UV プリンタを用いたレンズ造形手法とその応用

杉山 圭 *　　塚田 浩二 *

概要.　レンズは，身近なものから精密機器にまで幅広く利用されている．近年，デジタル工作機械の普及により，個人レベルでのものづくりの幅が広がっているが，デジタル工作機械のみでレンズを作ることは困難であり，一般に研磨等の個人の技量に依存する工程が必要である．そこで本研究では，FabLab などを中心に普及しつつある UV プリンタに着目し，出力後の加工が不要で汎用的なレンズを造形する手法を提案する．具体的には，UV プリンタを用いて透明インクを積層して形状を作り，その上に光沢の印刷を施すことで積層跡を埋め，なめらかな表面のレンズを造形する．また，レンズの直径／焦点距離等からレンズの形状を設計し，印刷データとして出力するツールを実装した．さらに，提案手法によって造形したレンズとその応用例，及び基礎的な性能調査について述べる．

1　はじめに

レンズは，眼鏡やカメラ，照明器具などの身近なものから，精密機器の光学系のレンズアレイにまで，光学素子として幅広く利用されている．近年，3D プリンタなどのデジタル工作機械の普及によって個人レベルで可能なものづくりの幅が広がっているが，デジタル工作機械を用いても個人レベルでレンズを作ることは困難である．例えば，3D プリンタを用いてカメラを作るプロジェクトは複数あるが，レンズについては 3D プリンタで出力した後に専用の器具を使って研磨する必要があったり，既存のカメラ用レンズを用いている．

そこで，我々は個人レベルで実現可能なレンズ造形手法として，UV プリンタに着目した．UV プリンタは，FabLab などの施設を中心に普及しつつある，紫外線硬化インクを用いたインクジェットプリンタである．多様な素材表面に印刷可能なことから，ノベルティグッズの作成等に広く利用されている．一方，透明インクを印刷することが可能であり，インクを重ねて厚みを持たせることもできる．

我々は，この透明インクを積層することで，多様なレンズを造形できると考えた．ここではまず，UV プリンタの特徴について整理する．

1.1　UV プリンタの特徴

本研究では，Roland DG 社の UV プリンタ VersaUV LEF-12i（以下，VersaUV）を用いた．VersaUV シリーズには，以下のような特徴がある．

1. アクリルや布など多様な素材に印刷できる．
2. CMYK 以外に白／透明のインクが使える．
3. インクを重ねて盛り上げる厚盛印刷ができる．
4. 透明のインクはマット／光沢の質感を選択できる．
5. 2mm 以内の凹凸のある面に印刷できる．

こうした特徴から，透明インクを積層してレンズの形状を作り（特徴 2，3），その上に透明インクを光沢仕上げで印刷し積層跡を埋めることで（特徴 4，5），なめらかな面のレンズが造形できると考えた．また，CMYK インクを組み合わせることでカラーレンズの造形も可能である（図 1）．

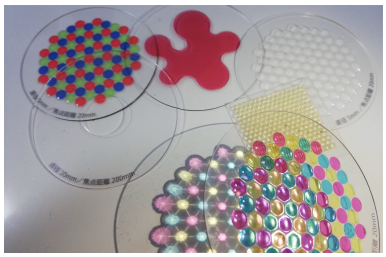

図 1．提案手法で造形したレンズの一例

2　関連研究

本章では，本研究の関連研究について，「UV 硬化樹脂を用いたレンズ造形」「デジタル工作機械を用いたレンズ造形」の 2 つの領域から紹介する．

2.1　UV 硬化樹脂を用いたレンズ造形

Chung ら [4] は，UV 硬化樹脂を用いてマイクロレンズアレイを造形する手法を提案している．独自のインクジェット印刷機を用いて UV 硬化樹脂の液滴によってレンズを造形し，液滴の量などからレンズの曲率を制御した．秋山ら [5] は，超精密切削加工で制作した金型に UV 硬化樹脂を注入し，マイクロレンズアレイを制作した．また，樹脂の硬化時に

Copyright is held by the author(s).

* 公立はこだて未来大学

加圧することで形状や表面粗さの精度が高まることを確認した．Luxexcel[6] は，独自開発した特殊な UV 硬化型 3D プリンターを用いて，研磨不要な眼鏡用レンズを製造している．

2.2 デジタル工作機械を用いたレンズ造形

森田ら [7] 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．そして，シリコンオイルを塗布していないものと比べて透過率が高まったことを確認した．3D プリンタメーカーの Formlabs[8] は，光造形 3D プリンタで出力したレンズを研磨することで表面をなめらかにし，透明度を高める手法を提案している．The magic lens[9] 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[10] 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．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る．例えば，テーブルトップインタフェース上に置かれた Phicon に組み込むことで，下面の液晶ディスプレイの映像を Phicon の正面に映し出すことができる．

2.3 本研究の特徴

本研究で提案する手法は，専用の特殊な機材を必要とせず，一般に販売されている汎用的な UV プリンタで造形可能である．また，光沢印刷で表面を滑らかにすることで出力後の研磨等の加工を不要とし，研磨が困難な形状のレンズアレイ等も造形可能である．そして，拡大鏡などにも用いられる汎用的な球面レンズを対象とし，設計ツールによって容易に直径／焦点距離等が設計可能である．また，設計ツールは Adobe illustrator 上で動作するため，CAD と比べて手軽に利用でき，CMYK 印刷と組み合わせて多様なデザインに組み込むことができると考える．

3 提案

本章では，本研究のレンズ造形のコンセプトとレンズ造形手法について述べる．

3.1 レンズ造形のコンセプト

本研究のコンセプトは以下の 3 点である．

(1) 多様な形状／大きさのレンズの造形

(2) 出力後の加工が不要な造形

(3) 汎用的な設計ツールの提供

一点目については，レンズの直径／厚さ／焦点距離などを自由に設計可能とする．さらに，複数のレンズを並べる等，柔軟なレイアウトを許容する．

二点目については，UV プリンタの光沢仕上げ印刷を用いることでレンズ表面をなめらかにし，出力後の研磨等の加工を不要とする．そのため，同一面上に複数のレンズを並べたような，研磨が困難な形状のレンズも造形可能である．また，個人の研磨技術等に依存しないため，汎用性が高いといった特徴がある．

三点目については，レンズの直径／厚さ／焦点距離等のパラメータから容易にレンズを設計でき，提案手法で印刷するためのデータとして出力可能なツールを実装する．

3.2 レンズ造形手法

ここでは，本研究でレンズを造形する手順について説明する．本研究では，レンズ形状の計算の容易さと用途の汎用性を考慮して，球面平凸レンズと球面平凹レンズを対象とする．なお，UV プリンタは一般的に板材等の上に出力を行うため，薄手の透明アクリル板（例: 1mm）の上にレンズを造形する．また，アクリル板の両面にレンズを造形することで，両凸レンズや両凹レンズ，片側が凸でもう一方が凹のメニスカスレンズへの応用が考えられる（図 2）．なお，両面への造形方法については 4.2 節で述べる．

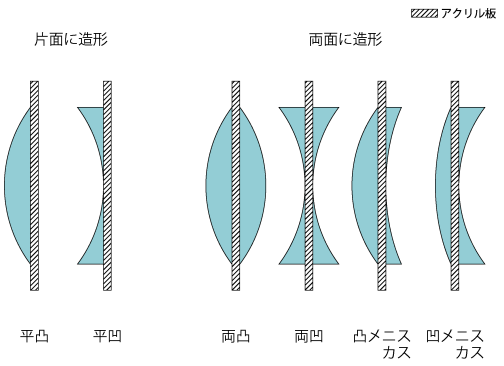

図 2. 提案手法で造形可能なレンズの種類

まず，レンズの形状を定める．球面レンズの形状は，レンズの直径と曲率半径によって定まる（図 3）．曲率半径 r は，片面が平面の球面レンズの焦点距離の近似式（式 (1)）を用いて，レンズの焦点距離 f と，レンズ材質の屈折率 n から求められる．なお，UV プリンタの透明インクの屈折率 n 自体は公開されていないが，一般的なアクリルや UV レジン等の透明樹脂素材に倣って，1.5 と仮定する．

$$f = \frac{r}{n-1} \tag{1}$$

また，照明の拡散等，精密に焦点距離や屈折率を定める必要がない用途の場合，直径と厚さからも曲

率半径が一意に定まる（図 3），よって，レンズの直径／焦点距離／材質の屈折率の 3 つ，もしくはレンズの直径／厚さの 2 つのパラメータによって，レンズ形状が定まる．

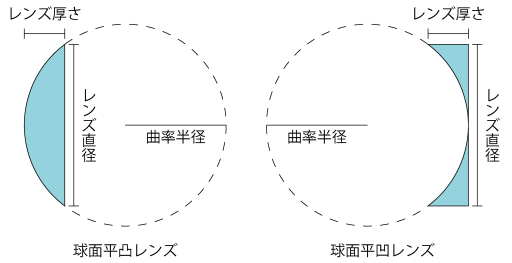

図 3. 球面レンズの形状設計

次に，レンズの形状から積層する層の形状を求める．1 層の厚さを印刷 1 回でのインクの厚さ（VersaUV においては約 0.035mm）とし，図 4 のように，レンズの断面の形状に沿って層に分割する．各層の形状は，凸レンズの場合は上の層ほど直径が小さい円形となり，凹レンズの場合は外径はすべて等しく，上の層ほど内径が大きくなるドーナツ形となる．

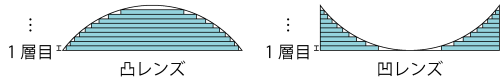

図 4. 積層した断面の形状

次に，この層を下から透明インクで繰り返し印刷することで，レンズの形状を造形する．前述したように透明インクの印刷設定には光沢仕上げとマット仕上げがあるが，この過程では印刷の精度が高いマット仕上げを利用する．

レンズ形状はここで完成するが，この時点では積層跡が目立つ問題がある（図 5 左）．そこで，最後にレンズ全体に透明インクを光沢仕上げで印刷し，積層跡を埋めることで表面をなめらかなレンズとする．その際，1 回では積層跡が十分に埋まらないため，2 回繰り返すこととした（図 5 右）．

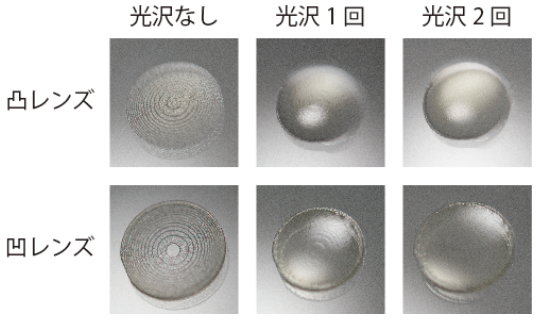

図 5. 光沢仕上げ印刷の回数によるレンズ表面の変化

4 実装

本章では，印刷データ制作ツールの実装と，提案手法を用いて制作したレンズの造形例を示す．

4.1 印刷データ制作ツール

ここでは，提案手法によるレンズ造形のための印刷データを制作するツールの実装について述べる．本研究で利用する UV プリンター（VersaUV）の印刷データ制作には Adobe Illustlator が推奨されているため，Adobe Illustrator のスクリプトを用いて実装した．本ツールは「レンズ設計スクリプト」「データ出力スクリプト」の 2 つで構成される．

まず，レンズ設計スクリプトで，造形したいレンズのパラメータを入力する（図 6 左）．UI で入力できるパラメータは，大きく分けて設計したいレンズに関係する「レンズの設定」と，プリンタやインクに関係する「プリンタの設定」の 2 種類がある．「レンズの設定」では，(1) レンズの種類（凸／凹），(2) レンズの直径，(3) レンズの焦点距離または厚さ が入力でき，「プリンタの設定」では，(4) 印刷 1 回でのインクの厚さ，(5) 印刷可能な厚さ，(6) インクの屈折率 が入力できる．なお，「プリンタの設定」のパラメータは変更することが少ないため，概ね規定値のままで利用できる．

これらのパラメータを入力すると，3.2 節で述べた方法で各層の形状が求められ，層ごとに個別のレイヤーに描画される（図 6 右）．レンズ設計スクリプトの動作はこれで終了する．また，描画された形状を複製したり，再度スクリプトを実行して他のパラメータのレンズを描画することで，複数のレンズを並べて配置することも可能である．なお，レンズの配置は現時点では手動で行う．illustorator 自体が優れたレイアウト機能を持つため，配置は容易であるが，今後はレイアウト用のスクリプトの実装も検討している．

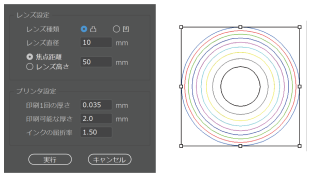

図 6. ツールのパラメータ入力画面と出力結果，各色はレイヤーの色を示す．

配置を終えたらデータ出力スクリプトを実行することで，レイヤーごとに個別の EPS 形式のファイルとして書き出され，各層の印刷データが出来上がる．このデータ群を UV プリンタの出力用ソフトウェアで読み込み，アクリル板等に下のレイヤーから順に印刷することでレンズを造形できる．

4.2 両面へのレンズ造形

両凸レンズや両凹レンズ，メニスカスレンズを造形する場合，アクリル板の両面にレンズを造形する必要がある．しかし，板の片面にレンズを造形したのちに裏返し，両面のレンズの位置が揃うように印刷テーブルに設置する必要があり，手動で位置を合わせるのは困難である．また，片面に凸レンズを造形した板を裏返す場合，水平に設置することはできない．そこで，次のような手順を用いて板の両面にレンズを造形する．まず，片面にレンズを造形する（図 7（1））．その際，レンズの周囲数か所に，レンズと同じ厚さの位置合わせ用の凸型も造形する．凸型はレンズ設計スクリプトを用いて，レンズと同じデータ上に，直径の小さな凸レンズを配置する．次に，レンズを造形した板を一度取り除き，印刷テーブルをマスキングテープ等で保護し，その上に位置合わせ用の凹型を造形する（図 7（2））．凹型もスクリプトを用いて，凸型と同じ直径，半分ほどの厚さの凹レンズを配置する．そして，板を裏返して凸型と凹型が合うように印刷テーブルに設置し，その上にレンズを造形する（図 7（3））．これにより手動で位置合わせを行う必要がなく，凸型が足となって裏返した際に水平に置くことが可能となり，板の両面へのレンズの造形が可能である．両凸レンズの造形例を図 8 に示す．

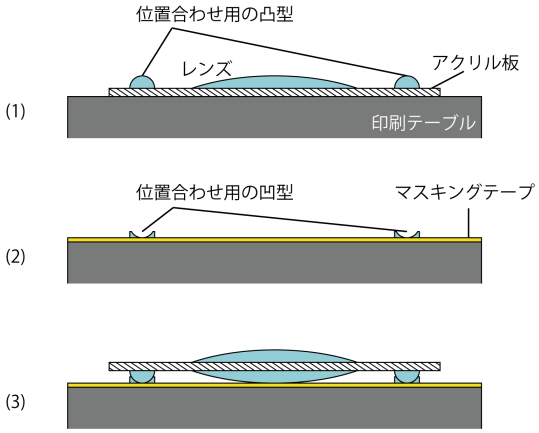

図 7. 板の両面へのレンズ造形の手順

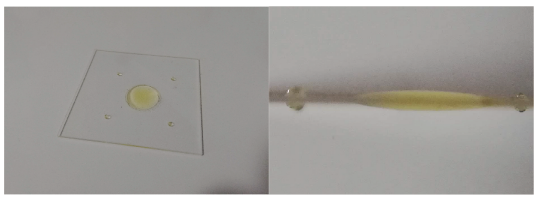

図 8. 両凸レンズの造形例とその断面
（直径 10mm，厚さ片面約 0.5mm）

4.3 レンズ造形例

提案手法を用いたレンズの基礎的な造形例について述べる．なお，応用的な事例は次章「応用例」にて紹介する．

本研究で提案する手法は，出力後の加工が不要であるため，研磨等が必要な手法では困難な，複眼のような複数のレンズが並んだものも制作できる（図 9 左）．

UV プリンタは CMYK インクも扱えるため，色がついたレンズも制作することができる（図 9 右）．これを応用することで，照明の色を変えたり，カラーフィルタをかけたような写真の撮影に利用できると考えられる．

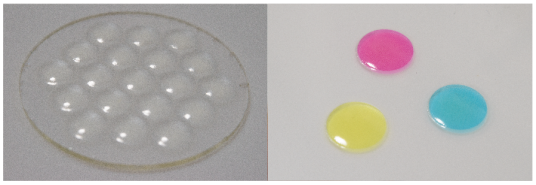

図 9. 複眼状の凸レンズとカラーレンズ

4.4 応用例

本研究の応用例として，簡易 VR ゴーグルの凸レンズを試作した（図 10）．提案手法は任意の直径／焦点距離等のレンズを比較的短時間（直径 2mm，厚さ 1mm で約 1 時間半）で造形可能なことから，試作を繰り返しやすく，視野の調整やバリエーションの増加等に向いている．

次に，超小型（レンズ部の直径 5mm）のミニチュア虫眼鏡を制作した．図 11 に示すように，小型ながら拡大鏡や集光レンズとして機能する．ここでは，1mm のアクリル板の上にレンズと周辺の黒い縁取りを同時に印刷している．このように，小型で一定の機能／デザイン性を備えたレンズを制作することができる．

また，板の両面へのレンズ造形によって，球状のレンズが並んだような形状（図 12 下）を作ることで，再帰性反射の性質をもつ反射板への応用が考えられる（図 12 上）．レンズを自由に配置でき，色を付けることもできるため，反射板は自由なデザインで作ることが可能である（図 13 左）．また，反射板の一部を片面のみの造形とすることで，その部分は再帰性反射の性質を持たず，光を当てたときに両面造形部分の絵柄が浮かび上がるといった応用も考えられる（図 13 中央，右）．

さらに，印刷データ作成ツールで出力したデータを手動で加工することで，特殊な形状のレンズへの応用も考えられる．例えば，ロゴマークなどの形状を半立体的に盛り上がらせ，その一部にレンズを組み込むような用途も考えられる（図 14）．

図 10. 提案手法で造形したレンズを用いた簡易 VR ゴーグルとレンズに写る像

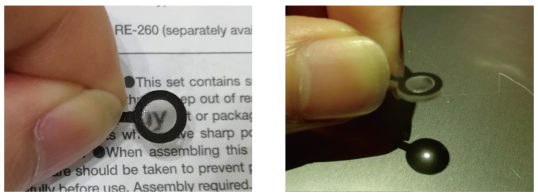

図 11. ミニチュア虫眼鏡での拡大と集光の様子

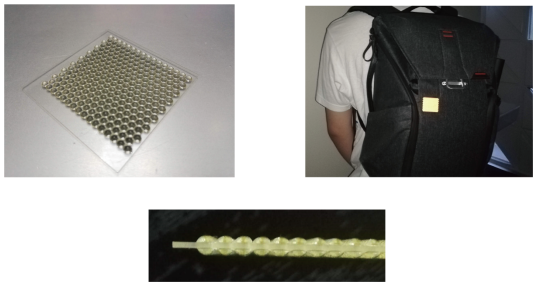

図 12. 反射板（左上）とその断面（下），鞄に取り付けて光を当てた様子（右上）

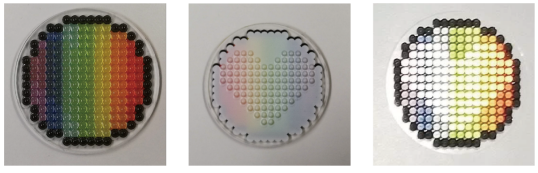

図 13. 自由にデザインした反射板（左）．一部を片面のみの造形（中央）とすることで，光を当てた際に両面造形部分が浮かび上がる（右）．

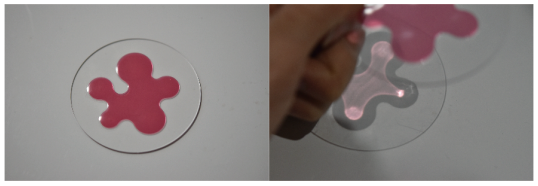

図 14. はこだて未来大学のロゴマークに組み込んだレンズと光を通した様子

5 議論

本章では，造形したレンズに見られた性質や精度，造形可能なレンズの制約について述べる．

5.1 造形可能サイズの調査

レンズの直径／厚さによる性質等を調査するために，球面平凸レンズを直径 5，10，20，30，40mm，厚さ各 0.5，1.0，1.5，2.0mm の計 20 種類制作した（図 15 左）．積層回数は厚さ 0.5mm から順に，14 回，28 回，42 回，57 回であった．一部のレンズには印刷中のゴミの混入が見られ，特に直径 30mm 以上のレンズに多く見られた（図 15 右）．全体的に少し黄ばみが生じており，分厚くなるレンズ中央部に向けて黄ばみの度合が強くなっていた．また，厚いレンズほど黄ばみの度合が強かった．黄ばみについては，今回多数のレンズを一度に出力したことが一因であると考えられるため，5.3 節で述べる．レンズに映る像の形状をわかりやすくするために，格子状の線をレンズを通して見た様子の一例を図 16 に示す．格子の間隔は 3mm で，レンズとの距離は 20mm である．

図 15. 20 種類の球面平凸レンズとごみの混入

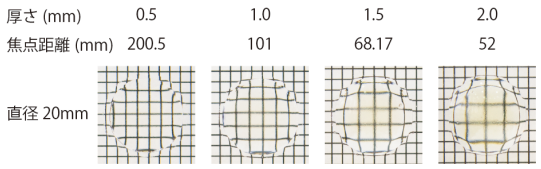

図 16. 直径 20mm の凸レンズを通して見える像．焦点距離が短い程倍率が大きくなる．

5.2 焦点距離の精度調査

レンズの精度の簡易的な調査として，提案手法で造形した凸レンズの焦点距離を測定した．疑似的な

平行光源として約 20m 離れた天井の電球を光源とし，レンズを経由して机上のスクリーンに光を投影した．ここで，各レンズを通した光が最も小さく収束した際（図 17 右）のレンズ-スクリーン間の距離を計測した（図 17 左）．レンズの直径／厚さごとの，レンズ形状から計算した焦点距離の理論値と，実測値の誤差を表 1 に示す．

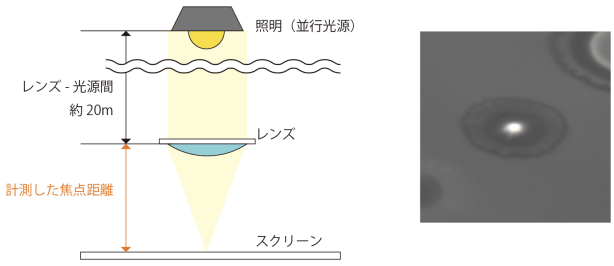

図 17. 実験の模式図

表 1. レンズの直径／厚さごとの焦点距離の理論値に対する実測値の誤差

厚さ＼直径 (mm)	5	10	20	30	40
0.5	0.00%	2.97%	2.74%	2.11%	-4.43%
1.0	-17.24%	-3.85%	-2.97%	7.08%	14.21%
1.5	-11.82%	-11.94%	2.68%	-0.33%	-2.30%
2.0	-22.03%	-17.24%	3.85%	-2.18%	-1.49%

全体的な傾向として，厚さは小さいほど，直径は大きいほど誤差が小さい傾向にあった．例えば，厚さが 0.5mm のレンズでは，全ての直径においても誤差は 5%未満であった．また，直径が 20mm 以上のレンズにおいても，厚さ 1mm のものを除けば，誤差は 5%未満であった．一方，厚さが大きい／直径が小さい例では誤差が大きくなり，最大で 22%の誤差を確認した（厚さ 2mm ／直径 5mm の時）．

5.3 造形可能なレンズの制約

本研究で提案したレンズ造形手法の課題として，まず，レンズの厚さの制約がある．本研究で利用する VersaUV の印刷可能な高低差は 2mm までであるため，レンズの厚さが 2mm を超える場合，積層跡を埋めるための光沢仕上げ印刷ができない．レンズの直径は厚さと焦点距離で規定されるため，この厚さの制限からレンズの最大直径が制約される．具体的には，焦点距離 10mm の時は最大直径 8mm，焦点距離 50mm の時は最大直径 19.6mm，焦点距離 100mm の時は最大直径 28mm となる．

そして，レンズの黄ばみの問題がある．印刷の際の紫外線照射が多い，つまり積層の回数が多いほど，インクが黄ばむ傾向がある（図 15）．これは UV プリンタで扱うインクの性質によるものであり，完全な改善は難しいと考えるが，積層回数が少なければ問題は少ないため，今後詳細な調査と対策の検討を進める．なお，図 15 では積層回数が少ないレンズにもやや黄ばみが生じているが，これは積層回数が多いレンズと同時に印刷したことにより，多くの紫外線を浴びたためだと考える．

6 まとめと今後の展望

本研究では，UV プリンタを用いて透明インクを積層することで球面レンズを造形する手法を提案し，印刷データ制作ツールを実装した．

今後は，印刷データ制作ツールの機能の充実と応用例の多様化，及び評価実験を通したツールの効果の検証を目指す．

参考文献

[1] SLO: 3D Printed Camera, https://amosdudley.com/weblog/SLO-Camera.

[2] 3D Printed Camera : OpenReflex, https://www.instructables.com/id/3D-Printed-Camera-OpenReflex/.

[3] VersaUV LEF-12i 概要, https://www.rolanddg.co.jp/products/printers/versauv-lef-12i-flatbed-printer/.

[4] Chung-Hao, T., Chien-Hsiang, H., and Tsung-Han, Y. : Microlens Arrays by Direct-Writing Inkjet Print for LCD Backlighting Applications, *Italic Journal of display technology*, Vol.5, No.5(2009), pp.147-151.

[5] 秋山 裕亮，岡田 睦，鈴木 浩文，難波 義治, 三村 健，古南 典正 : UV 成形によるマイクロレンズアレイの精密成形, 2016 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 2016, pp.15-16.

[6] Technology - Luxexcel — 3D Printed Optics, https://www.luxexcel.com/ophthalmic-technology

[7] 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, 2015, pp.711-712.

[8] Printing Lenses on the Form 1+, https://formlabs.com/blog/lenses-3D-printed-formlabs/.

[9] Marios Papas, Thomas Houit, Derek Nowrouzezahrai, Markus Gross, Wojciech Jarosz. : The Magic Lens: Refractive Steganography, ACM Transactions on Graphics (TOG), Vol31, No.6(2012). pp.186:1-186:10.

[10] Karl Willis, Eric Brockmeyer, Scott Hudson, Ivan Poupyrev. : Printed optics: 3D printing of embedded optical elements for interactive devices, Proceedings of the 25th annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST'12), 2012, pp. 589–598.