

フラワーゼリーの自動造形に向けた スリットインジェクションプリンティングと 設計ソフトウェアの実装と評価

宮武 茉莉^{1,a)} 鳴海 紘也¹ 関谷 勇司¹ 川原 圭博¹

受付日 2021年5月31日, 採録日 2021年12月3日

概要: フラワーゼリーとは、花の形をしたゼリーが透明なゼリーの中に浮かんでいる芸術的なスイーツであり、食べるのがもったいないと思わせるほどの美しさで見ると惹きつける。本稿ではこの繊細なスイーツの複雑な制作過程を単純化し既存のデザインスペースを拡張することを目的として、スリットインジェクションプリンティングという造形手法と、設計ソフトウェアを実装し評価を行った。この設計ソフトウェアを用いることで、ユーザはプレビュー画面を見て試行錯誤しながら形状をデザインすることができる。またフラワーゼリーの造形に関しては、柔らかく崩れやすいゼリーのプリントを実現するため、カラーゼリーをベースゼリーに直接注入するスリットインジェクションプリンティング技術を導入したフード3Dプリンタを開発し、様々な形状のゼリーを造形できることを示した。さらに、初心者と経験者に対してユーザスタディを実施して提案手法の効果を評価し、初心者でも簡単にフラワーゼリーを作製できるようになり、経験者はデザインを試行錯誤しながら制作可能であることを示した。

キーワード: デジタルフードファブリケーション, フード3Dプリンタ, ファブリケーション技術

Implementation and Evaluation of Slit Injection Printing and Design Software for Parametrically Designed Flower Jelly

MAKO MIYATAKE^{1,a)} KOYA NARUMI¹ YUJI SEKIYA¹ YOSHIHIRO KAWAHARA¹

Received: May 31, 2021, Accepted: December 3, 2021

Abstract: Flower jellies, a delicate dessert in which a flower-shaped jelly floats inside another clear jelly, fascinate people with both their beauty and elaborate construction. In efforts to simplify the challenging fabrication and enrich the design space of this dessert, we present a printing device and design software for digitally fabricating flower jellies. Our design software lets users play with parameters and preview the resulting forms until achieving their desired shapes. We also developed slit injection printing that directly injects colored jelly into a base jelly, and shared several design examples to show the breadth of design possibilities. Finally, the user study with novice and experienced users demonstrates that our system benefits creators of all experience levels by iterative design and precise fabrication.

Keywords: digital food fabrication, food 3D printer, fabrication techniques

1. はじめに

水の中に本物の花が浮かんでいるかのように見えるフラ

ワーゼリー (図 1) は、パティシエの熟練した技術がなければ美しく繊細に作ることはできない。本研究では、デジタルファブリケーション技術を導入することで、フラワーゼリー作製時の難しい作業を単純化し、さらにそのデザインの自由度を高めることを目的とする。

¹ 東京大学

The University of Tokyo, Bunkyo, Tokyo 113-8656, Japan

^{a)} mako-miyatake@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

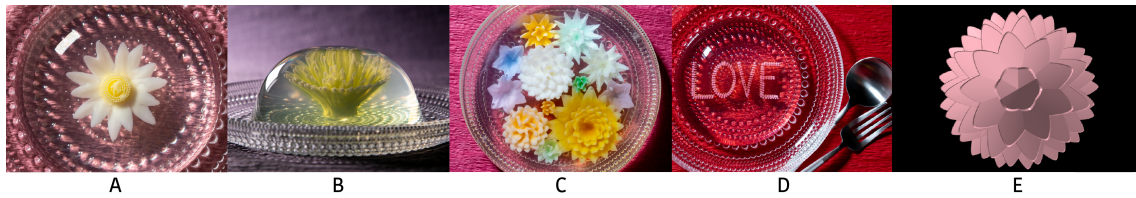


図 1 本研究を用いて制作したフラワーゼリー。(A) マーガレット, (B) 菊, (C) ゼリーケーキ, (D) メッセージ, (E) 設計ソフトウェア上のプレビュー画面 [1]

Fig. 1 Flower jellies made with our system. (A) Marguerite, (B) Mum, (C) A jelly cake, (D) A printed message, (E) A schematic preview in the design tool [1].

一般に、パティシエが行う手作業の調理工程では、次のような問題が生じていることが多い：(1) 柔らかい材料を扱う際に正確に細かく手を動かさなければならない、(2) 長時間集中力を保ちながら作業をしなければならない、(3) 間違えても修正したりやり直したりすることができない。フラワーゼリーの作製過程にあてはめると具体的に次のように述べられる：(1) 正確な動きができなければゼリーの形が崩れてしまう。(2) 特に複数の花を作製する場合は途中で集中力が切れてミスが生まれやすい。(3) 作製したフラワーゼリーが想定していた完成イメージと異なっても、後から修正することができない。

これらの問題を解決する方法としてデジタルファブリケーション技術の導入がある。一般に、デジタルファブリケーションツールを既存の手作業での調理工程に導入することによるメリットとして、以下のようなものがある。

- (1) 有機的で複雑な形状と幾何学的な形状の両方を正確に作るができる。
- (2) 自動化によって調理工程での人の負担を減らすことができる。
- (3) 造形前にソフトウェア上で試行錯誤しながら完成物のデザインを把握することができる。

本研究では、手作業の問題を解決すると同時にフラワーゼリーのデザインスペースを拡張するために、試行錯誤的にデザインできる設計ソフトウェアと、スリットインジェクションプリンティングという新たな造形手法によるフラワーゼリーの自動造形を提案する。ユーザはまず、設計ソフトウェア上で 3D のプレビュー画面を確認しながら好きな形状をデザインし、完成したデザインからプリント時のパスや造形用パーツのデータを生成する。次に、開発したフード 3D プリンタを使用して実際にフラワーゼリーをプリントする。本稿では、実際にこのプリンタを用いて、様々な形状のフラワーゼリーを造形可能であることを示した。さらに、前述の手作業での調理工程で生じる問題を解決しているかを明らかにするため、フラワーゼリー初心者と経験者の両方に対してユーザスタディを実施した。実験の結果から、初心者でも簡単にフラワーゼリーを作製することができ、経験者は満足のいくデザインになるまで様々なパターンを試してからプリントできることが分かった。

本研究の貢献は以下のようにまとめられる：

- フラワーゼリーの形状や構造をデジタルにデザインし 3D プレビューできる設計ソフトウェアを実装した。
- カラーゼリーをベースゼリーに直接注入するスリットインジェクションプリンティング技術と、それを用いたフード 3D プリンタを開発した。
- 3D プリントに必要な、カラーゼリーとベースゼリーという 2 種類のハイドロゲルの食材の配合と作製方法を確立した。
- 提案するプリンタを用いて様々な形状のフラワーゼリーを制作可能であることを示した。
- 初心者と経験者に対してユーザスタディを実施し、提案手法の効果を評価した。

2. 関連研究

2.1 デジタルフードファブリケーション

近年、デジタルファブリケーション技術は食品の調理工程にも導入されるようになった。なかでもフード 3D プリンタは様々な種類が開発され、現在では市販されているものもいくつかある [2], [3]。研究分野では、デジタルファブリケーション技術を料理人の扱うツールとして既存のキッチンに導入する Digital Gastronomy というコンセプトのもとで、3D プリントした麺や CNC で切削されたポテトなどの新しいレシピが考案されている [4], [5], [6]。

Human-Computer Interaction (HCI) において、新しい食体験を生み出すためによく使われるのは Additive Manufacturing を用いたフード 3D プリンタである。これを用いた研究として、食品内部の構造や密度を変えることで満腹度を制御するシステム [7] や、水に浸けると立体形状に変化する可食シート [8] などがある。これらの先行研究によって既存の食品のデザインスペースが拡張されているが、可食のペーストをシリンジから押し出して積み重ねるといったシンプルな印刷方式は、フラワーゼリーのように繊細で柔らかく崩れやすい食品を作るには適さない。また、調理工程に導入できる他のデジタルファブリケーションツールとして、CNC 切削機 [4] や 3D プリントした治具や抜き型 [9], [10]、レーザ加工機 [11] などがあるが、いずれも柔らかくて崩れやすいゼリーを扱うには適していない。

そこで本研究では、ゼリーの3Dプリントを可能にするためにスリットインジェクションプリンティング技術確立し、それを導入したフラワーゼリープリンタを提案する。

2.2 粒状ゲルサポートを使った3Dプリント

食品分野ではないが、3Dプリントを行う際にサポート材としてゲルを用いる研究はいくつかある。特に、ゲルを粒状に砕いたものをサポート材に使う手法は、内部に印刷したインクが硬化するまでの間インクの位置を固定することができるため注目を集めている。たとえば、バイオ分野や医療分野での応用を目的として、粒状ゲルサポート内部で Polydimethylsiloxane (PDMS) エラストマをプリントした研究 [12] が存在する。また、Rapid Liquid Printing [13] では、同じような粒状ゲルサポートを用いることで、大きな構造を高速に3Dプリントできることが示されている。

しかし、本稿で目標とするフラワーゼリーの印刷のためには、高い透明度のゼリーの中に別のゼリーを印刷する必要があるため、透明度の低い粒状のゲルを用いる従来の手法は適さない。そこで本稿では、粒状に砕いたゲルではなく、塊のままのゲルをサポート材として使うスリットインジェクションプリンティングを提案した。

なお、本研究と似ている手法として、固まったゼリーの中に粒状の食べ物を注入するという研究 [14] がある。この方法ではゼリー表面の注入時にできた穴を印刷後に固まる前のゼリーで塞ぐ必要があるが、スリットインジェクションプリンティングではこのような工程は必要ない。

3. フラワーゼリーの自動造形

本研究ではスリットインジェクションプリンティングと設計ソフトウェアを用いたフラワーゼリーの自動造形を提案する。造形までの工程は次の3つに分けられる：(1) 設計ソフトウェアを用いて好きな形状のフラワーゼリーをデザインする、(2) 印刷に必要なパーツのデータとゼリー造形用の G-code ファイルをそれぞれ出力し、プリントに使う2種類のゼリーを用意する、(3) スリットインジェクションプリンティングによりフラワーゼリーをプリントする。本章では各工程を順番に説明する。

3.1 設計ソフトウェアを用いたデザイン工程

ソフトウェア上で試行錯誤しながらのデザインを実現するため、RhinoCeros と Grasshopper を用いてパラメトリックな設計ソフトウェアを実装した (図 2)。

まずは、ユーザがライブラリに登録されている数種類の花の中から好きな種類を選択すると、その花の形状を決めるデフォルトのパラメータが設定される。

次に花弁の形状を設計する。(1) 長さ、(2) 幅、(3) 先端の丸み、(4) 根元の丸みの4つのパラメータを設定することで細長い花弁から大きく丸みのある花弁まで様々な形状

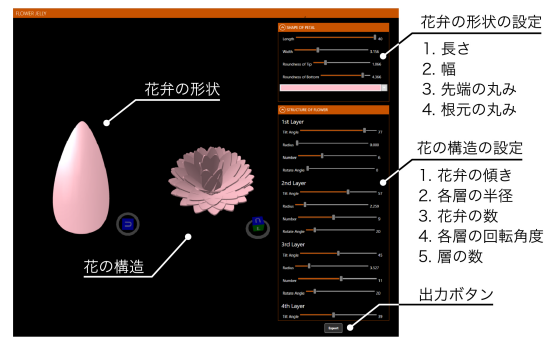


図 2 設計ソフトウェア. 形状の3Dプレビュー (左), 花弁の形状と構造を設計するためのパラメータ (右) (文献 [1] より改変)

Fig. 2 Design interface. The 3D preview of the flower (left). Parameters for the petal shape and the whole appearance (right) (modified from Ref. [1]).

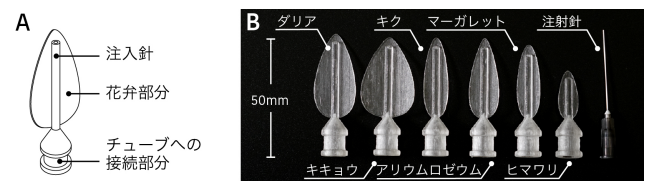


図 3 花弁型ナイフ. (A) 花弁型の部分と注入針とチューブへの接続部分が一体化されている. (B) 3D プリントした様々な形状のナイフ (文献 [1] より改変)

Fig. 3 Petal knives. (A) A single petal knife is composed of an injection needle, a designed petal, and a connection port to silicone tube. (B) Various types of 3D printed petal knives (modified from Ref. [1]).

をデザインすることができる。それぞれのパラメータはスライダーにより変更できる。

最後に、花の構造を設計する。花は花弁が層状に重なって構成されており、各層の花弁は中心軸を基準として回転対称になっているため、(1) 花弁の傾き、(2) 各層の半径、(3) 花弁の数、(4) 各層の回転角度の4つのパラメータを設定することで構造を決定できる。また、層の総数を変えることもできる。

この設計ソフトウェアでは現在設定されているパラメータから生成されるフラワーゼリーの完成形を、プレビュー画面でリアルタイムで確認しながら設計することができる。満足のいくデザインができたなら、プリントに必要な花弁型ナイフの STL ファイルと、フラワーゼリーを3Dプリントする際の経路が書かれた G-code ファイルを出力する。

3.2 プリント前の準備工程

フラワーゼリーをプリントする前に、花弁型ナイフと、プリント材料となる2種類のゼリーを準備する。

花弁型ナイフ。花弁型ナイフはユーザがデザインした花弁の形状のナイフと注入針 (内径: 0.4 mm) とシリコンチューブへの接続部分を一体化したパーツである (図 3)。これを使うことで固体のベースゼリーに切り込みを入れ



図 4 使用するゲル化剤によるベースゼリーの透明度の違い
 Fig. 4 The difference in the transparency of base jelly depending on gelling agents.

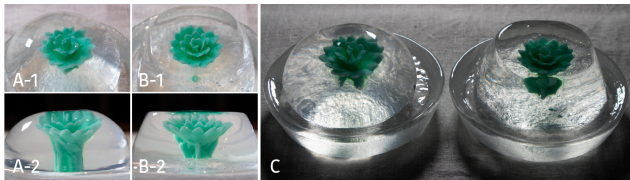


図 5 型の形状によるゼリーの見え方の違い. (A) 球状の型, (B) 角型, (C) 集光の違い
 Fig. 5 The difference in the appearance of jellies depending on the shape of molds. (A) Spherical mold. (B) Square mold. (C) The difference in light collection.

ると同時に、切り込みの中に液体のカラーゼリーを注入できる。本研究では、3D プリント Stratasys Objet 260 Connex3 により花卉型ナイフを 3D プリントし、インクには生体適合材料である MED610 を用いた。

プリント材料. フラワーゼリーを 3D プリントするには、(1) ベースゼリー、(2) カラーゼリーという 2 種類のゼリーが必要である。

ベースゼリーに関しては、使用するゲル化剤によってゼリーの見た目や性質が大きく異なる。図 4 に示す 3 つのゼリーは、200 ml の水に 7 g のアガー、7 g のゼラチン、2 g の寒天をそれぞれ加えて作ったものである。寒天を使った場合は白濁し、食感はかたくてもろい。ゼラチンを使うと少し黄みがかかった色になり、常温で溶けるためプリント中に変形する可能性がある。アガーを使用したゼリーの透明度が最も高く、常温でも溶けない。また弾力があるためナイフを挿入しても割れにくいので、本研究ではベースゼリーのゲル化剤としてアガーを選択した。本研究で作成したゼリーのレシピは付録 A.1 に示している。

また、図 5 に示すように、ベースゼリーを入れる型の形状によって屈折の仕方が異なるため中の花のゼリーの見え方が異なる。球状の型を使うと花卉が広がって見えるのに対して、角型を用いると歪むことなくそのままの形状を見ることができる。さらに、図 5(C) のように、角型では光が一様に入っているのに対し、球状の型では光が中心に集まり、立体感のある見え方になる。

カラーゼリーの粘性. カラーゼリーの粘性はフラワーゼリーの仕上がりに大きな影響を与える。本稿では粘度とインクの温度の関係、プリントした花卉の様子を調査した。図 6 を見ると、30°C の場合は花卉を綺麗にプリントでき

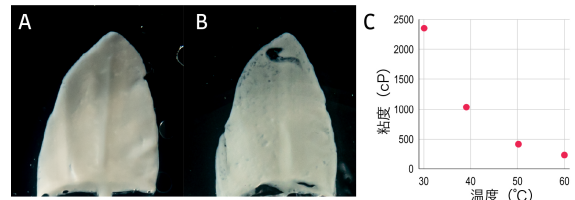


図 6 カラーゼリーの粘度. (A) 30°C の場合は花卉部分が綺麗にプリントできている、(B) 60°C の場合は小さな穴があいている、(C) カラーゼリーの粘度と温度の関係 (文献 [1] より改変)
 Fig. 6 Viscosity of colored jelly. (A) No gaps in the final look of the petal at 30°C. (B) A lack of uniformity at 60°C. (C) The relationship between viscosity and temperature of colored jelly (modified from Ref. [1]).

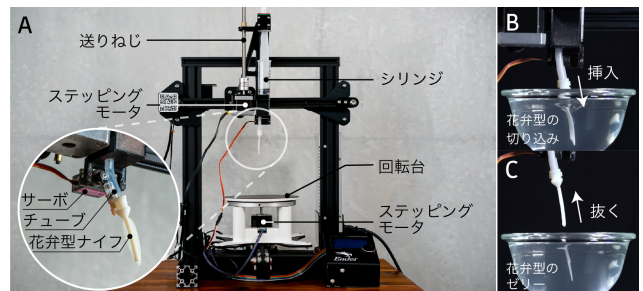


図 7 (A) 本研究で制作したフード 3D プリント. (B-C) スリットインジェクションプリンティングの工程 (文献 [1] より改変)
 Fig. 7 (A) The overview of the proposed printer. (B-C) The slit injection process (modified from Ref. [1]).

ているが、60°C の場合は小さな穴がいくつもあいていることが分かる。よって、30°C がカラーゼリーの適切な温度であることが分かった。

3.3 スリットインジェクションプリンタによる造形工程

プリンタによる造形工程では、固まったベースゼリーに固まる前のカラーゼリーを花卉型ナイフを使って注入する。冷えたベースゼリーに注入後カラーゼリーは固まるため、別のゼリーでふさぐような後処理は必要ない。カスタマイズした形状の花卉型ナイフによって様々な形のフラワーゼリーの造形を実現すると同時に、モータ駆動の回転台によって回転対称な構造を簡単にプリントできるようにした (図 7)。

ペストエクストルーダ. リニアガイドと送りねじを用いた機構によりステッピングモータ (Nema 17) の回転運動を直線運動に変換し、シリンジ (TELMO 30 ml) 中のペストを押し出すエクストルーダを実装した。さらに、シリンジとナイフをシリコンチューブで接続し、サーボモータ (MG90S) によって先端に取り付けた花卉型ナイフの挿入角度を制御できるようにした。

モータ駆動の回転台. メインボード (SKR v1.4) からステッピングモータを制御して台を回転できるようにした。台の表面には滑り止めシールを貼り、上にのせた容器が滑

り落ちないように工夫した。

パス生成アルゴリズム. デザインされた花の構造をプリンタの経路に変換し、G-code ファイルを出力するアルゴリズムを実装した。

ナイフの傾斜. サーボモータを制御して花卉型ナイフを設計ソフトウェアで指定した花卉の傾斜角度まで動かす。

開始位置. 図 8 のように、ナイフを挿入する開始位置 (x_{start}, z_{start}) は花卉の根元の部分の座標に対応するため以下の式で表せる。

$$\begin{pmatrix} x_{start} \\ z_{start} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 + r - (l_{tube} + l_{petal}) \sin \theta_{tilt} \\ z_0 - (l_{tube} + l_{petal})(1 - \cos \theta_{tilt}) \end{pmatrix}$$

ナイフの挿入. ナイフの挿入時の相対座標は傾斜角度 (θ_{tilt}) と花卉の長さ (l_{petal}) で決まるため、以下の式で表せる。

$$(\Delta x_{insert}, \Delta z_{insert}) = (l_{petal} \sin \theta_{tilt}, -l_{petal} \cos \theta_{tilt})$$

カラーゼリーの注入とナイフの抜き出し. ナイフをベースゼリーから抜くと同時にカラーゼリーをベースゼリーの中に注入する。このとき注入する量は花卉の体積 (V_{petal}) から算出し、さらにそれをシリンジを押し出す長さに変換する。

$$l_{extrusion}(\text{mm}) = V_{petal}(\text{mm}^3) \cdot \frac{1}{1000} \cdot a(\text{mm/mL}) \cdot 1.2$$

ただし、 a はカラーゼリーの流出量に対するシリンジの押し出し長さの割合である。また、ナイフを抜く際に注入したカラーゼリーがベースゼリーの上に出てしまう場合がある。少量出てきても花びらに穴ができないように、算出された押し出し長さの値を 1.2 倍して注入している。

ゼリーの回転. まず、各層のプリント動作に入る前に指定された回転角度 (θ_{rotate}) まで回転させる。次にそれぞれの花卉のプリント動作が終わるたびに、各層の花弁の枚数から算出される花弁間の角度 $(\frac{360^\circ}{n})$ だけ回転させる。

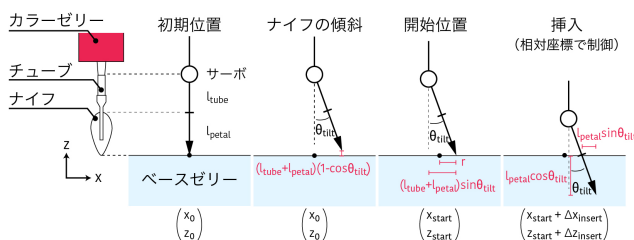


図 8 プリント時の動作 (文献 [1] より改変)

Fig. 8 Printing motions (modified from Ref. [1]).

さらに、それぞれの層のプリントが終わると初期位置に戻すために指定された回転角度だけ逆向きに回転させる $(-\theta_{rotate})$ 。

4. 制作例

ライブラリを活用することで様々な形状のフラワーゼリーを作ることができる (図 9)。本稿ではカラーゼリーの着色作業は手作業で行ったため、色の表現はプリンタではなくユーザに依存する。また、図 1(C) のように複数の花を 1 つのベースゼリーの内部に配置する場合は、それぞれの花をプリントするたびに容器の中心を移動させて作る。複数種類のナイフを用いる場合はそれぞれ別に G-code を出力し、順番にプリントしていくことでマーガレットのような花を表現することができる (図 9(E), (F))。

幾何学図形. 注入針を使えば点描画のようにして図形や文字を描くことも可能である (図 9(G))。また、長方形のナイフを並行に差し込むことでキューブのような幾何学図形も表現できる (図 9(H))。花以外の形状のプリントについてはさらなる研究が必要である。

5. ユーザスタディ

5.1 プリンタを用いたフラワーゼリーの制作工程におけるユーザ体験と使いやすさに関する調査

5.1.1 概要

設計ソフトウェアとプリンタを用いたフラワーゼリーの制作工程について評価を行うために、ユーザスタディを実施した。8 人の参加者 (男性: 3 人, 女性: 5 人, 年齢: 21–39 歳) のうち、4 人はフラワーゼリーを作ったことがないが CAD や 3D プリンタの経験はある。1 人はフラワーゼリーを作ったことがあり、CAD や 3D プリンタも数回使用したことがある。残りの 3 人はフラワーゼリーの技術には熟練しているが CAD や 3D プリンタを使ったことはない。参加者を初心者グループ (前半の 4 人: P1–4) と経験者グループ (後半の 4 人: P5–8) の 2 つに分けてそれぞれ実験を実施した。この実験は東京大学の倫理審査で承認されている。

COVID-19 の感染対策のため、参加者の体温が 37.0°C 以下であること、すべての機器が事前に消毒されていることを確認した。また、経験者グループは実験中に手作業で作る工程を省略し、代わりにふだんの作製工程に関してインタビューを行うことで物理的な接触を最小限にした。

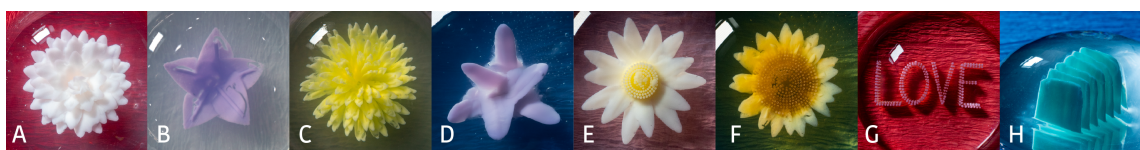


図 9 制作例 (文献 [1] より改変)

Fig. 9 Demonstrations of several printed patterns (modified from Ref. [1]).

表 1 アンケートの質問項目 (文献 [1] より改変)

Table 1 Survey questionnaire (modified from Ref. [1]).

ユーザ体験	
Q1. [見た目]	完成したフラワーゼリーの見た目は目標に近かった
Q2. [難易度]	フラワーゼリーの作製は技術的に難しかった
Q3. [ストレス]	フラワーゼリーの作製中に精神的なストレスを感じた
Q4. [やりがい]	フラワーゼリーの作製過程はやりがいがあった
Q5. [個性]	作製されたフラワーゼリーは自分だけの特別なものだと感じた
フラワーゼリープリンタの使いやすさ	
Q6. [直感的なデザイン]	ソフトウェアのインターフェースは直感的に理解しやすかった
Q7. [ソフトウェアの機能]	ソフトウェアのインターフェースにはデザインに必要な機能が揃っている
Q8. [ハードウェアの機能]	プリンタにはフラワーゼリーの作製に必要な機能が揃っている

初心者グループ (4 時間のセッション)

1. 手作業

- (1) フラワーゼリーの作り方を学ぶ.
- (2) ダリアの写真を見ながら、手作業でゼリーを作る.
- (3) 手作業での作製に関するアンケートに回答する.

2. フラワーゼリープリンタを用いたデザインと作製

- (1) ソフトウェアを使って好みのダリアのデザインを行う.
- (2) 完成したデザインを出力しプリントする.
- (3) プリンタを用いた作製に関するアンケートに回答する.
- (4) アンケートを用いた半構造インタビューに回答する.

経験者グループ (2 時間のセッション)

1. 手作業 (アンケートのみ)

- (1) ふだんの作製工程に関してアンケートに回答する.

2. フラワーゼリープリンタを用いたデザインと作製

- (1) 図 9 の (A)-(D) のなかから好きな花を選びソフトウェアを使ってデザインする.
- (2) 完成したデザインを出力しプリントする.
- (3) プリンタを用いた作製に関するアンケートに回答する.
- (4) アンケートを用いた半構造インタビューに回答する.

アンケートはユーザ体験に関する質問と、フラワーゼリープリンタの使いやすさに関する質問の 2 種類に分かれている。合計 8 個の質問項目 (表 1) のうち、前半 5 個は手作業とプリンタによる作製の両方について質問し、残りの 3 個はプリンタによる作製のみについて質問した。参加者は 5 点満点で評価し回答した (1. 「とてもそう思わない」、3. 「どちらでもない」、5. 「とてもそう思う」)。

5.1.2 結果

図 10 に表 1 の質問事項に対する (A) 初心者グループと (B) 経験者グループのそれぞれの平均点を示す ($n = 4$)。なお、初心者グループと経験者グループのそれぞれについて、Q1 から Q5 に対して Wilcoxon signed-rank test の片側検定を行ったが、 $p < 0.05$ で有意差は見いだせなかった。これは、実験参加者の人数が集められずサンプルサイズが不足したからだと考えられる。しかし平均値を使った評価には一定の価値があると判断したため、以下で議論する。

Q1 [見た目] について、好みのダリアをデザインした初

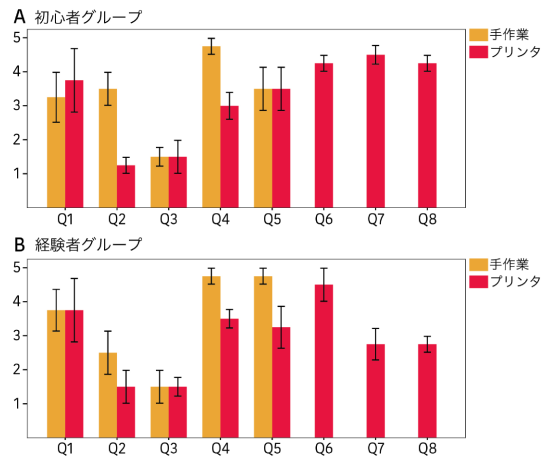


図 10 アンケートの平均点。(A) 初心者グループ、(B) 経験者グループ (文献 [1] より改変)

Fig. 10 The mean scores of the questionnaire for the (A) novice and (B) experienced groups (error bar: standard error σ/\sqrt{n} , $n = 4$ for each group) (modified from Ref. [1]).

心者グループの参加者は手作業に比べてプリンタを使用したときの方がゼリーの見た目が良く (3.25 から 3.75) 満足度が上がった。好きな花を選んだ経験者グループでは手作業とプリントした場合でゼリーの見た目に関する差分はほとんどなかった。また、Q2 [難易度] の点数から、両方のグループにおいてプリンタで制作した方が難易度は大きく下がっていることが分かる。

一方で、Q4 [やりがい] と Q5 [個性] の結果をみると、デジタルなプリント工程の方が楽しさや満足感が少ないと分かる。印刷されたフラワーゼリーは、作り手の個性が感じられないという意見もあった。

提案手法の使いやすさに関する質問 (Q6-8) では、初心者グループは全体的に分かりやすく、必要な機能が十分に備わっていると感じ、平均で 4.0 以上の点数となった。しかし、経験者グループはシステムの操作はわかりやすいと評価したものの、デザインに必要な機能が備わっているかという質問 (Q7, 8) についてはどちらも 2.75 という低い点数をつけ、改善案として、(1) 花と一緒に文字を入れられる、(2) 花卉を非対称に配置できる、(3) プリント中に色を変えられる、(4) ナイフの形をプリント中に変えられる、などをあげた。

また、経験者グループがプリンタを用いて作製したフラワーゼリーの結果を図 11 に示す。特に P6 に関しては花卉に加えて葉もデザインしたため、紫色で花卉のプリントをした後にシリンジを交換し緑色のゼリーで葉のプリントを行った、このとき花卉と葉の挿入角度の差 (15°) が小さかったため色が混ざり合ってしまった。P7 と P8 は花の色を作る際に、茶色の色素を混ぜることで彩度を下げるとい、直感に反するような工夫を取り入れて混色を行っていた。

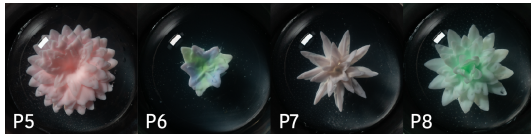


図 11 経験者グループがプリンタを用いて作製したフラワーゼリー
 Fig. 11 Jellies made by experienced group with our system.

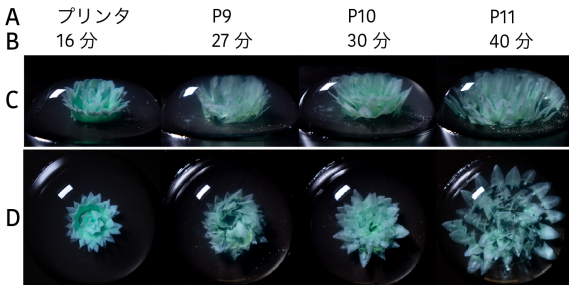


図 12 プリンタで作製したゼリーと手作業で作製したゼリーの比較。
 (A) 制作者, (B) 作業時間, (C-D) 完成したゼリー
 Fig. 12 Printer-created and manually-created jellies. (A) Creators. (B) Completion time. (C-D) Jellies.

5.2 自動化による作業負担軽減の効果に関する調査

5.2.1 概要

自動化による作業負担軽減の効果を評価するために、初心者が手作業でフラワーゼリーを作った場合と、フラワーゼリープリンタで制作した場合の作業時間と造形完成度を比較した。実験では、参加者 (P9~11) がフラワーゼリープリンタの設計ソフトウェア上のダリアを見ながらフラワーゼリーを作るのにかかる作業時間を測定し、完成したゼリーを撮影した。3人の参加者 (男性: 1人, 女性: 2人, 年齢: 28-52歳) はフラワーゼリーを作ったことがなかった。また、同じダリアをプリンタで制作する際も同様に作業時間を測定し、完成したゼリーを撮影した。

5.2.2 結果

図 12 にプリンタで制作したゼリーと参加者が制作したゼリーを示す。まず、作業時間はプリンタで制作した場合が最も短かった。プリンタと手作業で大きく異なったのは次の花びらをどこに挿入するか考える時間である。手作業の場合は制作中にゼリーを裏側から見て現状を把握し、次はどの場所にどの角度で花びらを配置すればいいのか考える時間が必要になる。プリンタの場合は設計ソフトウェア上でデザインが完成しており、最初から最後まで連続して動くため、作業時間が短かった。

次に、造形完成度については、P9~11の制作したフラワーゼリーに比べてプリンタで制作したゼリーの方が花びらが等間隔で同心円状に並んでいることが分かる。ただし、プリンタで制作したゼリーにも等間隔でない箇所が見受けられる。これは挿入時にナイフによって切り込みが入る前に弾力のあるベースゼリーが変形し、挿入開始位置がずれるためである。改善するためにはナイフの厚みをより

薄くして挿入時の抵抗を減らす工夫が必要である。

6. 議論

ここでは、1章で述べた2つの目標「作業の単純化」と「自由度の高いデザイン」についてユーザスタディの結果をもとに議論を行う。まず、「作業の単純化」に関しては、初心者はプリンタを使ってより簡単かつ正確にフラワーゼリーを作製できるようになった。P3は、「花卉を同心円状に等間隔に配置しようとしたときに手作業で行うのは難しかった」と述べ、さらにこのような作業に関してP2は「手作業では、新しい花卉を作るたびにゼリーを持ち上げて底から見た目を確認する必要があった」と報告した。

次に「デザインの自由度を高める」観点については、設計ソフトウェアを用いて、ゼリーを作る前にデザインをプレビューしたり、試行錯誤したりできるようになったことで、参加者は理想の形により近いフラワーゼリーを作ることができた (P1:「プリントを始める前に全体の構造を簡単に確認できたので、より正確な形状を作ることができた」)。経験者のなかでも花卉型ナイフを自分で制作する人の場合、手作業では薄い金属板を切って針を接着してナイフを作る。しかし、そのナイフを使ってフラワーゼリーを作製した後に、想像していた形状とは違うことに気づき、ナイフを作り直す場合がある。そのため、設計ソフトウェアはプリンタを使わないときにも役立つという意見があった (P7:「ソフトウェアでたくさんのデザインパターンを試すことができるのは役に立つ。手作業でフラワーゼリーを作るときにもこのソフトウェアは使えると思う」)。

しかし、3Dプリンタの利便性と引き換えに、手作業の工程や完成したフラワーゼリーへの楽しさが減少したと多くの参加者が指摘した。これは人の作業がプリンタに代替されたことから生じると考えられる。P4は「手作業だと失敗できないので、最後までやりとげたときはむしろ楽しかった」と述べた。プリンタによって人間のミスがなくなることで、作業のリスクが減り簡単になりすぎた可能性がある。

また、制作過程の自動化によって完成した作品とのつながりが減ったと指摘する経験者もいた。P8は「ゼリーをデザインしたのは自分だが、プリントされたものは何度でもコピーできるので、自分の作品に対する愛着がなくなってしまう」と指摘した。特に、デザインした人の技術が制作工程で必要ではない場合、簡単に複製できてしまうので作品への思い入れが減ってしまう。機械が人の手に替わる状況において、これは一般的な問題である。自動化された工程を作り手にとってより楽しく特別なものにするのは今後の課題である。

7. まとめと展望

本稿では、試行錯誤しながらデザインできる設計ソフト

ウェアを実装し、柔らかくて崩れやすいゼリーのプリントを実現するため、スリットインジェクション技術を導入した新しいフード3Dプリンタを開発した。さらにこのプリンタを用いて様々な種類のゼリーを造形できることを示し、ユーザスタディを実施して初心者と経験者の両方に対する効果を評価した。

今後の発展には2つの方向性が考えられる。

1つ目は、表現できるデザインの自由度を高めるためのシステムの改良である。本研究では、ナイフの形状を4種類のパラメータにより決定したためシンプルな花卉を表現することはできたが、桜やコスモス、芍薬のように複雑な形状の花卉は現在のソフトウェアでデザインすることができない。ユーザが花卉の形状を自由にスケッチできるようなインタフェースに改良することで表現できる花の種類を増やすことができる。また、点描画のように花以外のプリントもできるように改良することで、様々な3次元のデザインをゼリーの中で表現できると考えられる。このようにソフトウェア側でできることの自由度を上げることでデザインする際の達成感を高め、手作業がないことにより失われた「やりがい」を増強できる可能性がある。

2つ目は、ゼリー以外の食品への応用である。現在は1種類のカラーゼリーと1種類のベースゼリーを使っているが、複数種類の食材を用いることでより複雑な表現を実現できると考えられる。色だけでなく、かたさや香りなどの違うゼリーを使えば、食べる場所によってまったく異なる食体験ができるような新しい食品をデザインできる可能性がある。特に、嚥下機能が低下した人のための食事では、誤嚥のリスクを低下させるためにゲルを使うことが多いため、提案するプリンタを用いることで嚥下調整食のデザインの自由度を高められる可能性がある。本研究によって、柔らかい食品のデザインと造形の可能性が広がることを願う。

謝辞 有用な提案とコメントをしてくれた皆様に謝辞を申し上げます。本研究はJST ERATO 川原万有情報網プロジェクト (JPMJER1501) の助成を受けて実施された。

参考文献

- [1] Miyatake, M., Narumi, K., Sekiya, Y. and Kawahara, Y.: Flower Jelly Printer: Slit Injection Printing for Parametrically Designed Flower Jelly, *Proc. 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '21*, ACM (2021).
- [2] Focus: 3D Food Printer – Focus – byFlow, available from (<https://www.3dbyflow.com/>) (accessed 2021-05-31).
- [3] NaturalMachines: Natural Machines – Foodini, available from (<https://www.naturalmachines.com/foodini>) (accessed 2021-05-31).
- [4] Mizrahi, M., Golan, A., Mizrahi, A.B., Gruber, R., Lachnise, A.Z. and Zoran, A.: Digital Gastronomy: Methods & Recipes for Hybrid Cooking, *Proc. 29th Annual Symposium on User Interface Software and Tech-*

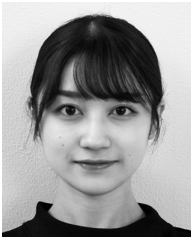
- nology*, pp.541–552, ACM (2016).
- [5] Zoran, A.: Cooking With Computers: The Vision of Digital Gastronomy, *Proc. IEEE*, Vol.107, pp.1467–1473 (2019).
- [6] Zoran, A. and Cohen, D.: Digital Konditorei: Programmable Taste Structures Using a Modular Mold, *Proc. 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.1–9, ACM (2018).
- [7] Lin, Y.-J., Punpongsonon, P., Wen, X., Iwai, D., Sato, K., Obrist, M. and Mueller, S.: FoodFab: Creating Food Perception Illusions Using Food 3D Printing, *Proc. 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.1–13, ACM (2020).
- [8] Wang, W., Yao, L., Zhang, T., Cheng, C.-Y., Levine, D. and Ishii, H.: Transformative Appetite: Shape-Changing Food Transforms from 2D to 3D by Water Interaction through Cooking, *Proc. 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.6123–6132, ACM (2017).
- [9] Lee, B., Hong, J., Surh, J. and Saakes, D.: Ori-Mandu: Korean Dumpling into Whatever Shape You Want, *Proc. 2017 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '17*, p.456, ACM (2017).
- [10] Tao, Y., Do, Y., Yang, H., Lee, Y.-C., Wang, G., Mondoa, C., Cui, J., Wang, W. and Yao, L.: Morphlour: Personalized Flour-Based Morphing Food Induced by Dehydration or Hydration Method, *Proc. 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.329–340, ACM (2019).
- [11] Fukuchi, K., Jo, K., Tomiyama, A. and Takao, S.: Laser Cooking: A Novel Culinary Technique for Dry Heating Using a Laser Cutter and Vision Technology, *Proc. ACM Multimedia 2012 Workshop on Multimedia for Cooking and Eating Activities, CEA '12*, pp.55–58, ACM (2012).
- [12] Hinton, T.J., Hudson, A., Pusch, K., Lee, A. and Feinberg, A.W.: 3D Printing PDMS Elastomer in a Hydrophilic Support Bath via Freeform Reversible Embedding, *ACS Biomaterials Science & Engineering*, Vol.2, No.10, pp.1781–1786 (2016).
- [13] Self-AssemblyLab: Rapid Liquid Printing – Self-Assembly Lab, available from (<https://selfassemblylab.mit.edu/rapid-liquid-printing>) (accessed 2021-05-31).
- [14] 大和田茂:ゼリープリンター, コンピュータ ソフトウェア, Vol.23, No.4 (2006).

付 録

A.1 本研究で作成したゼリーのレシピ

ベースゼリー. まず 370 ml の水を鍋に入れて加熱する。沸騰直前になったら弱火にし 14 g のアガーと 60 g の砂糖を入れて溶けるまで混ぜる。完全に溶けたら 15 ml のシロップを混ぜて好みの味と香りをつける。型に均等に注ぎ、冷蔵庫で 2 時間冷やす。

カラーゼリー. まず 200 ml の牛乳を鍋に入れて加熱する。沸騰直前になったら弱火にし 3 g のアガーと 6 g のゼラチン, 50 g の砂糖を混ぜて溶かす。完全に溶けたら容器に移し、着色料を加えて好みの色になるまで調整する。30°C に設定した恒温槽に入れる。



宮武 茉子 (学生会員)

2020年東京大学工学部電子情報工学科卒業。現在、同大学大学院工学系研究科電気系工学専攻修士課程在学中。



鳴海 紘也 (正会員)

2020年東京大学大学院情報理工学系研究科博士後期課程修了。2020年同大学助教。2021年同大学特任講師。



関谷 勇司 (正会員)

2005年慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科後期博士課程修了。2002年東京大学情報基盤センター助手。2008年同センター講師。2011年同センター准教授。2019年同大学教授。



川原 圭博 (正会員)

2005年東京大学大学院情報理工学系研究科博士課程修了。2005年東京大学助手。2010年同大学講師。2013年同大学准教授。2019年同大学教授。2018年情報処理学会理事。