

スリットインジェクションプリンティングを用いたフラワーゼリーの自動造形

宮武 茉莉* 鳴海 紘也* 関谷 勇司* 川原 圭博*

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者を惹きつける。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、それを用いたフラワーゼリーの自動造形を提案する。本研究で実装した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、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確認し、柔らかく崩れやすいゼリーに適した新しいフード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形状のゼリーを造形できることを示した。

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幅を広げることを目的とする。

一般に、パティシエが行う手作業での調理工程では、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。

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ことができる。
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. ソフトウェアを使って試行錯誤することにより納得いくまでデザインをやり直すことができる。

デジタルファブリケーションツールはすでに様々な食品の調理工程に導入されているが、全ての食品に適用できるわけではない。例えば、熱したノズルから

押し出されるとすぐに室温で固まるチョコレートなどの3Dプリント [7] などはすでに存在するが、ハイドロゲル (ゼラチンやアガーなど) を使った食品は冷えて固まるまでに時間がかかるため、Fused Deposition Modeling (FDM) などを用いた既存のフード3Dプリンタではプリント中に形が崩れてしまう。

そこで、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、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と、それ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。本論文では、実際にこのプリンタを用いることで、数枚の花弁からなるシンプルな花から複数の層の花弁が重なっているような複雑な花まで、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。

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材料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

Copyright is held by the author(s). This paper is non-refereed and non-archival. Hence it may later appear in any journals, conferences, symposia, etc.

* 東京大学



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) 複数種類の花がプリントされたゼリーケーキ. (d) メッセージ. (e) 設計ソフトウェアによるダリアのプレビュー画面.

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。中でもフード 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 [1, 2, 4]。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 [10, 13, 14]。

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 [9] や、水に浸けると立体形状に変化する可食シート [12] などがあげられる。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のには適さない。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 [10] や 3D プリントした治具や抜き型 [8, 11]、レーザー加工機 [5] 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のには適していない。

そこで本研究では、フラワーゼリーの 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という技術を確認し、これを用いた新しいフード 3D 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物体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。例えば、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 [6] が存在する。また、Rapid Liquid Printing [3] 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、本論文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。

3 フラワーゼリーの造形工程

3.1 概要

本研究ではスリットインジェクションプリンティングを用いたフラワーゼリーの自動造形を提案する。制作する際の工程は次の 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。本章では各工程について詳細に述べる。

3.2 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ことで、その花に応じたデフォルトのパラメータが設定される。現在ライブラリにはダリア、キキョウ、菊、アリウムロゼウム、マーガレット、ひまわりの 6 種類が登録されている。

次に花卉の形状を設計する。(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卉から大きく丸みのある花卉まで様々な形状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する。

最後に、花の構造を設計する。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ので (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める。花びらが何層重なっているか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デザインすることができる。満足のいく設計ができたなら、プリンタに必要なパーツの STL ファイルと、フラワーゼリーを 3D プリントする際のパスが書かれた G-code ファイルを出力する。

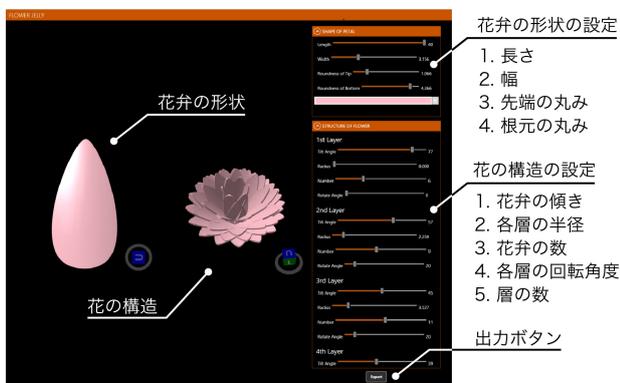


図 2. 設計ソフトウェア. 花弁の形状の 3D プレビュー (左). 花全体の 3D プレビュー (中央). 花弁の形状を設計するためのパラメータ (右上). 花の構造を設計するためのパラメータ (右下).

3.3 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、花卉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。

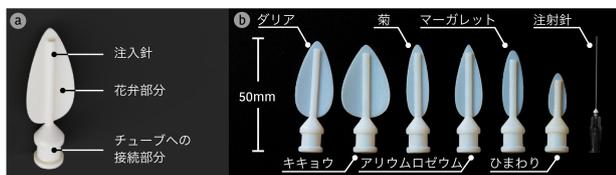


図 3. 花卉型ナイフ. (a) 花卉型の部分と注入針とチューブへの接続部分が一体化されている. (b) 3D プリントした様々な形状のナイフ.

花卉型ナイフ. 花卉型ナイフはユーザがデザインした花弁の形状の部分と注入針 (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). 花卉型ナイフはベースゼリーに切り込みを入れるだけではなく、切り込みの中にカラーゼリーを注入するという役割をもつ。本研究では、3D プリンタ Stratasys Objet 260 Connex3 に

より花卉型ナイフを 3D プリントした。インクには VeroWhite+ 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。

ベースゼリーは、パールアガーとフレーバーウォーター、砂糖を準備して以下のレシピで作る: まず 1L のフレーバーウォーターを鍋に入れて沸騰するまで加熱する。沸騰したら弱火にし 48g のアガーと 136g の砂糖を入れて溶けるまで混ぜる。完全に溶けたらガラス容器に均等に注ぎ、冷蔵庫で 2 時間冷やす。

カラーゼリーは、ジェリフ・ゼリエースの顆粒ゼラチンと牛乳, アガー, 砂糖, 着色料を準備して以下のレシピで作る: まず 400 ml の牛乳を鍋に入れて沸騰するまで加熱する。沸騰したら弱火にし 6g のアガーと 100g の砂糖を入れて溶けるまで混ぜる。完全に溶けたら 12g のゼラチンを入れて混ぜる。容器に移したら着色料を加えて好みの色になるように調整する。30°C に設定した恒温槽に入れる。

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、プリントした際の花弁の様子を調査した。図 4 からわかるように、30°C の場合は花弁を綺麗にプリントできているが、60°C の場合は小さな穴がいくつもあいていることがわかる。よって、30°C がカラーゼリーの適切な温度であることがわかった。

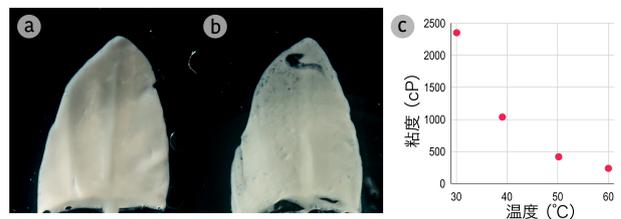


図 4. カラーゼリーの粘度. (a) 30°C の場合は花弁部分が綺麗にプリントできている. (b) 60°C の場合は小さな穴があいている. (c) カラーゼリーの粘度と温度の関係.

3.4 フード 3D プリンタによるプリント工程

印刷プロセスでは、カスタマイズした形状の花弁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。以下、プリンタ各部の詳細とプリント時のパスの生成について述べる。

3.4.1 スリットインジェクションプリンタ

市販されている安価な 3D プリンタ (Ender 3) に改良を加えて新しいフード 3D プリンタを制作した (図 5). 具体的にはペーストエクストルダを

取り付け、さらにその先端に花卉型ナイフを装着できるようにし、プリンタのベッド部分をモータ駆動の回転台に取り替えた。

ペー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) に入ったペーストを押し出すエクストルーダを実装した。さらに、先端に取り付ける花卉型ナイフの角度を自由に換えられるように、シリンジとナイフをシリコンチューブ (Leobro 4 mm*6 mm) で接続し、サーボモータ (MG90S) によって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. プリンタのメインボード (BigTreeTech SKR v1.4) から制御できるようにしたステッピングモータ (Nema 17) を使って台の部分を回転できるようにした。表面には滑り止めシールを貼ることで台の上のせた容器が滑り落ちないように工夫した。

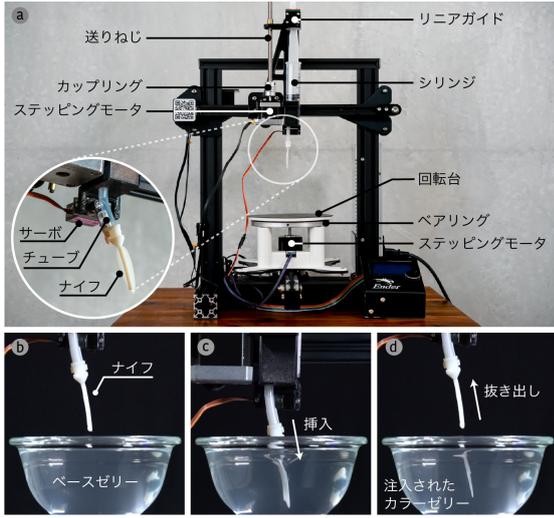


図 5. (a) 本研究で制作したフード 3D プリンタ. (b-d) スリットインジェクションプリンティングの工程. まずベースゼリーに切り込みを入れてその後ナイフを抜くと同時にカラーゼリーを注入する。

3.4.2 パス生成アルゴリズム

デザインされた花の構造をパスに変換し、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 M280 コマンドにより制御することで花卉型ナイフをデザインツールで指定した花卉の傾斜角度まで動かせるようにした。

開始位置. 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、図 6 より以下の式で表せる。

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

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}) によって決まるので、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。この時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、ナイフをベースゼリーから抜く際に少量のカラーゼリーが出てきてしまうので算出された値を 1.2 倍している。

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}) まで回転する。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 $(\frac{360^\circ}{n})$ だけ回転する。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する $(-\theta_{rotate})$ 。

Algorithm 1 パス生成アルゴリズム

Require: $x_0, y_0, z_0, r, n, \theta_{tilt}, \theta_{rotate}, l_{tube}, l_{petal}, V_{petal}$

- 1: $l_{extrusion} \leftarrow \text{CalculateExtrusion}(V_{petal})$
- 2: $flj \leftarrow \text{FlowerJelly}(x_0, y_0, z_0, l_{tube})$
- 3: **for** layer **do**
- 4: $flj.\text{Initialize}()$
- 5: $flj.\text{Tilt}(\theta_{tilt})$
- 6: $flj.\text{StartPosition}(r, \theta_{tilt}, l_{petal})$
- 7: $flj.\text{RotateBefore}(\theta_{rotate})$
- 8: **for** n **do**
- 9: $flj.\text{Petal}(\theta_{tilt}, l_{petal}, l_{extrusion})$
- 10: $flj.\text{Rotate}(n)$
- 11: $flj.\text{RotateAfter}(\theta_{rotate})$

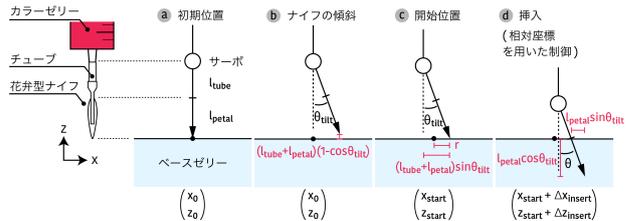


図 6. プリント時の動作. (a) 初期位置. (b) ナイフの傾斜. (c) 挿入の開始位置. (d) 挿入時の位置。

4 制作例

花卉	デザイン	結果
a ダリア 長さ: 40mm 幅: 3.2 先端の丸み: 1.1 根元の丸み: 4.4		
b キキョウ 長さ: 38mm 幅: 6.5 先端の丸み: 0.5 根元の丸み: 2.8		
c 菊 長さ: 38mm 幅: 2.4 先端の丸み: 1.4 根元の丸み: 3.1		
d アリウムロゼウム 長さ: 38mm 幅: 3.4 先端の丸み: 0.6 根元の丸み: 3.1		
e マーガレット 長さ: 35mm 幅: 1.9 先端の丸み: 1.8 根元の丸み: 3.5		
f ひまわり 長さ: 23mm 幅: 1.8 先端の丸み: 1.2 根元の丸み: 3.5		
g メッセージ 長さ: 25mm 半径: 0.4mm (注射針)		
h キューブ 長さ: 24mm 幅: 20mm		

図 7. 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。デフォルトのパラメータを用いた際の作例を図 7 に示す。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ーに依存する。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 7 (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 7 (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表現こともできる (図 7 (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 今後の課題

本稿では、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、芍薬のような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ーフェースに改良することで花卉の表現の幅が広がる可能性がある。

デジタル設計ツールでは設定されたパラメータから算出された完成形をプレビューできるようにしたが、その他の幾何学的な性質を算出することもできる。この特徴を活かせばデザインしたフラワーゼリーに対応したレシピのような、制作過程に必要な情報をユーザに与えることができる。例えば着色する際に使用する着色料とその配合を計算するようなシステムを実装すれば、設計ツールで指定した色を初心者でも簡単にゼリーの着色時に再現できる可能性がある。

1 つのフラワーゼリーを制作する場合だけでなく、大量生産する場合にもスリットインジェクションプリンティング技術を活用できると考えられる。現在フラワーゼリーを自動で作る工業用の機械はない上に、手作業で作るにはかなりの時間と手間がかかるので市販されていることはほとんどなく、売られていても高価である。より多くの人々がフラワーゼリーを楽しめるようにするには、大量生産できるようにプリンタの機構を改良する必要がある。

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、複数種類のゼリー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。さらに、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全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。

6 結論

本稿では、スリットインジェクションプリンティングによるフラワーゼリーの自動造形を提案した。ユーザがプレビュー画面を見ながらパラメータを調整することで花の形状をデザインできる設計ソフトウェアを実装した。また、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に、ベースゼリーの中にカラーゼリーを注入するという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た。本研究によって、フラワーゼリーのような美しいデザートを作る楽しみをより多くの人々が体験できること、そ

し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

本研究は JST ERATO 川原万有情報網プロジェクト (JPMJER1501) の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] byFlow, 2015. <https://www.3dbyflow.com/>.
- [2] Foodini, 2015. <https://www.naturalmachines.com/foodini>.
- [3] Rapid Liquid Printing, 2017. <https://selfassemblylab.mit.edu/rapid-liquid-printing>.
- [4] Mycusini, 2019. <https://mycusini.com/>.
- [5] K. Fukuchi, K. Jo, A. Tomiyama, and S. Takao. Laser Cooking: A Novel Culinary Technique for Dry Heating Using a Laser Cutter and Vision Technology. In *Proceedings of the ACM Multimedia 2012 Workshop on Multimedia for Cooking and Eating Activities*, CEA '12, p. 5558, New York, NY, USA, 2012. Association for Computing Machinery.
- [6] T. J. Hinton, A. Hudson, K. Pusch, A. Lee, and A. W. Feinberg. 3D Printing PDMS Elastomer in a Hydrophilic Support Bath via Freeform Reversible Embedding. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 2(10):1781–1786, 2016. PMID: 27747289.
- [7] M. Lanaro, D. P. Forrestal, S. Scheurer, D. J. Slinger, S. Liao, S. K. Powell, and M. A. Woodruff. 3D printing complex chocolate objects: Platform design, optimization and evaluation. *Journal of Food Engineering*, 215:13 – 22, 2017.
- [8] B. Lee, J. Hong, J. Surh, and D. Saakes. Ori-Mandu: Korean Dumpling into Whatever Shape You Want. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '17, p. 456, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [9] Y.-J. Lin, P. Punpongsanon, X. Wen, D. Iwai, K. Sato, M. Obrist, and S. Mueller. FoodFab: Creating Food Perception Illusions Using Food 3D Printing. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, p. 113, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [10] M. Mizrahi, A. Golan, A. B. Mizrahi, R. Gruber, A. Z. Lachnise, and A. Zoran. Digital Gastronomy: Methods & Recipes for Hybrid Cooking. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, p. 541552, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [11] Y. Tao, Y. Do, H. Yang, Y.-C. Lee, G. Wang, C. Mondoa, J. Cui, W. Wang, and L. Yao. Morphlour: Personalized Flour-Based Morphing Food Induced by Dehydration or Hydration Method. In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '19, p. 329340, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [12] W. Wang, L. Yao, T. Zhang, C.-Y. Cheng, D. Levine, and H. Ishii. Transformative Appetite: Shape-Changing Food Transforms from 2D to 3D by Water Interaction through Cooking. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, p. 61236132, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [13] A. Zoran. Cooking With Computers: The Vision of Digital Gastronomy. *Proceedings of the IEEE*, 107:1467–1473, 08 2019.
- [14] A. Zoran and D. Cohen. Digital Konditorei: Programmable Taste Structures Using a Modular Mold. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, p. 19, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.