

カスタマイズ可能な二次元レンチキュラを用いた多視点情報提示手法の研究

島元 諒¹ 塚田 浩二^{1,a)}

受付日 2022年5月9日, 採録日 2022年11月8日

概要: 本研究では, UV プリンタで造形可能なレンズアレイを用いた二次元レンチキュラを提案する. 二次元レンチキュラでは, 凸レンズを二次元方向に敷き詰めたレンズアレイをディスプレイや印刷物と組み合わせることで, 視点の角度に応じて二次元方向に画像が変化する情報提示を行うことができる. 二次元レンチキュラは, 小型マイコンやスマートフォン, タブレット等, 様々なサイズのディスプレイに対応でき, レンズの直径や厚さ等をカスタマイズすることで多様な表現が可能になる. 本論文では, レンズアレイの実装とパターン設計ツールについて説明し, 様々な応用例を紹介する. さらに視認性の性能評価や, ワークショップを通じた創作活動の観察やシステムの改善点等について報告する.

キーワード: レンチキュラ, 多視点情報提示, UV プリンタ, ディスプレイ

Research on Multi-viewpoint Information Presentation Using a Customizable 2D-lenticular System

RYO SHIMAMOTO¹ KOJI TSUKADA^{1,a)}

Received: May 9, 2022, Accepted: November 8, 2022

Abstract: We propose a customizable two-dimensional (2D)-lenticular system composed of a lens array that can be fabricated using a UV printer. In a 2D-lenticular system, a 2D lens array composed of convex lenses is combined with a display or printed material. This enables the presentation of multi-viewpoint information that changing the image in two directions according to the viewpoint. In contrast to conventional multi-view display methods, our lens system can be adapted to displays of various sizes, such as small microcontrollers, smartphones, and tablets. Moreover, by customizing the diameter/thickness/layout of the lenses, a variety of expressions become possible. In this paper, we describe the implementation of the lens array and pattern-design tool, and introduce various applications. We also discuss the results of performance evaluation of visibility and case study through a workshop.

Keywords: lenticular lens, multi-viewpoint information presentation, UV printer, displays

1. はじめに

近年, ディスプレイを見る角度によって異なる情報を提示する多視点情報提示手法の研究がさかんに行われている. 従来の研究では, センサを活用したディスプレイの電子的な制御による多視点情報提示 [1], [2] や, レンズアレイを用いた裸眼立体視可能な 3D ディスプレイ [3], [4] 等, 多

様な手法が研究されている. しかし, これらの手法は, 大型の設備や市販のレンズ等を必要とするため, 個人のものづくりでの利用や用途に応じたカスタマイズが困難であった. そこで本研究では, UV プリンタで造形可能なレンズアレイを用いた二次元レンチキュラを提案する. 二次元レンチキュラでは, 凸レンズを二次元方向に敷き詰めたレンズアレイをディスプレイや印刷物と組み合わせることで, 視点に応じて二次元方向に画像が変化する情報提示を行うことができる. 二次元レンチキュラは, 小型マイコンやスマートフォン, タブレット等, 様々なサイズのディスプレ

¹ 公立はこだて未来大学
Future University Hakodate, Hakodate, Hokkaido 041-8655, Japan

a) tsuka@acm.org

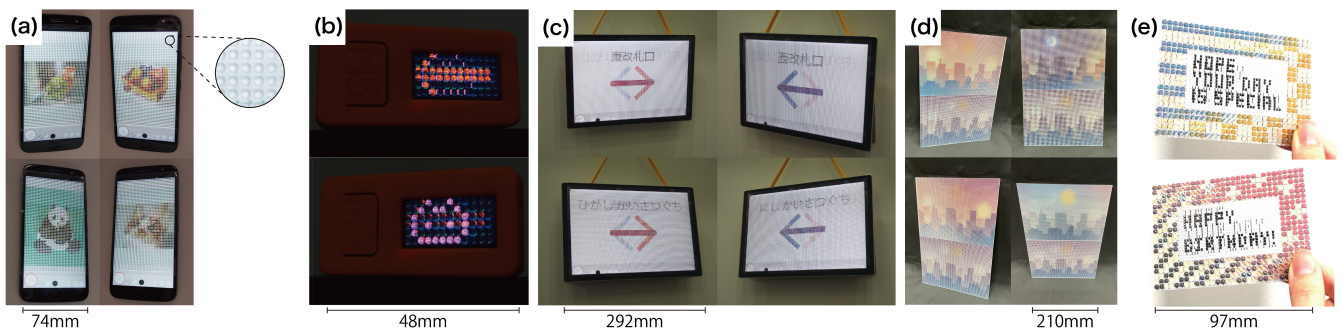


図 1 本研究の概要. (a)~(c) スマートフォン/小型マイコン/タブレット等の多様なデバイスで多視点情報提示を実現できる. (d) 視点によって風景の切り替わる A4 サイズのポスター. (e) メッセージと模様がキラキラと変化する, 複数の直径のレンズアレイを組み込んだバースデーカード

Fig. 1 Overview of our study.

イに対応でき, レンズの直径や厚さ等をカスタマイズすることで多様な表現が可能になる (図 1).

2. 関連研究

2.1 デジタル工作機器を用いた光学素子造形手法

森田ら [5] は, レーザ熱処理に用いる集光レンズを簡易的に制作するための手法として, CNC フライスでアクリル板を切削し, シリコンオイルの塗布によって表面の粗さを低減させることでレンズを制作した. また, The Magic Lens [6] は, 一見ランダムに見えるパターンの中に隠れた画像を複合化する屈折レンズアレイである. PolyJet 方式 3D プリンタで制作しており, 画像を複合化する機能は果たしているものの, 表面の粗さによる像のぼやけが課題とされている. Printed Optics [7] は, インタラクティブデバイスのための光学素子の 3D プリント手法である. たとえば, 光ファイバの束のように光の導線を 3D モデルの中に組み込むことができ, テーブルトップインタフェース上に置かれたオブジェクトに組み込むことで, 下面の液晶ディスプレイの映像をオブジェクトの正面に映し出すことができる. これらの手法はデジタル工作機械での造形後に磨き等の後処理が必要であったり, ハイエンドの 3D プリンタを必要としたりするため個人が手軽に利用することは難しかった.

また本研究の前身として, Tsukada ら [8] は, UV プリンタを用いて透明な紫外線硬化インクを積層し, レンズを造形する手法を提案した. 専用のツールを用いることで多様な大きさや厚みのレンズを手軽に造形することができる. 本研究では, この手法・ツールをカスタマイズ可能なレンズアレイの制作に活用する.

2.2 多視点情報提示手法

北村ら [9] は, 中央に穴のあいたディスプレイマスクを, 単一のディスプレイから適度に離れた位置に重ねることで, ユーザの視点位置に応じて異なる領域を観察できる装

置を提案した. また, Sakurai ら [1] は, ユーザの立ち位置等に応じて, プロジェクタからテーブルに投影される情報の輝度を制御し, 複数のユーザに対して異なる可視性で情報を提示するテーブルトップ型ディスプレイを提案した. Parallel Reality Display [2] は, 角度に応じて異なる色彩を提示可能なピクセルと, カメラを用いたオブジェクト認識を組み合わせて, ユーザの立ち位置に応じて異なる情報を提示できる大型ディスプレイである. これらの手法は基本的に大型ディスプレイを想定しており, 大がかりな設備や特殊な機材を必要とする. 本研究では多様なサイズのレンズアレイを造形してディスプレイと組み合わせるだけで, 手軽に多視点情報提示を実現できる.

Harrison ら [10] は, きわめて淡い色は正面からは白く, 斜めからははっきりと暗く見えるという, TN 液晶ディスプレイの色調の歪みを利用して多視点情報提示を行う手法を提案した. この手法は, 一般的な液晶ディスプレイで再現が可能であるが, 1 度に表示できる画像は 2 種類という制約に加え, 片方の画像がツェネに表示されるという制約がある.

Sakurai ら [11] は, UV プリンタを用いて CMYK インクの上に衝立状の構造を印刷することで, 見る角度によって異なる画像を表示する手法を提案した. 我々の提案と類似する効果を実現しているが, 画像パターンや衝立の構造が複雑になるため, 一般的な PC では数時間の計算が必要となる. また, 印刷物を対象としており, ディスプレイとの組み合わせは報告されていない.

Zeng ら [12] は, ハイエンドのマルチマテリアル 3D プリンタを用いて, 曲面の 3D オブジェクトの表面にカラーパターンとレンズを 1 度に印刷し, 視点の位置に応じて異なる外観に見せる手法を提案した. この手法では, 直径が 3mm より小さい場合, レンズやカラーパターンの印刷品質が低くなるという制約がある. また, 1 つのオブジェクトに印刷されるレンズはすべて同じサイズで統一される. 本手法では小さいレンズでもレンズやカラー品質を保つこ

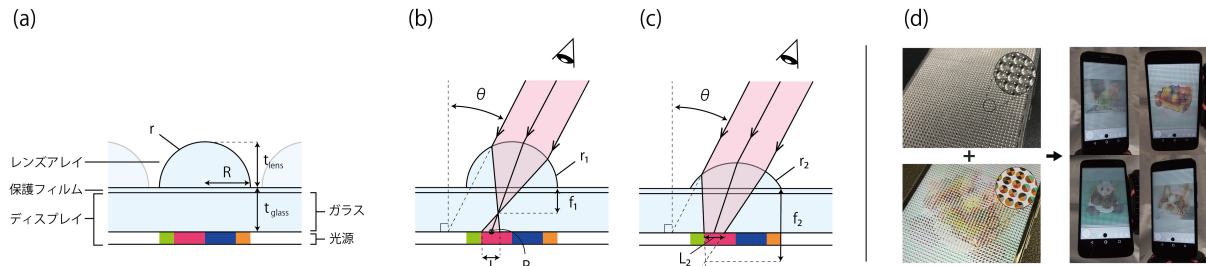


図 2 (a), (b), (c) 二次元レンチキュラの模式図. (d) スマートフォンへの適用例
 Fig. 2 (a), (b), (c) Configuration of a 2D-lenticular system. (d) Application example of smartphones.

とができ、直径や厚さの異なる複数のレンズを組み合わせた多様なレンズアレイを制作することができる。

三浦 [3] は、多数の微小レンズが配置されたレンズアレイを撮影と表示の双方に用いて被写体の光学像を形成することで、裸眼立体視が可能なインテグラル立体テレビの研究を行っている。Yamanouchi ら [4] は、ディスプレイの上に微小な単レンズをマトリクス状に配列されたフライアイレンズを配置し、その上にアクリル板等でできた四角錐をのせて映像を反射させることで、3D 映像が浮いて見えるホログラフィック・ピラミッドを提案した。また、藤木 [13] は、フルカラー 3D プリントを用いて、グラデーション付きの窪みを多数備える 3D モデルを造形した。この窪みにアクリル球を埋め込むことで、見る角度に応じてモデルの色がなめらかに変化する作品を発表した。これらの手法に対し、本手法では UV プリントを用いてレンズアレイが容易に制作でき、個々のレンズのサイズや焦点距離を用途に応じてカスタマイズできるため、様々なディスプレイや印刷物に適用することができる。

3. 提案手法

本章では、本研究で提案するシステムの概要とコンセプトについて述べる。

3.1 二次元レンチキュラ

まず、二次元レンチキュラの基本的な構造について説明する。図 2(a), (b), (c) はディスプレイに適用した場合の、二次元レンチキュラの模式図である。二次元レンチキュラは、保護フィルム上に印刷したレンズアレイと画像パターンを表示したディスプレイから構成される。レンズによって画像パターンが拡大される範囲の幅 L は、レンズの曲率半径 r と、ディスプレイのガラスの厚さ t_{glass} によって決定される。なお、厳密には保護フィルムの厚さも考慮する必要があるが、非常に薄いためここでは t_{glass} に含む形で考えることにする。ここで、ディスプレイのガラスの厚さ t_{glass} はディスプレイの機種に依存するため実質的に定数となる。曲率半径 r は、式 (1) よりレンズの半径 R とレンズの高さ t_{lens} から求められ、本研究ではレンズ

の厚さ t_{lens} を変更することで、ディスプレイの厚さ t_{glass} に合わせて拡大幅 L を調整する。なお、本研究で印刷するレンズは球面凸レンズであり、 t_{lens} の最大値は R となる。また、焦点距離 f はレンズメーカーの公式を用いて、曲率半径 r とレンズ素材の屈折率 n から式 (2) のように求められ、 t_{lens} が小さい（レンズが薄い）ほど焦点距離が長くなる（図 2(b), (c)）。図 2(b) のように t_{lens} が大きく焦点距離が t_{glass} よりも短い場合は、ディスプレイの像がレンズ内で反転して拡大される。図 2(c) のように t_{lens} が小さく焦点距離が t_{glass} より長い場合は、像は反転せずに単に拡大される。レンズの印刷に使用する透明インクの屈折率 n は先行研究 [8] にならい、アクリル樹脂等の一般的な透明樹脂の屈折率である 1.5 と仮定した。

$$r = \frac{R^2 + t_{lens}^2}{2t_{lens}} \quad (1)$$

$$f = \frac{r}{n - 1} \quad (2)$$

さらに、ディスプレイに対する視点の角度 θ によって、拡大される位置 P が変化する。たとえば、図 2(d) は薄い保護フィルム（厚さ 0.08 mm）に印刷したレンズアレイ（直径 1.5 mm、厚さ 0.75 mm）とスマートフォン Moto G5s Plus/Motorola 社（ディスプレイガラスの厚さ約 1.5 mm）に表示した画像パターンである。このレンズアレイを画像パターンの上に重ね、上下左右 20° の位置から撮影すると、視点に応じて画像パターンの異なる箇所が拡大されるため、二次元的に画像が変化して見える。

3.2 コンセプト

本研究のコンセプトは以下の 3 点である。

- (1) カスタマイズ可能なレンズアレイの造形
- (2) 手軽な画像パターンの設計
- (3) 多様な素材への出力と活用

1 点目は、UV プリントを用いることにより、様々な直径、厚み、レイアウトのレンズアレイを制作できる。これにより、スマートフォンやタブレット、小型マイコン等の多様なサイズに対応した二次元レンチキュラを手軽に造形できる。また、厚みを変えることでレンズの焦点距離を調

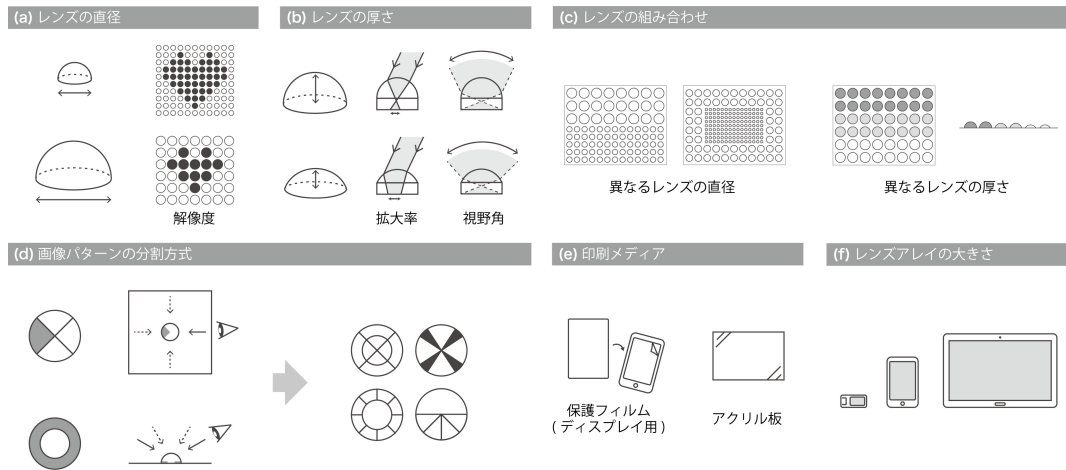


図 3 本手法のデザインスペース
Fig. 3 Design Space of our method.

整したり、直径を変えたりすることで解像度や視認性を用途に応じて変更できる。

2点目は、画像パターンを設計を支援するために、スマートフォンやタブレット上で動作する設計/表示ツールを提供することである。本ツールを利用すれば、特殊な技能を持たないユーザでも手軽に二次元レンチキュラ用の画像パターンを用意できると考える。なお、画像パターンとツールの詳細については後述する。

3点目について、紙やアクリル等、様々な素材に印刷できる UV プリントの特性を生かして、多様な活用事例を提案することである。たとえば、スマートフォン等のディスプレイ上で利用する場合は、付け外しが可能な画面保護フィルムにレンズアレイを造形することで、用途に応じて交換や取り外しが容易となる。さらに、スマートフォン等で設計して視認性を確認したパターンを書き出して、UV プリントでアクリル板等に（レンズアレイとともに）印刷することで、視点による情報の切替えが可能なポスタや案内板として活用することもできる。

3.3 カスタマイズ性

本手法ではレンズの直径や厚さ等をカスタマイズすることができる。カスタマイズ可能な要素を図 3 に示す。

レンズの直径。 レンズの直径は表示の解像度や視認性に関係する (図 3(a))。

レンズの厚さ。 レンズの厚さは画像パターンの拡大率や視野角の広さに関係する (図 3(b))。

レンズの組合せ。 本手法では直径や厚さの異なるレンズを複数組み合わせ配置し、1つのレンズアレイとして印刷することができる (図 3(c))。

画像パターンの分割方式。 レンズアレイの下に重ねる画像パターンは、レンズの直径に合わせた円状のピクセルから構成される。我々は、ピクセルの分割方式として、円の中心から放射状に分割する方式と、同心円状に分割する方式

の2種類を検討している (図 3(d))。この2つの方式を組み合わせることで、多様な角度からの多視点表示を実現できると考える。

印刷メディア。 本手法はスマートフォンやマイコン等のディスプレイと、アクリル板等のアナログなメディアの両方に適用することができる。ディスプレイに適用する場合は、薄型の保護フィルムにレンズアレイを印刷しディスプレイに貼り付ける。

レンズアレイの大きさ。 様々なサイズのレンズアレイが印刷可能であり、多様な大きさのディスプレイや印刷物に対応できる。

3.4 画像パターンの設計

ここでは、二次元レンチキュラに利用する画像パターンの設計について説明する。パターンの各ピクセルはレンズの直径に合わせた円とする。円の分割方式は、3.3 節で述べたように、放射状/同心円状の2種類とその組合せが考えられるが、ここでは、放射状の方式を説明し、それ以外の方式は 8.2 節で議論する。放射状の分割方式では、円を最大 8 分割した扇形ごとに、任意の画像を割り当てる。たとえば、図 4 に示すように、4 種類の画像を視点に応じて切り替える例を考える。まず、提示したい 4 種類の画像を用意し、パターン設計ツールに読み込む (図 4 左)。次に、パターンの各ピクセル (円) を 4 分割した扇形の 1 つに、各画像の対応する 1 ピクセルを割り当てる (図 4 中央)。なお、各画像の解像度はパターンに応じて自動的に削減される。最終的に、各扇形に配置された 4 種類の画像を合成することで、画像パターンが完成する (図 4 右)。このパターンをレンズアレイと組み合わせることで、扇形的位置に応じた一定の角度から画像を視認することができる。なお、円の分割数を増やせばより多くの画像を埋め込むことができるが、視認可能な角度は狭まることになる。

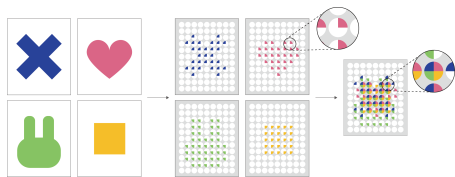


図 4 画像パターン設計. 提示する画像 (左), 各画像を扇形に割り当てた画像 (中央), 4 種類の画像を合成したパターン (右)

Fig. 4 Design of the image pattern.

4. 実装

本章では, 本研究で提案するシステムの実装について説明する.

4.1 レンズアレイ

レンズアレイは, 先行研究 [8] のレンズ設計ツールと Adobe Illustrator を活用してデータを作成し, UV プリンタを用いて透明インクで印刷する. UV プリンタは, Roland DG 社の「VersaUV LEF-12i」(以下, VersaUV) を利用し, 透明インクは同社の「ECO-UV, EUV-GL Ver2」*1 を使用した. 先行研究では基本的に 1 mm~2 mm 厚の亚克力板上にレンズを造形していた. 一方, 本研究ではレンズアレイをスマートフォンやタブレットのディスプレイ上に貼り付けて利用することになる. よって, こうしたデバイスへの取り付け/取り外しを容易にしつつ, タッチパネル機能も扱える状態とするために, A4 サイズで 0.08 mm 厚の画面保護フィルム (エーワンラベルシール光沢フィルム透明) 上にレンズアレイを造形することにした. なお, この保護フィルムは非常に薄く, 印刷中にレンズの張力等で丸まってしまうため, シートの周囲をテープ等で UV プリンタの台座に固定し, ピンと張った状態で印刷を行った. 図 5 に, シート上に印刷したレンズアレイの例を示す. これらのレンズアレイをスマートフォンに取り付けた状態でもタッチ操作は可能であり, 複数回の取り付け/取り外しができることを確認した. なお, このような注意をしたうえでも, 直径 3 mm 以上のレンズアレイを造形すると, シートが丸まってしまう傾向があった. 印刷の安定性等を考慮し, 後述する視認性評価等では直径 1.5 mm のレンズアレイを使用した.

4.2 画像パターン設計ツール

パターン設計ツールは Processing で実装した. PC (Windows, Mac) に加えて, Processing for Android を用いることで, スマートフォン (Android 端末) でも動作する.

アプリケーションは画面上部のパターン描画部と, 下部のツール群から構成される (図 6). 前述したように, レンズアレイの上からスマートフォンのタッチパネルを操作す

*1 インクの組成は感光性樹脂, 二アクリル酸ヘキサメチレン, アクリルエステル類, ホスフィンオキサイド誘導体からなる [14].

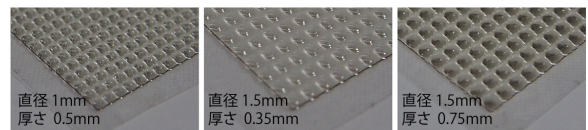


図 5 画面保護フィルム上に印刷したレンズアレイ (103.5 mm × 67.8 mm) の一例

Fig. 5 Lens arrays printed on protection films.

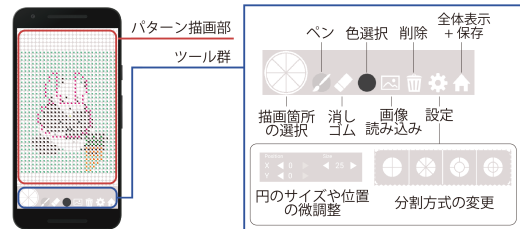


図 6 パターン設計ツールの画面構成

Fig. 6 Appearance of the pattern-design tool.

ることが可能であるが, 解像度が低下するためレンズアレイは画面のパターン描画部にのみ貼り付けることとした. パターン描画部では, 任意の画像を読み込むだけでなく, 指やタッチペン等を用いて直接ドット画像を描画することもできる. この際, レンズアレイを付けたままでも描画できるが, レンズアレイの凹凸により精密な操作はやや難しいため, シートを脱着して行うこともできる. ツール群では, 各ピクセル内の描画箇所 (扇形) の選択ツールや描画用のペン/消しゴム/色選択ツール, 画像読み込みツール, 設定ツール等を備えている. 設定ツールでは, ピクセル (円) のサイズや位置を微調整できる. これにより, 様々なディスプレイサイズやレンズ径に対応したり, 多少の貼り付け位置のずれに対処したりできる. また, 円の分割方式は放射状の 4 分割/8 分割に加え, 4 分割方式と同心円状の分割方式を組み合わせた 2 方式の 4 つに変更できるようにした.

5. 応用例

ここでは, 本研究の応用例として, 「行先案内板」「机上に設置した多視点ディスプレイ」「パスワード入力キーパッド」「メッセージと模様が変化するバースデーカード」を紹介する.

5.1 行先案内板

行先案内板について紹介する (図 1(c)/図 7). 行先案内板は複数の行先が表示されると複雑になりがちであるが, ここでは, 横から見ることで進行方向の矢印と目的地だけが表示される. 目的地は, 目線の高い大人が見ると漢字表記となり, 目線の低い子供が下から見るとひらがな表記となるよう配慮した. このように, 目線の高さに合わせて表記を切り替えるような, インタラクティブな情報提示が可能になる. なお, 図 1(c) の事例はタブレット端末 (Surface4/Microsoft 社) 上にレンズアレイを造形した保護

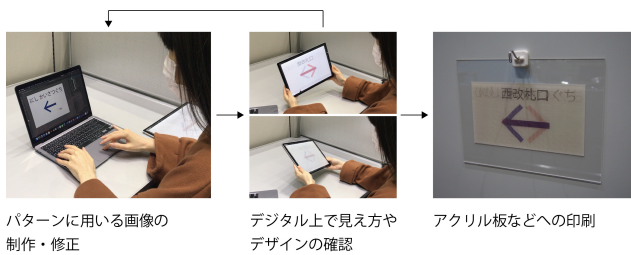


図 7 デジタル設計からアナログ印刷への流れ。修正の容易なタブレット端末上で視認性を確認後、アクリル板に印刷する
Fig. 7 Process flow from digital design to analog printing.

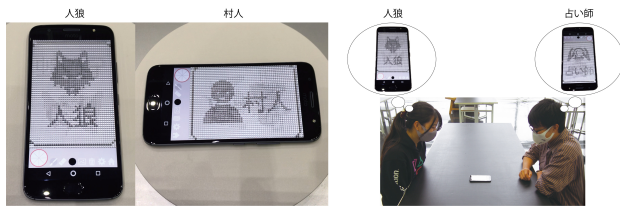


図 8 机に設置した多視点ディスプレイ。プレイヤーの位置に応じた役職を提示 (左)、人狼をプレイする様子 (右)
Fig. 8 Example of multi-viewpoint display on a table.

フィルムを貼り付け、パターン描画ツールを用いて実現している。図 7 のように、デジタル上でデザインや視認性を確認したうえで、同サイズのアクリル板にレンズアレイと画像パターンを同時に印刷することで、図 7 右のような静的ながらインタラクティブ性のある行先案内板として長期的に活用できる可能性がある。

5.2 机に設置した多視点ディスプレイ

机に設置した多視点ディスプレイの事例を紹介する (図 8)。テーブルを複数 (2~4 人) のユーザが囲むような状況で、レンズアレイを備えたディスプレイを机の中央に平置きすることで、ユーザの位置に応じた異なる情報を提示することができる。これにより、ユーザ間のコミュニケーション支援等に活用できる可能性がある。図 8 の事例は、スマートフォン (Moto G5s Plus/Motorola 社) を用いて、人狼ゲームに活用している。ここでは、プレイヤーの位置に応じた役職 (村人、人狼等) をランダムに提示している。さらに加速度センサを活用することで、スマートフォンを手を持っているときには設定画面を表示し、机の上に置いたときにスタート画面やそれぞれの役職を多視点で表示している (図 9)。これに加えて、進行状況等を切り替えて提示すれば、1 台の端末だけで人狼ゲームをスムーズに進行できると考える。

5.3 パスワード入力キーパッド

ショルダーサーフィンを防止できるパスワード入力キーパッドの応用例を紹介する (図 10)。この例では、画面を正面から見るとすべての文字が見えるが、斜めから見るとキーパッドや入力した数字が見えなくなる。これにより



図 9 加速度センサによる画面の切替え。加速度センサを用いて端末の状態 (把持/平置き) を検出している
Fig. 9 Example of interaction using accelerometer.

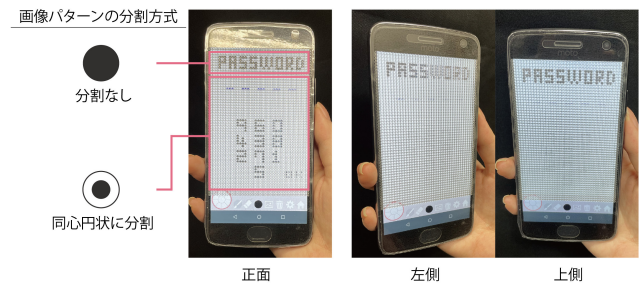


図 10 ショルダーサーフィンを防止するパスワード入力キーパッド
Fig. 10 Password entry keypad preventing shoulder surfing.

ショルダーサーフィンを防ぐことができる。パターン分割の方法を変えることで、見える角度 (≒視かれたくない角度) を簡単に調整することが可能である。さらに、正面以外の角度に対して異なるキーパッドの数字を出す等すれば、より安全性を高められる可能性もある。

5.4 メッセージと模様に変化するバースデーカード

図 1 (e) は直径の異なるレンズを組み合わせ、アクリル板に印刷したバースデーカードの例である。中央部分には視点によって変化する 2 つのメッセージ、フレーム部分にはきらきらと変化する模様を表現している。この表現を実現するために、2 種類のレンズと分割方法を組み合わせている。中央には小さなレンズ (1.5 mm) と 2 分割した黒いパターンを配置し、メッセージの視認性を高めている。フレーム部分には大きなレンズ (3.0 mm) とカラフルな模様 (ストライプやチェック等) を 8 分割で配置し、ジュエリのようなきらめきを表現している。

6. 視認性評価

6.1 目的と手法

本実験では、スマートフォンに提案手法で造形したレンズアレイを取り付けた際に、レンズの厚さ t_{lens} を変化させることで曲率半径を調整し、レンズに写る像の特徴 (拡大率や反転の有無) と視野角 (一定角度ごとの画像パターンの見え方の変化) を調査した。

レンズの厚さ (≒焦点距離) と視距離による画像パターンの見え方の変化等を調査するため、直径 1.5 mm/厚さ 0.35 mm, 0.50 mm, 0.75 mm の 3 種類のレンズアレイを

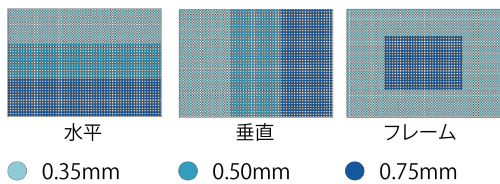


図 11 視認性評価用の特殊なレンズアレイ. これ以外にも 0.35 mm/0.5 mm/0.75 mm の厚さの標準レンズアレイを用意した

Fig. 11 Special lens arrays for visibility evaluation.

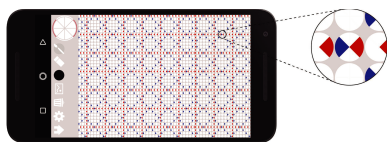


図 12 視認性評価用の画像パターン

Fig. 12 Image pattern for the visibility evaluation.

4章で紹介した保護フィルム（厚さ 0.08 mm）上に造形した. 厚さは直径 1.5 mm の球面凸レンズの最大値である 0.75 mm を基準に, それよりも薄い 0.50 mm, 0.35 mm とした. このレンズアレイをここでは標準レンズアレイと呼ぶ. さらにレンズの厚さを部分的に変化させた場合の画像パターンの見え方の変化を調査するため, 図 11 のようにレンズの厚さを水平, 垂直, フレーム状に変化させた特殊なレンズアレイを制作した.

すべてのレンズアレイの寸法は, スマートフォン Moto G5s Plus/Motorola 社 (ディスプレイガラスの厚さ約 1.5 mm) に表示した画像パターン設計ツールのサイズに合わせて 97.1 mm × 67.8 mm とし, レンズの直径は 1.5 mm とした. 変更するパラメータは, レンズアレイの種類に加えて, ディスプレイの回転角度 ($-50^\circ \sim +50^\circ$), 視点との距離 (視距離, 20 cm, 30 cm, 60 cm) とした. 画像パターンは, 赤と青の 2 色の網目模様のパターンを使用した (図 12). 画像パターンの円形の各ピクセルは 4 つの扇形に分割され, 左右の各ピクセルのみを 2 色で塗り潰した. 画像パターンを表示したスマートフォンに慎重に保護フィルムを貼り付けて位置ずれがないことを確認したうえで, 電動の回転テーブルにスマートフォンを垂直に固定した. そして, スマートフォンを 10° ずつ回転させデジタルカメラで撮影した. さらに異なる視距離とレンズアレイで同様に撮影を行った.

6.2 結果と考察

図 13 に実験結果を示す. この図では 1 つの画像パターンのみが見えたと見えたものをピンクと青でハイライトしている. なお, 視距離による違いがほとんど確認できなかったため, 視距離 20 cm の結果のみ抜粋している. また, スマートフォンの回転角度については, 図の可視性を保つため, -50° , -40° , $+40^\circ$, $+50^\circ$ を除いた.

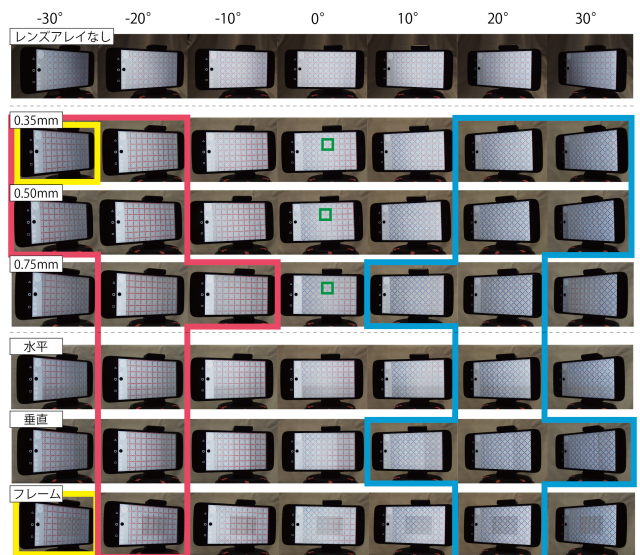


図 13 標準レンズアレイと特殊なレンズアレイの見え方の変化. 視距離は 20 cm. 単一の画像パターンがはっきりと見える画像をピンクと青でハイライトしている

Fig. 13 Result of the visibility evaluation.

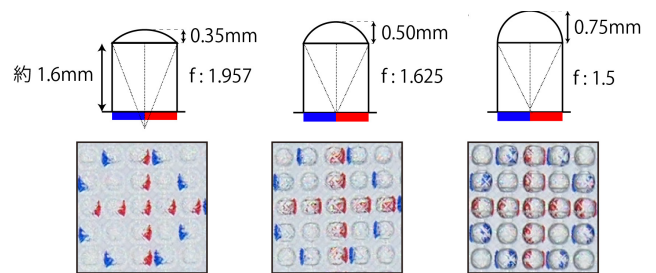


図 14 拡大した標準レンズアレイの比較. f は式 (2) で求めたレンズの焦点距離を表す

Fig. 14 Comparison of magnified lens arrays.

まず, 全体的な傾向として, どのレンズアレイでも -20° では赤色, $+20^\circ$ では青色の画像パターンが表示されて見え, 視点に応じた画像の変化が確認できる. 0° (正面) では, すべてのレンズアレイで画面の右側に赤色, 左側に青色の画像パターンが見える. また, 特殊なレンズアレイの場合, レンズの厚さが異なることから, レンズの厚さが 0.35 mm と 0.50 mm の部分は, 0.75 mm の部分よりも明るく見える. 図 13 上段のレンズアレイなしの場合では, いずれの角度でも両方の画像パターンが表示されて見える.

また図 14 に 0° (正面) の標準レンズアレイの一部 (図 13 の緑色にハイライトした箇所) を拡大したものを示す. レンズの隙間部分からも色が見えているためやや分かりにくい, レンズ部分に注目すると焦点距離 f がディスプレイの厚さ (約 1.6 mm^{*2}) より長い 0.35 mm と 0.50 mm ではレンズの左側が青色, 右側が赤色に見え, 画像パターンがそのまま拡大されている. 一方, 焦点距離 f がディスプレ

*2 ガラスの厚さ約 1.6 mm は保護フィルムの厚さ 0.08 mm とディスプレイガラスをノギスで計測した実測値の約 1.5 mm から概算したものであり, 0.1 mm 程度の誤差がある可能性がある.

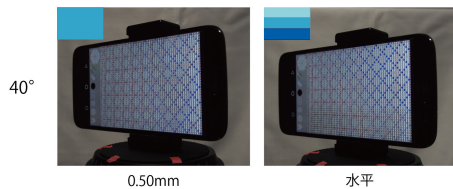


図 15 標準レンズアレイ (0.50 mm) と特殊なレンズアレイ (水平) の比較。後者のパターンは、斜めのグラデーションがかかっているように見える

Fig. 15 Comparison of standard/special lens arrays.

イの厚さより短い 0.75 mm ではレンズの左側が赤色、右側が青色になっており、反転して拡大されていることが分かる。なお、提案手法では各レンズ内で 1 つのパターンのみを視認させるため、今回の実験条件ではレンズ内の像が反転しても表示性能に大きな影響はないように思われた。今後、多様な画像パターンでも検討を進めていきたい。次に拡大率について、図 14 から考察すると、厚さ 0.35 mm が最も拡大率が低く、0.50 mm, 0.75 mm と厚くなるにつれてやや高くなる（狭い範囲が拡大される）と思われた。ガラスの厚さに誤差がある点や、レンズアレイの反射や撮影画像の解像度等の問題で正確な拡大率の検証までは今回は難しかったため、今後の検討課題としたい。また、レンズの隙間部分を白インク等で塗りつぶすことでノイズが軽減される可能性があり、今後検討を進めていきたい。

次に、標準レンズアレイ（レンズの厚さ）の違いに着目する。−30°では、厚さ 0.35 mm の標準レンズアレイは全体的に赤色の画像パターンを示している一方、厚さ 0.75 mm では画面左側に赤色の画像パターン、右側に青色の画像パターンが見える。反対に、−10°では、厚さ 0.35 mm の標準レンズアレイは左側に青色の画像パターン、右側に赤色の画像パターンが見え、厚さ 0.75 mm の標準レンズアレイでは全体的に赤色の画像パターンが表示されて見える。このように、レンズの厚さが大きくなるほど、視野角は狭くなる傾向が確認できた。

次に、厚さを部分的に変化させた特殊なレンズアレイの特徴的な箇所について、標準レンズアレイと比較して述べる。

特殊なレンズアレイ（水平）と標準レンズアレイ（厚さ 0.50 mm）を比較した結果を図 15 に示す。どちらも左側が赤色、右側に青色のパターンが見え、標準レンズアレイでは青色のパターンの面積は上下均一に見える。一方、特殊なレンズアレイ（水平）では、青色のパターンの面積は上側（厚さ 0.35 mm）では大きく、下側（厚さ 0.75 mm）では小さくなり、斜めにグラデーションがかかっているように見える。これは、厚さ 0.75 mm のレンズの方が 0.35 mm よりも視野角が狭いためだと考えられる。このような特徴を利用して、情報をクロスフェードのように切り替えることができると思われる。

さらに、特殊なレンズアレイ（フレーム）と標準レンズアレイ（厚さ 0.50 mm）を比較した結果について述べる。図 13 の黄色にハイライトした箇所に着目すると、標準レンズアレイ（厚さ 0.50 mm）では全体的に赤色のパターンで右側の 1/3 程が青みがかって見える。一方、特殊なレンズアレイ（フレーム）では、外側（厚さ 0.35 mm）が赤色のパターン、内側（厚さ 0.75 mm）が青色のパターンとなり、フレーム状に分かれて見えることが確認できる。この特徴を利用し、注目してほしい情報を内側に表示することで、強調表現等が可能ではないかと考える。以上のように、部分的にレンズの厚さを変えることで表現の可能性を広げられることが期待できる。

最後に、スマートフォンでの実験では、前述のとおり視距離（20 cm～60 cm）による角度ごとの画像パターンの見え方に変化は確認できなかった。しかし、ディスプレイを大きくし視距離を長くすることで、視野角等に影響を与える可能性があるため、今後検証していく。

7. ケーススタディ

7.1 目的

ケーススタディでは、提案手法や設計ツールを使用して一般のユーザに作品を制作してもらい、その様子を観察することで、作品の傾向や、提案手法/設計ツールの課題等を調査する。UV プリンタが設置/利用されているフィールドとして、FabLab Sendai Flat の協力を得て、子供から大人まで幅広い年齢層を対象としたワークショップを開催した。ワークショップの概要は事前に Web 上で告知し、参加希望者を集めた*3。ここでは、制作過程の観察や、制作された作品をもとに議論する。

7.2 手法

ワークショップの参加者は、（男性 5 名、女性 3 名）であり、年齢層は 6 歳～50 歳であった。なお、参加者のうち、6 名が 15 歳以下（小中学生）であり、保護者が同席した。制作物としては、小中学生の参加者が多いことから、難易度や体験時間（1 時間半、2 組に分けて実施）に配慮して、円形の亚克力板（厚さ 1.0 mm）を 2～3 枚重ねたシンプルなキーホルダとした（図 17 左）。任意の画像パターンを印刷した亚克力板の上に、レンズアレイを印刷した亚克力板をを重ねることで、角度によって画像が切り替わって見える。レンズは直径 1.5 mm または 3.0 mm から選択可能とした*4。なお、体験時間を短くするために、レンズアレイを印刷した亚克力板は事前に用意した。

次に、ワークショップの手順について示す。主催者は著者の 1 人である。

*3 https://fablabsendai-flat.com/2022/02/25/keyholoder_ws/

*4 3.0 mm のレンズアレイを使用する場合は、焦点距離を調整するスペーサとして亚克力板を 1 枚間に挟む必要がある。

参加者	A	B	C	D	E	F	G	H
作品概要	キャラクターが変化	キャラクターが変化	アルファベットと背景色が変化	文字の色が変化	ストライプの色と向きが変化	キャラクターが変化	キャラクターが変化	キャラクターが変化
レンズの直径(mm)	1.5	1.5	3.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
画像パターンの分割方式								
制作方法	別のツールで制作したドット絵の読み込み	画像の読み込み	ツールでの手描き	ツールでの手描き	ツールでの手描き	画像の読み込み	画像の読み込み	画像の読み込み
年齢	50	8	15	43	13	12	6	9

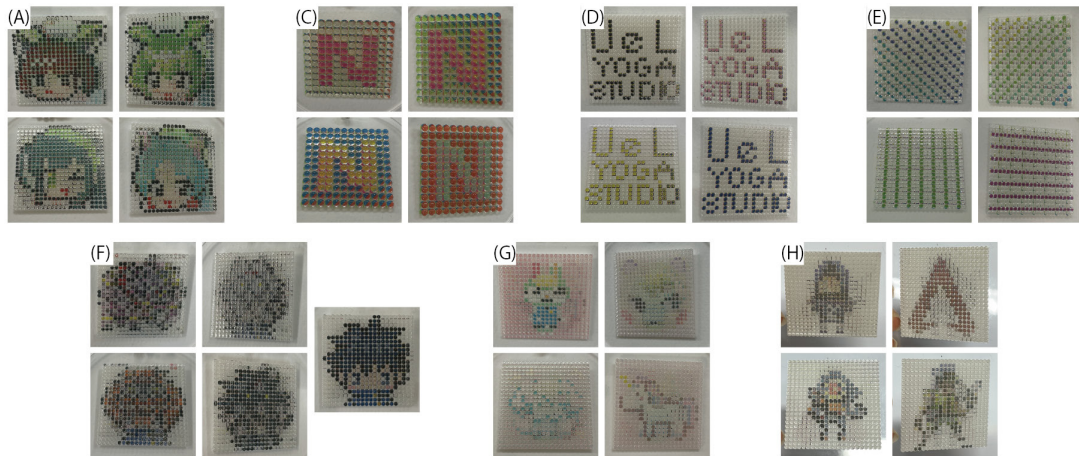


図 16 参加者が制作した作品
Fig. 16 Results of the user study.

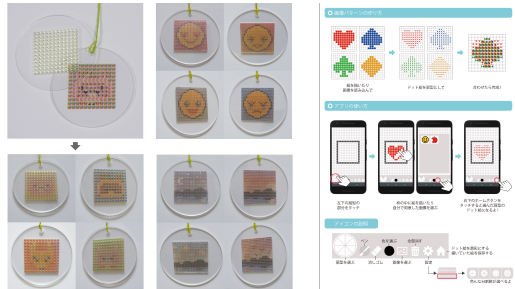


図 17 参加者に提示したサンプルの一例 (左) と事前説明用の配布資料 (右)

Fig. 17 Examples and handout for preliminary explanation.

- (1) 主催者は、参加者に本手法で制作したキーホルダの例を提示し、画像パターンの仕組みや設計ツールの使用方法を説明した (図 17)。なお、細かい作業を希望する人用にタッチペンも用意した。
- (2) 参加者は設計ツールを用いて画像パターンを制作し、保存した。
- (3) Illustrator を用いて画像パターンを EPS データに変換し、UV プリンタでアクリル板へ印刷した。なお、UV プリンタでの印刷過程は今回の調査の対象外であるため、この工程は主催者が行った。
- (4) 最後に、参加者は印刷された作品を確認した。画像パターンを制作している間、主催者と FabLab Sendai

Flat のスタッフ 2 名は参加者の側におり、ツールの使用方法や UV プリンタ等についての質問に答えた。なお、参加者/スタッフからは、ワークショップで制作した作品や、体験中の様子の掲載について同意を得た。

7.3 結果と考察

参加者が制作した作品を図 16 に示す*5。

図 16 に示す各作品について、「作品概要」「パターンの分割方法」「レンズ直径」「制作方法」の点から説明する。作品概要としては、大きくキャラクターの画像が切り替わる作品 (参加者 A, B, F, G, H) と、それ以外の作品 (参加者 C, D, E) に分けられる。参加者 C は同一のアルファベットを用いて、文字の色と背景色が変わる作品を制作した。参加者 D は文章の色が変わる作品を制作した。参加者 E は縦横斜めのストライプ模様が変化する作品を制作した。なお、参加者 C を除く作品では、画像パターンを印刷する際、発色を良くするためホワイトインクを全体に印刷してから、カラーインクで画像パターンを印刷している。参加者 C からは、「透明感を出したい」という希望があったため、カラーインクのみで印刷した。

パターンの分割方法については、参加者 F のみが 5 枚の画像を使用したいということから 5 つの分割方法 (正面と

*5 参加者 B の作品は著名なゲームキャラクターを含んでいたため、図からは割愛した。

上下左右)を選択した。その他の参加者は画像パターン設計ツールの初期設定であった4つの分割方法(上下左右)を選択した。

レンズ直径については、参加者Cのみ直径3.0mmのレンズアレイを使用し、その他の参加者は直径1.5mmのレンズアレイを使用した。この理由は、参加者Cが1つのアルファベットを強調したシンプルなデザインを用いたのに対し、その他の参加者はキャラクタや文章等の細かいパターンを利用したためだと考える。

次に、画像パターンの制作方法について紹介する。参加者C, D, Eはタッチペンを使ってツール上でドット絵を描く方法で制作した。参加者B, F, G, Hはインターネットで検索したキャラクタ等の画像をツールに読み込むことで制作した。特に、参加者B, G, Hのような小学校低学年の参加者は、保護者と対話しながら、好きなキャラクタ等の画像を検索して画像パターンとして使用していた。また、参加者Hについては画像を読み込んだ後、タッチペンを利用してツール上で画像の修正を行っていた。参加者Aについては、事前にレンズアレイと解像度を合わせたドット絵を用意しており、ツールに読み込んで利用した。その結果、他のキャラクタの画像を利用した例(参加者B, F, G, H)と比較して、細部まではっきりと再現できているように感じられた。また、参加者C, F, Gについては、図18(c)のようにレンズアレイを画面に押し当てて制作した画像パターンの見え方を確認する様子が確認できた。

以上のように、幅広い年齢層の参加者が本手法と画像パターン設計ツールを使用して多様な作品を制作できたことを確認できた。

また、制作中に参加者から設計ツールに関して、「保存機能^{*6}はどう使うのか」という質問や「1つ前の状態に戻る機能があるといい」等の意見が複数あったことから、ツールのUIや機能の改善が必要であると考える。



図18 参加者の様子。(a) 全体の様子。(b) タッチペンで描画する様子。(c) レンズアレイを画面に押し当てて見え方を確認する様子。(d) 完成した作品を眺める様子

Fig. 18 Appearances of participants in the workshop.

^{*6} 1つのパターンを描画または画像読込後、プレビュー画面に移動したタイミングで、自動的にパターンが保存される設定とした。

8. 議論

ここでは、レンズの直径による解像度等の違い、パターン分割方式、印刷サイズと印刷時間、提案手法の制約について述べる。

8.1 レンズの直径による解像度等の違い

図19は直径2.5mmと1.5mmのレンズアレイそれぞれで画像を表示した例である。画像パターンはレンズの大きさに合わせて、同一の写真を画像パターン設計ツールに読み込んで作成した。図を見ると、直径2.5mmの大きなレンズアレイではドット絵のような低解像度だが明るい表示、直径1.5mmの小さなレンズアレイでは高解像度な表示となっていることが分かる。レンズの直径を変えた場合の視認性評価はまだ行っていないため、今後調査を進めていく。

8.2 画像パターンの分割方式

ここでは、画像パターンの分割方式について議論する。3.3節で述べたように、画像パターンの分割方式として、円の中心から放射状に分割する方式と、同心円状に分割する方式の2種類を検討しており、この2つの方式を組み合わせることで、多様な角度からの多視点表示を実現できると考える。図20に画像パターンの一例を、図21にそれぞれのパターンの実際の見え方を示す。視認性評価に使用した画像パターンの分割方式1は、円を扇形に分割している(図20左上)が、この分割方式では図21上段のように、ディスプレイを0度(正面)から見た際、すべての画像が混ざって見えてしまう。この問題は、分割方式を変えることで解決できると考える。たとえば、円の中央を白く塗り

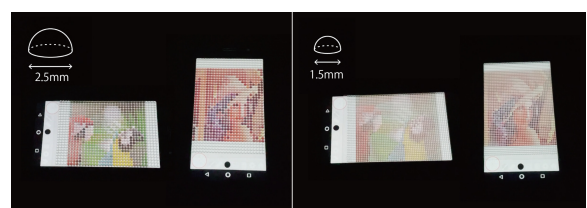


図19 直径と厚さの異なるレンズアレイの比較

Fig. 19 Comparison of lens arrays with different diameters.

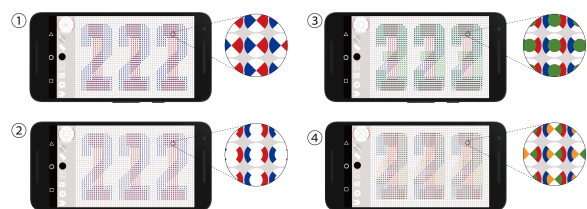


図20 画像パターンの分割方式の一例。分割方式1:扇型に4分割。分割方式2:円の中央を白く塗り潰す。分割方式3:円の中心に別の画像で塗り潰す。分割方式4:扇型を二重に重ねる

Fig. 20 Examples of segmentation methods.

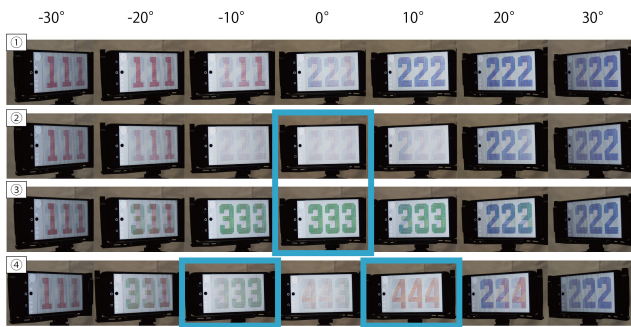


図 21 各分割方式ごとの実際の見え方. 特徴的な箇所をハイライトしている

Fig. 21 Appearances of each segmentation method.

つぶした分割方式 2 (図 20 左下) や別の画像で塗りつぶした分割方式 3 (図 20 右上) を用いれば, 0 度 (正面) から見たときに画像が混ざって見えることを防いだり, 0 度 (正面) にも任意の情報を提示したりすることができる.

また, 別の分割方式として扇形を二重に重ねた分割方式 4 (図 20 右下) を用いることで, 図 21 のように 2 段階で画像を切り替えることが可能になる. この分割方式は, 0 度 (正面) から見たときに画像が混ざってしまうという問題は残るが, 細かい角度で複数段階に画像を切り替えることができ, 提示できる情報が増える. このように, 画像パターンの分割方式を工夫することで表現の可能性を広げることができると考えられる.

8.3 印刷サイズと印刷時間

印刷サイズについては, VersaUV で印刷可能な最大範囲が 305 mm, 奥行 280 mm であるため, この大きさを超えるレンズアレイは 1 度に印刷できず, 複数枚に分割する必要がある.

図 22 に, 異なる印刷サイズのレンズアレイと異なる厚さのレンズアレイについての印刷時間を比較した結果を示す. 今回制作したスマートフォン用のレンズアレイ (厚さ 0.50 mm, 67.8 mm×103.5 mm)/タブレット用のレンズアレイ (厚さ 0.50 mm, 173.2 mm×260 mm) の印刷時間はそれぞれ約 45 分/97 分であった. 面積比が約 6.5 倍あるものの, 印刷時間は約 2.2 倍に収まっており, 面積の影響は比較的受けにくいことが分かる. 一方, 同じスマートフォン用で厚さの異なるレンズアレイ (0.35 mm/0.75 mm) の造形時間はそれぞれ約 35 分/58 分となり, 厚さが約 2.1 倍になると, 印刷時間は約 1.7 倍かかっている. このように, 印刷時間においてはレンズの厚さの影響が大きいため, 一般的な用途では薄いレンズを選択したほうがよいと考えられる.

8.4 制約

本手法では汎用性, 解像度等の制約がある.

まず汎用性について述べる. 今回レンズアレイの印刷に

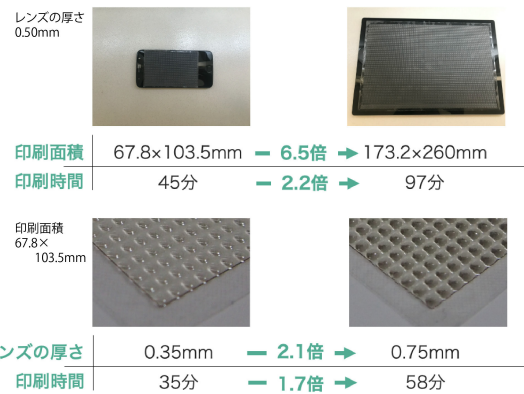


図 22 印刷サイズとレンズの厚さによる印刷時間の比較

Fig. 22 Comparison of printing time.

使用した UV プリントは VersaUV という 1 機種のみである. VersaUV は主に日本国内の印刷所等でノベルティやオリジナルグッズの制作に利用される一般的な機種で, 複数の FabLab 施設等^{*7}でも利用することができる. 本機種には光沢印刷ができるという特徴がある. 光沢印刷では一定量の透明インクを噴霧し, しばらく時間をおいてから紫外線を照射してインクを硬化させることで, 表面になめらかな光沢を出すことができる. この機能が磨き等の後処理が不要なレンズの造形に重要である [8]. 他の機種でのレンズアレイの印刷についてはまだ試していないが, この機能は他の市販の UV プリントでも提供されており, 提案手法を適用できる可能性がある.

次に解像度について説明する. 本手法ではレンズアレイと高解像度のディスプレイや印刷物を組み合わせるため, 多視点表示した最終的な画像の解像度は, 元のディスプレイの解像度より低くなる. 表現可能な解像度は, レンズの直径と, ディスプレイ等のサイズと解像度によって制限されると考える.

9. まとめと展望

本研究では, UV プリントで造形可能なレンズアレイを用いた二次元レンチキュラを提案した. 本手法では, レンズアレイをディスプレイや印刷物と組み合わせることで, 視点に応じて二次元方向に画像が変化する情報提示を行うことができる. 本論文では, PC やスマートフォン上で動作する設計ツールを実装し, タブレット/スマートフォン/マイコン等多様なサイズのディスプレイを用いた応用例を構築した. そして視認性の基礎評価を通して, 視点に応じてクリアに画像が変化し, レンズの焦点距離を変えることで視野角が変化することを確認した. さらに, ワークショップを通して, 本手法による創作活動の様子を観察し, 提案手法や設計ツールの課題を考察した.

今後の展望として, 8 章で述べたような課題の改善に取

^{*7} FabLab Sendai, Fabcafe Tokyo, DMM.make.AKIBA, おおた fab 等 (2022 年 5 月現在, 施設の Web で確認)

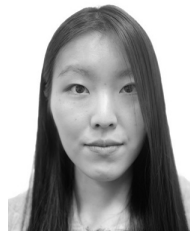
り組むとともに、3.3節で述べたような柔軟なカスタマイズ性を生かした多様な応用例の構築を行う。これらを通して、光学プロトタイピングの可能性を追求していきたい。

謝辞 本研究の一部は、科研費 20H04231 の支援を受けた。

参考文献

- [1] Sakurai, S., Kitamura, Y., Sriram, S. and Kishino, F.: A Visibility Control System for Collaborative Digital Table, *Personal and Ubiquitous Computing, Special Issue on Interaction with Coupled and Public Displays*, Vol.13, pp.619–632 (2009).
- [2] Dietz, P.H. and Lathrop, M.: Adaptive environments with parallel realityTM displays, *SIGGRAPH '19: ACM SIGGRAPH 2019 Talks*, No.34 (2019).
- [3] 三浦雅人：インテグラル立体テレビの研究開発, *NHK 技研 R&D*, Vol.158, pp.44–53 (2016).
- [4] Yamanouchi, T., Maki, N. and Yanaka, K.: Holographic Pyramid Using Integral Photography, *EECSS'16*, No.MHCI 109, pp.1–4 (2016).
- [5] 森田 翔, 渡辺 翔, 徳永 剛, 桑野亮一：切削と液体塗布によるレーザ熱加工用簡易アクリルレンズの作製と評価, 2015 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.711–712 (2015).
- [6] Papas, M., Houit, T., Nowrouzezahrai, D., Gross, M. and Jarosz, W.: The Magic Lens: Refractive Steganography, *ACM Trans. Graphics (TOG)*, Vol.31, No.6, pp.186:1–186:10 (2012).
- [7] Willis, K., Brockmeyer, E., Hudson, S. and Poupyrev, I.: Printed optics: 3D printing of embedded optical elements for interactive devices, *UIST '12*, pp.589–598 (2012).
- [8] Tsukada, K., Sugiyama, K. and Oki, M.: Lens Shaping Method and Applications Using UV Printer, *Journal of Information Processing*, Vol.30, pp.97–106 (2022).
- [9] 北村喜文, 小西孝重, 山本澄彦, 岸野文郎：多数数共有型立体ディスプレイ IllusionHole, *映像情報メディア学会誌*, Vol.57, No.10, pp.1320–1327 (2003).
- [10] Harrison, C. and Hudson, S.E.: A new angle on cheap LCDs: making positive use of optical distortion, *UIST '11: Proc. 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, p.537–540 (2011).
- [11] Sakurai, K., Dobashi, Y., Iwasaki, K. and Nishita, T.: Fabricating reflectors for displaying multiple images, *ACM Trans. Graph.*, Vol.37, No.4, pp.158:1–158:10 (2018).
- [12] Zeng, J., Deng, H., Zhu, Y., Wessely, M., Kilian, A. and Mueller, S.: Lenticular Objects: 3D Printed Objects with Lenticular Lens Surfaces That Can Change their Appearance Depending on the Viewpoint, *UIST '21: The 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, p.1184–1196 (2021).
- [13] 藤木 淳：みやざきアートセンター開催の個展についての報告「不可思議の体験展藤木淳個展」, *幌市立大学研究論文集*, Vol.12, No.1, pp.17–28 (2018).
- [14] ローランドディー・ジー・株式会社：ECO-UV, EUV-GL Ver2 安全データシート (2021).

島元 諒



1998 年生。2021 年公立はこだて未来大学システム情報科学部情報アーキテクチャ学科卒業。同年同大学大学院システム情報科学研究科入学。

塚田 浩二



1977 年生。2005 年慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科博士課程修了。博士（政策・メディア）。産業技術総合研究所、お茶の水女子大学、科学技術振興機構さきがけ研究員を経て、2013 年より公立はこだて未来大学情報アーキテクチャ学科准教授。日用品インタフェース、マテリアルインタラクション等の研究に従事。2012 年イグノーベル賞（音響学）受賞。