

ProtoMold：形状が変化する型と真空成形による 素材再利用可能な高速プロトタイピング

山岡 潤一^{1,a)} 笥 康明^{1,b)}

受付日 2018年4月20日, 採録日 2018年7月10日

概要：近年普及している一般的な 3D プリンタなどのデジタルファブリケーションツールは、造形に時間がかかり、材料は使い捨てである。そこで高速かつやり直し可能な真空成形法と動的なピンディスプレイを組み合わせた ProtoMold を提案する。ユーザは、ジェスチャ入力や深度スキャナなどを用いて、ピンディスプレイを制御し型を設計する。型の設計後、樹脂板を加熱し軟化させ、吸引することで瞬時に型に定着させる。完成後、樹脂板を再度加熱することで平らな状態に戻り、材料を再利用できる。本装置を用いることで、日々の食材の形に応じたトレイを作り直せるため、輸送や材料コストの削減につながる。さらに表面に印刷加工することでお面や立体地図、導電性インクを用いた回路を含めた試作ができる。本稿では、ProtoMold の設計と実装、応用事例、ユーザスタディ、および今後の展望について述べる。

キーワード：デジタルファブリケーション、デザイン手法、創作支援

ProtoMold: Reusable Rapid Prototyping Using Shape Changing Mold and Vacuum Forming

JUNICHI YAMAOKA^{1,a)} YASUAKI KAKEHI^{1,b)}

Received: April 20, 2018, Accepted: July 10, 2018

Abstract: A current digital fabrication tool such as a 3D printer which has become popular, however it takes time to create objects and the material is disposable. Therefore, we propose ProtoMold that combines vacuum forming and dynamic shape-changing surface. The user designs a mold by controlling a pin display using a gesture input and a depth scanner. After designing the mold, the tool heats and vacuums the plastic sheet. After molding the objects, the user can reuse the material by re-heating the plastic sheet. By using ProtoMold, the user can re-create trays according to the shape of daily foods. This leads to reduction of transportation and materials cost. Furthermore, by printing techniques on the surface, it is possible to create a three dimensional map which has a texture on the surface and prototypes which has circuits with a conductive ink.

Keywords: digital fabrication, design methods, creative support

1. はじめに

近年、3D プリンタなどのデジタルファブリケーション技術の向上により、立体的なプロダクトの試作が普及し始めている。また設計や製造などの生産プロセスおよび教育分野や建築領域など多くの分野に影響を与えている [2]。し

かし、現在提案されている立体造形技術には、製造速度、インタフェース設計、および材料の再利用性に対して解決すべき課題がある。

1 つ目の課題として、造形速度の高速化があげられる。Mueller らは現在の 3D プリンタなどの立体造形手法は造形速度が遅く、試作回数の少なさが創作活動の制約であると指摘している [3]。そのため多くの研究者が、光造形を用いた造形手法や造形時の CNC の動きを高速化するソフトウェア [17] などを提案している。また、レーザカッタなど

¹ 東京大学大学院情報学環
The University of Tokyo, Bunkyo, Tokyo 113-0033, Japan
a) yamajun@iii.u-tokyo.ac.jp
b) kakehi@iii.u-tokyo.ac.jp

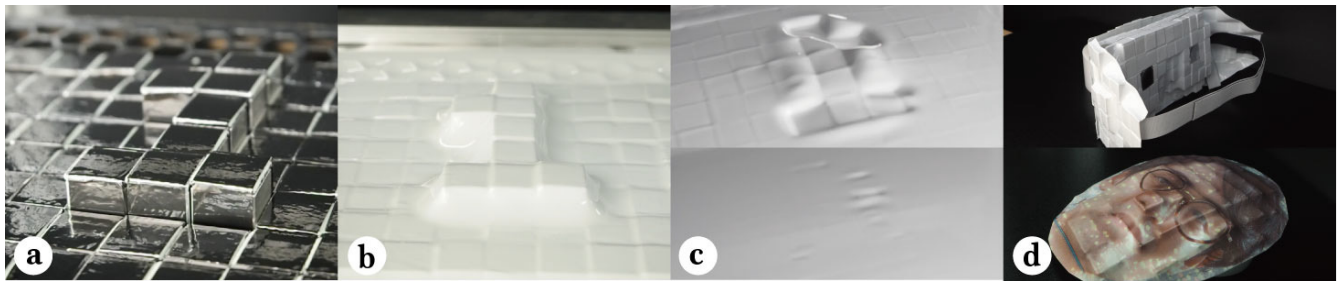


図 1 ProtoMold を用いた造形手順
 Fig. 1 Fabrication process using ProtoMold.

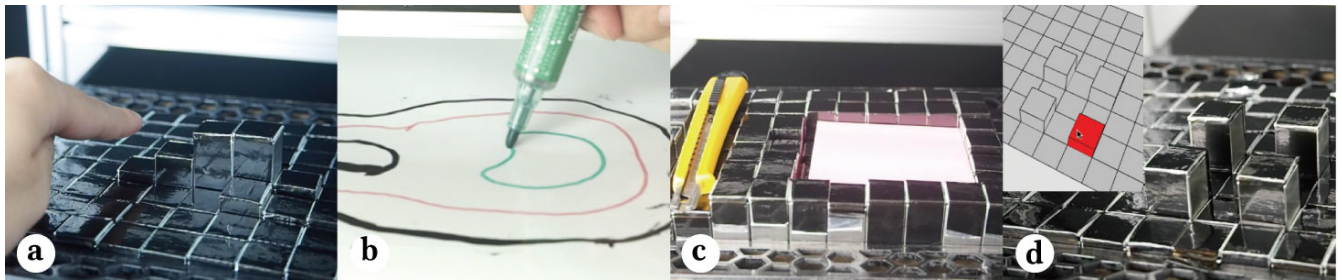


図 2 ProtoMold の設計手法
 Fig. 2 ProtoMold input methods.

の高速加工可能なデジタルファブリケーションツールを用いた、新しい造形手法も提案されている [4], [13].

2つ目の課題は、直感的な設計インタフェースの必要性である。Willis らは、一般的なデジタルファブリケーションツールを用いた制作環境では、CAD などの設計ソフトウェアを用いた設計工程と工作機械を用いた造形工程が分離されていて、ユーザは設計工程にしか介入できないと指摘している [5]。これは制作過程の中で自由に形を変更できる粘土細工のような手作業と比較して、ユーザの創作活動に対して制約であると考えられる。

3つ目の課題は、材料の再利用可能性である。これまで造形物を粉砕して材料に戻す装置 [6] などが提案されているが、3D プリンタの多くは一度造形したら、造形物は使い捨てるのが一般的である。すぐに造形物を再度材料に戻すことで、プロトタイピングの試行錯誤の回数を増やし、完成物の質が向上すると考えられる。

これらの課題を解決するため、本研究では、真空成形を用いた高速デジタルファブリケーションツール ProtoMold を提案する [1]。本システムは、96 個のリニアアクチュエータからなる動的なピンディスプレイと真空成型装置から構成され、半立体の造形物を高速に成形することができる (図 1 a)。また本システムは、成形物に再び張力と熱を加えることで平らになり、再整形することが可能である (図 1 b, c)。さらに本提案では、ProtoMold に最適な設計インタフェースとして、あらかじめ設計したモデルデータを読み込むだけでなく、指を用いたジェスチャ入力や実物体をスキャンし、ピンディスプレイの形状を直接制御する方法を開発した。

真空成形は、容器やお面などの半立体物を事前に用意した型を用いることで迅速に量産可能な技術である。本システムでは、動的な型を用いることで、真空成形の型製造の初期コストを低減し、材料を再利用することで、多様な種類のオブジェクトを試作することができる。さらに樹脂板にペンで直接設計図を描くことで凹凸を制御できるなど、ProtoMold ならではの設計手法を開発した。これにより容易に持ち運び可能な容器やお面などの半立体物を即興的に成形できる (図 1 d)。

本稿は、ProtoMold の設計と実装、および応用事例について述べる。さらにシステムの有用性を検証するために、ユーザ調査を実施し、本システムの評価と制約、および今後の展望について述べる。

2. ProtoMold を用いた造形手順

ProtoMold を用いた造形手順は、設計工程、成形工程、再利用工程の 3 つの工程に分けられる。ユーザは、設計工程と成形工程をシームレスに行き来しながら、成形を試行錯誤することができる。本章では、ProtoMold を用いた造形手順について述べる。

(1) 設計工程：ユーザは樹脂板を成形するための動的な型の形状をあらかじめ設計する必要がある。本研究では、動的な型の形状を設計するための 4 つの制御方法を開発した。ユーザの指の動きを用いたジェスチャ入力 (図 2 a)、ホワイトボードマーカで樹脂板に直接描画して設計する描画入力 (図 2 b)、深度カメラを用いたスキャン入力 (図 2 c)、コンピュータの画面上の仮想のピンを操作するソフトウェア入力 (図 2 d) である。

- (2) 素材選定：ユーザは、樹脂板の素材と厚みを選択する。
- (3) 印刷工程：成形前に、事前にインクジェットプリンタなどを用いて、樹脂板上に模様や回路を印刷できる。
- (4) 動的な型の変形：設計工程で制作した形状データに基づいて、ピンディスプレイの形状を変更する。
- (5) 真空成形の温度/時間設定：樹脂板を加熱する温度と時間を設定する。温度・時間設計に応じて、成形物の表面の曲率を変更できる。
- (6) 成形工程：樹脂板を加熱し軟化させた後、ピンディスプレイに押し当てながら吸引し、型の形状に成形する。
- (7) 再利用工程：再成形する際は、板を再度加熱して、最初の平らな状態に戻す必要がある。再成形を繰り返すことで、修正後の形状を素早く確認することができる。
- (8) 仕上げ工程：樹脂板の形状が確定したら、余白部分をハサミで取り除く、あるいはCNC制御されたホットカッタを用いて自動的に切断する。最終的に半立体の造形物が短時間で完成する。余白部分を取り除いた後、現状のシステムでは再度装置に戻して再利用することは難しい。

3. システム設計

3.1 ハードウェア設計

ProtoMold は、ヒータ部、ピンディスプレイ部、真空ユニット、深度カメラ、およびコンピュータで構成される(図 3)。本システムでは、樹脂板の加熱温度と加熱時間を設定可能な真空成形機 (V.former, ラヤマパック社製) を使用した。成形可能範囲は、縦 325 mm, 横 218 mm, 設定可能な温度は 70~200°C である。また使用可能な樹脂板

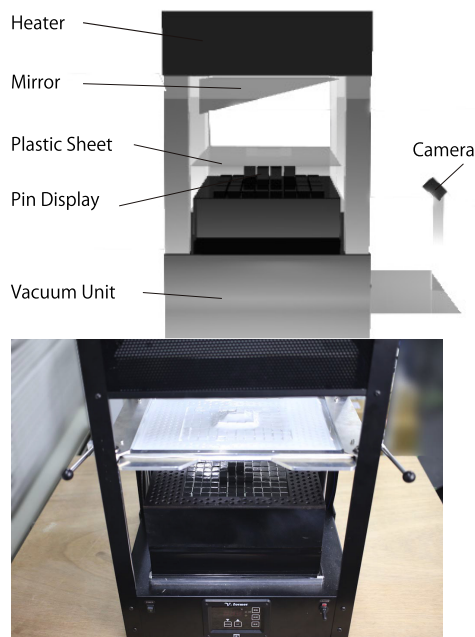


図 3 ProtoMold システム
Fig. 3 System design of ProtoMold.

の素材は、ポリ塩化ビニル (PVC) またはポリエチレンテレフタレート (PET) である。

ピンディスプレイ部は、96 個 (12×8 個) のリニアアクチュエータ (L12-1 Micro Linear Actuator, Actuonix Motion Devices 社製) から構成される。各アクチュエータの最大ストロークは 30 mm, 最大トルクは 12 N, 最高速度は 23 mm/s である。本装置は下部の真空ユニットで樹脂板を吸引する際にピンに力がかかるため、高トルクのギヤードリニアアクチュエータを選定した。各ピンの大きさは幅 16 mm, 長さは 18 mm である。さらに各ピンの表面に耐熱性のポリイミドフィルムを貼り付けた。

各アクチュエータの高さは、マイクロコンピュータから送信される PWM 信号によって制御される。今回、多数のアクチュエータを同時に駆動するために、8 台の Arduino Mega をシリアル通信でコンピュータに接続して制御する。

さらに指を用いたジェスチャ入力検知や、描画入力のための樹脂板に描画された線の検知、オブジェクトのスキャン入力のために、深度カメラ (Intel RealSense SR300, Intel 社製) を配置した。この深度カメラは、20~150 cm の範囲内の物体の位置および形状を検知できる。装置上部から画像を取得するため、図 8 のようにピンディスプレイの上部に鏡を 25° の角度で取り付ける。

3.2 ソフトウェア設計

ピンディスプレイの形状を制御するための専用のソフトウェアを Processing を用いて開発した。ユーザは、画面上の仮想のピンを選択して、キー入力でピンを上下することで型を作成できる(図 4)。画面上で仮想のピンを上下させると、対応した装置上の物理的なピンが移動し、ユーザは物理的なピンの形状をリアルタイムで確認することができる。このソフトウェア入力には 2 つの機能を用意した。1 つ目の機能では、ユーザは個別のピンを 1 つずつ上下できる。2 つ目の機能では、ユーザは複数のピンを同時に選択して上下移動できる。またユーザは、設計したモデルを保存し読み込みできる。

このようなソフトウェア上でのピンディスプレイ制御方法に加え、ジェスチャ入力や描画入力、スキャン入力など

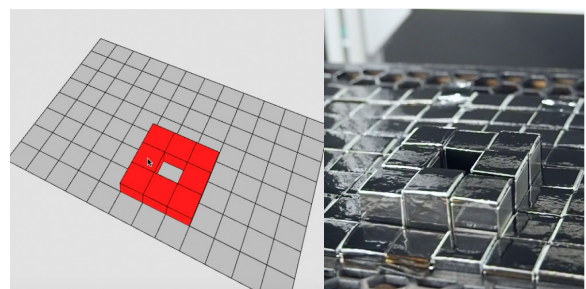


図 4 ソフトウェア入力
Fig. 4 Software input.

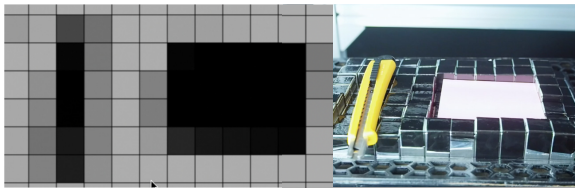


図 5 スキャン入力

Fig. 5 Scanning input.

直感的に型を設計するための入力方法をいくつか開発した。型の設計中に、ユーザは割り当てられたキーを入力することで、これらの入力方法を自由に切り替えることができる。

3.2.1 スキャン入力

ユーザがスキャンしたい実物体をピンディスプレイの上に置くことで、装置横に配置された深度カメラが実物体の形状をスキャンする。取得した深度情報はピン数に対応した 12×8 個の格子に平滑化され分割される (図 5)。各格子の深度情報に応じて、物理的なピンが上下して型の形状が変更される。またユーザは、顔の形状のスキャンするなど、深度カメラを取り外して対象物をスキャンすることができる。

3.2.2 ジェスチャ入力

inForm [17] などの従来の物理的なシェイプディスプレイでは、手や実物体などの形状をスキャンしてピンの形状を制御する手法が提案されている。本研究ではシェイプディスプレイの直感的な操作法を、デジタルファブ리케이션のための型の変形に応用した。ユーザは、指を各ピンの上で上下に動かすことで、各ピンの高さが指の位置まで動き、型を設計することができる。ユーザの指の位置は、OpenCV のフレーム間差分と肌色検出を用いてソフトウェア上で検知する。

3.2.3 描画入力

ユーザは、樹脂板の表面にホワイトボードマーカを用いて、型の輪郭を直接描画することで、型を設計できる。装置上部の深度カメラが描画線を検出し、描画線の輪郭内に位置するピンを持ち上げることで、型の形状を変更する。また描画線をホワイトボード用イレーザで消すことで、樹脂板を最初の平らな状態に戻すことができる。今回、描画線の色の違いによって、ピンの高さが変更されるようにした。本システムでは、黒を 10mm、赤を 20mm、緑を 30mm とした。このような描画入力は、たとえば地形や都市模型を設計する際に有用であり、ホワイトボードマーカと樹脂板を組み合わせて、直感的に試行錯誤を繰り返すことができる。

4. 製作例

本章では、ProtoMold を用いて製作可能な立体物と使用例について述べる。

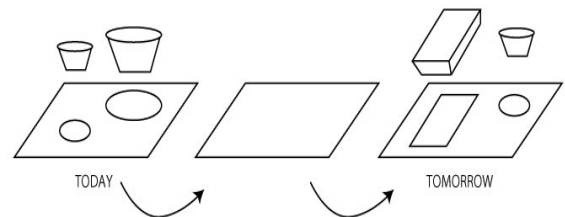


図 6 食品の形に合わせたトレイ

Fig. 6 The shape changing tray.

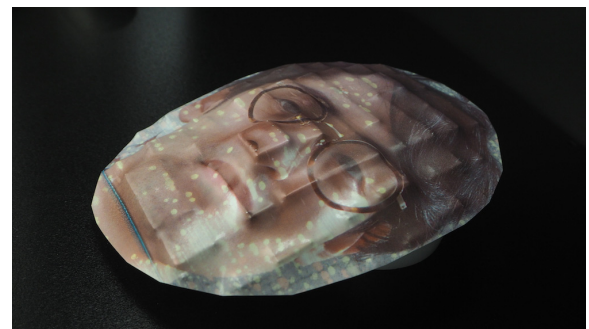


図 7 個々人の顔に合わせたお面

Fig. 7 Character masks.

4.1 食品の形に合わせたトレイ

ユーザの選んだ料理に応じて、それぞれの食品が適切に収納されるトレイを自動的に成形できる (図 6)。これはスキャン入力とソフトウェア入力を用いて作成する。まず食品と樹脂板をピンディスプレイの上に置き、上部に配置された深度カメラで食品の形状をスキャンする。形状データをソフトウェアに転送した後、形状データの高さを反転することで、それぞれの食品の窪みが配置されたトレイの形状が作成される。ユーザの日々の食事に応じて最適なトレイに瞬時に成形でき、使用後は平らな状態に戻して収納することができる。

4.2 個々人の顔に合わせたお面

一般的なお面は、金型を用いてプレス成形で大量生産される。一方、ProtoMold を用いることで、様々な形状のマスクを素早く作成することができる (図 7)。まず深度カメラを用いて、ユーザの顔の形状データと画像データを取得する。平らな樹脂板の表面にインクジェットプリンタを用いて顔の画像を印刷した後、樹脂板を顔の形状データを元に変形させる。たとえば展示会の会場で、来場者の顔に

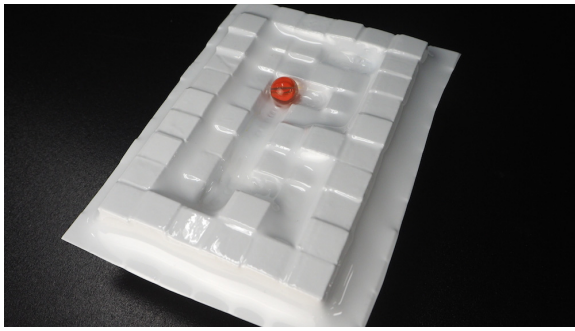


図 8 動的なパズルゲーム
Fig. 8 Dynamic maze puzzle.

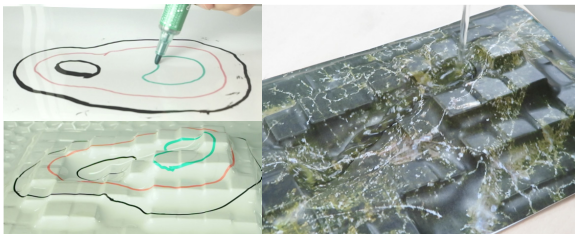


図 9 地形のシミュレーション
Fig. 9 Designing a landform.

合わせたお面を 3D プリンタで造形する場合は数時間待つ必要があるが、ProtoMold を用いることで、すぐにお面を成形して渡すことができる。

4.3 動的なパズルゲーム

ProtoMold を用いることで、ボール球を用いたパズルゲームの難易度を動的に変更することができる。1 枚の樹脂板からユーザの希望の難易度のステージに瞬時に変更できる。ユーザはソフトウェア上でステージを選択することで、ピンディスプレイが自動的に変形して、次のステージの形状に成形して遊ぶことができる (図 8)。ステージを変える際には、再度装置に樹脂板を戻し、再加熱・再成形する。

4.4 地形のシミュレーション

これまで、Tangible CityScape [7] など、ピンディスプレイを用いて地形を物理的にシミュレーションする方法が提案されてきた。本研究では、完成物は手に持って持ち運ぶことができるため、使用可能な場所の制約がない。ユーザは、樹脂板の上にホワイトボードマーカーを用いて等高線を描くことで、物理的な地形モデルを生成する (図 9)。樹脂板を平らな状態に再加熱し、板の表面にテクスチャを印刷して、再成形が可能である。また造形物に、水を注いで流体のシミュレーションを行ったり、建築模型を配置しながら都市設計を行うことができる。

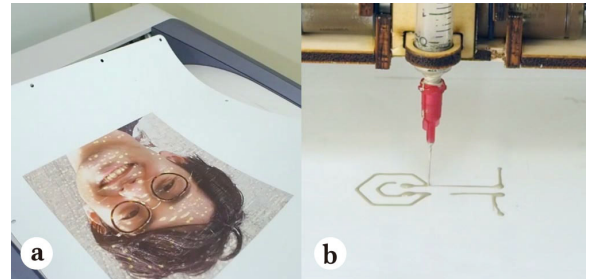


図 10 テクスチャ印刷 (a), 回路印刷 (b)
Fig. 10 Printing textures (a), printing circuits (b).

4.5 テクスチャ印刷

ProtoMold 単体を用いた様々な形状のプロダクトの試作に加えて、インクジェットプリンタや CNC 工作機械などの外部の製造機械を使用することで、表面に模様や回路を印刷したプロトタイプを作成できる。

たとえばインクジェットプリンタを用いることで、樹脂板の表面に模様などのテクスチャを印刷することができる (図 10 a)。樹脂板表面は光沢があるため、印刷時にインクを弾く。そのため、印刷前に、ユーザは樹脂板表面にスプレーなどを用いてマット加工を施す必要がある。ユーザはピンの位置が配置されたテンプレートを使用して、Adobe Illustrator などの画像編集ソフトウェア上で、印刷用の画像を作成する。樹脂板上の印刷された箇所は、アセトンを用いて表面を擦ることで取り除くことができるため、再度印刷できる。

4.6 回路印刷

装置を用いて成形する前に、ユーザは樹脂板の表面に導電性インクを用いて回路を印刷することで、成形物に電気的な機能を追加することができる。樹脂板状に回路を印刷するために、3D プリンタ (NJB-200W, Ninjabot 社製) のフィラメント射出部に導電性インク (LA-3, CEMEDINE 社製) を充填したシリンジを取り付けた (図 10 b)。この導電性インクは、23°C で 60 Pa・s の伸縮率を有し、樹脂板の変形後も導電性を維持できる。また導電性インクの効果時間は 100°C で 10 分で、樹脂板を成形するために加熱する間に導電性インクは硬化する。導電性インクの導電率は $2.5E-04 \Omega \cdot \text{cm}$ であり、テクスチャ印刷と同様にアセトンを用いることで、導電性インクで印刷した箇所を消去できる。

ユーザは、回路設計ソフトウェア Frizing を用いて、樹脂板表面に印刷する回路パターンを設計する。専用ソフトウェアを用いて生成した回路パターンを CNC 用の制御コードである GCode に変換し、3D プリンタ用制御ソフトウェア Repetire-Host 経由で 3D プリンタに送信する。さらに LED などの板表面に配置する電子部品の末端には、ネオジウム磁石が接着されている。ユーザは、成形後に部品を磁石を用いて取り付け、回路を修正する場合は再び簡

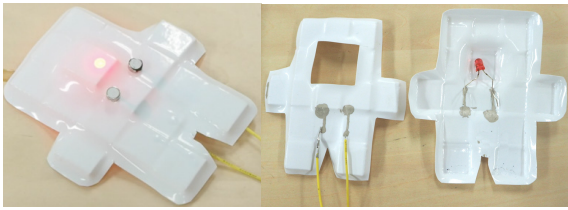


図 11 スイッチ内蔵の光る玩具
Fig. 11 Shiny toy with built-in switch.

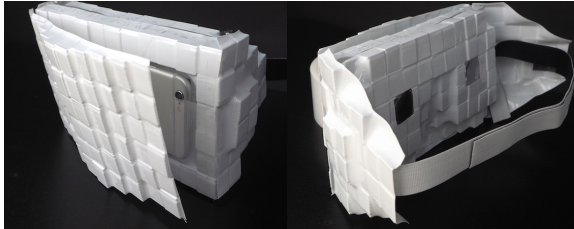


図 12 ヘッドマウントディスプレイ
Fig. 12 Fitted HMD.



図 13 タッチセンサ(ヘッドマウントディスプレイ)
Fig. 13 HMD touch sensor.

易に外すことができる。回路印刷の手法を用いて作成されたいくつかのプロトタイプについて述べる。

4.6.1 スイッチ内蔵の光る玩具

樹脂板の表面に回路を印刷し、LED とバッテリーを取り付けることで、光る人形の玩具を造形できる。玩具は 2 枚の板から構成されており、2 枚が向かい合う内側の面には、それぞれ回路が印刷されている。玩具の中央部分を押すことで、内側の回路が接続され、LED が点灯する (図 11)。このように複数層の回路が印刷された板を重ねることで、たとえば指で押した任意の場所を検知するようなタッチパネルの試作を作成することができる。

4.6.2 ヘッドマウントディスプレイ

ユーザの顔の形に合わせた形状のヘッドマウントディスプレイ (HMD) の試作を作成できる (図 12)。ユーザは、画面として用いるスマートフォンをピンディスプレイの上に置き、スキャン入力機能を用いて、スマートフォンの形状データをスキャンする。HMD を構成する複数のパーツをそれぞれ造形した後、ユーザは部品どうしを組み合わせて貼り合わせる。組み立てた後、HMD を顔に付け、装着具合を確認し、必要に応じて鼻が当たる窪みなどを再調整する。また HMD を組み立てるだけでなく、導電性インクを用いることで、タッチセンサを表面に印刷し、VR アプリ

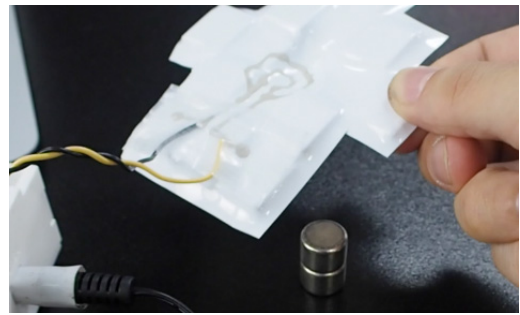


図 14 半立体スピーカ
Fig. 14 2.5D shaped speaker.

を装置側面から制御できる (図 13)。ExtensionSticker [8] と同様に、HMD の側面にタッチセンサを印刷し、ユーザはセンサに触れることで間接的にスマートフォン画面に触れることができる。

4.6.3 半立体スピーカ

LED などの電子部品を配置せずに、樹脂板の表面上に印刷した回路のみを用いて機能を追加できる。たとえば、導電性インクを用いて、樹脂板表面にコイル形状の回路パターンを印刷する。回路に 12V アンプを接続し、板の下にマグネットを配置することで、スピーカの原理を再現して音を出すことができる (図 14)。さらに板を再成形することで、様々な形状のスピーカコーンを作成することができ、多様な音の違いを試すことができる。

4.7 自動切断機能

樹脂板の形状を変形した後、必要のない余白部分をハサミを用いて手で切断する。また 3D プリンタ (Ninjabot Inc., NJB-200W) のフィラメント射出部にホットカッタを配置することで、自動的に余白部分を切断できる。Processing のピン制御ソフトウェア上で形状データに基づいて、輪郭線のベクターデータを自動生成できる。ベクターデータを専用ソフトウェア上で GCode に変換した後、3D プリンタ制御ソフトウェアを経由してホットカッタを制御し、余白部分を切断する。

5. 性能評価とユーザスタディ

5.1 性能評価

本章では、実際に ProtoMold を実装し、いくつかの実験より得られた知見について述べる。

まず本システムを用いて、1 枚の樹脂板を何度再利用可能かを調査した。厚み 0.5 mm の PVC の板を加熱し、各ピンの高さをそれぞれ 5, 10, 20, 25, 30 mm として、成形を繰り返し、再加熱した際に平らな状態に戻るか観察した。厚みを 0.5 mm にした理由は、一般的なトレイなどの容器の厚みと同等である。実験の結果、ピンの長さが 10 mm のとき、板は 20 回再成形しても平らな状態に戻った。しかし、ピンの高さが 25 mm を超えると、2 回目の再加熱時に

穴が空いた。またピンの高さが20mmでは、3回目の再加熱時に穴が空いた。これは各ピンの辺の端が鋭いためであると考えられる。さらに透明のPET板は、再加熱した際に白色に変色したので、PETを使用するには白色の板が適している。また他の厚みに関しては今回実験は行っていないが、厚みを増やすと穴は空きにくくなる考えている。

またProtoMoldの加工時間について調査した。36mm×32mm×30mmの直方体を成形する場合、ヒータの加熱時間が7分、真空成形に10秒、樹脂板の再加熱に30秒必要である。ヒータは一度加熱すると、2回目以降の造形プロセスでは加熱時間は含まれない。従来の真空成形では、ユーザは事前にCNC切削機などを用いて型を準備する必要があるため、時間が掛かる。一方、本システムは2回目以降の試行錯誤では短時間で成形できる。

さらにヒータの温度と造形物の縁の鋭さの関係性について調べた。厚み0.3mmのPET板を用いて、ヒータの温度を55°C、65°C、75°C、85°Cに変えながら25秒間加熱し、10 (PinC)、20 (PinB)、30mm (PinA)の長さのピンに押し当てて成形した。図15のように、造形物の縁の滑らかさはヒータの温度とともに変化した。温度を調整することで、縁の滑らかさを制御することは可能である。

ProtoMoldのピンディスプレイの解像度はピンの数によって制限される。今回提案したシステムでは、96個のアクチュエータを使用しているが、高解像度の形状を作成するには、多くの小さなピンが必要である。一方で、ピンの距離を離して、加熱温度を低めに設定することで、ピン

の数を増やさずに滑らかな曲面を生成することができる。また他の方法として、Incremental Forming [10]と同様に、CNCを用いてピンを水平方向に移動させながら樹脂板を変形させる方法があげられる。しかし、この方法では板を変形させるのに時間が掛かる。また一様に板を加熱するため、移動しながら変形した箇所がまた平らに戻ってしまう。したがって、高速に真空成形と動的な型を組み合わせるシステムには、ピンディスプレイのような動的な型が適している。

また細かい形状を表現する方法として、faBrickation [12]で提案されているように、3Dプリンタで造形した複雑な形状の造形物とピンディスプレイを組み合わせる方法があげられる。これは、ユーザが複雑な部品を3Dプリンタを用いて造形し、ピン上に置き、造形物とピンを合わせて型として樹脂板を押し当てる。大まかな箇所はピンの形状を用いるので、3Dプリンタのみの造形に比べ造形時間は短縮できる。

また真空成形では基本的にピラミッド型など半立体形状しか作成できない。ProtoMoldを用いて立体物を作成するには、2つの向い合せの半立体物を作成し、板どうしを貼り合わせる必要がある。通常は内部は空洞であるが、液体樹脂を注入して固めることで、固い造形物も製作可能である。

5.2 ユーザスタディ

本装置を用いて実際に制作する様子をユーザスタディを通して観察した。参加者は20歳から29歳のデジタルファブリケーションツールを利用してプロトタイプングの経験のある大学生5名(男性4人、女性1人)である。まずProtoMoldの基本的な操作方法である、ソフトウェア入力を用いたピン操作やオブジェクトをスキャンする方法を教えた。参加者は、透明か白色の樹脂板から1枚を選び、約10~20分でプロトタイプを制作した。

結果的にすべての参加者がProtoMoldを用いて立体物を造形していた。図16は実際に作成した作品例である。

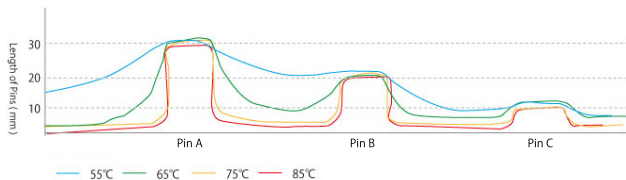


図15 造形物の形状と温度の関係性

Fig. 15 The relationship between the shape and temperature.

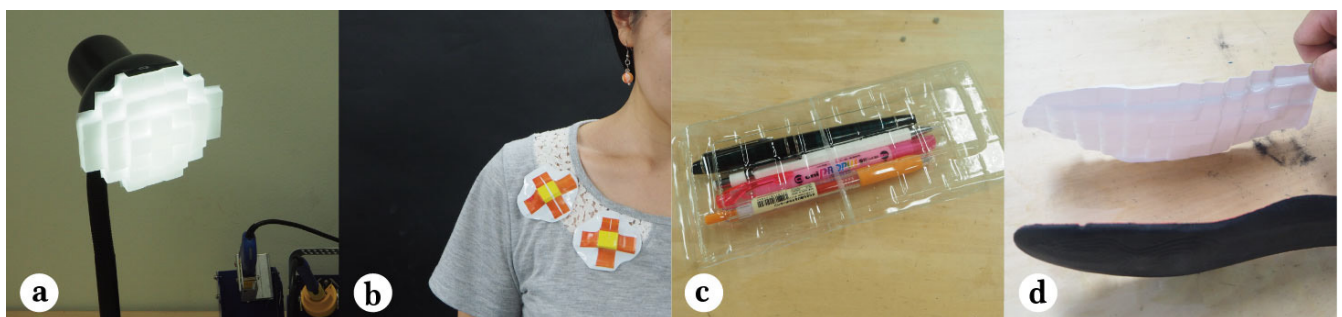


図16 ユーザスタディ事例 (a) 参加者Aによるランプシェード, (b) 参加者Bによるワッペン, (c) 被験者Cによる筆箱, (d) 被験者Dによるインソール

Fig. 16 Examples from the user study. (a) a lamp shade made by Participant A, (b) a badge made by Participant B, (c) a pen case made by Participant C, (d) an insole made by Participant D.

参加者 A はランプシェードを作成した (図 16a). 参加者 B は, ベクターソフトウェアを用いて画像を作成し, 樹脂板に印刷し形成することで, 花の形状の立体的なワッペンを作成していた (図 16b). 彼女は「成形後, 自分の服に当てながら大きさを確認できるので, 衣服の部品の試作には適している設計プロセスである」と述べていた. また参加者 C は, 透明な筆箱を作成した (図 16c). 彼は, 数本のペンをピンディスプレイに置き, 型に収まるかを確認しながら設計していた. 筆箱の箱を作るために, 2つの半立体物を作成し, 互いを合わせて接着していた. 参加者 D は靴のインソールを作成した (図 16d). 樹脂板を変形した後, 彼は実際に板の上に足を載せて, 足の形状に合っているかを確認していた. 2度再加熱し調整した後, インソールを完成させていた. 彼は, 「通常の真空成形機で手や足を型として置くことは, 加熱した樹脂板に直接接触するので危険であるが, ProtoMold を用いて体をスキャンした後, 体の形状の造形物を試作できるので, ウェアラブルな試作には適している」と述べていた.

6. 関連研究

本研究と同様に, 多くの研究者が高速に立体物を造形するデジタルファブリケーション手法を提案している. WirePrint [11] は, 既存の 3D プリントを用いてワイヤフレーム構造の立体物を短時間で出力する手法である. ユーザは完成物の大きさや形状を少ない造形時間で確認することができる. faBrickation [12] は, ブロックなどの汎用的な部品と 3D プリントで造形した細かい部品を組み合わせることで, 造形時間を短縮できる技術である. これらは, 造形時間の短縮は実現しているが, 3D プリントを使用しているため, 造形後にやり直す場合は, 再び初めから造形する必要がある.

熱可塑性の樹脂板などを様々な形状に変形させる造形手法も多く提案されている. MOR4R [13] は, 電子レンジで加熱すると温度の上昇する特殊なテープをアクリル板に貼り付けることで, 立体物の曲がる箇所を指定できる造形手法である. Jorgensen は, 加熱したガラス板を任意の形状に配置された複数のピンの上に置くことで, 様々な形の容器の造形手法を提案している [16]. これらの手法は, 1枚の板の形状を自由に変更できるが, ユーザが手動で曲げたり組み立てる必要がある.

コンピューショナルに熱可塑性樹脂を変形させる造形手法として, Incremental Forming [10] は先端に半田こてを取り付けたロボットアームを用いて, 樹脂板を押し当てながら任意の幾何学的立体形状を造形するシステムである. Wang らは, 真空成形と動的な型を組み合わせ, 任意の立体物を造形する手法を提案している [14]. これは CNC の先端に取り付けた電動ドリルで個々のピンの高さを1つずつ制御することで, 動的な型を作成している. これらの

造形手法は, 動的な型や樹脂板を少しずつ変形させるため, 高速に造形することは難しい. またユーザが形状を設計するために CAD などの設計ソフトウェアのスキルを必要とする. 本研究で提案する手法は, ピンそれぞれにアクチュエータを内蔵し, 高速な造形環境を実現した. またジェスチャ入力や描画入力など直感的な設計手法を提案している.

本研究で提案している動的な型と同様なシステムとして, 複数のリニアアクチュエータを用いた動的なシェイプディスプレイである inForm [9] があげられる. これは遠隔地のユーザにピンディスプレイを介して触感を伝えたり, 遠隔地の対象物を動かしたりすることができる. 本研究でも, 同様のピンディスプレイを用いるが, 真空成形と組み合わせたデジタルファブリケーションのために用いる. また通常のピンディスプレイの装置を動かすことは重量的に難しいが, 本提案で作成された造形物はピンディスプレイから取り外して持ち運ぶことができる.

7. まとめと今後の展望

本稿では, 真空成形と動的形状変更可能なピンアレイを用いて, 任意形状を高速にかつ再利用できるデジタルファブリケーションツール ProtoMold を提案した. さらにスキャン入力や描画入力など ProtoMold ならではの設計手法を用いて, お面や立体地図などを造形する事例や, 立体物の表面に模様や回路を印刷する手法を示した. また実験の結果, ユーザは同一の樹脂板を 20 回再利用でき, ユーザスタディではすべての参加者がランプシェードやインソールなどの試作品を制作できた.

将来的には, 超小型アクチュエータを選定することで, 高解像度で高精細なピンディスプレイを開発する. 高精細なピンディスプレイを用いることで, より細かい凹凸を持った造形物が表現できる. 具体的には空気圧で駆動するリニアアクチュエータなどは, ポンプを離れた場所に設置できるのでピン部分の解像度を上げることができる.

また現在は立体的な造形物を作るためには, 複数の半立体物を貼り合わせる必要がある. 今後は, 組み立てを自動化することで, 立体物を手間なく自動で出力する方法を提案する. たとえば, ピンディスプレイの横にロボットアームを設置することで, 材料の設置や回収, 組み立てを自動化できる.

さらにピンディスプレイのアクチュエータを大型化することで, 机や椅子などの大型な造形物を短時間で出力する方法を開発する. 素材を均一に加熱できるヒータ部, ピンディスプレイの解像度は課題である. 家具などを短時間で作れることで, 必要なときに造形することができ, 必要でないときは再び平らにして収納することができる.

謝辞 本研究は JST ERATO 川原万有情報網プロジェクト (JPMJER1501) の支援により実施された.

参考文献

- [1] Yamaoka, J. and Kakehi, Y.: ProtoMold: An Interactive Vacuum Forming System for Rapid Prototyping, *Proc. 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '17)*, pp.2106–2115, ACM (2017).
- [2] Gershenfeld, N.: FAB: The coming revolution on your desktop — From personal computers to personal fabrication, Basic Books (2005).
- [3] Mueller, S., Beyer, D., Mohr, T., Gurevich, S., Teibrich, A., Pfisterer, L., Guenther, K., Frohnhofen, J., Chen, H.-T., Baudisch, P., Im, S. and Guimbretiere, F.: Low-fidelity fabrication: Speeding up design iteration of 3D objects, *Proc. 33rd Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '15)*, pp.327–330, ACM (2015).
- [4] Beyer, D., Gurevich, S., Mueller, S., Chen, H.-T. and Baudisch, P.: Platener: Low-fidelity fabrication of 3D objects by substituting 3D print with laser-cut plates, *Proc. 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '15)*, pp.1799–1806, ACM (2015).
- [5] Willis, K.D.D., Xu, C., Wu, K.-J., Levin, G. and Gross, M.D.: Interactive fabrication: New interfaces for digital fabrication, *Proc. 5th International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI '11)*, pp.69–72, ACM (2011).
- [6] Noztek Pro Filament Extruder, available from <http://www.noztek.com/>.
- [7] Tang, S.K., Sekikawa, Y., Leithinger, D., Follmer, S. and Ishii, H.: Tangible CityScape (2013), available from <http://tangible.media.mit.edu/project/tangible-cityscape/>.
- [8] Kato, K. and Miyashita, H.: ExtensionSticker: A proposal for a striped pattern sticker to extend touch interfaces and its assessment, *Proc. 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '15)*, pp.1851–1854, ACM (2015).
- [9] Follmer, S., Leithinger, D., Olwal, A., Hogge, A. and Ishii, H.: inFORM: Dynamic physical affordances and constraints through shape and object actuation, *Proc. 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '13)*, pp.417–426, ACM (2013).
- [10] Braumann, J., Goldbach, D. and Lublasser, E.: Single-point incremental forming, DADA 2015 Conference, in cooperation with Tongji University and FabUnion, available from <https://vimeo.com/132981872>.
- [11] Mueller, S., Im, S., Gurevich, S., Teibrich, A., Pfisterer, L., Guimbretiere, F. and Baudisch, P.: WirePrint: 3D printed previews for fast prototyping, *Proc. 27th Annual Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '14)*, pp.273–280, ACM (2014).
- [12] Mueller, S., Mohr, T., Guenther, K., Frohnhofen, J. and Baudisch, P.: faBrickation: Fast 3D printing of functional objects by integrating construction kit building blocks, *Proc. 32nd Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '14)*, pp.187–188, ACM (2014).
- [13] Yasu, K., MOR4R: Microwave oven recipes for resins, *SIGGRAPH 2015: Studio*, Article No.4, pp.1–14, ACM (2015), Jorgensen, T., Neo-industrial biography, glass working, and re-configurable toolmaking, *SIGGRAPH 2015*, Art Gallery (2015).
- [14] Wang, Z., Wang, Y. and Gindy, N.: Planning and control of a hybrid vacuum-forming system based on screw-pin tooling, *WSEAS Trans. Sys. Ctrl.*, Vol.5, No.7, pp.557–566 (2010).
- [15] Leithinger, D., Follmer, S., Olwal, A., Luescher, S., Hogge, A., Lee, J. and Ishii, H.: Sublimate: State-changing virtual and physical rendering to augment interaction with shape displays, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '13)*, pp.1441–1450, ACM (2013).
- [16] Jorgensen, T., Pin bowl (2011), available from <https://www.petronillasilver.co.uk/artists/glass/tavs-jorgensen/>.
- [17] Duan, M., Yoon, D. and Okwudir, C.: A limited-preview filtered B-spline approach to tracking control – With application to vibration-induced error compensation of a 3D printer, *Mechatronics* (2017).



山岡 潤一 (正会員)

2015年慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科博士課程修了。日本学術振興会 PD を経て、2016年慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科特任助教、同大学非常勤講師、2018年より東京大学大学院情報学環特任助教、現在に至る。主にデジタルファブリケーション、Computer Human Interaction, メディアアートに関する研究に従事。博士 (政策・メディア)。



筧 康明

2007年東京大学大学院学際情報学府博士課程修了。科学技術振興機構さきがけ研究員を経て、2008年慶應義塾大学環境情報学部専任講師、2011年同准教授、2018年東京大学大学院情報学環准教授に着任、現在に至る。拡張現実感、Computer Human Interaction, インタラクティブファブリケーション等の研究や、インタラクティブデザイン、メディアアート作品制作に従事。博士 (学際情報学)。