12 のように 32×32 画素毎に分割し、それぞれの領域についてにじみ率を求めた。結果を図 13 に示す。閾値は $R_T = 29$ を用いており、全体の最大にじみ率 $B(32w_p) = 1.69$ であった。さらに最大のにじみ率を取った (7,9) 座標近傍の 3×3 領域（図 12 の赤い領域）をそれぞれ 8×8 画素毎に分割して同様の計測を行うと、最大にじみ率 $B(8w_p) = 2.06$ であった。 $B(8w_p)$ と $B(32w_p)$ との関係は、 n の増加につれ $B(w)$ は小さくなるという先の予想と一致し、またこのことから、 $n \geq 8$ の時は必ず $B(nw_p) \leq 2.06$ が成り立つことが示唆される。この時式 (11) より、

$$\frac{d_{min}}{w_c} < 1.23 + 2.06 \cdot \frac{1}{\alpha} \quad (12)$$

となるように設計すれば、5.2 節で述べた条件が保証される。なお $w_c = 8w_p$ の時、この値は 1.47 となり、CMY 画素間の距離を CMY 画素の径の 1.47 倍以上離せばいいことになる。この時占有面積率 $s \simeq 0.45$ となり、この値は $w_c = 8w_p$ とした場合の理論限界値を表す。

5.4 基礎的な発色結果

以上の結果を踏まえ、CMY 画素の径を 1mm、CMY 画素間の距離を 1.5mm、縦 64 ドット、横 74 ドットで実装した結果を示す。

図 14 は、本手法による発色制御の基礎となる、C のみ、M のみ、Y のみの発色である。このように、全面同じパターンでありながら、投影の制御によって様々

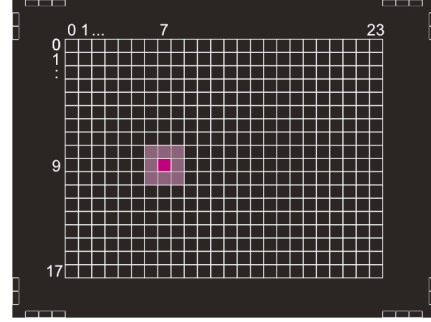


図 12 プロジェクタの投影画素の分割（赤は最大にじみ率を取った領域）

Fig. 12 Division of projector pixels (Red area has the worst spread rate)

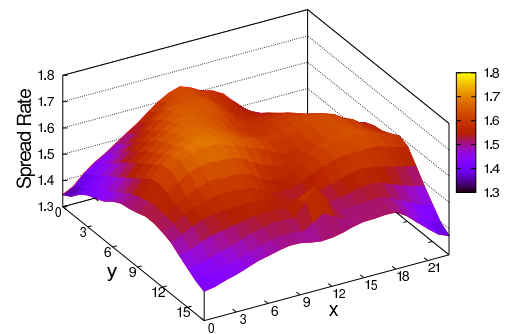


図 13 32×32 画素毎のにじみ率分布

Fig. 13 Distribution map every 32×32 pixels

な色を呈することが可能になった。また C, M, Y に $R(=M+Y)$, $G(=Y+C)$, $B(=C+M)$ の 3 色を加えた 6 色について階調表現も併せて行った例を図 15 に示す。

5.5 考察

本研究では、環境光の反射を利用した発色型ディスプレイの多色化に関して検討を行った。各色の配置に関しては、LCD などの自発光する発光型ディスプレイを参考に設計を行い、フотクロミックインクの配列に、発光型ディスプレイに用いられる併置混色を採用した。ただし発光型は加法混色であり、発色型は減法混色であるため、基本色は RGB ではなく、CMY とした。

本研究は、従来の印刷物に比べて、時間変化を生じさせることができるという点で、時間軸方向に発色型の情報を設計可能になったと位置づけることができる。一方で、併置混色による印刷のため、空間軸方向で考えると解像度の低下が生じている。この解像度等の印刷品質の課題に関して特に考察を行う。

今回の発色結果を検討すると、本システムにおける色域は一般的な発光ディスプレイよりも小さい。式 (3) から言えるように、色域の広さは 2 つのパラメータが左右する。1 つは占有面積率 s 、もう 1 つは C, M, Y 各色と紙の色との色差である。

占有面積率は CMY 画素の径と CMY 画素間の距離

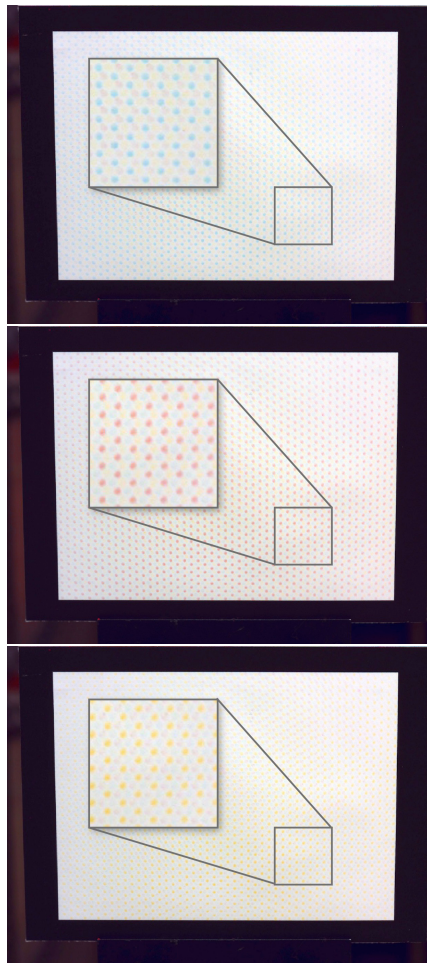


図 14 CMY 画素の発色
Fig.14 CMY representation

の比で表すことができ、この最大値はにじみ率に大きく依存する。本システムでは用いたプロジェクタの理論限界値に近い値で実装したが、にじみ率の低い光学系を用いることができれば、さらに占有面積率を上げることが可能である。

また発色型ディスプレイは環境光を反射するものであり、C, M, Y 各色と紙の色との色差は、用いるフォトクロミック材料に大きく依存する。現状のインクの色差では蛍光灯下で十分読める程度あるため、読書灯程度の環境下では十分なコントラストが得られず、可読性が低下してしまうという課題がある。ただし、今回用いたインクジェット印刷可能なフォトクロミック材料は 2013 年発売のものが最初である。今後インクの発色や応答性の向上によって、本システムの基本構成を変更することなく、機能の向上が期待できる。

また本研究では併置混色であり、画素の重畳を許さない状態での設計になっている。この原理の限界を超えた色彩表現を、手描きに応じた動作を実現するプロジェクタ方式で実現するためには、堀田らが提案するように、複数の色のレイヤーを重ねて、波長選択的に反応させる方法が考えられる [14]。彼らはプリンタによって一度に書き換えを行う仕組みであり、本研究のような筆記具との連携を狙った仕組みではなく、ユーザが書きながら表示を徐々に変化させるといったことには対応していない。今後、本研究のようなプロジェクション手法を、先のようなインクに対応させていくことで、より動的で豊かな色彩表現を実現できるものと考えている。

6 アプリケーション

以下では 4 章で述べた各制御手法について、実装したアプリケーションを述べる。

6.1 面分割による選択的発色制御

図 16 は、面分割による選択的発色制御をインフォグラフィックに用いた実装例である。印刷する画像は図 16(a) のように、黒い線と有彩色のパターンから構成される。黒い線は通常の K インクで印刷されるため常に可視である一方、有彩色の箇所は紫外光を当てるまで不可視である。ゆえに、普段は通常の白地図として用いることができ、書込も可能である。そして付加情報が必要になった時、用紙をプロジェクタの前にかざすと、カメラで位置が取得され、情報が一時的に印刷される。有彩色の印刷パターンに合わせて図 16(b) のような棒グラフのパターンを投影すると、図 16(c) のように各都市の情報を表示することができる。また別のパターンを投影すれば異なる情報を表示することができる。このように薄さや軽さ、書込可能、可読性の高さ等の紙の性質を損なうことなく、紙面上の色を動

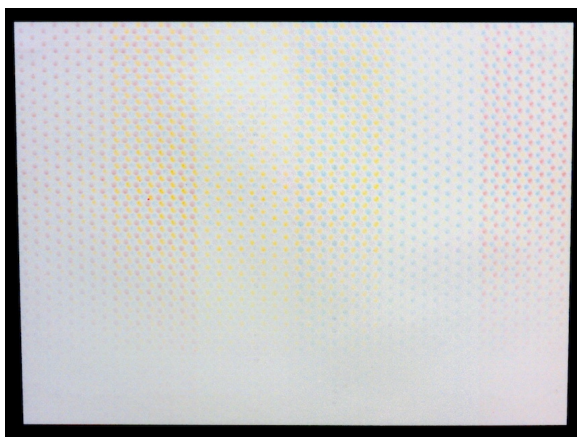
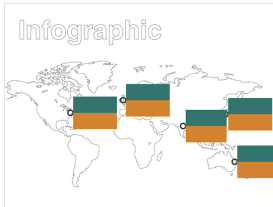
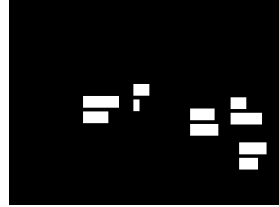


図 15 基礎的な多色表現
Fig.15 Fundamental multiple color representation

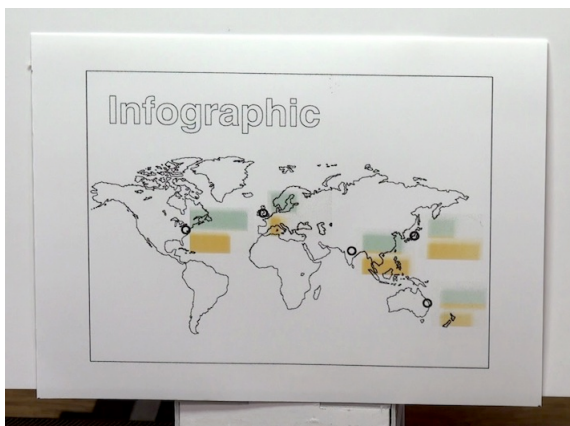
的に制御することができる。今回はインフォグラフィックに用いたが、通常の印刷文書をハイライトしたり、フローチャートに矢印を加えたりと言った応用も可能であり、色は固定されるものの細かな制御を行うことができる。



(a) 印刷画像



(b) 投影画像



(c) 投影結果

図 16 動的なインフォグラフィック
Fig. 16 Dynamic infographic

6.2 線分割による選択的発色制御

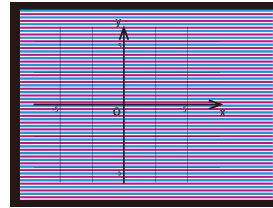
図 17 は、線分割による選択的発色制御を用いたアプリケーションイメージである。背景には赤青2種類の線が交互に印刷されており、手描きを取得することで、書いた式を指定した色で可視化させることができる。このように同じ領域に異なる色を出力でき、横方向に関しては細かな制御が可能である。同技術は円グラフなどにも応用できる。

6.3 点分割による選択的発色制御

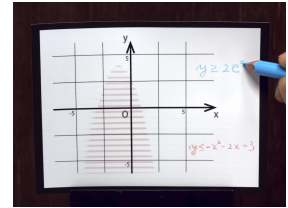
図 18 は、点分割による選択的発色制御を用いたアプリケーションイメージである。CMY3色の点が印刷されており、黒で印刷された花の絵を任意の色でマークすると、印刷された絵がマークした色で彩色される。また別の領域において任意の色で絵の輪郭を描くと、描いた色で自動的に輪郭内部が彩色される。このように紙面上のあらゆる箇所において、任意の色に近い色を表示することが可能である。

7 おわりに

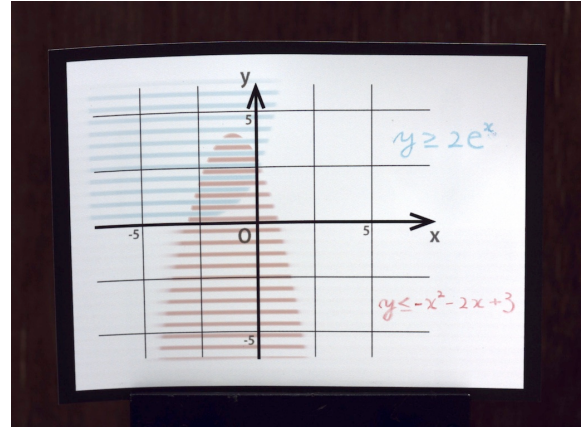
本稿では、これまで二値かつ単色であった紙面上の発色型映像投影技術を多色化する手法を提案・実装し、



(a) 印刷画像



(b) 式を書き込む



(c) 式がグラフ化される

図 17 手書き式のグラフ化のイメージ
Fig. 17 The image of Visualization of hand-writing formula

応用例を示した。また表示面上の画素を非接触な外的刺激によって制御する際の条件について基礎的な検討を行うことで、本システムにおける制約条件を求めるとともに、多色化のための指針を示した。本研究による色域は現状広いとは言えないが、にじみ率のより低い制御系や色の濃いフォトクロミック材料を用いることで広げることが可能である。

本研究を用いることによって、コンピュータならではのコピー、アンドウ・リドゥ、高速な計算、可視化、自動処理などの機能を紙面上で行うことが可能になり、日常生活の豊かさを向上させると考えている。

謝辞

本研究の一部は JST CREST「共生社会に向けた人間調和型情報技術の構築」領域「局所性・指向性制御に基づく多人数調和型情報提示技術の構築と実践」による助成を受けた。

参考文献

- [1] D. Saakes, M. Inami, T. Igarashi, N. Koizumi and R. Raskar: "Shader Printer", ACM SIGGRAPH 2012, Emerging Technologies, Article No.18, 2012.
- [2] L. Sheng, M. Li, S. Zhu, H. Li, G. Xi, Y. Li, Y. Wang, Q. Li, S. Liang, K. Zhong and S. X. Zhang: Hydrochromic molecular switches for water-jet rewritable paper; Nature Communica-

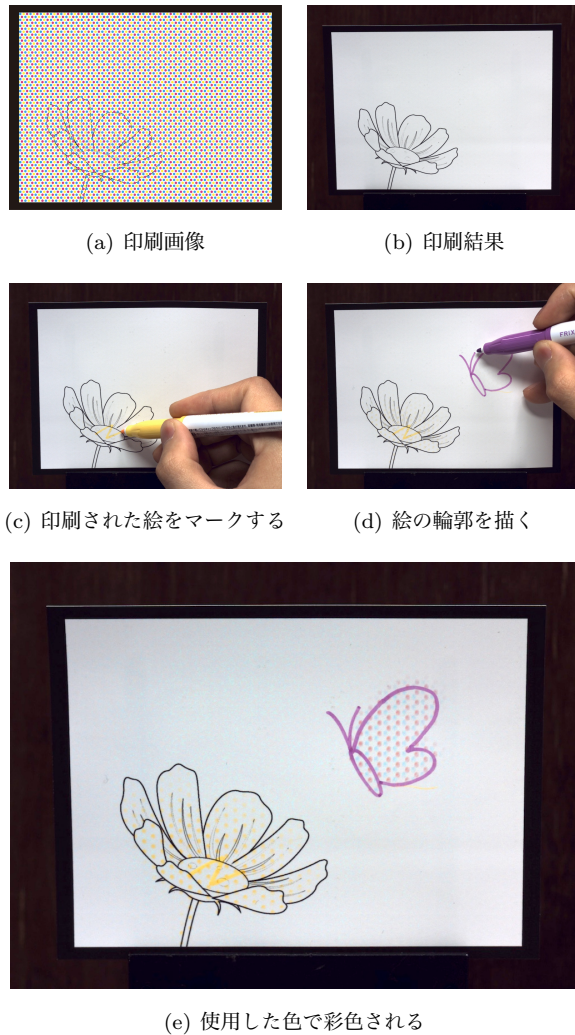


図 18 印刷物と手描きの自動彩色のイメージ
Fig. 18 The image of Auto coloration of print and handwriting

- tions, vol(5), no(3044) (2014.1)
- [3] 辻 航平, 脇田 玲: “Material Syncretism : 紙とコンピュータの調和による表現の開拓”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 18, No. 3, pp.305–314, 2013.
 - [4] K. Kushiya, T. Baba, K. Doi and S. Sasada: “Thermo-Pict neo”, ACM SIGGRAPH 2010, Posters, Article 42, 2010.
 - [5] H. Yamada, T. Tanikawa, K. Nishimura and M. Hirose: “Paint color control system with infrared photothermal conversion”, In Proceedings of the 8th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology, Article 64, 2011.
 - [6] 西村 光平, 金 ジョンヒョン, 苗村 健: “AR-eLaser: 紙面の手書き文字を消去可能な AR インタフェース”, インタラクション 2012, 2012.
 - [7] 竹田 翔一, 岩井 大輔, 佐藤 宏介: “フォトクロミズムによる反射率変調を用いた非平面投影ディスプレイの高コントラスト化”. 日本バーチャルリアリティ学会第 18 回大会, 12B-1 (2013.9).
 - [8] D. Saakes, K. Chiu, T. Hutchison, B. M. Buczyk, N. Koizumi, M. Inami, R. Raskar: “Slow Display”, ACM SIGGRAPH 2010, Emerging Technologies, Article No.22, 2010.
 - [9] T. Hashida, K. Nishimura and T. Naemura: “Hand-rewriting: Automatic Rewriting Similar to Natural Handwriting,” ACM Interactive Tabletops and Surfaces, pp.153–162, 2012.
 - [10] 橋田 朋子, 西村 光平, 苗村 健: “Hand-rewriting : 紙面上における人とコンピュータの協調的な加筆と消去”. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 (投稿中).
 - [11] 日本色彩学会: “新編 色彩科学ハンドブック [第 2 版]”, 東京大学出版会, 1998.
 - [12] H. E. J. Neugebauer: “Die theoretischen Grundlagen des Mehrfarbendrucks”, Zeitschrift für wissenschaftliche Photographie, Photophysik und Photochemie 36, issue 4, pp.73–89, 1937.
 - [13] 日本画像学会 (編), 藤井 雅彦 (監修): “インクジェット (シリーズ「デジタルプリンタ技術」)”, 東京電機大学出版局, 2008.
 - [14] 平野 成伸, 高橋 裕幸, 川島 伊久衛: “フォトクロミック化合物を用いたフルカラーリライタブル表示メディア”, Ricoh Technical Report No.29, pp.79–83, 2003.