

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提案

島元 諒* 塚田 浩二*

概要. レンチキュラは、ユーザの視点によって絵柄が変化するポスター等の印刷物に広く利用され、裸眼立体視表現などディスプレイへの応用も進められている。一方、一次元方向でしか画像を切り替えることができず、レンズを印刷物等に精密に張り合わせる必要があり、個人のモノづくりではあまり利用されてこなかった。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。本手法では、レンズアレイの直径／厚み／サイズなどをカスタマイズして出力し、独自のパターン設計ツールと組み合わせて、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。本稿では、設計ツールの実装や応用例の構築、視認性の基礎評価について述べる。

1 はじめに

レンチキュラレンズとは、かまぼこ型の凸レンズが連なったシート状のレンズである。これを複数画像を交互に分割して配置した合成画像の上に重ねることで、見る角度によって画像が切り替わって見える。この仕組みは一般にレンチキュラと呼ばれ、傾けるとアニメーションするカードや、ユーザの視点によって絵柄が変化するポスター等の印刷物に広く利用されている。さらに、裸眼立体視表現などディスプレイへ応用する研究も行われている[1]。一方、従来のレンチキュラでは一次元方向でしか画像を切り替えることができず、一般のユーザが扱うためにはレンズを印刷物等に精密に張り合わせる必要があり、敷居が高い問題があった。よって、3D プリンタやレーザーカッターのように個人レベルのモノづくりではあまり利用されてこなかった。

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(図1左)。さらに、小型マイコン／スマートフォン／タブレット等の多様なサイズのディスプレイに適応したり(図1右)、レンズの焦点距離を変えることで視認性を調整することもできる。

本稿では、本研究の先行研究を紹介した後、二次元レンチキュラの基本的なアイデアとコンセプト、実装について説明する。さらに、応用例や視認性の基礎的な検証結果を紹介し、制約や将来性について議論する。

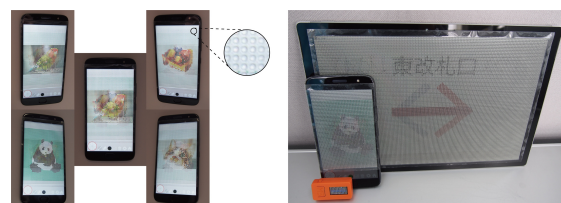


図1. 本研究の概要。二次元レンチキュラを用いて視点に応じて画像が変化する情報提示を行う(左)。レンズアレイは多様なサイズ／厚み等にカスタマイズして造形できる(右)。

2 関連研究

本章では、本研究の関連研究について「デジタル工作機器を用いた光学素子造形手法」、「多視点情報提示手法」の2点から紹介する。

2.1 デジタル工作機器を用いた光学素子造形手法

CNC フライスや光造形 3D プリンタ等のデジタル工作機械を用いてレンズを造形する研究について紹介する。森田ら[2]は、レーザー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することでレンズを制作した。また、The Magic Lens[3]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[4]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。例えば、光ファイバー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 プリンタを必要とするため個人が手軽に利用することは難しかった。

本研究の前身として、杉山ら[5]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二次元レンチキュラの制作に活用する。

2.2 多視点情報提示手法

櫻井ら[6]は、ユーザの立ち位置などに応じて、プロジェクト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。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、大掛かりな機材を必要とする。本研究では多様なサイズのディスプレイ等に合わせたレンズアレイを造形して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。

Sakurai ら[7]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。

藤木[8]は、フルカラー 3D プリンタを用いて、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。本研究では、カスタマイズ可能なレンズアレイを用いて、こうした表現手法を多様なディスプレイや素材に適用することができる。

3 提案

本章では、二次元レンチキュラの基本的なアイデアについて紹介したのち、提案手法のコンセプトを述べる。

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。

二次元レンチキュラは、半球状の凸レンズを隙間なく並べた二次元レンズアレイと、各レンズの下に配置された円状の画像パターンから構成される（図

2）。この画像はスマートフォンなどのディスプレイ上で表示したり、UV プリンタでレンズアレイと一緒に（あるいは別々に）印刷することができる。例えば、図 2 はレンズアレイと色環状の画像パターンを別々に 1mm 厚／同形のアクリル板上に印刷した例である。ここで、レンズアレイを画像パターンの上に重ねることで、視点に応じて色環上の異なる箇所が拡大されるため、二次元的に色が変化して見える（図 3）。

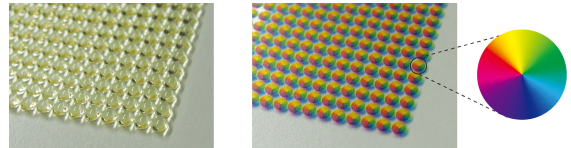


図 2. 二次元レンズアレイ(左). 各レンズの下に配置された円状の画像パターン(右).

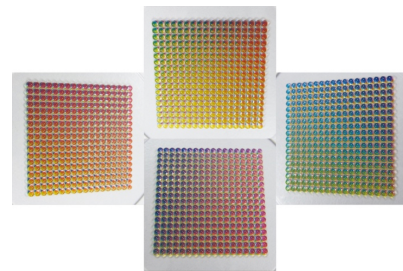


図 3. 二次元レンチキュラの例. 角度によって二次元的に色が変化する。

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

一点目は、UV プリンタ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整したり、直径を変えることで解像度を用途に応じて変更できる。

二点目は、画像パターンの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。

三点目について、紙やアクリルなど様々な素材に印刷できる UV プリンタの特性を生かして、多様な活用事例を提案することである。例えば、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シート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 プリンタで亚克力板等に（レンズアレイと共に）印刷することで、アナログな二次元レンチキュラとして活用することもできる。

3.3 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。円の分割方式を調整することで異なる情報提示に活用できる可能性があるが、本論文では単純に円を最大八分割した扇形毎に、任意の画像を割り当てる方式を採用する。例えば、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）を四分割した扇形の 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。

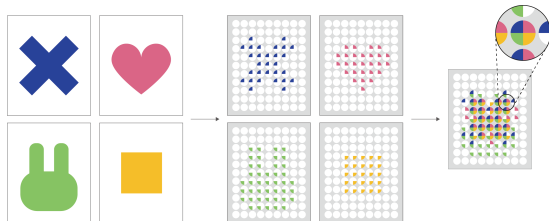


図 4. 提示する画像(左)、各画像を扇形に割り当てた画像(中央)、4 種類の画像を合成したパターン(右)

4 実装

本章では、提案システムの主要な構成要素として、レンズアレイとパターン設計ツールの実装について述べる。

4.1 レンズアレイ

レンズアレイは、先行研究[5]のレンズ設計ツールと Adobe Illustrator を活用して、UV プリンタで印刷する。UV プリンタは、Roland DG 社の VersaUV LEF-12i(以下、VersaUV)を利用した。先行研究では基本的に 1mm~2mm 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張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、タッチパネル機能を殺さないために、A4 サイズで 0.08mm 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などで 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上でも、直径 3mm を超えるような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。ガラスタイプの保護フィルム (Moto G5 Plus ガラスフィルム/Ferlinso 社、厚み 0.4mm) への造形も試したが、表面加工の問題かレンズが剥がれやすい傾向があったため、今後適切な素材を引き続き探していきたい。

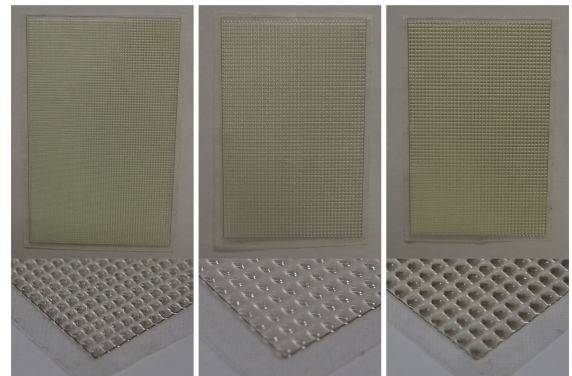


図 5. それぞれ画面保護フィルム上に印刷したレンズアレイの一例。左から、直径 1mm/厚さ 0.5mm、直径 1.5mm/厚さ 0.35mm、直径 1.5mm/厚さ 0.75mm

4.2 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でもタッチパネル操作はできるが、視認性が落ちるため、パターン描画部のみにレンズアレイを張り付けることとした。パターン描画部では、前述したように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（図 7）。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できる。また、円の分割数は4分割／8分割に変更できるようにした。

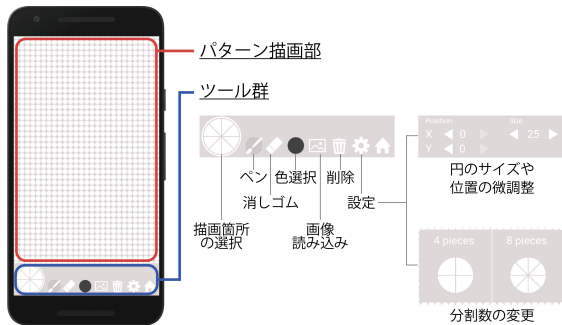


図 6. パターン設計ツールの画面構成



図 7. パターン設計ツールの利用例

4.3 応用例

ここでは、提案手法を活用した応用例について示す。まず、行先案内板について紹介する（図 8）。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 8 左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フィルムを張り付け、パターン描画ツールを用いて実現している。このようにしてデザインや視認性を

確認したうえで、同サイズの亚克力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、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（図 8 右）。

次に、机上に設置した多視点ディスプレイの事例を紹介する（図 9）。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 9 の事例は、スマートフォン（Moto G5 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。これに加えて、進行状況等を切り替えて提示すれば、一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。

さらに、提案手法を小型マイコン M5StickC に適用した例を示す（図 10）。M5StickC のディスプレイは 0.96 インチ（解像度: 80×160）と非常に小型であるが、保護フィルム上に造形したレンズアレイを張り付けて画像パターンを提示することで、スマートフォン等と同様に角度に応じて異なる画像を視認できることを確認した（図 10 左）。なお、パターンの描画は M5StickC 上で実装した独自のプログラムで行っている。さらに、搭載するバックライトが明るいためか、レンズアレイを取り付けることでディスプレイの見かけ上の輝度が向上し、視認性が上がるように感じられた（図 10 右）。このように、ディスプレイの解像度は下がるものの、遠距離からの視認性が向上した LED マトリクス（電光掲示板）のように扱える可能性もあると考える。



図 8. 行先案内板. Surface4 で表示したもの（左）と亚克力板に印刷したもの（右）

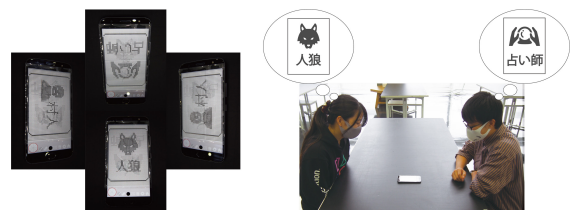


図 9. 机上に設置した多視点ディスプレイ. プレイヤーの位置に応じた役職を提示（左）、人狼をプレイする様子（右）

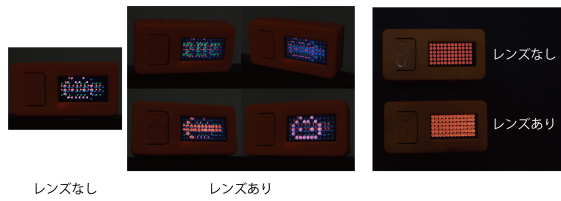


図 10. M5StickC に適用した例. 角度を変えることで絵柄が変化する様子 (左), レンズの有無による輝度の比較 (右)

5 議論

本章では, レンズアレイの厚みによる視認性調査やレンズアレイの造形上の制約について述べる.

5.1 レンズの厚みによる視認性の調査

レンズの厚み (≒焦点距離) による画像パターンの視認性の変化等を調査するため, 直径 1.5 mm / 厚さ 0.35mm, 0.50mm, 0.75mm の 3 種類のレンズアレイを 4 章で紹介した保護フィルム (厚さ 0.08mm) 上に造形した. なお, レンズアレイ全体のサイズはスマートフォン (Moto G5 Plus / Motorola 社) に合わせて, 103.5 mm × 67.8mm とした. 画像パターンは, 図 11 に示すように 4 色の市松模様とした. 色付きの各ピクセルは赤, 青, 緑, 黒の 4 色で 90 度ずつ扇形に塗りつぶされている. 変更するパラメータは, レンズアレイの厚みに加えて, ディスプレイの回転角度 (-60°~60°), ディスプレイの向き (縦方向 / 横方向), 視点との距離 (視距離, 20cm, 30cm, 60cm) とした. 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張り付けて位置ずれがないことを確認した上で, 三脚にスマートフォンを固定し, 15 度ずつ回転させてデジタルカメラで撮影した. さらに, 視距離, レンズアレイの厚み, ディスプレイの向きを変えて繰り返し撮影した¹.

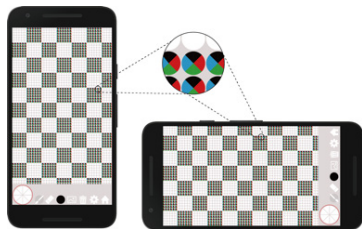


図 11. 実験用の画像パターンと縦画面 / 横画面の表示例.

次に, 調査結果について述べる. ディスプレイの向きが縦方向の結果を図 12 に, 横方向の結果を図 13 に示す. なお, 視距離による差はあまり確認できなかったため, これらの図では 30 cm の例のみを抜

粋した. また, ディスプレイの回転角度については, 60 度はパターンが目視できなかったため除外した.

まず, 図 12 / 13 の全体的な傾向として, -30 度 ~ -15 度の範囲では赤色, 15 度 ~ 30 度の範囲で青の市松模様が表示されており, 視点に応じた画像の変化が確認できる. 特に 15 度の角度では, レンズの厚みに関わらずくっきりした色が確認できる.

次に, レンズの厚さの違いに着目すると, 図 12 の -30 度 / 30 度の時に厚さ 0.35mm では全体的に赤色 / 青色がくっきり見えているのに対し, 厚さ 0.75mm ではほぼ視認できなくなっている. 同様に, 図 13 の -30 度に着目すると, 厚さ 0.35mm では全体が赤色に見えるのに対し, 厚さ 0.75mm では左端は赤みがかったが, 右側はほぼ色が視認できない. 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.

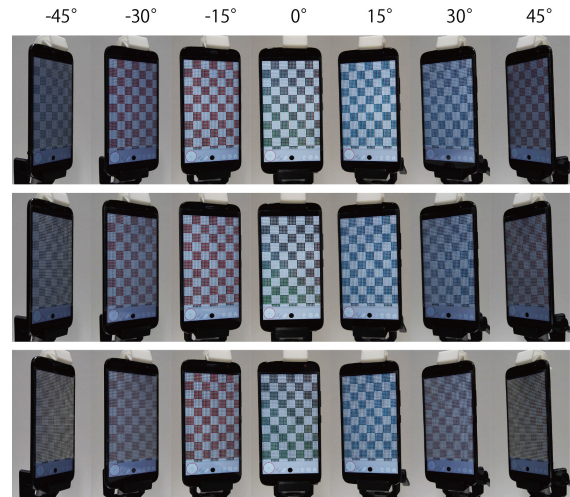


図 12. レンズの厚さによる視認性の変化 (1) : ディスプレイ縦向き / 視距離 30cm で, 厚さは上から 0.35mm, 0.50mm, 0.75mm.

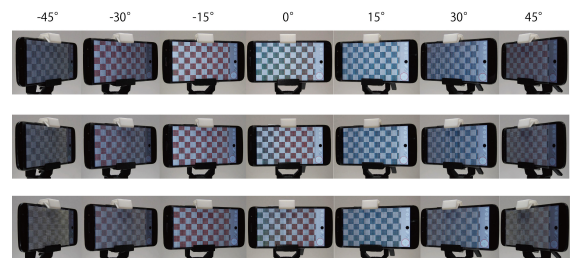


図 13. レンズの厚さによる視認性の変化 (2) : ディスプレイ横向き / 視距離 30cm で, 厚さは上から 0.35mm, 0.50mm, 0.75mm.

最後に, 視距離については前述のように差があまり確認できなかったが, レンズの厚みが 0.75mm / 横方向の例を参考として紹介する (図 14). -30 度の角度において, 20cm の距離では左端が赤みがかったが, 60cm の距離では全体的に色が非常に薄

¹ ディスプレイの向きを変える際, 緑と黒の市松模様が写真では視認しにくかったため, 図 11 のように, 市松模様も 90 度回転させることにした.

く、ほぼ視認できなくなっている。これ以外の条件では今回は差が確認できなかったが、ディスプレイのサイズが大きくなり、距離が離れていくと、同じレンズでも視野角が若干狭まる可能性がある。

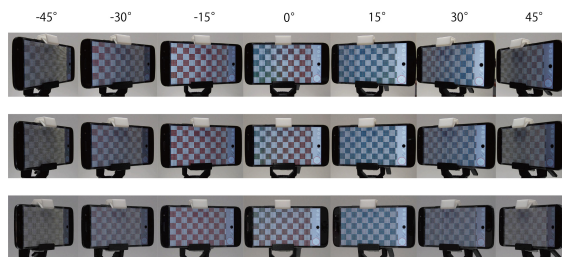


図 14. 視距離による視認性の変化：ディスプレイ横向き／厚さ 0.75mm で、視距離は上から 20cm, 30cm, 60cm.

5.2 提案手法の制約

ここでは、提案手法の制約として、印刷サイズ／レンズの正面からの視認性について述べる。

まず、印刷サイズについては、VersaUV で印刷可能な最大範囲が 305mm, 奥行 280mm であるため、この大きさを越えるレンズアレイは直接印刷できず、複数枚に分割する必要がある。なお、サイズが大きいほど印刷時間も増加するものの、今回制作したタブレット用のレンズアレイ（厚さ 0.50mm, 173.2mm×260mm）／スマートフォン用のレンズアレイ（厚さ 0.50mm, 67.8mm×103.5mm）の印刷時間はそれぞれ約 97 分／45 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みの異なるレンズアレイ（0.35mm／0.50mm／0.75mm）の造形時間はそれぞれ約 35 分／45 分／58 分となり、厚みが約 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みの影響が大きいと、特に視野角を狭くしたいという意図がなければ、薄いレンズを選択したほうがよいと思われる。

最後に、現在の画像パターンでは、レンズの正面

から見た際に、全てのパターンが混ざって見えてしまう。この問題は、パターンの中央部のみを背景色や別の画像で塗りつぶすことで解決できると考える。さらに、画像パターンの分割方法を工夫することで表現の可能性を広げていきたい。

6 まとめと今後の展望

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。本稿では、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。さらに、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。

今後は、より多様な応用例の構築や、解像度や視認性の向上に取り組み、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] 山田 千彦, 磯野 春雄, “背面投射方式大画面 3D ディスプレイ用両面对称型レンチキュラスクリーンの一設計法”, 電気学会論文誌, 125, 3, (2005), p.420.
- [2] 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.
- [3] Marios, P., Thomas, H., Derek, N., Markus, G., and Wojciech, J. The Magic Lens: Refractive Steganography, ACM Transactions on Graphics (TOG), Vol31, No.6, pp.186:1-186:10, 2012.
- [4] Karl, W., Eric, B., Scott, H., and Ivan, P. Printed optics: 3D printing of embedded optical elements for interactive devices, In Proceedings of UIST' 12, pp.589 – 598, 2012.
- [5] 杉山 圭, 塚田 浩二, UV プリンタを用いたレンズ造形手法とその応用, WISS2019 論文集, pp. 25-30, Sep, 2019.
- [6] 櫻井 智史, 北村 喜文, スリラムサブマニアン, 岸野文郎: 回転偏光フィルタにより情報の可視性を制御するテーブルトップ型ディスプレイ; 情報処理学会論文誌, Vol. 50, No. 1, pp. 332-343, 2009.
- [7] Kaisei Sakurai, Yoshinori Dobashi, Kei Iwasaki, and Tomoyuki Nishita. 2018. Fabricating reflectors for displaying multiple images. ACM Trans. Graph. vol. 37, No. 4, pp. 158:1-158:10, Jul. 2018.
- [8] 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 —「不思議の体験展藤木淳個展」—, 札幌市立大学研究論文集, Vol. 12, No. 1, pp. 17-28, 2018.