

Purikura-Fab：3D プリンタ未経験者の造形プロセス理解と利用意欲を促進する体験型システムの開発

臼井 義人* 高橋 治輝* 松村 耕平*

概要. 3D プリンタが安価で扱いやすくなったことで、個人によるものづくりが広まりつつある。しかし、3D プリンタの使用には、依然として 3D データの入手やスライサパラメータの設定など様々な処理が必要であり、3D プリンタで何かを作りたいという動機がなければ利用には至らないだろう。そこで本研究は、3D プリンタ未経験者に動機と手軽な利用条件、簡潔なワークフローを提供することで、理解と利用意欲の向上を目指す。提案システムは、写真をもとにリソフェン形状の 3D モデルを作成し、造形に必要な一連の処理を自動化・簡略化する。体験者は、スマートフォン上の Web アプリから造形したい写真を送信した後に、3D プリンタ上のボタンで造形対象を選ぶだけで良い。さらに、画像という性質を活かして、プリクラのようにテキストやスタンプを重ねる画像編集要素を取り入れた。本稿では、提案システムが満たすべき要件とその実装について述べ、実際に造形された制作例を紹介する。

1 はじめに

2025 年現在、Blender¹や Tinkercad²といったモデリングツールの簡易化や、Bambu Lab³に代表される安価かつ高性能な 3D プリンタの登場により、パーソナルファブリケーション [3, 7] と呼ばれる個人によるものづくりが広まりつつある。教育現場 [2] では、学生が 3D プリンタを通じて技術的理解や創造性を高めるためのワークショップが開かれている [8]。日常生活 [5, 6, 10] においても、家庭での 3D プリンタの将来的な活用法が模索されている [9]。3D プリンタを活用できるユーザにとっては、さまざまな立体形状を高精度に作り、活用できるような技術が確立されていると言えるだろう。

しかし、未経験者にとっては「3D プリンタを使いたい」と思うきっかけが不足している。日常生活や趣味のための小物や備品などが 3D プリンタで作れることを知らなかったり、具体的な利用動機を持ちにくかったりするため、ものづくりのための手段とならないのが現状である。さらに、いざ利用しようとしても、3D モデルの作成や入手、3D プリンタ用の制御コード (Gcode) に変換するスライサソフトの操作、材料であるフィラメントの選定といった作業が必要となる。失敗しやすい箇所も多く、一度失敗するとモチベーションの維持が難しい [4]。

依然として 3D プリンタを使ったことがない者が多い状況を踏まえ、本研究では、「未経験者には気軽に魅力的な 3D プリント体験の機会を与えるべきで



図 1. Purikura-Fab の造形例

あり、その体験により基礎理解や利用意欲の向上につながる」という仮説を立てた。この考えに基づき、本稿では未経験者を対象とした体験型 3D プリントシステムを提案する。本システムでは、写真を 3D モデルへ変換し、造形に必要な処理を自動化・簡略化することで、未経験者でも容易に 3D プリントを体験できる環境を提供する。体験者は、システムから造形してみたい写真を送信した後に、自動で処理された造形対象を 3D プリンタ上のボタンで選ぶだけで良い。さらに、「プリクラ」のようにテキストやスタンプを重ねる画像編集要素を取り入れた。これは、従来のワークフローにおける 3D モデリングの代替として機能するだけでなく、自分だけの作品を制作している感覚を提供することにも寄与する。この体験を通じ、図 1 のような作品を作る中で、体験者に 3D プリンタに関する基本的な知識を習得させ、将来的な利用意欲の向上を目指す。

2 予備調査

様々な 3D プリント手法の中で、3D プリンタ未経験者にとって理解や利用意欲を高めるための手法

Copyright is held by the author(s).

* 立命館大学

¹ <https://www.blender.org>

² <https://www.tinkercad.com>

³ <https://bambulab.com/ja-jp>

として有効なものを明らかにし、その有効性を調査した結果についてまとめる。

2.1 3D プリント体験を促すための事例と手法

3D プリントに必要な 3D モデルの用意を省略したり、あるいは簡潔に 3D プリントを行う手法は数多く存在している。

例えば、Bambu Lab などが手掛ける 3D プリンタでは、事前にいくつかのサンプルデータが用意されているため、そのデータを選択するだけで造形することができる。また MakerWorld⁴では、web 上に掲載されているデータを選択するだけで、3D プリントすることができる。これらの手法は手軽に 3D プリントができるという観点においては優れているが、ユーザが直接選択したり制御することが少ないため、作成物に対して愛着を感じにくい傾向があると考えられる。

p5.fab[11] や G-coordinator⁵は、ユーザがコードを書くことで 3D プリンタを制御することができる。これらのツールは、プログラミング経験が豊富なユーザにとっては、自身のスキルを活用しやすく、3D プリンタに対する理解を深めるツールとしても、利用意欲を高めるツールとしても有効であると考えられる。一方で、プログラミング経験があまりないユーザにとっては、取っ掛かりにくく、3D プリントの理解を深め、利用意欲を高めるツールとしては有効だと考えにくい。

生成 AI を活用したツールとして、PrintMon Maker⁶ や Meshy AI⁷などが存在する。これらのツールを活用した体験は、昨今の生成 AI の普及により、多くのユーザにとって魅力的であると考えられるが、3D プリントを行う際に制御するパラメータが多く、手軽にできる体験とは考えにくい。

さらに、写真や画像から 3D プリンタのためのデータを作成する手法 [1] が存在する。この手法は、画像の輝度情報に応じて 3D モデルの厚みを変えることで、パターンやテキストチャ、エンボス加工などに応用している。本研究ではこの手法を活用したもので、画像の輝度をもとに厚みの異なる板に変換する「リソフェン」を採用する。リソフェンは、厚みの違いを利用して光の透過率を調整し画像のデザインを表現することができる技法である (図 1)。この技法は、基本的に単色の材料で造形物を作るため、材料の切り替えや写真に応じた調整が不要である。また、構造がシンプルなため造形の失敗も少なく、誰でも手軽に造形できると考えられる。さらに、背後から光を当てるとは入力された画像がはっきりとわかる



図 2. 学内で実施したリソフェンを使用した 3D プリント体験会の様子

ないため、出力された形状とそれを実際に手に取ったときの違いに驚きを感じることもあり、魅力的な体験につながる可能性がある。リソフェンを使用したツールとして、すでに Image to Lithophane⁸ や Make My Lithophane⁹などが存在する。しかし、これらのツールはいわゆる 3D モデリングツールの拡張版のような形で提供されており、未経験者が扱うには、パラメータの設定やスライス処理、データの受け渡しなどに課題がある。

2.2 リソフェンを使用した 3D プリント体験

自分の持っている写真でリソフェンを制作する体験は、未経験者にとって魅力的か。そして、利用可能なツールを用いて自分ひとりで制作することができるのか。こうした前提を確認するため、予備調査として 3D プリント体験会 (図 2) を実施した。

体験会は、立命館大学大阪いばらきキャンパス H 棟にある開けたスペースで、5月13日の12-15時に実施された (なお、事前に大学内で張り紙などで宣伝を行った)。参加者は、3D プリンタと本体験会についての説明を受け、造形してみたいと思った写真をスタッフに提出した。その後、事前に用意した PC を用いて、提出した写真をスタッフのサポートのもと、Image to Lithophane を用いて 3D モデルに変換した。3D プリンタは、FlashForge の Adventurer 5M Pro¹⁰、スライサは同社の FlashPrint 5 を使用した。造形には 1 時間程度要し、制作物を受け渡し時に、イベントに参加した動機、3D プリンタの利用経験や難しいと感じたこと、ひとりでも利用できそうかなどについてインタビューを行った。

体験会には、10 名の参加者 (すべて同大学の学生) があり、この内 7 名は 3D プリンタ未経験者であったものの、全員が写真を用いた 3D プリントを体験することができた。体験会の参加の動機としては、「通りかかって面白そうだった」という回答

⁴ <https://makerworld.com/ja>

⁵ <https://github.com/tomohiron907/G-coordinator>

⁶ <https://share.bambulab.com/PrintMonMakerLaunch>

⁷ <https://www.meshy.ai>

⁸ <https://3dp.rocks/lithophane/>

⁹ <https://makerworld.com/ja/makerlab/makeMyLithophane?from=makerlab>

¹⁰ <https://flashforge.jp>

に加え、「自分の写真を使って作品がもらえるのが魅力的だった」といった回答が3件ほどあった。このため、写真を題材とすることは未経験者にとって魅力的である可能性が示された。また、体験会以前から3Dプリンタに興味はあったが、実際に使う機会がなかったと述べる参加者もあった。

体験会が参加者に与えた影響として、ある体験者（一度だけ3Dプリンタ経験あり）は、「(3Dプリンタに対して)難しいというイメージはあるが、表現の幅がいろいろあって、もっと取り組んでみたいと思った」と回答した。その他の参加者にも、一度体験してみることで、「使うハードルが下がった」、「思ったより簡単にできた」、「写真がきれいに立体化されて驚いた」といった前向きな意見が得られた。さらに、「研究や趣味で使ってみたい」、「自作グッズを作りたい」といった利用意欲が示され、本体験が3Dプリンタ利用の動機付けとなる可能性が示唆された。

一方で、体験会で難しかったこととして、10名全員が「スライサの設定」と「用語の意味」を回答しており、これらが未経験者にとって障壁となることが確認された。また、3Dプリンタの操作を補助するスタッフがおらずとも造形までできると答えた参加者は1名のみであり、現行のツールを提供するだけでは初心者が自力でワークフローを完遂するのは困難であることも分かった。

以上より、写真を用いた3Dプリントは、未経験者にとって「自分の写真を立体化する」というわかりやすく魅力的な体験となっており、結果として3Dプリンタの理解や利用意欲を高める効果を持つと考えられる。一方で、提案システムでは、未経験者が躓いていた処理や設定を適切に支援する必要がある。

3 提案システム：Purikura-Fab

ここでは、本研究の提案システムの要件とそれらをどのように満たしたのかについて紹介する。

・手元にある写真で手軽に3Dプリント体験

提案システムで第一に満たすべき要件は、誰もが手軽に3Dプリントを体験できる仕組みである。3Dモデリングや3Dモデルを探す準備段階の手間を省き、造形時間が長くなりすぎない工夫も必要である。

提案システムは、写真からリソフェン形状を作るため3Dデータの準備が不要となる。体験者は、自身のスマートフォンにある写真をシステムにアップロードするだけで良い。また、作りたい写真が手元にない場合は、その場で画像を検索したり新たに撮影しても良い。そして、造形完了時間を1時間前後に調整することで、品質と大きさを担保する。

・魅力的な3Dプリント体験

手軽さだけでなく体験者にとって魅力的な体験であることが重要である。つまり、安易に体験を省略するだけでは、制作物のオリジナリティが損なわれる可能性がある。実際に、著者らの先行研究 [12] では、

テトリスを応用した造形体験を実現したものの、造形物に自分で作った感がないという課題があった。

写真からリソフェンを制作する手法は、自分で選んだ写真が3Dプリントされるため、それだけで体験者にとって魅力的な制作物になる可能性がある。提案システムでは、この特徴をさらに有効活用すべく、入力された写真にテキストやスタンプを追加する画像編集機能を実装する。この画像編集は単純であるものの、編集結果がリソフェンの形状にまで反映されるため、従来の3Dモデリング作業を代替し得る。

前述した写真を用いた手軽な体験とこの画像編集機能は「プリクラ」を参考にしている。商業施設やゲームセンターで気軽に体験できるプリクラは、その場で写真をデコレーションするという手軽さでステッカーを作ることができる。これは提案手法の重要な特徴であるため、我々はシステムを「Purikura-Fab」と命名した。

・造形に至るまでの処理の自動化

予備調査の体験会で明らかになったように、未経験者は設定や何気ない用語の理解で躓く可能性がある。また、PCと3Dプリンタとのデータのやりとりなど、3Dプリントに直接は関係しない手間も生じる。こうした未経験者にとって障壁になり得る要素は、可能な限り取り除かれなければならない。

提案システムでは3Dデータの作成、スライス処理、3Dプリンタへの転送を自動化することとした。体験者が行う必要のある作業は、①写真や画像のアップロード、②各処理が完了するまで待機、③3Dプリンタに転送された造形データの選択のみである。

・パラメータ調整の余地

予備調査では、スタッフの手を借りながらも3Dプリント体験を経ることで、「思ったより簡単にできる」という理解を示すことがわかった。つまり、すべての処理を自動化したり隠蔽したりするだけでは、体験によって得られる学びの機会をも損失してしまう可能性がある。

造形プロセスの理解と利用意欲の促進を目指すため、提案システムでは積層ピッチと造形速度のパラメータを体験者が調整可能な形で残すこととした。これらのパラメータは、スライサの基本的な設定項目であり、仕上がりの品質やプリント時間に影響を与える。体験者自身が調整する機会があれば、これらの造形結果への影響を通じて速度と品質のトレードオフを学べるのが期待される。また、この調整が体験者にとって体験の障壁とならないように、なにも変更しなくても造形できるように設計する。あくまでも、体験者自身が体験の過程で興味があれば変更できるように設計を行う。

・誰もが利用できる運用

予備調査の参加動機で、「通りかかって面白そうだった」という意見があったように、3Dプリンタは手

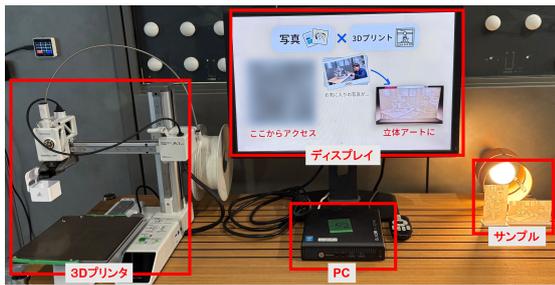


図 3. 提案システムの設置図

軽に体験できる場所にあり、そのシステムがどのような体験をもたらすのかひと目で分かるようになっていなければならない。

そこで、提案システムは誰もがアクセスできるような場所に 3D プリンタを配置する想定で実装する。システム説明や 3D プリンタの状態を示すためのディスプレイを併設することで、誰でも体験できるという情報も提供できるようにする。

4 実装

4.1 システム構成

提案システムは、主に 2 つの要素から構成されている。1 つ目の要素は、Gcode を作成する Web アプリケーションである。この Web アプリケーションは、ユーザが画像編集を施した写真と選択した造形パラメータ、事前に用意したプリセットをもとに Gcode の作成を行う。生成した Gcode はクラウドストレージ (Firebase) に送信されて管理される。

2 つ目の要素は、3D プリンタと通信を行うサーバである。このサーバは、クラウドストレージに保存されている Gcode をダウンロードし、3D プリンタへデータを送信する役割と、3D プリンタの状態や造形完了時間をユーザにディスプレイから提示する役割を備えている。

提案システムの設置図を、図 3 に示す。3D プリンタは、価格の安さと造形速度の速さを考慮して Bambu Lab A1 mini¹¹を採用した。フィラメントは、Bambu Lab PLA Basic(白)を採用した。そして、造形物のサンプルを展示するため、3D プリンタとディスプレイの近くにライトを設置している。

4.2 Web アプリケーション

システムの画面および 3D モデルへの変換処理は、Image to Lithophane¹²を参考に実装した。追加で実装したインターフェースやボタンの入力処理には、HTML や CSS, JavaScript を用いて実装した。画像編集の機能は、キャンバス API を用いており、絵

文字スタンプとテキストの配置と大きさの変更が可能である。また、ユーザはスライサパラメータをラジオボタン形式で選択できる。積層ピッチは、0.2 mm から 0.36 mm まで 0.04 mm 間隔で選択できるように設計しており、造形速度は 230 mm/s から 270 mm/s まで 10 mm/s 間隔で選択できるように設計した。またそれぞれのパラメータの役割がユーザにわかるようにイラストと説明を含めた提示も行う。編集した画像をもとに 3D モデルを生成後、ユーザが選択したパラメータの数値、事前に用意したプロファイルをもとに、スライサエンジンである CuraEngine を使用して Gcode を作成する。生成された Gcode を Firebase へアップロードする。

4.3 3D プリンタと通信を行うサーバ

開発言語として、Python を用いて実装した。ユーザに、3D プリンタの造形状況やファイルの転送状況をディスプレイに提示する画面は Pygame で実装した。Bambu Lab A1 mini の稼働状況や造形ファイルの情報の取得は MQTT, Gcode の送信は FTP で実装した。FTP 転送やプリンタ監視, Firebase 監視などの並行処理を行うために Threading モジュールを用いて並列処理を行っている。システムは、常に Firebase の監視を行っており、造形データが Web アプリケーションからアップロードされるたびに随時ダウンロードする。ダウンロードが完了したのちに、3D プリンタへの転送を行う。なお、システム運用のため、3D プリンタの状況を Google スプレッドシートへ記録するようにした。

4.4 制作するリソフェン

制作するリソフェンの外形を図 4 に示す。入力された画像はまずグレースケール画像に変換され、輝度値に応じて各部分の厚みが決定される。具体的には、画像の最も明るい部分が最も薄く、最も暗い部分が最も厚くなるように厚みが線形的に割り当てられる。このとき、輝度の 1 階調 (0 から 255 までの 256 段階) ごとに高さを少しずつ変化させる仕組みを用いている。輝度の値は、最小厚さ (0.8 mm) と最大の厚さ (3 mm) を基準に、1 階調ずつ厚さが増えるように換算される。最小の厚さと最大の厚さは著者が試作する中で、造形の安定性と品質の兼ね合いから導いた。また、画像を 3D モデルに変換する際には、1mm あたり数ピクセルの密度で高さデータが割り当てられ、これが「ピクセル比率」として造形の解像度を決める。

生成されるリソフェンは高さ方向に積層され、全体を支える台座部分が約 30 mm 突き出している。入力画像の縦横比を保持したまま自動で拡大・縮小され、長辺が最大 100 mm となるように調整される。造形時間はおおよそ 1~1.5 時間である。

¹¹ <https://bambulab.com/ja-jp/a1-mini>

¹² <https://github.com/MarkDurbin104/3dp.rocks/>

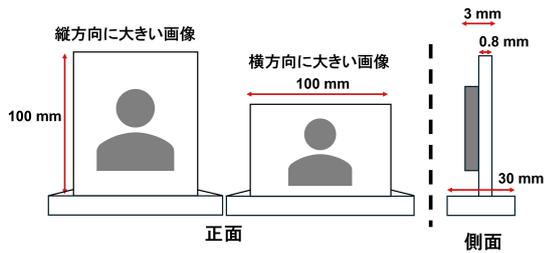


図 4. 制作するリソフェンの図

5 システム利用の流れ

体験者は自身のスマートフォンから、ディスプレイに表示されている QR コードを読み取ることで提案システムにアクセスする(図 3)。その後、出力したい写真を選択する。写真を確認し、写真に画像編集を施すか、そのまま写真を確定させて造形パラメータの選択を行うかを選択する(図 5 左)。

「写真を編集する」を押す(図 5 左)ことで、画像編集画面(図 5 中央)に遷移し、ユーザはスタンプやテキストの入力を行う。最終的な画像を確認した後(図 5 右)、次の画面へ移行する(図 6 ①)。



図 5. 画像編集を行う画面

次に 3D モデルの確認と、スライス処理に必要なパラメータ設定を行う。プレビューに生成された 3D モデルが表示される(図 6 ②)。この時、生成される 3D モデルに対して高さや厚みを変更できる。変更がなければ、画面をスクロールし、スライス処理のパラメータ設定を行う。

スライス処理でユーザが変更できるパラメータは、積層ピッチと造形速度である。ユーザは説明文を確認(図 6 ③)し、自由にパラメータを選択する。パラメータ選択後、アップロードを行う(図 6 ④)。アップロードが完了するまで、ローディング画面が表示される(図 6 ⑤)ので、ユーザは画面を閉じずに待機する。アップロード完了後、ディスプレイ上には、3D プリンタへ転送中のファイルのファイル名と転送の進捗が表示される(図 7 ②)。

Gcode を 3D プリンタへと送信完了すると、ディスプレイにはファイル選択画面(図 7 ③)が表示さ



図 6. スライス処理を行う画面

れるので、ユーザが 3D プリンタのディスプレイを操作し、造形ファイルを選択する。

造形が開始されるとディスプレイ上に造形の終了予定時刻が表示される(図 7 ④)。ユーザは表示された時刻を目安にして、造形物を回収するために再訪すれば良い。3D プリンタが造形中は常にこの画面が表示されている。以上の手順を踏むことで図 1 に示すようなリソフェン作品が完成する。

6 システム運用

提案システムを立命館大学大阪いばらきキャンパス H 棟 5F の廊下に設置し(図 3)、実際の利用状況やシステムの動作を確認した。8 月 7 日からシステムを設置し、8 月 31 日現在において、その間に制作された作品は計 12 件であった。

システムによって造形された例を図 8 に示す。制作されたものの多くはペットやお気に入りの写真を題材としていた。なお、プライバシーの観点から、体験者から同意を得られていない制作物を論文に載せることは避けた。

システムは体験者によって自由に使用されており、著者らによるサポートは必要なかった。運用期間中に制作された作品の大半は問題なく造形されたが、いくつか失敗事例も確認された。たとえば、ベットが正しく設置されていなかったため、造形途中に 3D プリンタのベッドから造形物が剥離するケースがあった。さらに、高輝度領域が連続する写真を入力としたリソフェンでも造形失敗が見られた。図 9a はその一例であり、元の画像を確認すると、画像の上部が白く、薄い層が続くため失敗したと考えられる。このため、青空や白背景が広い画像では薄い層が続く

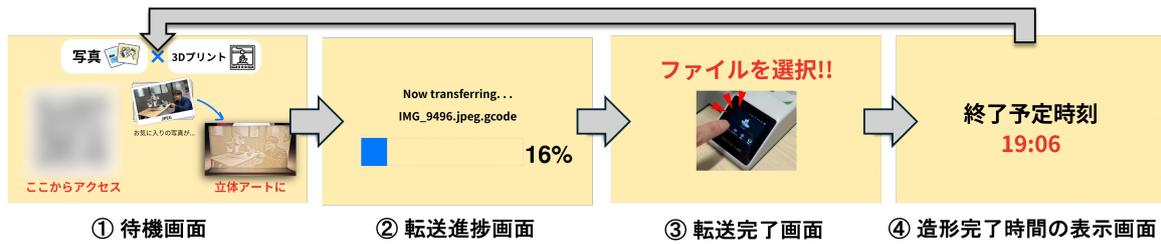


図 7. ディスプレイの表示画面



図 8. 造形例

ため、最後まで造形できずに失敗することも考えられる。また、画像編集で追加されたテキストやスタンプが綺麗に造形されないケースも一部見られた。図 9b に示すように、文字と背景写真の輝度値が近いと、リソフェン変換後に十分なコントラストが得られず、文字輪郭が判別しにくくなるがあった。その結果、完成物では文字が背景に埋もれ、編集した内容がわかりづらいケース (図 9 c) が確認された。

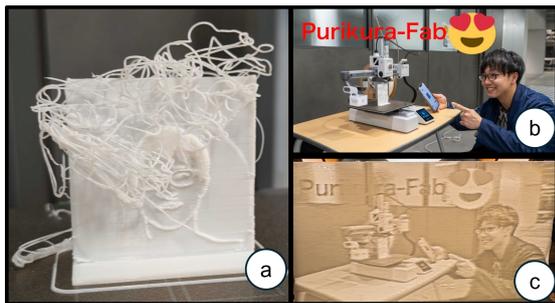


図 9. 失敗例。(a) リソフェンに薄い部分が多いと積層に失敗することがある。(b, c) 画像編集で追加された文字が写真に埋もれてしまう場合がある。

利用者からの意見としては、ローディング画面 (図 6⑤) の表示時間が長く、システムのエラーと誤解される点や、選択可能なパラメータの基準が不明瞭である点が指摘された。また、造形完了予定時刻が造形開始後にしか提示されない点についても、不満の声が寄せられた。これらの問題に対して、以下の対応策を考えている。まず、スライス処理中のロー

ディング画面については、単に静止画を表示を提示するだけでなく、処理進捗やアニメーションを加えることで映像に変化を持たせ、利用者が処理の継続を直感的に理解できるようにする。次に、パラメータ選択に関しては、積層ピッチや造形速度を変更した場合の仕上がりや造形時間の差異をサンプル画像や比較図として提示し、利用者が結果を想像しやすい形でガイドを与える。さらに、アップロード処理の段階で、想定される造形時間をあらかじめ提示することで、利用者が出力までの待機時間を把握できるようにし、不満軽減につなげることを目指す。

7 今後の展望

運用中の意見をもとにシステムを修正していき、より多くの人々が利用できる場所での評価実験を通じて、提案システムが、3D プリンタ未経験者に対してどのような影響を及ぼすかを調査していく。

特に、本研究ではユーザが提案システムを体験する中で、どのような過程を経て3D プリンタに対する理解や利用意欲を深めていくのかに注目する。現在の提案システムでは、造形完了時間表示画面 (図 7④) など、映像に変化が見られない箇所が存在する。そのような箇所にフィラメントや Gcode、モデリングなどの情報を提示することで、システム体験者に対し、より理解や興味を促すことができるかもしれない。リソフェン作品の土台に、選択したパラメータの値や造形時間を印字することも有効だと考える。自分の制作物を通じて、どのパラメータを変更させるとどのような結果がでるかを理解することで、3D プリント体験そのものに対する理解が深まるかもしれない。

8 おわりに

本研究では、3D プリンタ未経験者を想定して、3D プリントに対する基礎理解や利用意欲の向上を目指した。ユーザが自身のスマートフォンの写真をリソフェン形状の3D モデルに変換して造形できるシステムを開発した。今後は評価実験を通じて、システムが3D プリンタ未経験者に与える影響を調査する。

参考文献

- [1] M. Alexa and W. Matusik. Reliefs as images. In *ACM SIGGRAPH 2010 Papers*, SIGGRAPH '10, New York, NY, USA, 2010. Association for Computing Machinery.
- [2] J. Günther, L. Brehm, H. Günzel, and A. Humpe. Teaching 3D Printing Technology Hands-on. In *2020 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, pp. 953–957, 2020.
- [3] N. Gershenfeld, 田中 浩也, 糸川 洋. Fab ーパーソナルコンピュータからパーソナルファブリケーションへ. オライリー・ジャパン, 2012.
- [4] N. Hudson, C. Alcock, and P. K. Chilana. Understanding Newcomers to 3D Printing: Motivations, Workflows, and Barriers of Casual Makers. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, p. 384–396, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [5] J. Kim, A. Guo, T. Yeh, S. E. Hudson, and J. Mankoff. Understanding Uncertainty in Measurement and Accommodating its Impact in 3D Modeling and Printing. In *Proceedings of the 2017 Conference on Designing Interactive Systems*, DIS '17, p. 1067–1078, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [6] B. Lee, G. Han, J. Park, and D. Saakes. Consumer to Creator: How Households Buy Furniture to Inform Design and Fabrication Interfaces. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, p. 484–496, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [7] C. Mota. The rise of personal fabrication. In *Proceedings of the 8th ACM Conference on Creativity and Cognition*, C&C '11, p. 279–288, New York, NY, USA, 2011. Association for Computing Machinery.
- [8] B. Norouzi, M. Kinnula, and N. Iivari. Making Sense of 3D Modelling and 3D Printing Activities of Young People: A Nexus Analytic Inquiry. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '21, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.
- [9] R. Shewbridge, A. Hurst, and S. K. Kane. Everyday making: identifying future uses for 3D printing in the home. In *Proceedings of the 2014 Conference on Designing Interactive Systems*, DIS '14, p. 815–824, New York, NY, USA, 2014. Association for Computing Machinery.
- [10] E. Stemasov, A. Botner, E. Rukzio, and J. Gugenheimer. Ephemeral Fabrication: Exploring a Ubiquitous Fabrication Scenario of Low-Effort, In-Situ Creation of Short-Lived Physical Artifacts. In *Proceedings of the Sixteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '22, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- [11] B. Subbaraman and N. Peek. p5.fab: Direct Control of Digital Fabrication Machines from a Creative Coding Environment. In *Proceedings of the 2022 ACM Designing Interactive Systems Conference*, DIS '22, p. 1148–1161, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- [12] 高橋 治輝, 白井 義人, 松村 耕平. ボタンひとつで3Dプリントが体験できるシステムの提案と運用. 日本ソフトウェア科学会 WISS2024, 2024.