

# OpticDesigner：多様な光学レンズ効果をカスタマイズ可能な3D プリントレンズフィルターデザインシステム

吉本 健義\* 大友 千宙\* 宮下 芳明\*

**概要.** 写真家や映像制作者をはじめとする多くの撮影者は、それぞれ理想の表現を持っている。こうした表現を実現する手段は、カメラ内効果による撮影前処理とソフトウェア編集による撮影後処理に大別される。しかし、後処理では完全な再現が困難な効果もあり、多くの場合は前処理に依存する。だが、カメラ内の光学レンズ効果を構成するレンズやフィルターは個人ユーザが独自に調整することが難しい。本稿では、ユーザが自身の求める効果に応じて形状をカスタマイズできるレンズフィルターデザインシステム OpticDesigner を提案し、複数の光学レンズ効果の統合や強度、適用範囲の制御を可能にした。作製には光造形方式 3D プリンタを使用し、スピコーティング法による後処理を加えることで、撮影用レンズフィルターとして利用可能な水準の透明度を実現した。さらに、写真・映像制作経験者を対象としたワークショップを実施し、ユーザの意図に応じてデザインされた光学レンズ効果の有効性とデザインの多様性を示した。

## 1 はじめに

撮影者にはそれぞれが求める理想の表現があり、写真や映像を構成する構図、露出等には全て撮影者の意図が存在する。写真・映像制作において、撮影者が求める表現を実現する手段は、カメラ内効果による撮影前処理とソフトウェア編集による撮影後処理に大別される。後処理でのみ可能な表現として、時間軸の編集による動きの変化や、撮影時には存在しない対象の追加などがある。しかし、収差やボケをはじめとする光学的なアーティファクトに由来する効果は完全な再現が困難である。これらは、レンズやフィルターなどを用いた撮影前処理だからこそ表現できる要素である。そのため、個別のニーズを満たすカメラ内効果を得るためには、撮影時に光学レンズ部品を調整する必要がある。近年の映像制作では、撮影者が求める最適な表現を生み出すため、その場面に適したレンズの設計・作製が行われている [6]。映画「Oppenheimer」では、理想の表現や光学性能を得るため、複数回の試作・撮影・改良を経てカスタムレンズを開発している。しかし、光学レンズの作製には精密な形状加工が求められ、それに要する時間や設備を伴うため製造コストは高い。そのため、個人がカスタムレンズ制作において試行錯誤を重ねることは難しい。多くの場合は工業的に生産された量産品を使用せざるを得ず、ユーザが扱える表現の幅や制御可能な領域が制限されてきた。

そこで、本稿では個人ユーザが光学レンズ効果の設計・作製を可能とすることを目的に、3D プリントを用いたレンズフィルターデザインシステム OpticDesigner を提案する。OpticDesigner は、レ



図 1. (A) OpticDesigner のインターフェース画面。  
(B) 設計・作製されたレンズフィルター。

ンズフィルターの形状デザインを通じて複数の光学レンズ効果を統合し、その強度や適用範囲を制御できる。また、ユーザはシミュレーションによって作製したレンズフィルターの視覚効果を確認し、その結果に基づいた調整によって、自身の求める光学レンズ効果を実現できる。これにより、表現意図に応じた光学レンズ効果を柔軟に制御することが可能となり、シーン単位で変化する多様な視覚表現を低コストで実現する。作製したレンズフィルターは既存の光学系に外部から装着可能であり、カメラ本体の光学性能を保持したまま効果を付加できる (図 1B)。レンズ部分の作製には光造形方式 3D プリンタを用い、造形物にスピコーティング法による後処理を加えた。これによって、写真や映像表現のためのレンズフィルターとして利用可能な水準の透明度を実現した。本稿では、OpticDesigner の機能を紹介し、設計・作製におけるワークフローを示す。さらに、著者らによる作例および写真・映像制作経験者を対象としたワークショップによるデザイン事例を通じて、本システムによって作製された光学レンズ効果の有効性と表現の多様性を検証する。



図 2. OpticDesigner によるワークフロー。

## 2 関連研究

### 2.1 光学レンズ効果の編集

写真・映像に対する後処理においては、Adobe Photoshop や DaVinci Resolve といったソフトウェアが用いられる。こうしたソフトウェアでは、レンズに直接光が差し込んだ際に発生するレンズフレアなどの光学的アーティファクトを意図的に付与し、その効果を調整することができる。また、本研究以外にも光学的アーティファクトを写真表現の重要な要素として扱っているものがある。例えば、Hullin らは物理的な正確さと表現の自由度を併せ持つレンズフレアのレンダリング手法を提案した [5]。また、Spencer らは光の散乱現象であるグレア効果を既存の画像に追加するアルゴリズムを提案している [8]。

だが、多くの研究では単一の光学的アーティファクトを対象としており、ユーザが求める複数の光学レンズ効果を写真や映像に付与することはできない。さらに、プリズムによる多重像やレンズ内の複雑な反射によるゴーストなどの効果は、視覚的な擬似再現は可能であるが、違和感のない完全な再現を既存の編集ソフトウェアで実現することは困難である。

### 2.2 3D プリント光学素子

3D プリント技術の発展により、積層造形を応用したフレネルレンズ [1] やアルバレスレンズ [4] をはじめとする多様な機能性をもつ光学素子の作製が注目されている [10]。特に、低価格帯の光造形方式 3D プリンタの普及とスピコーティング法による薄膜形成を用いた後処理 [9] により、光学用途にも応用可能なレンズを短時間かつ低コストで造形することが可能となった。Berglund らは、スピコーティング法により 3D プリントした平凸レンズの表面を平滑化し、射出成形プラスチックレンズと同程度の表面粗さを実現した [7]。撮像性能はガラスレンズには及ばないものの、高解像を必要としない用途では十分な性能を示した。さらに、Christopher らによる研究では同様の手法を用いることで、顕微鏡用のレンズ群を設計・作製し、明視野観察や蛍光観察用の対物レンズとして応用できることを示した [3]。一方、Chen らは、投影型マイクロ光造形技術 (Projection Micro-stereolithography) にグ

レースケール光重合とメニスカス平衡二次硬化を組み合わせ、低コストかつ高速に光学素子を造形する手法を提案した [2]。この手法により作製した非球面レンズをスマートフォンのカメラに装着することで、高解像度撮影を実証するとともに市販のカメラ装置への実装可能性を示した。

これらの研究では、3D プリント技術によって形状自由度の高い光学素子を低コストで作製している。しかし、多くの先行研究では光学素子作製の精度向上と性能評価が目的であり、光学レンズ効果のデザインによる表現支援に取り組む事例はほぼ存在しない。本研究は、ユーザ自ら光学レンズ効果をデザインできるシステムを提供する。さらに、先行研究で用いられたスピコーティング法によって、撮影用レンズフィルターとして利用可能な水準の透明度を実現した。これにより、ユーザの意図や目的に応じた光学レンズ効果のデザインを可能とし、ユーザの表現領域の拡張を促すことができる。

## 3 OpticDesigner

OpticDesigner におけるワークフローは図 2 に示すように、形状デザイン・光学レンズ効果の確認・ファブリケーション・撮影の 4 フェーズから構成される。ユーザはこれらのフェーズ内での試行錯誤によって、自身の求める表現をもたらすレンズフィルターをデザインする。OpticDesigner の対象ユーザは写真・映像を作品として仕上げた経験を有するプロ、もしくはハイアマチュアのカメラマンである。光学に関する専門的な知識は要求しないが、求める表現や意図を持ち、それらを反映させるための能力を有することを前提としている。本研究における表現や意図の範囲は、被写体及び構図、さらには構図内の特定領域に付与する効果の種類や強度とする。これらの要素を踏まえ、撮影者はそれぞれを組み合わせながら自身が求める画を構築していく。

### 3.1 デザインソフトウェア

OpticDesigner では図 1A に示すように画面左側でフィルター形状をデザインし、画面右側で光学レンズ効果を確認する。フィルター形状に関するアルゴリズムは Rhinoceros/Grasshopper で、光学レンズ効

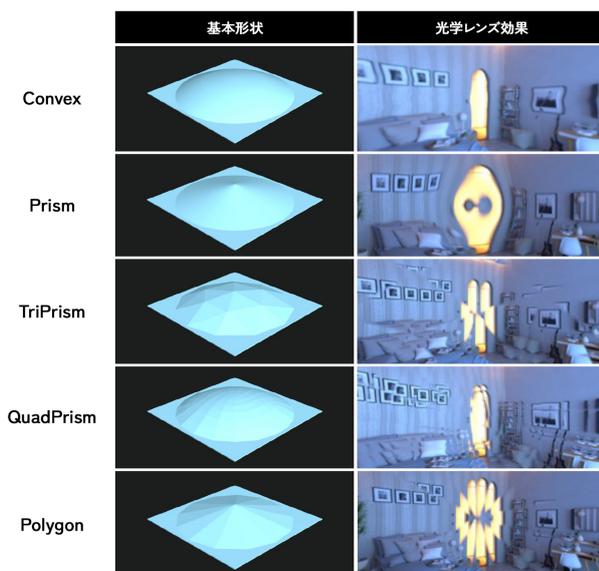


図 3. OpticDesigner による 5 種類の基本形状。ユーザはまずこの基本形状を選択し、各種パラメータを制御することで自身が求める表現をもたらすフィルターをデザインしてゆく。

果のレイトレーシングシミュレーションは V-ray for Rhino によって実装した。また、Rhinoceros/Grasshopper の使用経験がないユーザでも OpticDesigner を扱えるように、UI を JavaScript によって実装し、Web アプリケーションとしている。ユーザはスライダーやプルダウンメニューといった一般的な UI 要素の操作によって、フィルター形状をデザインする。一般に、カメラマンは形状編集を前提とする CAD ソフトウェアの操作経験を有していないことが多いが、Lightroom や Capture One 等の写真編集ソフトウェアの操作には慣れていていると考えられる。そこで本研究では、これらのソフトウェアで多く用いられるスライダー形式の UI で実装した。

OpticDesigner では図 3 に示す 5 種類の基本形状があり、これらの基本形状を各種パラメータによって制御することができる。本研究で実装した基本形状は、レンズフィルターとして市販されているものの中から、光造形方式の 3D プリントにおいて技術的に再現可能なものを選んだ。形状パラメータは、効果の強度を制御するものと効果の範囲を制御するものの 2 種類に分類される。前者には、レンズの厚みや多重像の大きさ・形状など、効果の強度や特性に直接影響を与えるものが含まれる。一方、後者には、マスク範囲の指定、穴の形状や大きさの制御、形状表面に作成する平面の大きさを調整するものなどが含まれる。さらには、フィルター裏面に溝を形成することでクロスフィルター効果を制御する機能や、任意のテキスト形状に沿って穴を作成する機能も実装しており、光造形方式 3D プリントの形状自由度を最大

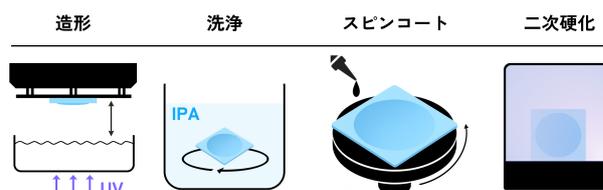


図 4. レンズフィルターのファブリケーション手順。スピンコーティング法によって 3D プリント由来の積層痕を緩和し、フィルターとして求められる光学性能を向上させている。

限に活用したデザインができる。OpticDesigner でデザイン可能な形状は全 10 万通り以上であり、ユーザは自身が求める表現のための 1 枚をデザインすることができる。また、OpticDesigner は STL 形式での保存や CSV 形式での形状パラメータの入出力に対応している。そのため、ユーザは気に入った形状を保存して次の形状をデザインすることや実際の撮影後にさらなる微調整を行うことが可能である。

OpticDesigner では画面左下にフィルター形状のプレビューを、画面右にその形状による光学レンズ効果のプレビューを表示している。形状のプレビュー部ではマウス操作によって様々な角度からフィルター形状を確認することができる。ユーザが 1 つでもパラメータを変更すると形状の再計算が行われ、そのプレビューが画面左下に表示される。一方、光学レンズ効果のプレビューはその処理時間の長さを考慮して、ユーザが形状を出力しないと行わない仕様とした。そのため、ユーザは自身の求める表現をもたらすであろうフィルター形状をある程度デザインしてから、その光学レンズ効果を確認することとなる。

### 3.2 ファブリケーション

本研究におけるフィルターのファブリケーション手順を図 4 に示す。デザインソフトウェアが STL 形式で出力したフィルター形状は、光造形方式 3D プリント (Saturn 4 Ultra 16K, ELEGOO) で造形する。著者らによる試行錯誤ののち、材料にはフィルターとしての使用に適した高い透明度を持つレジンを (新高透明度レジンを、SK 本舗) を採用した。また、造形パラメータの試行錯誤も行い、OpticDesigner でデザインした形状が確実に造形されるようレイヤー高さ 0.02 mm・露光時間 1.75 秒に設定している。造形後は、IPA による 10 分間の洗浄の後、透明度を向上させるためにスピンコートを行う。洗浄後のフィルターに片面ずつ UV コーティングレジンを (Kirari, SK 本舗) を滴下し、段階的に回転速度を上昇しながら約 1 分間回転させる。スピンコートによって UV コーティングレジンを均一に塗布した後、Form Cure を用いて 2 分間の二次硬化を行う。また、二次硬化前に予め FDM 方式 3D

プリンタによって造形しておいた100mm幅の枠をフィルターに接着する。市販のフィルターも100mm幅で製造されていることが多いため、既存のフィルター用ホルダーにそのまま装着することができる。

#### 4 作例

OpticDesignerによる光学レンズ効果のデザイン及び制御の有効性を示すため、著者らによって撮影された2つの作例を紹介する。これらの作例によって、本システムで設計・作製されたレンズフィルターの実際の写真・映像制作における応用可能性を示す。

図5Aは、部分的に開口したプリズム構造を持つレンズフィルターで撮影された写真である。プリズム効果とは、レンズフィルター内で光が屈折する際に分散や反射が生じ、多重像やスペクトルの分離といった視覚効果を生み出す現象である。市販のプリズムレンズフィルターは種類や効果のバリエーションが多く、ユーザ自ら自身のニーズを満たすものを選択し、その製品が持つ表現力の範囲で制作せざるを得なかった。特に、多重像を生み出す効果は幻想的な表現を可能にする反面、効果が画面全体に及ぶことで意図しない冗長な表現となり、フレーム内の主題の明瞭さを損なう恐れがある。OpticDesignerでは、光学レンズ効果が及ぶ範囲や強度をユーザがデザインするため、背景の光源のみを強調しつつ、被写体となる人物を明瞭に描写できる。図5Aでは、画面中央から左上にかけて背景のレインボーブリッジのハイライト部分が多重像として現れている一方で、残りの領域を開口部とすることでシャープで自然な表現を実現している。さらに、本作例では開放絞りで撮影することでフィルターの開口部を周囲の風景と自然になじませ、一枚の写真の中で幻想的な雰囲気と写実的な描写を両立している。

また、図5Bは、複合された効果を持つレンズフィルターによって撮影された写真である。従来のレンズフィルターでは、1枚につき1種類の光学レンズ効果が基本であり、複数の効果を得るためには複数のレンズフィルターを重ねて使用する必要があった。しかし、フィルターの厚みが増すと周辺減光や光学収差が生じやすくなるという課題がある。OpticDesignerでは、複数の光学要素を1枚のフィルターに統合し、意図した効果を効率的に得ることができる。本作例では、凸レンズとクロスフィルターの形状を組み合わせ、中央に開口部を設けたレンズフィルターを作製した。図5Bに示すように、中央の開口部ではレンズ本来のシャープな描写が保たれ、周辺部ではクロスフィルター構造によって点光源が拡散されている。また、凸レンズ構造による歪曲収差が加わることで、光芒が放射状に広がる印象的な表現が生まれ、複合的な視覚効果が実現している。



図5. 作製したレンズフィルターを用いて撮影した写真。(A)部分的に開口させることで、効果の適用範囲を制御している。(B)複数の光学要素を組み合わせ、複雑な光の拡散を表現している。

#### 5 ワークショップ

OpticDesignerによって可能となる表現の事例を収集し、そのデザインの多様性を示すことを目的として、ワークショップを実施した。参加者は22-28歳の男性4名であり、写真・映像制作経験を有するプロ1名とアマチュア3名で構成された。いずれも自らの機材を用いた1年以上の制作経験を有しており、本研究の対象ユーザとして適切であると判断した。

##### 5.1 プロセス

ワークショップではOpticDesignerによって2枚以上のレンズフィルターをデザインするタスク（以下、デザインタスク）と、そのフィルターを用いて写真・映像を制作するタスク（以下、撮影タスク）の2つを行った。デザインタスクはワークショップの初日に実施され、全体の所要時間は約1時間であった。撮影タスクは参加者がフィルターを入手してから約5日間の間で、各参加者が自由なタイミングで実施した。各タスク終了後に、参加者はアンケートと半構造化インタビューへ回答するように求められた。

デザインタスクでは基本形状が異なるフィルターを2枚以上デザインすることを制約とし、時間は1枚につき30分を目安とした。デザインタスク実施前に本研究の概要説明を行い、撮影データの取り扱いに関する同意書への署名を得た後、OpticDesignerの使用方法を説明した。また、全ての基本形状と4節での作例を参加者に提示し、本システムによる表現の可能性を示した。参加者は必要に応じてそれらを手に取り、カメラを通して実際の見え方を確認しながらデザインタスクに取り組むことができた。デ

デザインタスク終了後にこれまでの制作経験に関するアンケートと、各フィルターをデザインした意図について尋ねる半構造化インタビューを実施した。

撮影タスクではフィルターの入手後約5日間、自由なタイミング・題材で写真・映像を制作してもらった。撮影タスク終了後、参加者には自身がそのフィルターによって表現したかったことが表れている作例をフィルターごとに3つ程度選出させた。選出した作例について、その選出意図や撮影時に感じたことについてを半構造化インタビューによって回答した。

## 5.2 デザイン事例

図6に、参加者がデザインしたレンズフィルター形状及び作例写真を示す。各参加者は2種類のレンズフィルターを作製した。ほとんどの参加者はConvexやPrismなどの画面全体に歪曲収差を生じさせる形状とTriprismやPolygonなどの多重像を生み出す形状をそれぞれ一枚ずつ選択していた。また、全ての参加者が効果範囲を制御するために、レンズフィルターの一部に開口部を設けていた。さらに、中央部への穴あけや断面を付与する機能、テキストの形状に穴を空ける機能を併用し、既製品ではないような複雑な形状をデザインする傾向が見られた。

### 5.2.1 ユーザ意図と予期せぬ効果がもたらす表現の多様性

参加者がデザインしたレンズフィルターは、デザインタスク時に意図した表現を実際の撮影においても発揮することができていた。例えば、参加者Cはデザインタスク時に、日常の風景において非現実感を現実と融合させるような異世界感を表現したいという意図を持ってフィルター作製を行っていた。図6C-2に示すように、形状としては、異世界感を表現するために中央部には大きなプリズムの形状を、周辺部には風景をそのまま映すために開口部を作成した。実際の作例では、画面中央において被写体の多重像が現れ、参加者Cが狙った「異世界感」を表現できたと自ら述べていた。また、参加者Dはデザインタスクにおいて、画面全体に歪曲収差を付与しつつ中央部では被写体を明瞭に描写したいと述べていた。その意図に基づき、薄い凸レンズの中央部を開口したような形状を作成した。作例(図6D-2)では、画面中央で蛇口を鮮明に描写しながら、周辺領域では水しぶきや逆光によるゴーストを歪ませることができていた。さらに、参加者Bは、対称的な多重像の配置による幾何学的な光の広がりを用意し、三角形のプリズム構造と開口部を組み合わせた。図6B-1から、生じた多重像を被写体の手前に配置することで、従来の写真表現における前ボケに近い効果が得られ、印象的な重畳表現を生み出すとともに、空間に奥行きや広がりを与える表現が確認できる。このように、撮影タスクでは意図通りの

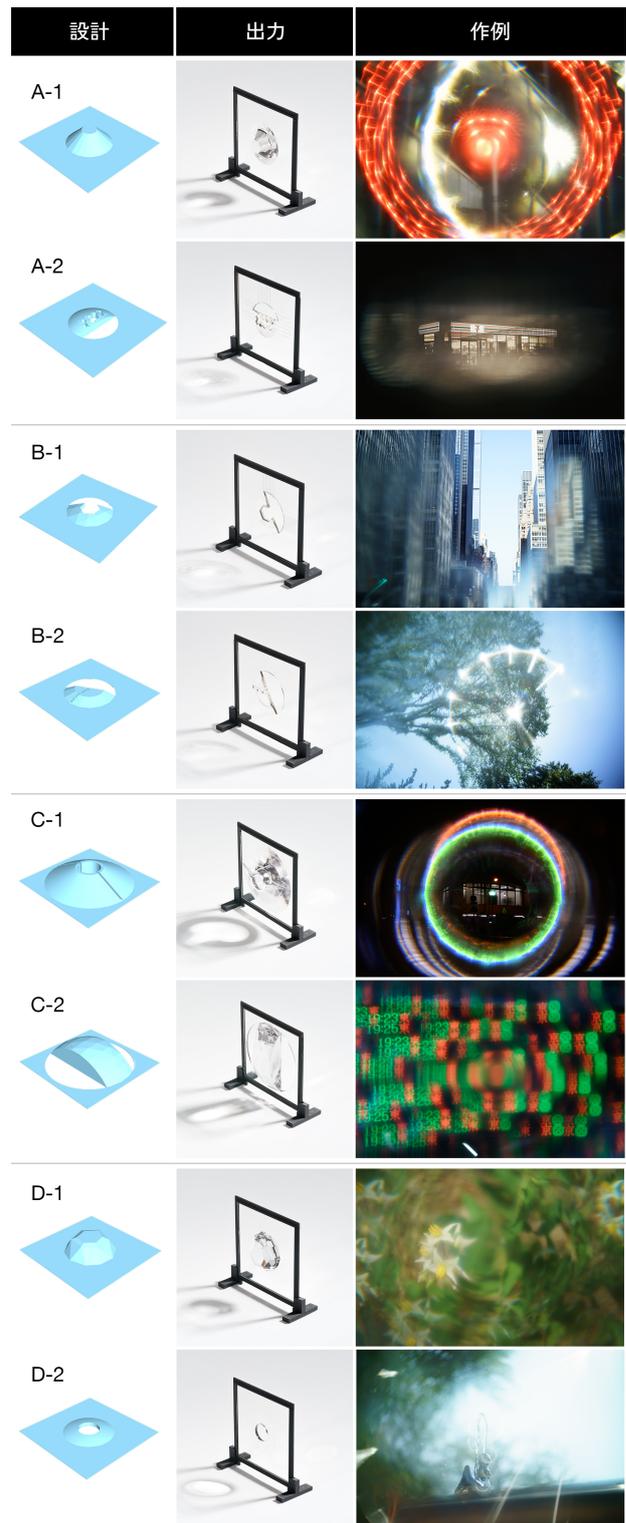


図6. ワークショップ参加者によって作製したレンズフィルターのデザイン事例。左から順に、参加者によってデザインされた形状、3Dプリントされた出力結果、およびそのレンズフィルターを用いて撮影された作例を示す。各参加者(A-D)は2種類のレンズフィルターをデザインし、いずれも異なる基本形状を選択している。

効果を得る過程で、撮影者が効果を応用的に用いることにより、当初のデザインタスク時の想定を上回る新たな表現が実現される場合もあった。一方、撮影タスク後のインタビューでは多くの参加者が「デザイン時に意図していなかった効果が得られた」と述べた。図 6A-1・A-2・B-2・C-1 に示す作例では、点光源を画角内に配置した際に、デザイン時には想定されていなかった光輪や、開口部・断面部の形状を通過した光源の拡散といった効果が確認された。これらの結果は、偶発的に生じる効果が写真表現の多様性を広げる可能性を持つことを示している。

### 5.2.2 デザインにおけるプレビューの有効性

参加者の多くは、事前に撮影するシーンを想定した上でレンズフィルターのデザインを行っていた。具体的には、まずシミュレーション機能で全体の見え方を検討し、おおよその構成を決定した後に、形状プレビューを用いて細部を調整するという利用方法が観察された。一方で、参加者の中には効果のプレビューに触発され、そこから表現を構築した者もいた。彼らはあるパラメータに極端な値を入力し、そこから得られる効果を実際の撮影にどう活かすかを検討しながらデザインを進めていた。例えば、参加者 A はレンズ部の厚みを最大値にすることで、強力な多重像の効果が得られることを発見した。その上で、主題の明瞭さを損なわない範囲で中央の解像感と周辺部の拡散のバランスをとる方針で図 6A-1 の形状を作り上げていた。インタビューにおいては、レンダリングのタイミングの違いから、パラメータを変更する度に出力が変化する形状プレビューが試行錯誤において有効であるとの意見も得られた。全ての参加者が OpticDesigner のプレビュー機能、シミュレーションの必要性を指摘していた。本研究の対象ユーザは、レンズ形状から得られる効果を直感的に予測できるほどの光学知識を持たないため、プレビュー機能の有効性が示されたといえる。

### 5.2.3 既存の撮影体験との違い

これまでの撮影では、汎用的なレンズやフィルターを個別のシーンに適用する形が一般的であり、量産品の中からニーズを満たすものを選択して撮影に臨んでいた。これに対し、OpticDesigner では、撮影者自身が特定のシーンや表現に合わせて設計・作製したレンズフィルターを撮影に用いる。この違いにより、参加者からは「設計・試作・撮影の試行錯誤を繰り返すことで表現を探求できる可能性を感じた」、「特定のシーン専用により作られたレンズフィルターを設計できれば、本システムの有効性を最大限に発揮できる」といった意見が得られた。これを裏付けるように、「OpticDesigner は一発勝負の現場には適さない可能性がある」という指摘も得られた。このような指摘は、従来のレンズやフィルターを用いた撮

影にはない考え方である。これは、量産品による汎用的な機材での撮影とは対照的に、OpticDesigner での撮影シーンや照明条件に応じた光学レンズ効果の調整によって、ユーザ自身のニーズに即した表現を生み出せる可能性を感じたことを示唆している。

## 6 制約

本稿では、従来の光学システムや 3D プリント光学素子に対して行われるような光学的な評価を実施していない。4 節と 5 節で示したように、OpticDesigner によって作製されるレンズフィルターの形状は多岐にわたる。そのため、特定の形状で得られた光学的評価と同様の結果が他の形状で得られるかは定かではないことから、光学的評価を実施しなかった。

また、OpticDesigner におけるソフトウェア上の制約として、効果適用範囲や形状設計の自由度が低いことがある。現状では、開口部は常にフィルター中央の一つ配置され、基本形状は事前に用意された 5 種類のみである。ワークショップ参加者からもこれらの制約に関する指摘が得られたことから、今後は複数の開口部を自由に配置できるインタフェースの開発と、複数形状の融合や基本形状以外の多様な形状を生成可能なアルゴリズムの実装を予定している。

さらに、光造形方式 3D プリンタによるレンズフィルター造形においては、スピニングコーティングを開口部を持つ形状に適用するとコーティングむらが生じるという制約がある。これは、レジンド滴下時に開口部を通じて非コーティング面へレジンドが流出することに起因する。この課題に対しては、後処理時のみ開口部を一時的に塞ぐ逆形状のパーツを造形し、レジンドの流出を防止する方法が有効である可能性がある。

## 7 おわりに

本稿では、ユーザ自身が求める光学レンズ効果を設計・作製可能にするレンズフィルターデザインシステム「OpticDesigner」を提案した。光造形方式 3D プリンタとスピニングコーティング法を組み合わせることで、実用的な光学品質を実現しつつ、複数の効果の統合や適用範囲の制御を可能とした。さらに、写真・映像制作経験者を対象としたワークショップを通じて、ユーザが意図した効果を具現化できること、そして予期せぬ効果を含めた多様な表現が生まれることを示した。これにより、従来の汎用的な量産レンズでは実現できなかった、シーン固有のニーズに応じた撮影体験を提供できることが明らかとなった。

今後の研究では、複数の開口部を自由に配置できるシステムの実装とコーティング手法の改良によって、レンズフィルターの設計自由度と光学的品質を向上させる。また、スマートフォンやレンズ固定式カメラなどの撮影機器に対しても OpticDesigner を適用し、さらなるアプリケーションの拡大を目指す。

## 参考文献

- [1] M. Ali, F. Alam, N. Vahdati, and H. Butt. 3D-Printed Holographic Fresnel Lenses. *Advanced Engineering Materials*, 24(9):2101641, 2022.
- [2] X. Chen, W. Liu, B. Dong, J. Lee, H. O. T. Ware, H. F. Zhang, and C. Sun. High-Speed 3D Printing of Millimeter-Size Customized Aspheric Imaging Lenses with Sub 7 nm Surface Roughness. *Advanced Materials*, 30(18):1705683, 2018.
- [3] J. Christopher, L. M. Rooney, M. Donachie, D. Uttamchandani, G. McConnell, and R. Bauer. Low-cost 3D printed lenses for bright-field and fluorescence microscopy. *Biomed. Opt. Express*, 15(4):2224–2237, 2024.
- [4] D. Gonzalez-Utrera, B. Villalobos-Mendoza, R. Diaz-Urbe, and D. Aguirre-Aguirre. Modeling, fabrication, and metrology of 3D printed Alvarez lenses prototypes. *Opt. Express*, 32(3):3512–3527, 2024.
- [5] M. Hullin, E. Eisemann, H.-P. Seidel, and S. Lee. Physically-based real-time lens flare rendering. *ACM Trans. Graph.*, 30(4), 2011.
- [6] I. Marcks. Creating Custom Optics for \*Oppenheimer\*. <https://theasc.com/articles/optics-oppenheimer-sasaki>, 2023. (2025/10/23 参照).
- [7] L. M. Rooney, J. Christopher, B. Watson, Y. S. Kumar, L. Copeland, L. D. Walker, S. Foylan, W. B. Amos, R. Bauer, and G. McConnell. Printing, Characterizing, and Assessing Transparent 3D Printed Lenses for Optical Imaging. *Advanced Materials Technologies*, 9(15):2400043, 2024.
- [8] G. Spencer, P. Shirley, K. Zimmerman, and D. P. Greenberg. Physically-based glare effects for digital images. In *Proceedings of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH '95, p. 325–334, 1995.
- [9] M. D. Tyona. A theoretical study on spin coating technique. *Advances in materials research*, 2:195–208, 2013.
- [10] Y. Zhu, T. Tang, S. Zhao, D. Joralmon, Z. Poit, B. Ahire, S. Keshav, A. R. Rajee, J. Blair, Z. Zhang, and X. Li. Recent advancements and applications in 3D printing of functional optics. *Additive Manufacturing*, 52:102682, 2022.