

Title	MultiJam : 機能性材料を用いた変形可能なインタフェースの3D印刷手法
Sub Title	MultiJam : the 3D printing method of shape-changing interface using functional materials
Author	梁, 文碩(Yang, Munseok) 山岡, 潤一(Yamaoka, Jun'ichi)
Publisher	慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科
Publication year	2021
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2021年度メディアデザイン学 第931号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002021-0931

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

修士論文 2021 年度

MultiJam: 機能性材料を用いた変形可能な
インタフェースの3D印刷手法



慶應義塾大学
大学院メディアデザイン研究科

梁 文碩

本論文は慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科に
修士(メディアデザイン学)授与の要件として提出した修士論文である。

梁 文碩

研究指導コミッティ:

山岡 潤一 専任講師 (主指導教員)

Kai KUNZE 教授 (副指導教員)

論文審査委員会:

山岡 潤一 専任講師 (主査)

Kai KUNZE 教授 (副査)

杉浦 一徳 教授 (副査)

修士論文 2021 年度

MultiJam: 機能性材料を用いた変形可能な インタフェースの3D印刷手法

カテゴリ：サイエンス / エンジニアリング

論文要旨

本研究では、ユーザーが自分の好みに応じて変形可能なインタフェースを制作できるように促進することを目的とし、機能性材料を用いた変形可能なインタフェースの3D印刷手法を提案する。本手法は、ユーザーが実生活でも容易に自作できる機会を与え、機能性素材やデジタルファブリケーションの特徴を活かした一層豊富な体験の提供に貢献する。具体的に、ユーザーは3D CADツール上でビーズのサイズや形状、機能性材料の種類などのパラメーターなどを編集し、デバイスを3D印刷することで、製造プロセスを相当に短縮できる。このような高い編集性と製造自動化のメリットだけでなく、ユーザーは本手法を通じて手動では制作が難しかった二重構造や剥がしやすいビーズの塊などの複雑な構造を作成することもできる。本論文では、機能性材料とデジタルファブリケーションを用いた制作手法がユーザーの好みに応じた変形可能なインタフェースの自作を促進できるという仮説を立てる。その後、3段階にわたるプロトタイプ制作のプロセスから得た知見をもとに仮説検証を行い、提案した手法を通して本研究が描くビジョンについて述べる。

キーワード：

機能性材料, 3Dプリンター, マルチマテリアル3Dプリンター, デジタルファブリケーション, シェイプチェンジングインタフェース

慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科

梁 文碩

Abstract of Master's Thesis of Academic Year 2021

MultiJam: The 3D Printing Method of Shape-Changing Interface Using Functional Materials

Category: Science / Engineering

Summary

This study proposes a 3D printing method for shape-changing interfaces using functional materials to facilitate users to create them according to their preferences. This method allows users to easily create their interfaces in real life and contributes to providing a richer experience by utilizing functional materials and digital fabrication features. Precisely, users can edit parameters such as the size and shape of the beads and the type of functional material on a 3D CAD tool and then 3D print the device, which can considerably shorten the manufacturing process. In addition, users can also create complex structures through this method, such as duplex structures that were difficult to create manually or clumps of beads that are easy to peel off. This paper hypothesizes that a production method using functional materials and digital fabrication can facilitate the self-creation of deformable interfaces according to user preferences. We then test our hypothesis based on the findings from the three-step prototyping process and describe the vision that this research portrays through the proposed method.

Keywords:

functional materials, digital fabrication, 3D printer, multi-material 3D printer, shape-changing interface

Keio University Graduate School of Media Design

Munseok Yang

目 次

第 1 章 序論	1
1.1. 形状が固定されたデバイス	1
1.2. 柔らかいデバイスに対するニーズ	1
1.3. 本研究の目的	2
1.4. 本論文の構成	3
第 2 章 関連研究	5
2.1. 柔らかい日用品を活用したセンサモジュールの研究	5
2.1.1 赤外線反射光を用いた柔軟物体の圧力測定	5
2.1.2 小麦粘土の柔軟性と導電性を用いた形状認識	6
2.2. 機能性材料を用いた柔らかいセンサの研究	7
2.2.1 導電糸を用いたソフトセンサの開発	7
2.2.2 導電性インクを用いたソフトセンサの開発	8
2.3. 柔軟なインタフェースの研究	10
2.3.1 シェイプ・チェンジング・インタフェース	10
2.3.2 ジャミング・ユーザ・インタフェース	15
2.4. 複雑な構造物の制作に容易なデジタルファブリケーション	18
2.4.1 3D プリンター	18
2.4.2 レーザーカッター	21
2.5. デジタルファブリケーションを用いたジャミング・ユーザー・インタフェースの開発	21
2.6. 本章のまとめ	22

第3章 提案	23
3.1. 本研究の目指すビジョン	23
3.2. 研究計画	24
3.2.1 小麦粘土の機能性テスト	24
3.2.2 デジタルファブリケーションと機能性フィラメントの有効性テスト	24
3.2.3 マルチマテリアル3Dプリンターを活用した変形可能なデバイス制作から考える新規性と社会貢献性	25
第4章 実装	26
4.1. 小麦粘土とエラストマー素材を用いたインタフェースの制作	26
4.1.1 小麦粘土の抵抗値測定	28
4.1.2 プロトタイプ制作	29
4.1.3 応用例	32
4.1.4 考察	33
4.2. 機能性フィラメントと3Dプリンターを用いた形状変更できるインタフェースの制作	34
4.2.1 プロトタイプ制作	35
4.2.2 形状変化の確認	39
4.2.3 応用例	40
4.2.4 考察	40
4.3. マルチマテリアル3Dプリンターを用いた形状変更できるインタフェースの制作	42
4.3.1 プロトタイプ制作	43
4.3.2 応用例	47
4.3.3 考察	52
第5章 評価	53
5.1. 複数の機能性フィラメントによる複雑なセンシングの設計	53
5.2. 製造自動化による製造コストの削減	54

5.3. 複数の独立した内部空間の設計	55
5.4. 剥がしやすいビーズの塊の構造	55
5.5. 実生活での活用例	57
5.6. ユーザーフィードバック	60
5.7. その他の課題	61
5.7.1 他研究との比較	61
5.7.2 量産化	61
第6章 結論	63
6.1. 仮説検証	63
6.1.1 複数の機能性フィラメントを用いた3D印刷手法の変形可能な インタフェース制作と実生活への応用可能性	63
6.2. まとめ	64
謝辞	67
参考文献	69

目 次

2.1	fuwafuwa ([1] から抜粋)	5
2.2	1	6
2.3	Neondough ([2] から抜粋)	6
2.4	2	7
2.5	導電糸を使ったソフトセンサの制作 ([3] から抜粋)	7
2.6	3	9
2.7	morphIO ([4] から抜粋)	9
2.8	foamin ([5] から抜粋)	9
2.9	シェイプ・チェンジング・インタフェースのインタラクション ([6] から抜粋)	11
2.10	シェイプ・チェンジング・インタフェースの目的 ([6] から抜粋)	11
2.11	Printflatable ([7] から抜粋)	12
2.12	millimorph ([8] から抜粋)	13
2.13	PneUI ([9] から抜粋)	13
2.14	hotflex ([10] から抜粋)	14
2.15	blowfab ([11] から抜粋)	14
2.16	Jamming User Interface ([12] から抜粋)	15
2.17	jamSheets ([13] から抜粋)	16
2.18	xslate ([14] から抜粋)	16
2.19	レイヤー・ジャミング・ソフトロボット ([15] から抜粋)	17
2.20	4	18
2.21	Ondul 迎 ([16] から抜粋)	19
2.22	Metamaterial Mechanisms ([17] から抜粋)	20

2.23	マルチマテリアル 3D プリンターを用いたメタマテリアル配列の センサの制作（ [18] から抜粋）	20
2.24	5	21
2.25	FoldTronics	21
2.26	マルチマテリアル 3D プリンターを用いたソフトグリッパー（ [19] から抜粋）	22
4.1	小麦粘土を用いた音楽インタフェースのプロトタイプ	27
4.2	プロトタイプの展開図	29
4.3	抵抗値の測定範囲	29
4.4	段階的なアルゴリズムの仕組み	30
4.5	プロトタイプの形状認識	31
4.6	楽器の形状の入力に応じた楽器音の出力	32
4.7	機能性フィラメントで制作したプロトタイプ	34
4.8	内膜のモデリング	35
4.9	ビーズのモデリング	35
4.10	印刷した内膜	36
4.11	印刷したビーズ	36
4.12	機能性材料と 3D プリンターを用いたプロトタイプの展開図	38
4.13	機能性フィラメントで制作したプロトタイプ	39
4.14	応用例の展開図	40
4.15	提案するインタフェースの基本構造	42
4.16	ビーズのサイズ調整プロセス	43
4.17	製造プロセス	44
4.18	ウェアラブル・ハプティック・デバイス	45
4.19	内部に二重構造を持つハプティック・デバイス	47
4.20	導電性素材を用いたコントローラー	48
4.21	球状とテトラポッド状のビーズ	49
4.22	二つのプロトタイプの曲がり具合の測定実験	50
4.23	ジャミングを解除した後の変化量と錘の重さの関係	51

5.1	多様な形状変形とセンシングの可能性	53
5.2	3D CAD ツールによるモデリング	54
5.3	複数の独立した内部空間	55
5.4	剥がしやすいビーズの塊	56
5.5	押し潰し	56
5.6	硬さを変更できる柔らかいプロダクト	57
5.7	関節の曲げ具合を調整できるジョイントサポーター	58
5.8	形状に応じて異なるセンシングができる	59

表 目 次

4.1	小麦粘土の長さ と抵抗値の關係	28
4.2	印刷時のパラメーター	37
4.3	印刷時のパラメーター	46
4.4	実験結果	51

第 1 章 序

論

1.1. 形状が固定されたデバイス

情報技術の発展に伴って、我々の生活は一層潤沢になってきた同時に、日常の中で電子機器を使用することは我々にとって欠かせないことになった。市販で普及されている電子機器は単なる個別の機能を超え、インターネットを活用したスマートなパフォーマンスを実現している。

しかし、ほとんどの電子機器は固定された形状を持ち、使用目的と機能が固定されているため、それらの使い方はユーザーにとって直感的ではない。具体的に言えば、ゲームコントローラーのような市販の入・出力インタフェースの場合、ハードウェアに付いているボタンは、それぞれ定まった機能を持つ。この点は、ユーザーが効率的で的確にハードウェアを操作できる点から、メリットを持つ反面、すでに定まっている機能しか発揮できないため、ユーザーの好みやさまざまな状況に応用が難しいというデメリットを持つ。

1.2. 柔らかいデバイスに対するニーズ

上述から日常で使われるデバイスは、形状が固定されていることによって応用性と直感性が乏しいため、今後はよりユーザーに応じて対応できるデバイスが期待されるだろう。そこで注目されているのが形を変えられる柔らかいデバイスである。一例として、Human Computer Interaction という研究領域では、形状を柔軟に変えられるデバイスの開発が活発に行われている。変形可能なデバイスは使用目的によって形状を変更できるため、ユーザーとインタラクションできる選択

肢が増える上に、直感的な操作が実現できる。変形可能なデバイスを制作するために、いろんな方法が提案されているが、その中でも柔らかい機能性材料を用いた制作手法が注目を浴びている。

同手法を用いて制作したデバイスは、柔軟性や導電性など、複数の機能性を持つことができるため、形状変化を兼ねたセンシングが実現できる。具体的に言えば、信号の入力によって形状を多様に変化・固定でき、異なる形状の入力によって異なる信号を出力することができる。つまり、このことは、既存のデバイスでは不可能だった複雑な信号の制御や、ユーザーの目的に応じたプロダクトの使い分けなどを実現することを意味する。

1.3. 本研究の目的

前述のように、変形できるデバイスに対するニーズは徐々に高まっている。そして、このような状況から目指すべきビジョンは、誰もが自分の好みに合わせて形状変化できるデバイスを自作できるようにすることである。この目標の実現手段として、本研究では機能性材料に着眼し、いろんな素材を用いて柔らかいデバイスのプロトタイプ制作を行う。具体的には、日常で探しやすい小麦粘土を用いたプロトタイプの制作をはじめ、マルチマテリアル 3D プリンターを用いた変形できるインタフェースの制作に至る、数段階の実装を行う。最後に、制作過程から提案する制作手法の有効性を検証し、ビジョンに対して貢献できる点について述べる。

本研究が提案する機能性材料を用いた変形可能なインタフェースの 3D 印刷手法は、以下のリサーチ・クエスチョンをもとに、仮説の検証を行う。

リサーチ・クエスチョン

- 機能性材料を用いた変形可能なインタフェースの 3D 印刷手法は、他手法と比べて、どんなメリットとデメリットが存在するのか。

仮説の設定

- 複数の機能性フィラメントを使った3D印刷手法を使えば、一層簡単にユーザーの好みに応じて変形するインタフェース（ジャミング・ユーザ・インタフェース）が制作できるのではないかと考える。

本研究では、提案する手法を通して、将来、ユーザーがシートやソファなどの柔らかいプロダクトを自分の好みに合わせて制作したり、一つの柔らかいインタフェースを使って多目的に使い分けたりすることを期待する。また、身体的障害を持つユーザーに対しても、自分の指や膝の関節に合わせたジョイントサポーターの制作が考えられる。

これらの実現のために本研究では、変形しやすい構造や、複雑な構造を簡単に製造できる方法について探求すべきである。その一環として着目したデジタルファブリケーションは、本研究の全体的なビジョンとして、ユーザーの自作を促進し、参入障壁を下げるキーポイントになると考える。つまり、デジタルファブリケーションツールさえあれば、どこにいても自分の目的に合うインタフェースを簡単に作ることができる世界を描いているのである。

1.4. 本論文の構成

第1章では、かつて日常で使われてきたデバイスの現状、そして柔らかいデバイスのニーズに触れている。そして、ユーザーが組み立てに負担を持たず、自分の好みに応じた変形可能なデバイスを制作できるようにすることを本研究の目的として掲げている。続いて、機能性材料やデジタルファブリケーションツールを用いたデバイス制作の必要性について述べながら、仮説を明示している。

第2章では、本研究を進めるに前もって、実生活の中で使われる日用品を活用したセンサモジュールや、機能性材料を用いた柔軟なセンサ、柔軟な入・出力インタフェース、デジタルファブリケーションなどに関連して調べた研究について述べる。

第3章では、プロトタイプの実装の前に、本研究のワークフローを提案し、目指す長期的なビジョンについて具体的に紹介する。本研究の意図や、最終的に得たい目標について触れる。

第4章では、小麦粘土など、実生活で得られる機能性材料を用いたプロトタイプをはじめ、複数の機能性フィラメントを使って3Dプリンティングしたプロトタイプの制作プロセスと、それらから得た知見について紹介する。

第5章では、実装を通して提案する手法が貢献したところについて述べる。その後、実生活で使われそうな活用例や、今後の課題について触れる。

第6章では、設定した仮説を検証し、各章のまとめと本研究の今後の方向性について述べる。

第 2 章

関 連 研 究

2.1. 柔らかい日用品を活用したセンサモジュールの研究

2.1.1 赤外線反射光を用いた柔軟物体の圧力測定

クッションなどの柔軟な日用品は内部素材が綿で構成される場合が多いため、形状変化に容易であるだけでなく、この性質とセンサを用いてさらなる活用ができる。FuwaFuwa [1] は、フトリフレクターで綿と綿の間に赤外線を照射し、反射されてくる光の変化を測定することで、綿でできている物体にかかる圧力の変化や接触位置を把握できる。圧力の変化によって綿と綿の間の密度が変化するため、反射光にも影響を与える。さらに、センサをモジュール化して、物体の中に複数のモジュールを内蔵することで、二次元平面における接触位置を計測できるマルチセンサシステムを構築している。このことから、単一のデータしか測定できないセンサでも複数利用することで、立体的な物体のセンシングなど、比較的複雑なデータを測定できることがわかった。

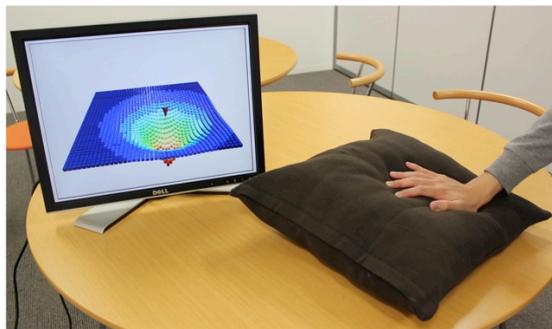


図 2.1 fuwafuwa ([1] から抜粋)

2.1.2 小麦粘土の柔軟性と導電性を用いた形状認識

小麦粘土は、我々の日常の中で簡単に得られるものでありながらも、高い柔軟性と導電性を併せ持つため、比較的自由的な形状変化のみならず、電極を用いたセンシングもできる素材である。Squishy Circuits は、子供向けの STEM 教育用のキットであり、小麦粘土や LED、ミニアンプなど、小麦粘土のセンシングに必要な部品が入っている（図 2.2）。ユーザーは小麦粘土を電極間の媒介として LED を光らせたり、ミニアンプからサウンドを出力したりすることができる。オームの法則により、電極間の抵抗値は媒介とする小麦粘土の長さや電極と接する表面積によって変化するため、ユーザーは小麦粘土の形状を変えることで、異なる出力が期待できる。

応用例として、NeonDough [2] は、小麦粘土とセンサが内蔵された多数のモジュール（電極）を用いることで、粘土の形状を認識するインタフェースである。さらに、粘土を伸ばしたり潰したりするタンジブルな入力を通して、粘土に内蔵された LED の色も変更できるため、子供を対象とした直感的な体験が期待できる（図 2.3）。この研究から、素材の特性を活かしたセンシングや、タンジブルな入力による直感的な体験について知った。



図 2.2 Squishy Circuits¹

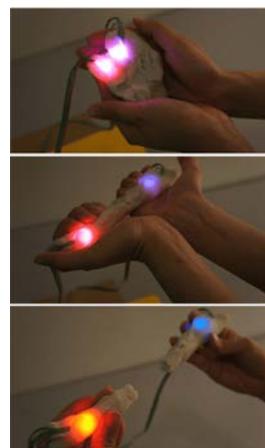


図 2.3 Neondough（[2] から抜粋）

1 出典：Squishy Circuits, 2021/12/13 アクセス, <https://squishycircuits.com/>

2.2. 機能性材料を用いた柔らかいセンサの研究

素材の特性を活かしたセンサについて調べる中、機能性材料を用いたソフトセンサの開発に関する研究に興味を持ち、機能性材料が今後のセンシングに与える影響力について考えた。

2.2.1 導電糸を用いたソフトセンサの開発

機能性材料の一つであり、近年、ウェアラブルデバイスの開発にも広く応用されている導電糸（図 2.4）は、形状変化に容易な線状であるため、複雑な曲面を持つデバイスのセンシングに適していた。

それだけでなく、導電糸はソフトセンサのシステムを形成する時にも金属線を代替するものとして用いられている点から、幅広いセンサの制作が可能になっていることが分かった（図 2.5） [3]。



図 2.4 導電糸²

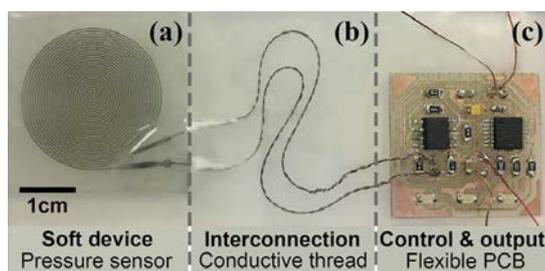


図 2.5 導電糸を使ったソフトセンサの制作
（ [3] から抜粋）

2 出典：Switch Science, 2021/12/15 アクセス, <https://www.switch-science.com/catalog/911/>

2.2.2 導電性インクを用いたソフトセンサの開発

導電性インク（図 2.6）を染み込ませて乾燥したスポンジは、柔軟に形を変えられるだけでなく、電極を付着することによって電極間の抵抗値を測定できる。さらに、オームの法則によって、抵抗値は電極間のスポンジの長さや接触面の広さに比例するため、導電性インクを塗布したスポンジは、導電性を活かした様々なソフトセンサに応用されてきた。

その一環として紹介する MorphIO [4] は、円筒状のチューブの中に導電性インクを塗布したスポンジと電極、そしてマグネットを入れたソフトセンシングデバイスである（図 2.7）。デバイスは上下面に付着された電極を通じて、コンピューターやどうぶつデバイスを付着した物体を制御できる。この仕組みにより、ユーザーはデバイスに圧力をかけ押し潰すなどのタンジブルな行動をとることで、触っていない物体やデジタル信号を制御できる。ところで、当研究でわかることは、導電性インクを用いた柔らかいセンシングだけでなく、チューブやマグネットなどの他素材と一緒に活用した、様々な活用方法である。チューブから空気吸引しデバイス全体の大きさを調整することで、電極間のスポンジも収縮し、抵抗値は変化する。また、マグネットを用いて複数のチューブの同時制御することもできる。

foamin [5] は、導電性インクを塗ったスポンジもとにマルチモーダルな入力を通して信号を制御する直方体型のソフトセンサに関する研究である。このソフトセンサは導電性スポンジと金属線一本だけで構成され、ソフトウェアを通して押される位置やその強度を認識する（2.8）。機能性材料の性質を活かせば、ソフトウェアでハードウェアの設計をカバーすることができるので、複雑な制御も実現できることがわかった。

3 出典：Atria Innovation Conductive Inks, アクセス 2021/12/15, <https://www.atriainnovation.com/en/conductive-inks/>



図 2.6 導電性インク³



図 2.7 morphIO ([4] から抜粋)

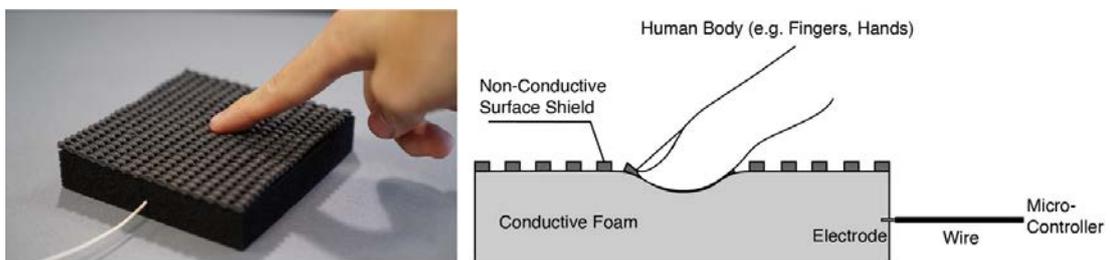


図 2.8 foamin ([5] から抜粋)

2.3. 柔軟なインタフェースの研究

コンピューター工学の側面から見た機能性材料の応用は、センサからインタフェースへと拡張して考える必要がある。コンピューターを制御する柔軟なインタフェースは、既存のシステムから離れ、ユーザーにとってより直感的なシステムを構築するために多角的に議論されてきた。

2.3.1 シェイプ・チェンジング・インタフェース

シェイプ・チェンジング・インタフェースは、名の通り、形を変えるインタフェースを意味する。しかし、そのあり方は、単一的でなく、ユーザーの意図に応じて多様に分類される [20–24]。具体的に、その類型はインタフェースのインタラクションの有無や、使う目的によって異なる (図 2.9, 2.10) [6]。

Perform [25] は、帯状の音楽インタフェースであり、帯の形状を変えることで、曲がったバンドセンサが認識され、センサの組み合わせによって異なる音を出力する。移動しながら使えるから前作である SoundFORMS [26] の欠点を補っている。さらに、帯の形状を活かした入力と音の出力の仕方が印象的である。帯の後ろの素材のおかげで、ダラダラせず、固定できている。しかし、帯状であるため、豊富な形状変化ができない。

printflatables [7] は、空気を注入して形状を変化させるインフレータブルなオブジェクトである (図 2.11)。3D CAD ツールを用いて目的に応じたモデルを設計した後、モデルをカスタマイズした制作ツールを用いて製造する。製造では、折りたたみや熱によるシーリングを通して、空気の注入によって変化した形状を考慮した上で、平面状のオブジェクトを制作するのが特徴である。

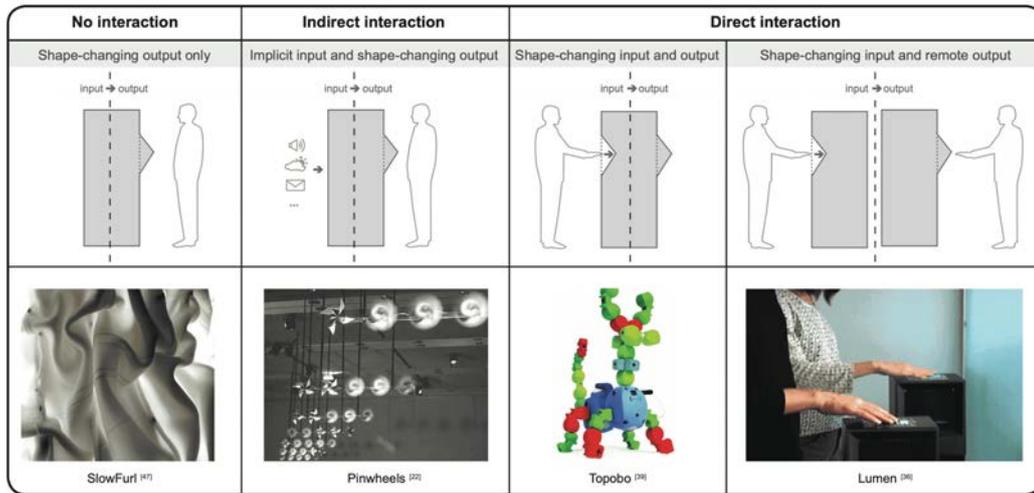


図 2.9 シェイプ・チェンジング・インタフェースのインタラクション（[6] から抜粋）

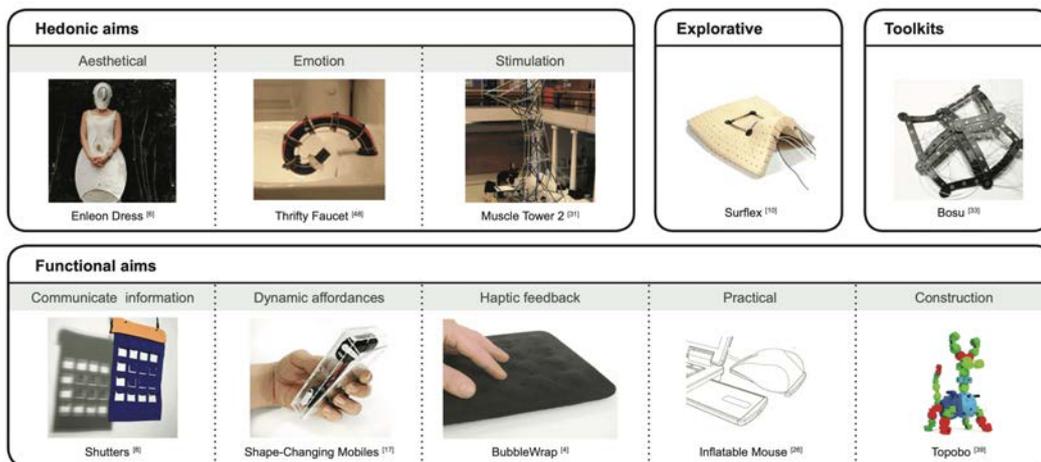


図 2.10 シェイプ・チェンジング・インタフェースの目的（[6] から抜粋）

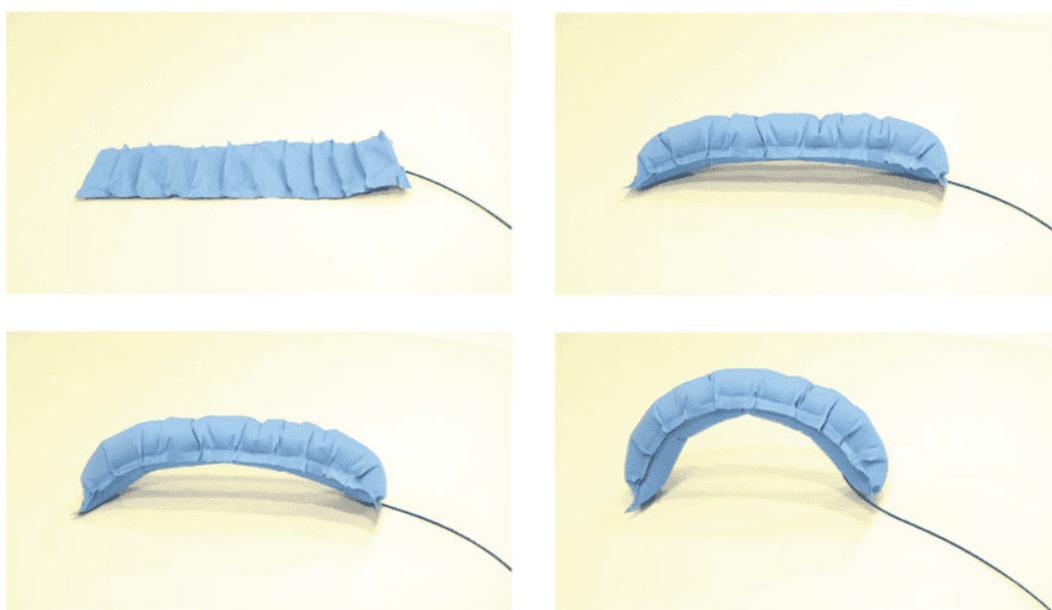


図 2.11 Printflatable ([7] から抜粋)

milliMorph [8] は、コンピューターの数値制御によって設計したパターンや回路などのモデルを、平面状の機能性材料上に印刷、あるいはシーリングすることで、微細な単位でのセンシング及び形状変化をデザインするマイクロファブリケーション手法である (図 2.12)。

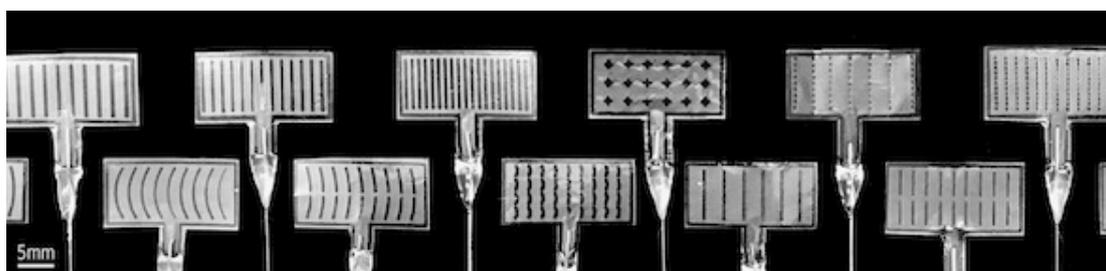


図 2.12 milliMorph ([8] から抜粋)

PneUI [9] は、複数の異なる素材をレイヤーごとに重ねて制作し、空気を注入することによって、形状変化及びセンシングできるインタフェースである (図 2.13)。素材の組み合わせによって、形状変化がダイナミックである点から、簡単なセンシングを用いた実生活での活用が目立つ。

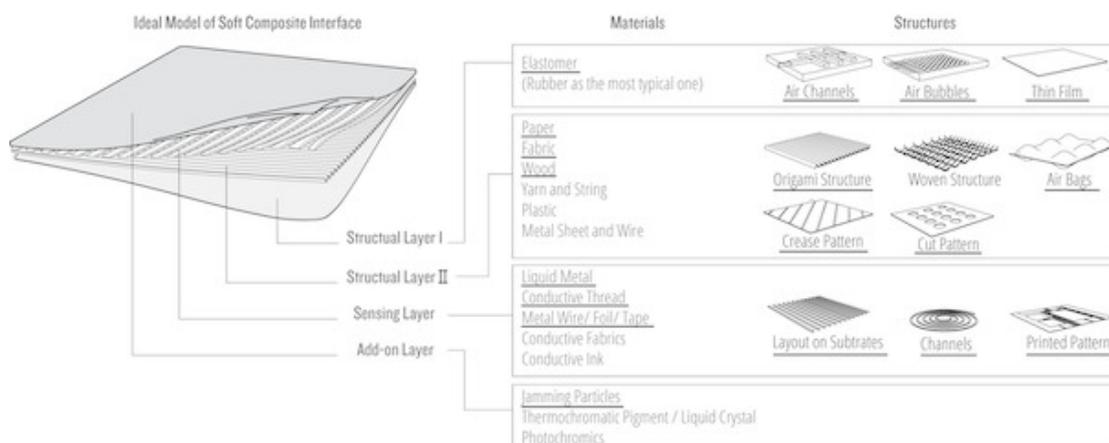


図 2.13 PneUI ([9] から抜粋)

hotflex [10] は、柔軟なフィラメント素材と熱可塑性のフィラメント素材を活用することで、3D プリント後も熱を与えて変形できるデバイスの制作手法である (図 2.14)。ユーザーは印刷した後も目的に応じてデバイスの形状をカスタマイズできるため、提案手法に対して実生活での応用が容易に見られた。

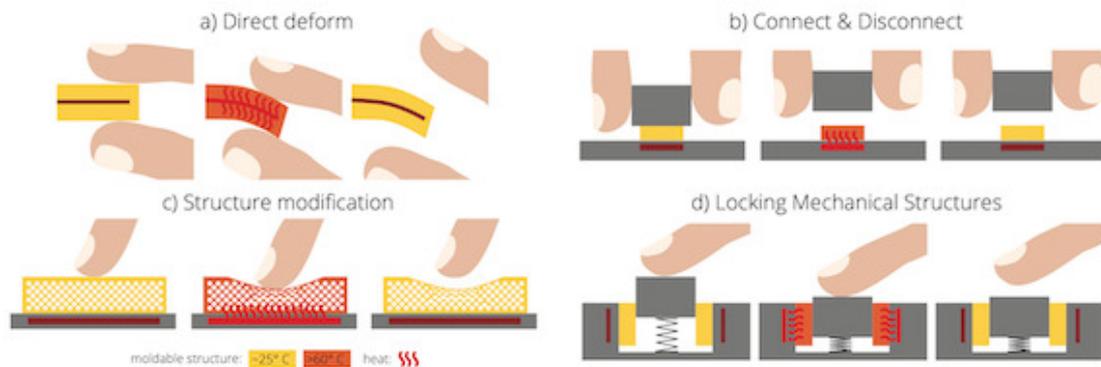


図 2.14 hotflex ([10] から抜粋)

blowfab [11] は、レーザーカッターと空気を注入するブロー成形を組み合わせることによって、2.5D オブジェクトを高速に作れる制作手法である (図 2.15)。オブジェクトの使用後、空気を抜くことで再利用も可能なところが印象的である。

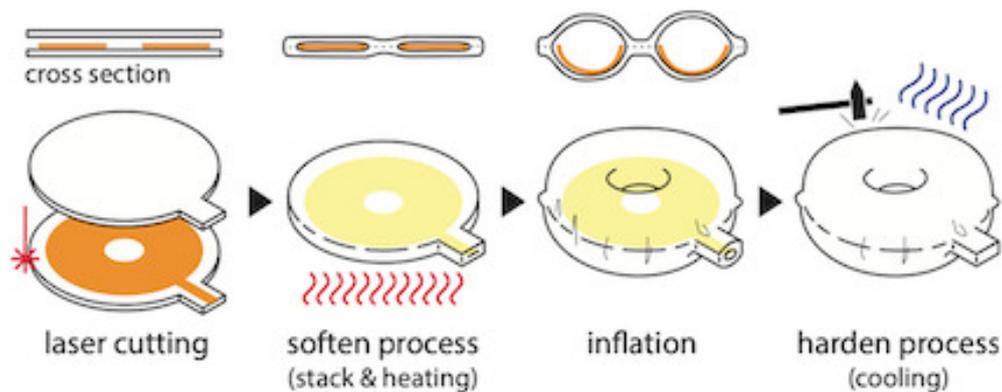


図 2.15 blowfab ([11] から抜粋)

2.3.2 ジャミング・ユーザ・インタフェース

変形するインタフェースの中で、MIT Media Lab が定義したジャミング・ユーザ・インタフェース [12] が注目されている。ジャミング・ユーザ・インタフェースは、主に膜と粒状素材で構成され、ジャミング転移を活用して、形状変化後空気の吸引によって形状を固定することができる。砂や粒のような粒子の集合体は、その粒子の密度がある敷居値より低い場合は流体的に動く一方、その敷居値より高い場合は固体的な動きを示すが、ジャミング転移はこの密度による状態変化を意味する [27,28]。つまり、ジャミング・ユーザ・インタフェースはポンプやアクチュエーターを通して、インタフェース内部の空気を吸引し密度を調節することで、ジャミング転移を行い、形状や硬さを制御できるのである。この観点からジャミング・ユーザー・インタフェースは前述のシェイプ・チェンジング・インタフェースより立体的な形状の変化及び安定的な固定が可能であることがわかる。



図 2.16 Jamming User Interface ([12] から抜粋)

jamSheets [13] は、レイヤー単位のジャミングを行うことで、平面上ならでの形状の変化・固定ができるインタフェースである。立体状のジャミング・ユーザ・インタフェースでは応用できなかった、折り紙構造や靴のデザインなどに活用できるところが目立つ。



図 2.17 jamSheets ([13] から抜粋)

xslate [14] は、シリコン素材の膜と発泡スチロール素材のビーズ、そして水平移動タイプのモーターで構成される平面状のインタフェースである。モーターはデバイスの骨格を構成し、水平に長さを変えることによってデバイスのサイズを変えることができる。その後、空気の吸引によってデバイスを固くすることで、インタフェースの平面的サイズを拡張・縮小できる。

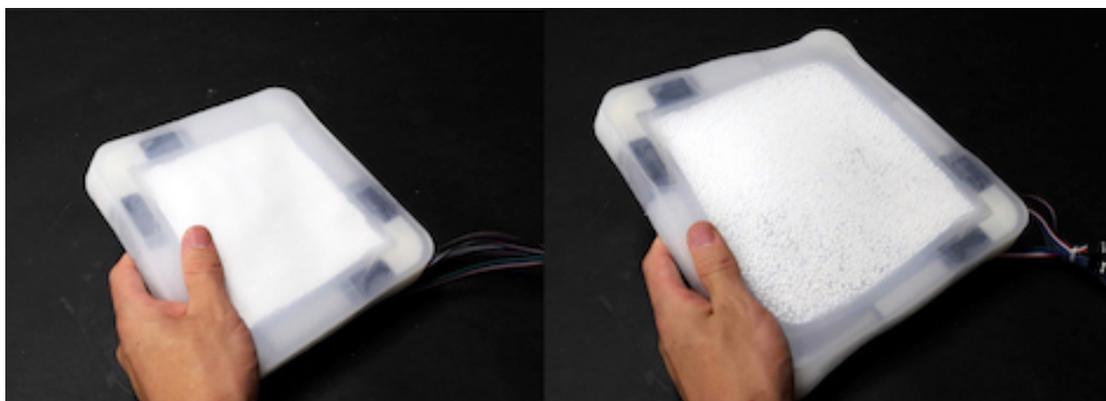


図 2.18 xslate ([14] から抜粋)

ジャミング・ユーザ・インタフェースが活発に応用されているもう一つの分野として、ソフトロボティクスという研究領域がある。かつてのロボットは硬くて固定された形状だったことから、正確で速い作業速度を要する作業や、反復的なプロセスに最適化されていた。そして、それらを構成する要素は、鉄やアルミニウム、磁石、銅などの硬い電磁部品が多かった。その反面、ソフトロボティクス領域ではキャタピラーやタコのような柔軟な生物の身体構造に着眼して、柔軟で動的な要素を活かしたソフトロボットの制作を行っている。そのため、ソフトロボットは柔らかい素材で構成され、物を掴む手段としてジャミング・ユーザ・インタフェースの原理でもある、空気の吸引を利用した形状変化・固定を活用している [29]。いろんな形のソフトロボットが開発されている中、軟体動物に着眼したレイヤー型のジャミング機能を持つソフトロボットは、いろんな形で変形できるため、形の異なるさまざまな物体を掴むのに効果的である（図 2.19） [15]。

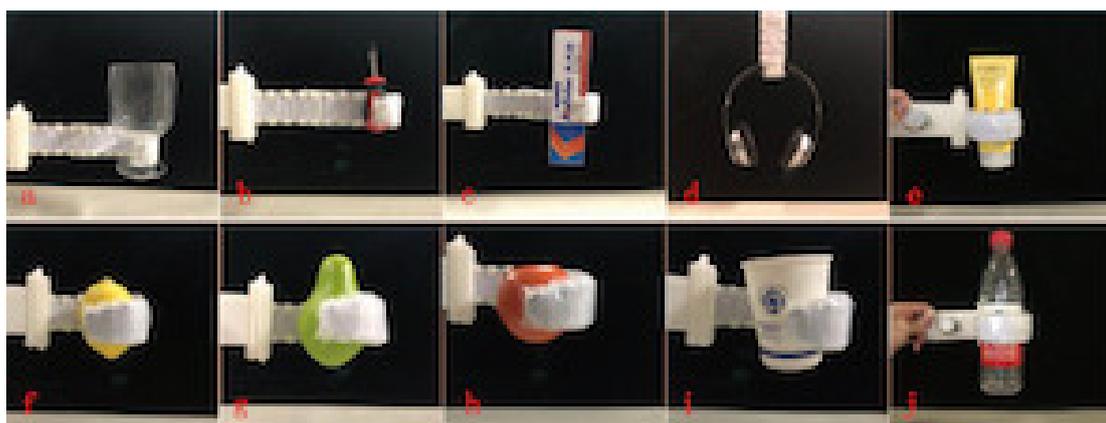


図 2.19 レイヤージャミング・ソフトロボット（ [15] から抜粋）

2.4. 複雑な構造物の制作に容易なデジタルファブリケーション

ソフトウェア上でモデルをレンダリングし、ハードウェアを通して自動制作するデジタルファブリケーションは、かつて手動では難しかった複雑な構造の制作に優れる点から、組み立てのコストを大幅に削減し、ユーザーに一層効率的な制作プロセスを提供する。

2.4.1 3D プリンター

3D プリンターは、近年多用されているデジタルファブリケーションの一つであり、ユーザーは3D CAD ツールで作った3D モデルを3D プリンターを通して手軽に印刷することができる。さらに、ソフトウェア上で印刷のパラメーターを変えて、同じ構造のモデルでもいろんな種類の印刷や、手作業では難しいパーツの制作、二つ以上の機能性フィラメントを用いた複雑な設計が実現できるため、ユーザーはより能率的な制作を行える。



図 2.20 3D プリンター：Creator 3⁴

4 出典：Flashforge Creator 3, アクセス 2021/12/13, /url<https://www.flashforge.com/product-detail/flashforge-adventurer-3-3d-printer>

Ondulé (図 2.21) [16] は、3D CAD ツールである Rhinoceros との連動を通して、3D モデルの特定部位に合わせたスプリング構造やジョイント構造を自動的にレンダリングしてくれるソフトツールと、その応用例について紹介する。当ツールは 3D プリンティングを想定した構造をレンダリングしながらも、パラメーターに応じて構造物の長さや厚さを編集できるため、ユーザーに効率的なデジタルファブリケーションの手法を提供すると言える。

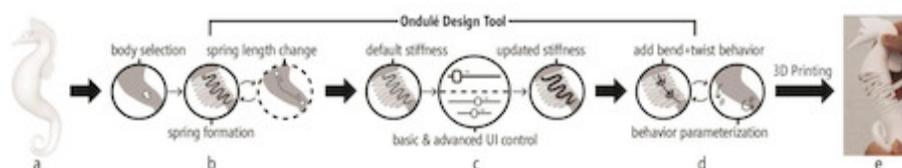


図 2.21 Ondulé ([16] から抜粋)

次に、Metamaterial Mechanisms (図 2.22) [17] は、平面状のメタマテリアルのパターンを容易にレンダリングできるソフトツールと、3D プリンティングされたパターンを用いた、ドアロックのような実生活中の応用例について紹介している。印象的なところは、手動では難しいメタマテリアルのパターンをデジタルファブリケーションを通して容易に制作できる点、パラメーターを調整したり、複数のフィラメントを使ったりすることによって、一層複雑なパターンの構造物を簡単に制作できるという点であった。さらに、実生活で不便を感じるドアロックを代替するデザインである点も注目すべき点であった。

続いて調べた研究は、マルチマテリアル 3D プリンターを用いたメタマテリアル配列のセンサの制作に関する研究である (図 2.23) [18]。この研究では、人体工学的に馴染みやすいメタマテリアルの配列をモデリングした後、積層式印刷を通して柔軟な TPU 素材と導電性素材をレイヤーごとに交互に用いることで、センシング可能なウェアラブルジョイントを制作している。メタマテリアルは配列のデザインによって圧力に耐えられる具合を調節できる。そこでユーザーの体に適合するパターンを探し、柔軟性と共に信号制御のための導電性を付け加えることは、今後のいろんな方向へと拡張できる可能性があると考えた。

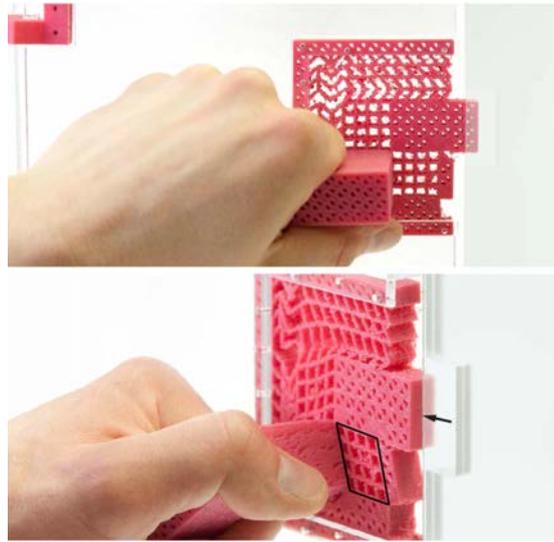


図 2.22 Metamaterial Mechanisms ([17] から抜粋)

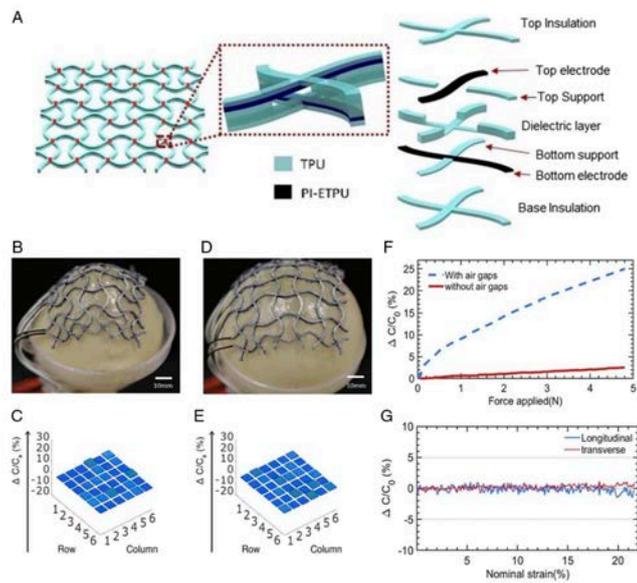


図 2.23 マルチマテリアル 3D プリンターを用いたメタマテリアル配列のセンサの制作 ([18] から抜粋)

2.4.2 レーザーカッター

3Dプリンターのみならず、レーザーカッターを用いた複雑な構造物の制作も目立つ（図 2.24）。FoldTronics（2.25）[30] はハニカム構造の平面図と電極間につながる導電性銅箔粘着テープの回路を、レーザーカッターを用いて容易に制作するプロセスを提示している。応用例である 2D・3D ディスプレイのスマートウォッチから、デジタルファブ리케이션は小型の繊細なデバイスの制作にも適合していることがわかった。

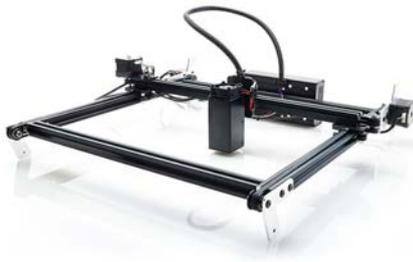


図 2.24 レーザーカッター：FABOOL Laser Mini⁶



図 2.25 FoldTronics

2.5. デジタルファブ리케이션を用いたジャミング・ユーザー・インタフェースの開発

元々、ジャミング・ユーザ・インタフェースは素材とモジュールを組み合わせたタイプが多く、それらのデバイスは主に手動で制作されるため、組み立てが複雑である。

一方、マルチマテリアル 3D プリンターを用いたジャミングソフトグリッパーは、ファブ리케이션ツールによって一回の作業で自動制作されるため、ジャ

6 出典：SMART DIYS FABOOL Laser Mini, アクセス 2021/12/15, <https://www.smartdiys.com/fabool-laser-mini/>

ミング・ユーザ・インタフェースの組み立てにかかるコストを格段に削減できる
2.26 [19]。



図 2.26 マルチマテリアル 3D プリンターを用いたソフトグリッパー（ [19] から抜粋）

ところが、ジャミング・ユーザ・インタフェースの制作において、マルチマテリアル 3D プリンターに期待できることは制作プロセスの簡素化だけではない。手作業では実現しづらい複雑な二重構造の制作や、複数の機能性フィラメントを用いることによる幅広いアプリケーションの提案が考えられる。

2.6. 本章のまとめ

本章では日常品を用いたセンシングの研究をはじめ、機能性材料を用いたソフトセンサの研究に触れることで、柔軟なデバイスの制作における機能性素材の有効性を確かめた。一方、3D プリンターやレーザーカッターなど、複雑な構造物の制作に特化されたデジタルファブリケーションツールを活用したインタフェース制作の研究から、デジタルファブリケーションツールによる製造プロセスの簡素化にも注目した。

第 3 章

提 案

本章では、第 1 章で設定した本研究のビジョンについて具体的に述べる。そして、本研究で選定した機能性材料やデジタルファブリケーションツールをもとに、目指すビジョンの実現に必要な研究計画について具体的に述べる。その後、それぞれのステップから学習できることについて説明することで、ステップ間の有機的な関係を明確に示す。

3.1. 本研究の目指すビジョン

近年、機能性材料の性質を活用した柔らかいセンサやインタフェースの開発が活発に行われている。このような柔らかいデバイスは形状変化に容易であるため、周辺環境の情報を収集するセンサの位置づけから見ても、曲面など複雑な形を持つ物体に活用されやすい。しかも、小麦粘土の形状認識 [2] や導電性スポンジのマルチモーダルな入力 [5] のように形状を変えること自体がセンシングに活用されることもあるため、機能性材料を用いた柔軟なデバイスは形状に応じて異なるセンシングを実現する可能性があると考えられる。

さらに、関連研究でも言及したように、形状を柔軟に変えられるインタフェースは、ユーザーに比較的豊富で直感的な体験を提供する。その中でも膜とビーズで構成されるジャミング・ユーザ・インタフェースは膜内の空気を吸引することでインタフェースの形状を固定でき、コンピューターの信号制御や実生活での活用も考えられる [12]。しかし、このような複数の素材で構成されるインタフェースは組み立てにかかるコストが高い。そこで課題の解決策として、私が着目したのはデジタルファブリケーションツールである。ユーザーはデジタルファブリケー

シジョンツールを用いることによって、製造の自動化から組み立てコストを削減し、結果的に複雑な製造プロセスを短縮できる。また、任意的にカスタマイズした3D CAD ツールで意図した構造物をより簡単に3D印刷できるという点 [16–18] から、ツールをユーザーが使いやすくカスタマイズできれば、ユーザーの好みに合わせたファブリケーションが実現できると考えた。

3.2. 研究計画

3.2.1 小麦粘土の機能性テスト

初期段階では、周辺環境で見つかる機能性を持った素材に着眼し、その機能性を活かしたインタフェースのプロトタイプを制作する。そして、今回は小麦粘土の導電性と柔軟性を活用いた音楽インタフェースを制作する。前述の Neondough [2] から、小麦粘土は複数のセンサと組み合わせることで、形状認識を通じたサウンドやLEDなどの基礎的な信号制御が確認できた。そのため、本研究では小麦粘土の形状認識をさらに活用して、形状に応じてコンピューター上のグラフィック要素を制御したり、形状に応じたサウンドを選択再生したりすることを計画する。そして、制作目的は、小麦粘土のさらなる応用可能性、他機能性材料への拡張可能性を確認することである。

3.2.2 デジタルファブリケーションと機能性フィラメントの有効性テスト

次の段階では、デジタルファブリケーションツールの一つである3Dプリンターを用いたインタフェースの制作を行う。関連研究 [16,17] から分かるように、3Dプリンターは、カスタマイズした3D CAD ツールにより制作者の求めるモデルを事前に自動構築し、結果的に製造プロセスを短縮できる。特に、今回は磁性や導電性のような機能性を持ついろんなフィラメントにも着目し、試作品からセンシングや吸引による形状変更・固定をテストする。

3.2.3 マルチマテリアル 3D プリンターを活用した変形可能なデバイス制作から考える新規性と社会貢献性

前段階では、カスタマイズしたデジタルファブリケーションツールと、機能性フィラメントの有効性をテストした。この点を踏まえ最終段階では、カスタマイズした制作ツールと、二つの異なるフィラメントが使えるマルチマテリアル 3D プリンターを用いて、変形可能なインタフェースを制作する。

マルチマテリアル 3D プリンターを用いたジャミングソフトグリッパーの研究 [19] から、マルチマテリアル 3D プリンターは、吸引機能を持つデバイスを組み立てを最小限に抑えて制作できることを確認した。しかし、当研究で制作したソフトグリッパー以外にも、同プリンターを用いて実現できるインタフェースの構造や、その応用例から、新規性と社会貢献性について考えることにする。また、同プリンターを用いたメタマテリアル配列のセンサの研究 [18] から、同プリンターを通じた複数の機能性フィラメントの併用は、実生活で使える柔軟なデバイスの制作にもつながる可能性を持つことがわかっている。

従って、これらから分かる本研究の実装段階での目的は、実生活での自作に活用できる機能性材料と 3D プリンターのメリットを発見することである。

第 4 章

実 装

本章では、研究計画に基づいているような機能性材料を用いた諸プロトタイプについて紹介し、それぞれの制作プロセスや実装することで得た知見について述べる。

4.1. 小麦粘土とエラストマー素材を用いたインタフェースの制作

機能性材料の中で、最初に着眼した素材は小麦粘土とエラストマー素材である。

小麦粘土は導電性素材であるため、電極を用いて抵抗値を測定し、コンピューターとデータのやり取りができる。さらに、小麦粘土は柔らかい素材であるため、柔軟な形状変化が期待できる点から、直感的に制御するインタフェースとして応用することも考えられる。

一方、エラストマー素材は非常に柔らかく、比重が小さく成形しやすい。そのため、形状変化できる小型のデバイスを制作するのに無理なく使えると考えた。本研究でエラストマー素材は、プロトタイプの本体である小麦粘土の外側を巻くことで、プロトタイプの形を柔軟に変えつつも、意図した形を維持するのに貢献する。

そこで本研究では、小麦粘土の導電性と柔軟性、エラストマー素材の柔軟性を用いて、形状認識できる音楽インタフェースを制作した(図 4.1)。本デバイスは、小麦粘土に接着した複数の電極間で抵抗値を測定することで、電極間の距離を概算し、コンピューター上のビジュアルに反映する。オームの法則により、電極間の抵抗値は媒介とする導電体の長さや電極と接する表面積によって変化する。こ

のことを活用して、インタフェースに内蔵した電極の位置に応じて変化するインタフェースの形状を随時認識することができる。詳しく言って、多数の電極を用いて測定した小麦粘土の抵抗値を形状認識や音作りのパラメータとして活用する。



図 4.1 小麦粘土を用いた音楽インタフェースのプロトタイプ

4.1.1 小麦粘土の抵抗値測定

制作に先立って、小麦粘土の導電性素材としての有効性を確認するために、小麦粘土の抵抗値を測定した。

NeonDough [2] は、オームの法則に基づいて多数の電極を内蔵した小麦粘土の形状認識を行った。そして、本研究でも小麦粘土の長さによる抵抗値の変化に関する実験を行った。実験には、Arduino UNO と 330Ω の抵抗、そして小麦粘土（株式会社たんぽぽ社製）を用いた。実験の内容として、直径 1cm の小麦粘土の両端に電極を配置し、分圧回路を用いて粘土の長さを変更する際の抵抗値の変化を測定した。分圧回路の一つの抵抗を 330Ω 、片方の抵抗を小麦粘土とし、電圧は 5V とした。その結果、小麦粘土の抵抗値は測定開始から約 5 秒が経過した時点から上昇し、約 50 秒が経った時点で最高値を記録した後徐々に減少し、 1 分～ 1 分 10 秒の間に特定の数地帯に収束した。表 4.1 は、小麦粘土の長さ（最小～最大）の関係を示す。実験の結果から、電極間の小麦粘土の長さに比例して上昇することが確認できた。

小麦粘土の長さ (cm)	抵抗値 (Ω)
1	287~499
2	311~533
3	342~589
4	380~642
5	430~721
6	507~766
7	483~762
8	489~792
9	556~867
10	563~880

表 4.1 小麦粘土の長さ（最小～最大）と抵抗値の関係

4.1.2 プロトタイプ制作

ハードウェア

上述から小麦粘土の導電性素材としての有効性を確認できた。これに基づいて、今回はプロトタイプとして4つ電極を用いた三角錐型のインタフェースを設計した。形状に基づいて、厚み0.5mmのエラストマーシート（3M社製Y4905J）を切り立体状の膜を作成した。三角錐の1辺の長さは9cmとした。エラストマーシートの伸び率は約109%である。その中に導電性素材である小麦粘土と電極であるジャンプワイヤを配置した。その後、図4.2の展開図のように、エラストマーシートの表面の境界をそれぞれ接着して仕上げる。

電極はインタフェースの図形の頂点になる四つの部分に配置される。具体的に、頂上の頂点には+極、底面の三つの頂点には-極が割り当てられ、三つの抵抗値を出力する。要するに、今回のプロトタイプから測定されるそれぞれの抵抗値は、三角錐の頂上から底面の頂点までの長さとして取り扱うことになる。図4.3は実際に制作したプロトタイプと測定する抵抗の範囲を示す。この結果、三つの抵抗値を用いた形状の変化による異なる音の選択が可能になる。

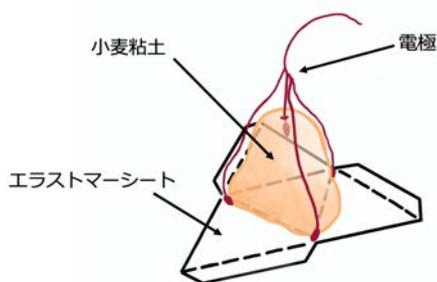


図 4.2 プロトタイプの展開図

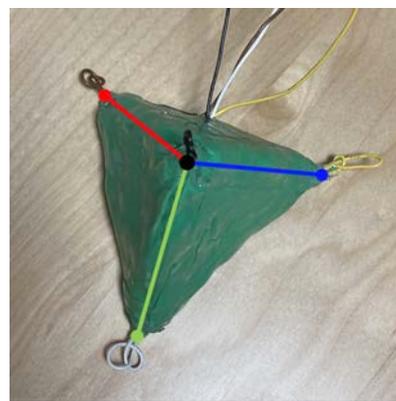


図 4.3 抵抗値の測定範囲

音のデザイン

音のデザインは大きく分けて2つがある。1つ目は、UIを「伸ばす」や「潰す」操作を通して変形させることで、形に相応するプリセットの音を読み込み出力する。2つ目は、ユーザが任意的にUIの形を再調整することで、はじめに読み込まれたプリセットの音源をカスタマイズできる。これは、UIに内蔵された電極間の距離を音のパラメータとして使用する。例えば、ユーザは特定の電極が内蔵された部分を伸ばす、潰すことで音の周波数をコントロールすることができる。リアルタイムに、ユーザはUIを変形しながら音の変化を確かめることもでき、出力する音をMIDIデータとしてコンピューターに伝送することもできる。図4.4はデバイスの段階的なアルゴリズムの仕組みを示す。

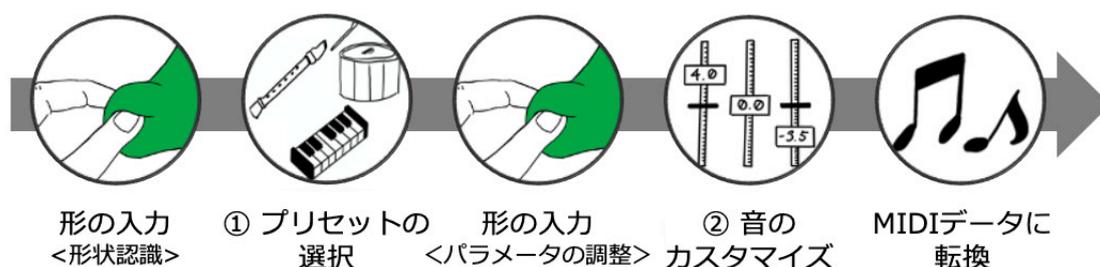


図 4.4 段階的なアルゴリズムの仕組み

このようなサウンドデザインの手法は、ユーザーが希望する楽器の外形を入力することで、UIがその形と最も関連性の高い楽器の音をユーザーに提供することができる。形状の変化による抵抗値の出力はシリアル通信を通して Arduino UNO から Cycling'74 社の音響プログラミングソフトウェアである Max に入力される。Max では、入力される形状を認識するために、Arduino UNO から伝送された複数の抵抗値のデータを比較する条件文を設計して、それぞれの条件に合う形状を判別し、その形状にマッチングする音を出力する。図4.5は異なる形状を入力した時の Max 上の音の選択過程を示す。プロトタイプを変形する際（左側）、Arduino UNO は受け取った抵抗値をもとに、大小関係を示すグラフと、ビジュアルの三角形（それぞれの抵抗値の具合によって中央から頂点までの長さが変わる。）を表

示し、指定の条件文に基づいて出力するサウンドを選別する（右側）。今回のプロトタイプの場合としては、出力された三つの抵抗値（red、blue、green）の中でredが最も高い値を示す時のみドラムのサウンドが出力され、それ以外の場合はギターのサウンドが出力されるように設定した。このとき、ビジュアルの三角形はプロトタイプを上から眺めたときの形を想定したため、上から眺めたプロトタイプの形と三角形の形は同じ形状として認識される。

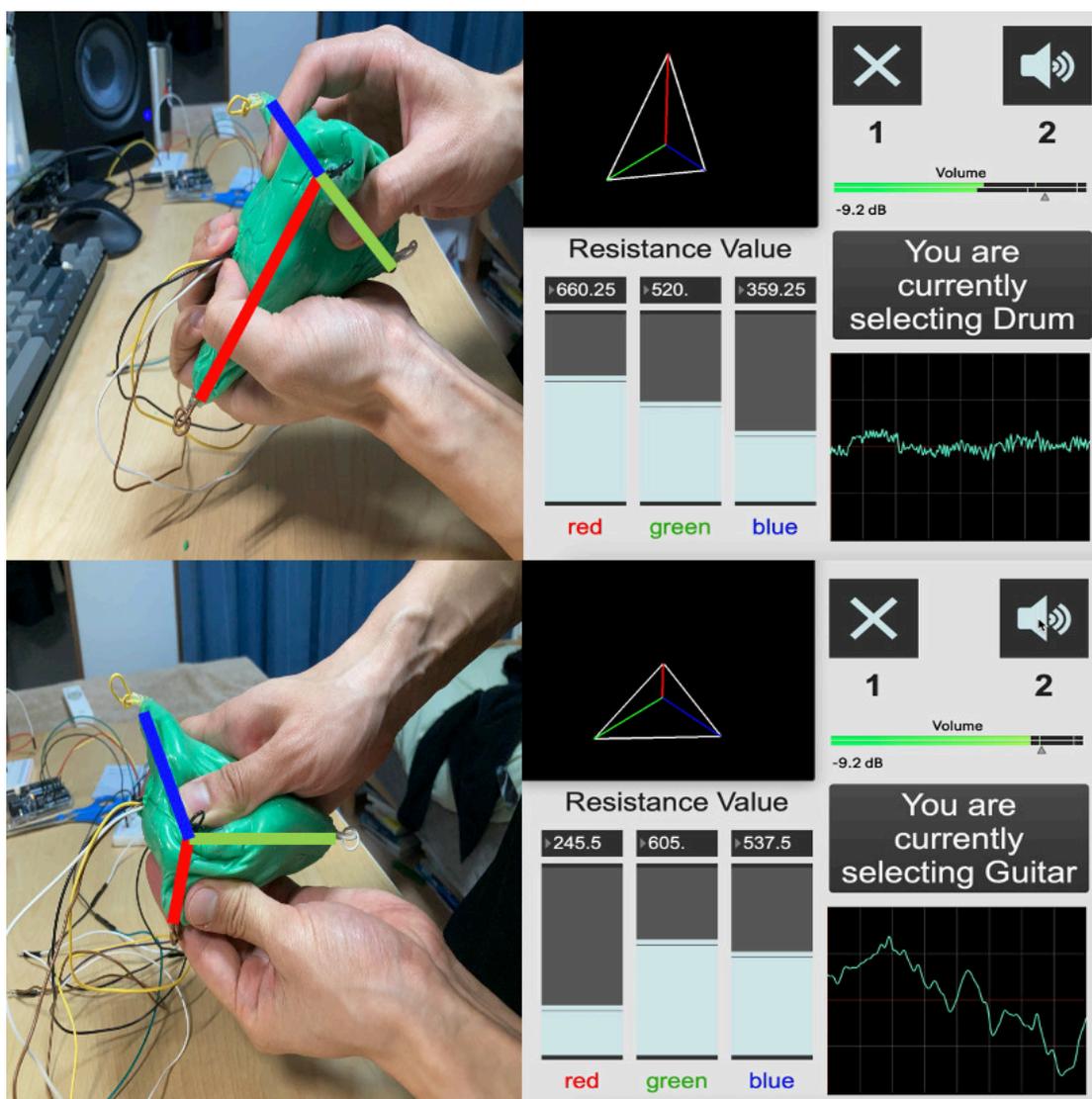


図 4.5 プロトタイプの形状認識

4.1.3 応用例

今後の応用例として、小麦粘土に多数の電極を付着して楽器の形状を認識させることを考えた。インタフェースの形状を楽器の形に変えることでその形に値する楽器音を出力する仕組みが考えられる。さらに、二つの異なる楽器の形を融合した形を入力することで、その二つの楽器音の中間にあるサウンドを出力できることが期待される。このようなシステムをもつインタフェースは、将来、タンジブルな体験を活かした子供向けの音楽教育に応用される可能性がある。

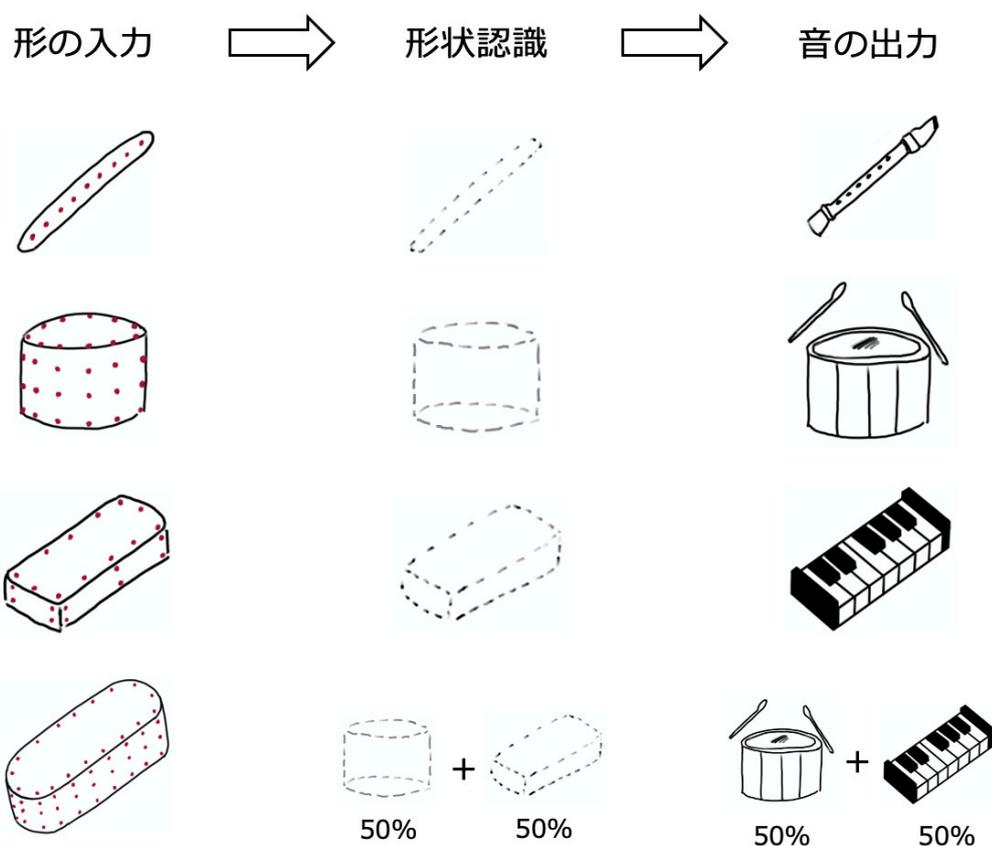


図 4.6 楽器の形状の入力に応じた楽器音の出力

4.1.4 考察

小麦粘土の不安定な抵抗値測定

確かに、小麦粘土は非常に柔らかい素材であって、柔軟な形状変化が可能なインタフェースを制作することができた。しかし、小麦粘土は水分を含むため、マイクロコンピュータから粘土に電流を流した時、数十秒内に粘土と電極が接触面が錆びてしまうことがわかった。錆びた電極は、抵抗値を正常的に測定できなくなり、形状認識にも支障を与えた。

安定性と機能性の拡張

前述より小麦粘土は導電性を利用したセンシングに適合していないことがわかった。そこで、安定的なセンシングと共に、インタフェースにさらなる機能を追加するために、3D プリンターの機能性フィラメントに着眼した。

エラストマー素材の必要性

現段階で制作したプロトタイプの外側にはエラストマー素材のシートが覆われていて、形状変化時小麦粘土がデバイスの本体から離脱しないように固定したのみならず、柔軟に形状を変更できた。この点から、高い柔軟性と耐久性が目立ったため、今後のプロトタイプ制作においても使う可能性が高いと判断した。

4.2. 機能性フィラメントと 3D プリンターを用いた形状変更できるインタフェースの制作

前段階から得た結果をもとに、3D プリンターを用いて機能性フィラメントをもとにしたインタフェースの制作を行った (図 4.7)。本プロトタイプ制作を通して確認したいことは、以下の通りである。

- 3D プリンターによってインタフェースの製造プロセスが短縮できるか
- 磁石を用いてインタフェースの磁性素材を制御できるか
- 空気を吸引することで、インタフェースの形状を変更・固定できるか

今回は、前作から効果を確認したエラストマー素材のシート (外膜) に、PLA フィラメント素材 (ビーズ) と、磁性フィラメント素材 (内膜)、そして吸引用のチューブとポンプを使って、三角錐型のプロトタイプを制作した (図 4.7)。



図 4.7 機能性フィラメントで制作したプロトタイプ

4.2.1 プロトタイプ制作

モデリング

製造プロセスの最初段階として、内膜とビーズのモデリングを 3D CAD ツールである Rhinoceros を用いて行う。内膜のパターンは、Rhinoceros の追加プラグインである Grasshopper を使ってモデリングする（図 4.8, 4.9）。

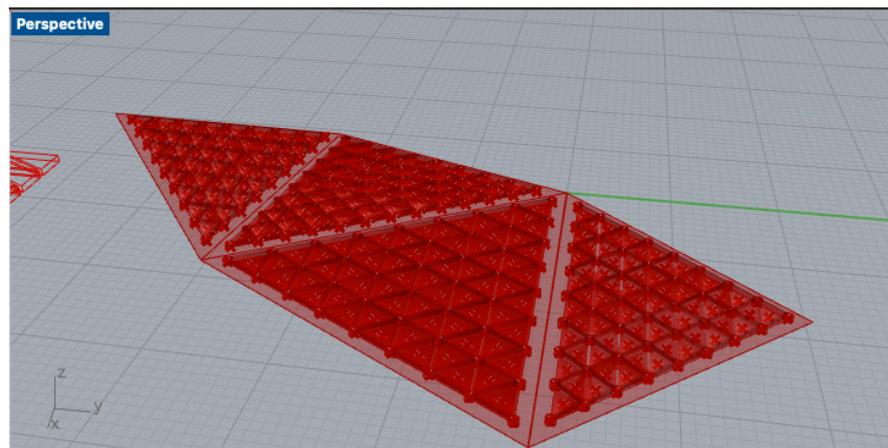


図 4.8 内膜のモデリング

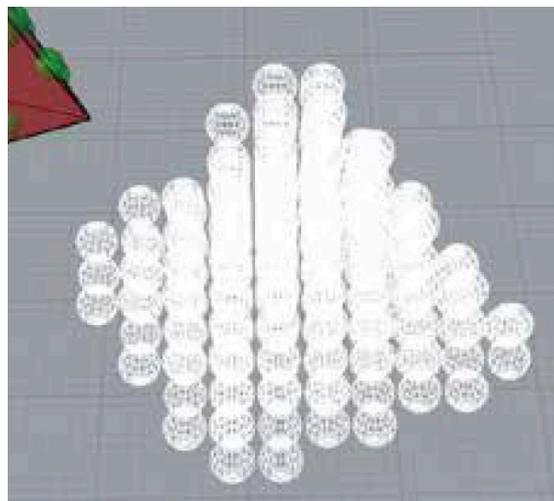


図 4.9 ビーズのモデリング

印刷

モデルに基づいて、図 4.10 と図 4.11 のように、それぞれ一つの塊として印刷する。印刷後、塊からパーツごとに取り外し、仕上げの時に使うことにする。印刷時のパラメーターの設定は図 4.2 の通りである。



図 4.10 印刷した内膜



図 4.11 印刷したビーズ

4. 実装 4.2. 機能性フィラメントと 3D プリンターを用いた形状変更できるインタフェースの制作

パラメーター		値
積層ピッチ	積層ピッチ	0.17mm
	モデル一層目の厚み	0.27mm
ヘッドの温度		210°C
スピード	樹脂を押し出し中の速度	10mm/s
	樹脂を押し出していない時の速度	80mm/s
	樹脂押し出し中の最低速度	5mm/s
	一層目の最大速度	10mm/s
	一層目の最大移動速度	70mm/s
モデル内の充填率	上面積層数	4
	下面積層数	3
	充填率	10%
	モデル内部充填パターン	三角形
モデル上面プリントの速度&底面プリントの速度と基準速度の比率		50%
オブジェクトの内部充填速度と基準速度の比率		100%
押出率		100%
第一レイヤーの押出率		110%
サポート		なし
ラフト		あり

表 4.2 印刷時のパラメーター

仕上げ

形状に基づいて、厚み 0.5mm のエラストマー素材のシート（3M 社製 Y4905J）を切り立体状の膜を作成する。三角錐の 1 辺の長さは 6cm とする。図 4.12 の展開図のように、エラストマー素材のシートの上に磁性の 3D プリント素材を敷いた後、シートの真ん中に PLA フィラメント素材のビーズを配置して、エラストマーシートの表面の境界をそれぞれ接着して組み立てる。

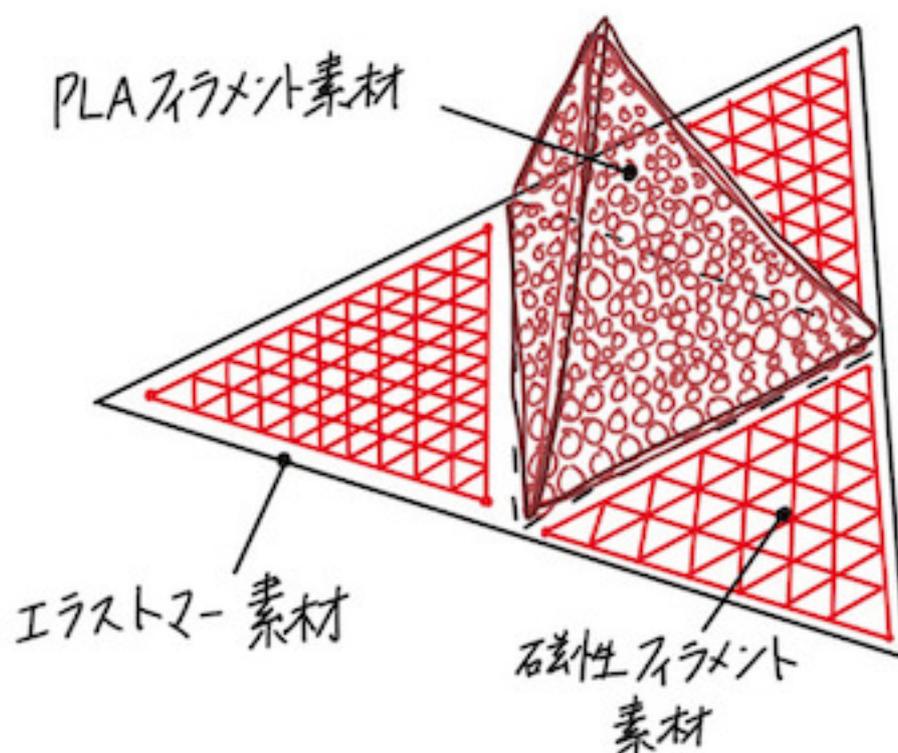


図 4.12 機能性材料と 3D プリンターを用いたプロトタイプの展開図

4.2.2 形状変化の確認

チューブに繋いだポンプを通してインタフェース内の空気を吸引した。その結果、吸引する前の形状にインタフェースの形を固定することができた。

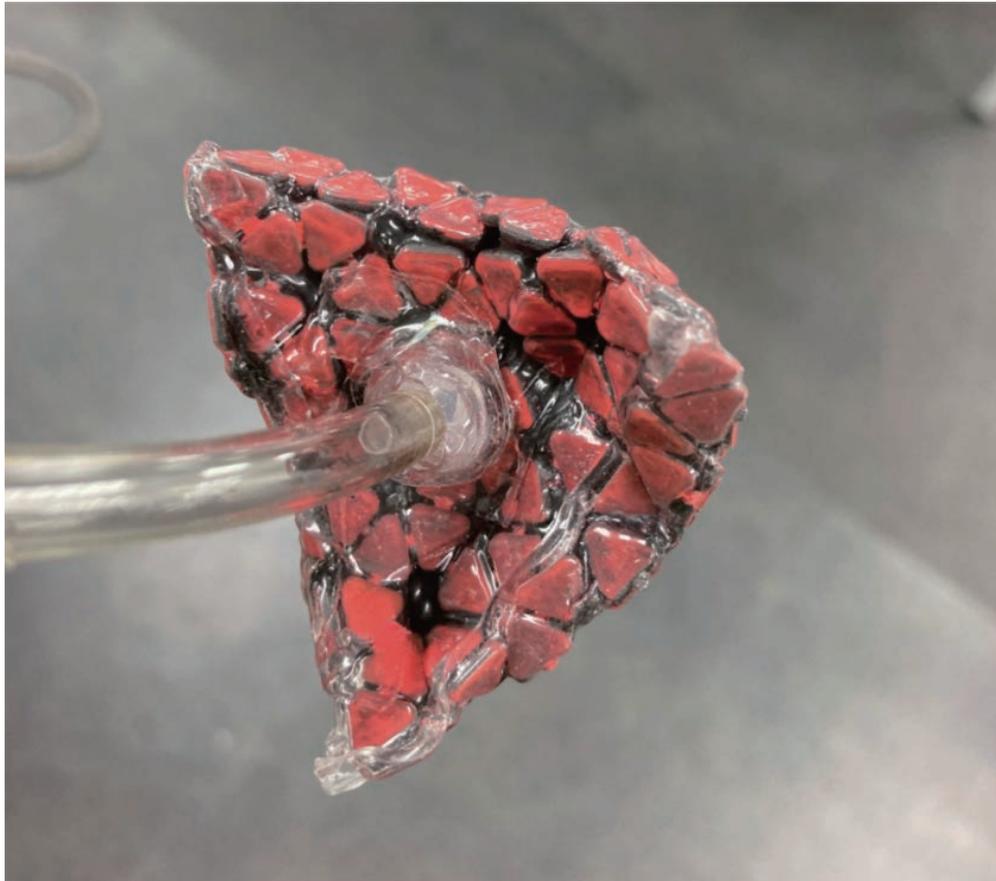


図 4.13 機能性フィラメントで制作したプロトタイプ

4.2.3 応用例

今後の応用例としては、中身のビーズを導電性素材のフィラメントに変えて電極を付着するによって、形状の変化による信号の制御も可能だと考えられる（図 4.14）。

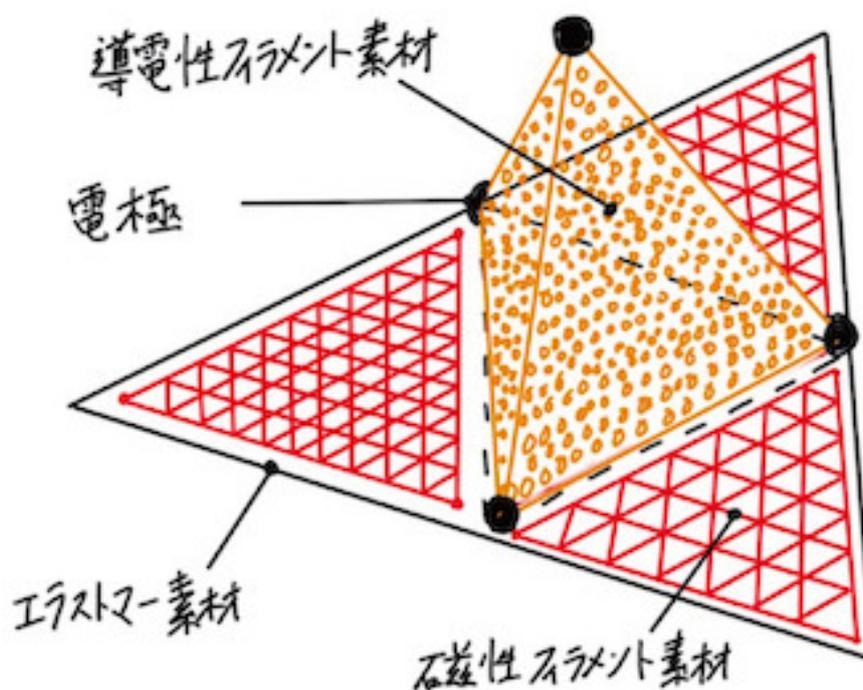


図 4.14 応用例の展開図

4.2.4 考察

3D プリンターによる製造プロセスの簡素化

カスタマイズしたプログラミングツールを通して、具現したいモデルを高速に作成できた。具体的には、制作に必要な材料を全て 3D プリンターから印刷でき

たため、制作の仕上げにかかる時間を大きく短縮できた。

一方、ビーズの塊の場合、ビーズ同士で強く接着されていたため、剥がすのに時間がかかった。今後の研究において、もっと剥がしやすいビーズの配列を考える必要があると判断した。

また、応用例として考えられる電極の付着されたバージョンの場合、現段階のプロトタイプと比べ、組み立てが複雑だと判断した。従って、組み立てを最小化し、製造プロセスにかかる負担を一層減らせる方法について検討することにした。

磁石による磁性素材の制御

磁性フィラメントで造形したインタフェースの外壁はマグネットによる引力を感じる事ができた。ただし、エラストマー素材のシートがその二つの間を介していたこと、本研究で使った外壁のパターンでは外壁を部分的に制御できなかったこと、以上2点から磁石による磁性素材の制御は確認できなかった。今後の応用例として、磁性フィラメント素材の制御によるセンシングや形状変化が課題として考えられる。

吸引による形状変化・固定

制作にあたっては、エラストマー素材のシートをインタフェースの外壁に貼っていたため、チューブを通した空気の吸引が正常的に確認できた。そして、空気の密度を制御することにより、形状を固定することもできた。

まとめ

以上3点から、カスタマイズした制作ツールによる効率的な製造プロセスの実現と、吸引による形状制御が確認できた。続いて、これらの手法を同時活用しながら、作業効率を一層高められる方向へ研究を進むことにした。

4.3. マルチマテリアル 3D プリンターを用いた形状変更できるインタフェースの制作

前段階からわかったことを踏まえ、今回はカスタマイズしたプログラミングツールとマルチマテリアル 3D プリンターを使って、吸引によって形状変化できるインタフェースを制作した。現段階で確認したいことは、以下の通りである。

- インタフェース内に異なる部屋を作り、それぞれに吸引を行なった時、独立した制御ができるか
- マルチマテリアル 3D プリンターを使えば、吸引して形状変化できるインタフェースの製造プロセスはどこまで省略できるか

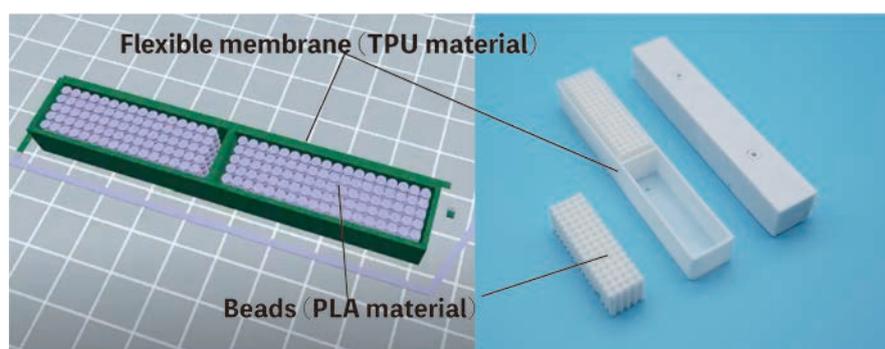


図 4.15 提案するインタフェースの基本構造

提案手法による基本的な構造は図 4.15 のとおりである。オブジェクトは、TPU 素材製の柔らかい膜、PLA 素材製のビーズ、吸引用のチューブ、ポンプ、そしてマイクロコンピューターで構成されている。膜の内側の部屋を分離することにより、ユーザーは各部屋の空気を部分的に吸引し、インタフェースの形状を複数の選択肢の中で切り替えることで、さまざまな触覚を体験できる。すべての制作プロセスが 3D 印刷によって実行されるため、この方法は複雑な内部構造を作成できるメリットがある。3D 印刷のもう一つの特徴は、ユーザーがいろんなサイズと形状でビーズを印刷することができる点である。これにより、ユーザーはオブジェクトの硬さと触感を変更できる。

この方法を使えば、一回の印刷プロセスで、複数の材料を使用して複雑な構造を制作できる。そして、ユーザーはこの方法を用いて膜とビーズを1つに印刷できるうえに、制作後は、オブジェクトを潰して内部のビーズの塊からビーズを剥がすことで、ジャミング転移を実行することができる。最後に、チューブをオブジェクトに連結し、ポンプをマイクロコンピュータで維持することにより、形状と硬さを制御することができる。今回は、膜の構造、内部の構造、ビーズの形状を効率的に設計できる環境を開発した。

4.3.1 プロトタイプ制作

モデリング

まず、ユーザーは複数の素材で作られたジャミングインタフェースを制作するために、3Dモデルを作成する必要がある。今回は、3D CADソフトウェアであるRhincerosのプラグインであるGrasshopperを使用してカスタマイズされたソフトウェアを開発した。このソフトウェアを使用すると、ユーザーはオブジェクトの形状を簡単に設定し、3Dモデルを膜と内部ビーズのセットに変換することができる。膜の厚さはプリントしたオブジェクトの硬さに影響を与えるが、今回は膜の厚さを1mmに設定した。ビーズの直径は0.5~3mmの間で変更できるが、今回はビーズの直径を2mmに設定することにした。格子状のサポート材は、ビーズ間の各レイヤーに自動的にレンダリングされる。その結果、直方体のオブジェクトを設計した。デバイスの幅は90mm、デバイスの長さは15mm、高さは15mmであった(図4.16)。

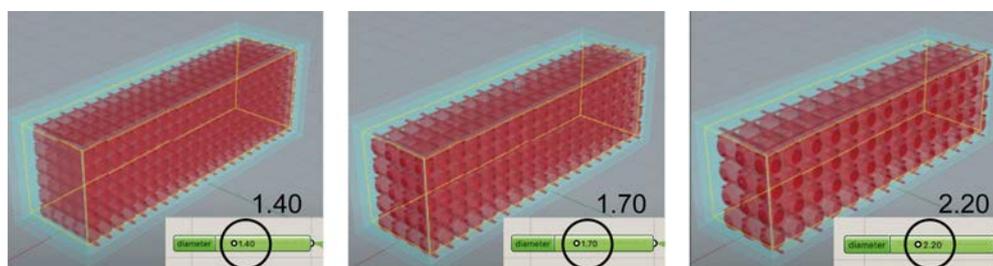


図 4.16 ビーズのサイズ調整プロセス

印刷

次のステップでは、マルチマテリアル 3D プリンターの 1 つである 3D プリンター (Flashforge 社製の Creator3 PRO) を使用して印刷した。今回は、TPU フィラメント (Polymaker 社製の PolyFlex TPU95) を使用して膜を印刷し、PLA フィラメント (Flashforge 社製の PLA-F13) を使用してビーズをプリントした (図 4.17 の A)。

印刷のプロセスでは、表 4.3 に示すようにパラメーターを設定する。

上記の条件での印刷時間は合計 7 時間であった (図 4.17 の B)。印刷後、ユーザーはビーズを剥がすために手でデバイスを押しつぶす必要がある。繰り返しになるが、これはサポート材がビーズの各層をつなぎ合わせているからである。コンプレッションの後、オブジェクトはジャミングユーザインタフェースとして機能できるようになる (図 4.17 の C)。

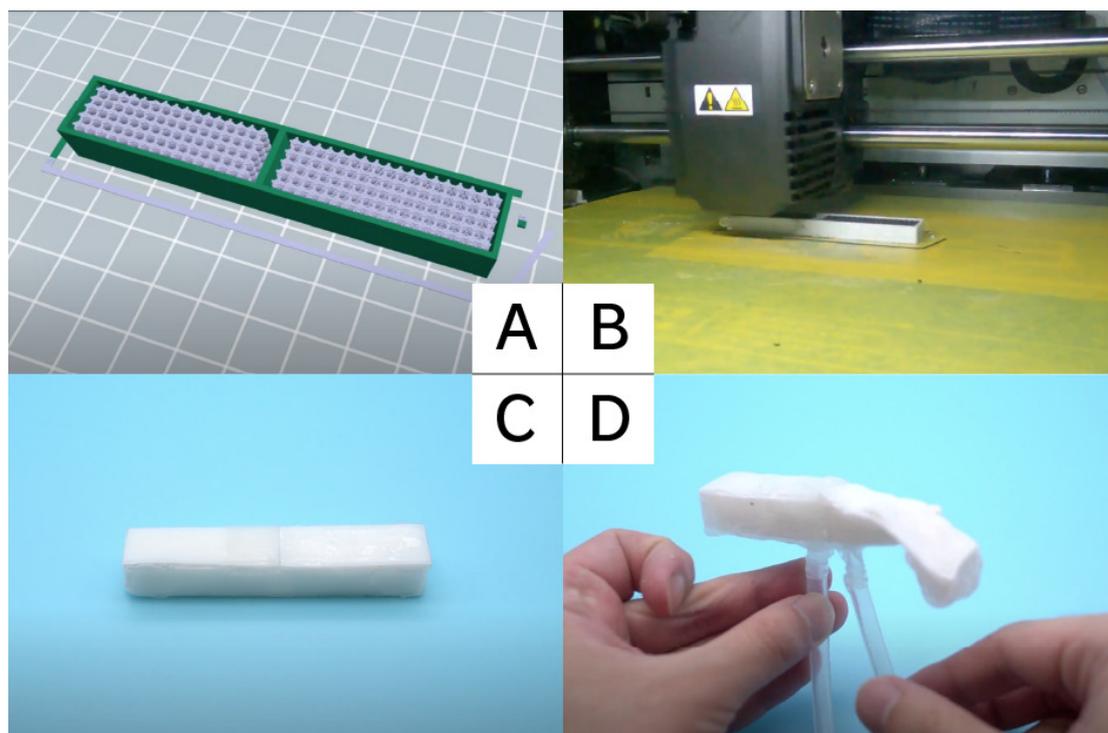


図 4.17 製造プロセス

仕上げ

最後に、各部屋にチューブを連結し、部分的な吸引で各部屋の硬さを制御した。さらに、それぞれのチューブが各部屋を独立的に吸引していることを確認した（図 4.17 の D）。このオブジェクトは、ユーザーの指のウェアラブル触覚デバイスとしても役立つ（図 4.18）。



図 4.18 ウェアラブル・ハプティック・デバイス

パラメーター		値
積層ピッチ	積層ピッチ	0.20mm
	モデル一層目の厚み	0.27mm
温度	左ヘッド (TPU)	225°C
	右ヘッド (PLA)	220°C
スピード	樹脂を押し出し中の速度	10mm/s
	樹脂を押し出していない時の速度	80mm/s
	樹脂押し出し中の最低速度	5mm/s
	一層目の最大速度	10mm/s
	一層目の最大移動速度	70mm/s
モデル内の 充填率	上面積層数	4
	下面積層数	4
	充填率	15%
	モデル内部充填パターン	六角形
モデル上面プリントの速度&底面プリントの速度と基準速度の比率		50%
オブジェクトの内部充填速度と基準速度の比率		100%
押出率		100%
第一レイヤーの押出率		110%
サポート		なし
ラフト		なし

表 4.3 印刷時のパラメーター

4.3.2 応用例

ハプティック・デバイス

六角柱のハプティック・デバイスは、図 4.19 に示すように、内部と外部の構造が独立している。デバイスの底面の直径は 65mm、デバイスの高さは 20mm であった。膜厚は 0.5mm、ビーズの直径は 2mm、印刷時間は 22 時間であった。ユーザーは、デバイスに圧力をかけることにより、硬さの違いを体験できる。二重構造であるため、両方の部屋を吸引すると困難になり、部屋を吸引しないと柔らかくなります。具体的には、その二重の設計により、デバイスの内側または外側のいずれかを硬化させることができ、最終的には、より複雑な触覚表現を行うことができます。さらに、3D 印刷は、個別の部屋が吸引できるシステムが制作するための唯一の手段である。

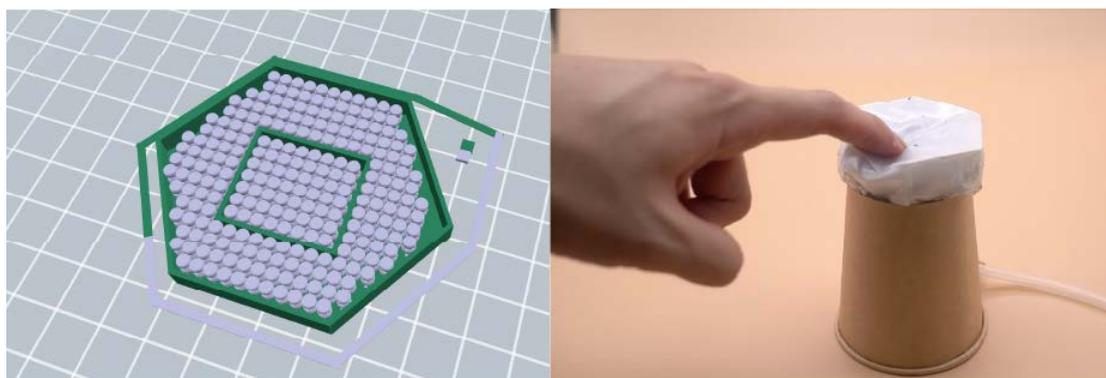


図 4.19 内部に二重構造を持つハプティック・デバイス

機能性材料で構成されるコントローラー

我々の方法では、通常の PLA フィラメントだけでなく、機能性材料を使用したジャミングインタフェースをもプリントできる。たとえば、導電性 PLA フィラメントを用いたコントローラー（PROTO PLANT 社）は、インタフェースの弾性を概算するために抵抗値を測定する（図 4.20 の A）。インタフェースの幅は 110mm、長さは 52mm、高さは 15mm、内部ビーズのサイズは 0.5mm である。印刷時間は

18 時間であった。印刷後、ユーザーはビーズを吸引することでコントローラーの形状を変更できる（図 4.20 の B、C）。電極はインターフェースの両側に貼り付けられ、電極間の抵抗値は Arduino を使用して測定される。デバイスの長さで抵抗値の関係を測定した。抵抗値は、距離が 5mm の場合、約 1493Ω、30mm の場合、2647Ω であった。拡大・縮小することで、画面上のオブジェクトを操作できる。さらに、相互作用中の吸引はデバイスの触感も変える可能性がある（図 4.20 の D）。

一方、FDM3D プリンターで制作された TPU 素材のオブジェクトが乱暴に扱われていると仮定してみよう。その場合、その層が剥がれる可能性があるため、柔軟なコーティング素材などを用いて損傷したセグメントを覆う必要がある。実際、インターフェースの制作中にも、エラストマーシート（3M 社）を使用して、いくつかの穴を覆った。

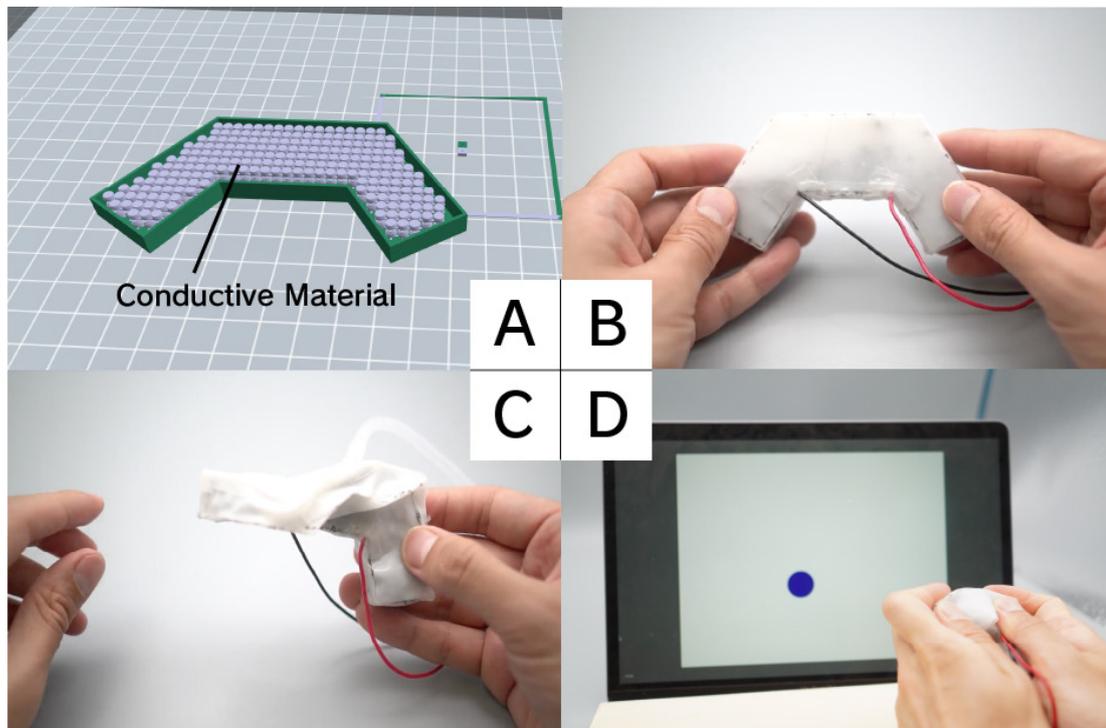


図 4.20 導電性素材を用いたコントローラー

ビーズの形状の編集

3D CAD ツールを使用すると、インタフェースの構成のプロパティを自由に編集できるという利点がある。たとえば、ユーザーは球状の代わりにさまざまな形のビーズを選択できる。本研究では今後の作業のために、テトラポッド状と球状のビーズを使って2つの異なるスティック型のインタフェースを作成し、2つの異なる形状のビーズ間の違いを発見するために実験を行った（図4.21）。球状のビーズの直径は2mm、テトラポッド状のビーズの中心からの長さは2mmであった。各プロトタイプに使用したビーズの重さは2gであった。膜の厚さは0.5mmであった。当インタフェースの幅は80mm、長さは12mm、高さは5mmであった。

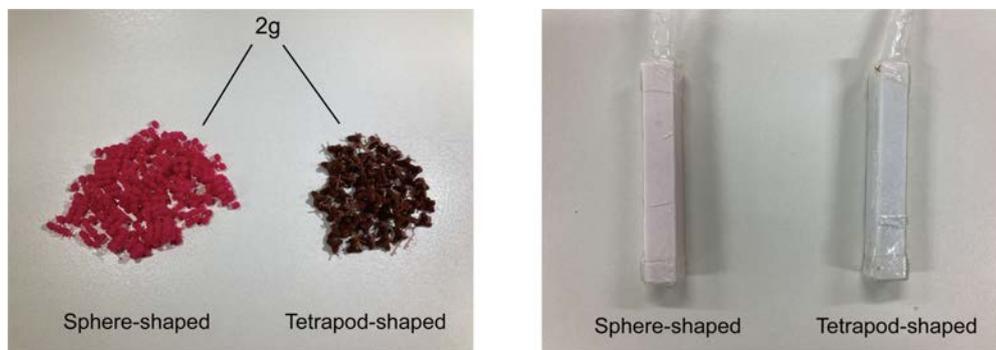


図 4.21 球状とテトラポッド状のビーズ

圧力がかかった時のそれぞれのプロトタイプの曲がり具合を測定するために、同じ高さのスタンドを2つ用意し、プロトタイプをスタンドの両端に配置した。その後、望遠鏡の代わりにカメラ（35mm フォーマットの52.5mm レンズを搭載した富士フイルム社の X-T30）を使用して、ユーイングの装置を使用したヤング率の測定法を参照して、曲がり具合を観察した。その結果、カメラで撮影した写真を分析することで、曲がり具合の変化量を取得した。また、プロトタイプの中央部に150g、200g、250g、350g、400g、450gの順に6つの錘を結び、ジャミングの有無による曲がり具合を観察した。実験は（1）ジャミング、（2）軽く錘を落とす、（3）曲がり具合を観察する、（4）ジャミングを解除する、（5）曲がり具合を観察するという順序で行った。錘を結ぶところはピボットから30mm 離れていた（図4.22）。

ジャミングを解除した時の変化量（図 4.22 の A）は、継続する圧力下でプロトタイプがいかに形状を固定できるかの安定性に比例する。値が 0 から離れるほど、継続的な外圧下でジャミング状態での形状を維持するのに効果的である。対照的に、値が 0 から近いほど、同じ条件下でジャミング状態の形状を維持することが難しくなる。

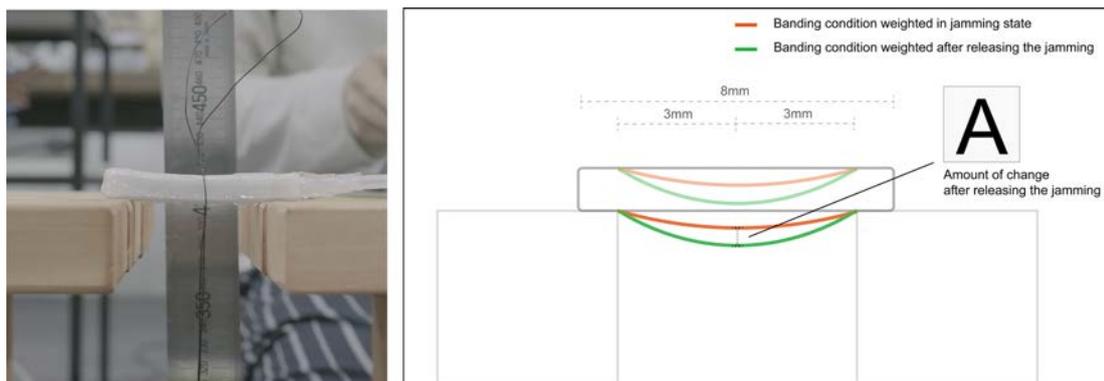


図 4.22 二つのプロトタイプの曲がり具合の測定実験

実験結果は表 4.4 と図 4.23 の通りである。1.0mm 未満の値については、不確かさはあるが、軽量でも単調に増加する傾向が見られた。

球状のビーズの場合、350g までは変化が大きくなり、その後は減少することがわかった。一方、テトラポッド状のビーズは、重さの増加に応じて変化が徐々に増加することを示した。これらの事実は、テトラポッド状のビーズのインタフェースが、ジャミング状態で継続的な外圧に対して形状を固定するのに比較的適していることを示している。実験の結果を参考にすると、今後の作業でテトラポッド状のビーズを使用することで、激しい圧力下でも形状を固定できるジャミングインタフェースを開発することが想像できる。

		Weight (g)					
		150	200	250	350	400	450
A of Figure 8 (mm)	Sphere-shaped	0.2	0.3	0.4	0.7	0.6	0.3
	Tetrapod-shaped	0.3	0.7	1.0	1.2	1.5	1.8

表 4.4 実験結果

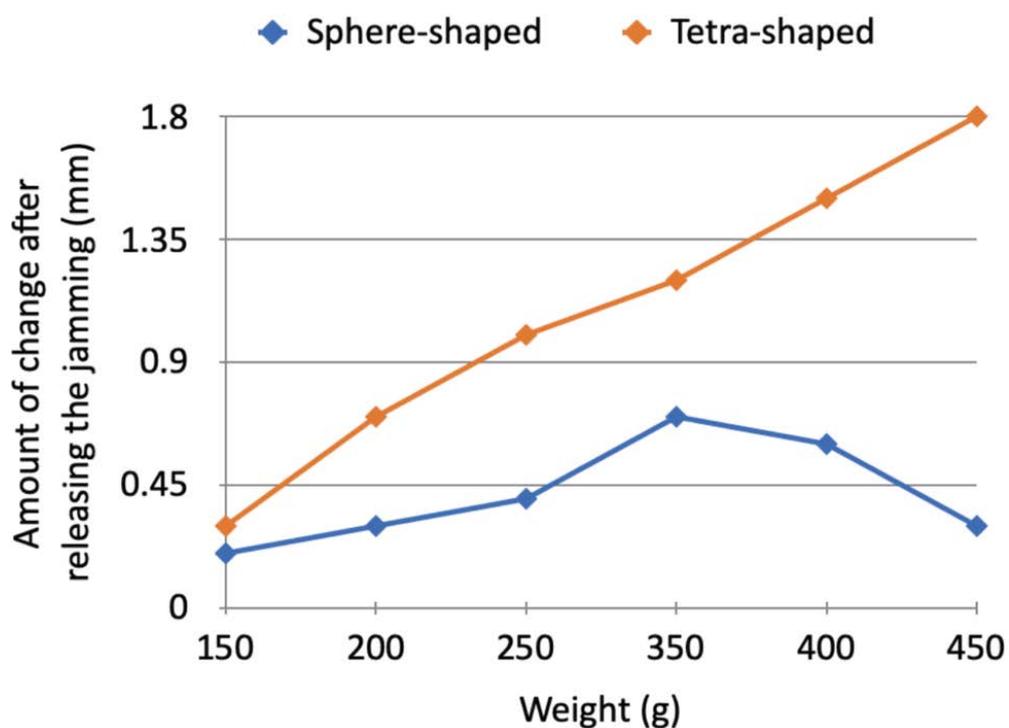


図 4.23 ジャミングを解除した後の変化量と錘の重さの関係

4.3.3 考察

本プロトタイプ制作を通じて確認した、マルチマテリアル 3D プリンターを使ったデジタルファブリケーションツールのメリットは以下の通りである。

独立した複数の内部空間の実現

独立した複数の内部空間をそれぞれ吸引した結果、それぞれごとに独立した形状変更を確認できた。さらに、提案した応用例からも分かるように、二重構造を通じた豊富なハプティック体験が今後の研究の方向として期待される。ただし、前段階である押し潰しの段階で圧力を入れすぎたら、内部空間を区分する壁の耐久性が弱くなり、正常な形状変化ができなかった。したがって、改善策として印刷時のパラメータ調整やモデリングの見直しなどが求められる。

剥がせるビーズの塊の作成

今回の実装では、一度の制作でどれくらい製造プロセスを省略できるかが注目されていた。そして、デバイスを実装しながら、小さい圧力でも押し潰せるビーズの塊をモデリングすることができた。そのおかげで、チューブを付着する前段階までの製造プロセスは、3D CAD のソフトウェアと、マルチマテリアル 3D プリンターを活用することで、自動化され、複雑な作業を手動で行う必要がなくなった。

ビーズの形状によって異なる特徴の発見

最後の応用例では、異なる形状のビーズをそれぞれ入れたスティック型のプロトタイプに対して、錘をかけて圧力を継続的に与えたときの吸引による形状固定の有効性を比較した。実験結果からは、テトラポッド状が球状よりビーズ間の摩擦面が広いため、吸引によって形状を固定しやすいということが推定できる。しかし、それにとどまらず、今回の実験を通じて今後の研究においても多様な形のビーズの効果を探求する必要性を感じた。

第 5 章

評 価

5.1. 複数の機能性フィラメントによる複雑なセンシングの設計

同じ形状のインタフェースでも、どのような機能性材料を使うかによって、そのデバイスのパフォーマンスは変わってくる。本研究では、TPU フィラメント素材の膜に、内部ビーズの素材を PLA フィラメントから導電性フィラメントに代替することによって、結果的にいろんな形に変更できる入・出力コントローラーを実現できた 5.1。このような機能性の拡張は、今後他フィラメント間の組み合わせや、ビーズの形状というパラメーターに応じて、シナジー効果を期待できると考える。

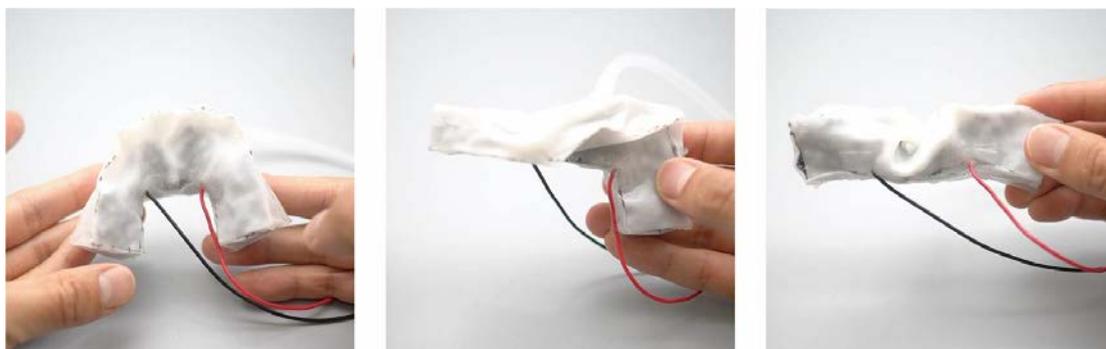


図 5.1 多様な形状変形とセンシングの可能性

5.2. 製造自動化による製造コストの削減

本研究では、カスタマイズしたデジタルファブリケーションを活用して変形できる柔軟なデバイスを制作した。実装したプロトタイプは製造自動化によって、製造プロセスを短縮し、結果的に実生活で活用できるウェアラブル・ハプティック・デバイスのアイデアを提案している。この点から、将来、誰でも容易に自分の体に合うデバイスを制作できるというビジョンを抱えていることがわかる。

一方、制作に使われた 3D CAD ツールと 3D プリンターは、事前に作ったモデルをもとにデバイスを自動製造してくれるため、展開図の作成や組み立てのような複雑な作業の手間を省いてくれる 5.2。そのおかげで、ユーザーは複数のシステムを持つ柔軟なインタフェースを手軽に作る事ができる。

反面、今後の課題としてユーザーの利用できるプリセットの数を増やすことが検討される。本研究の提案手法はより簡単に事前設計するためのプリセットを提供するが、その数がいまだに限定的である。そのため、その数を増やす、あるいはユーザーが容易くカスタマイズできるようなセッティングを作ることが今後の課題として挙げられる。

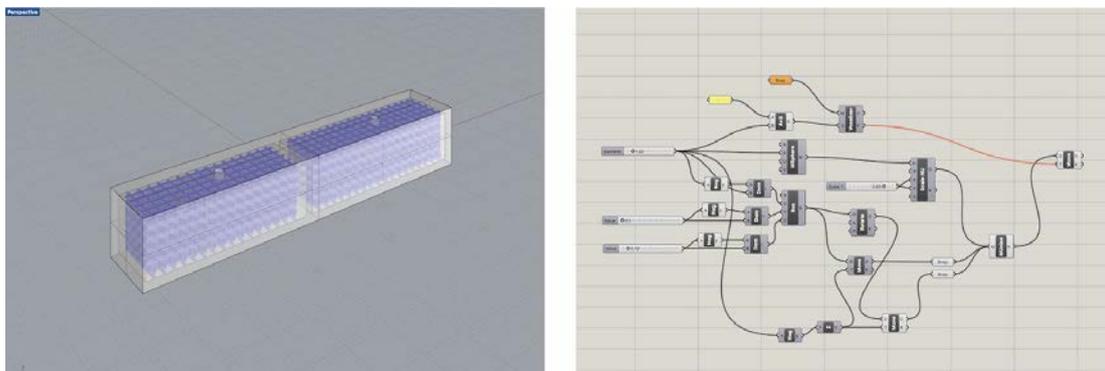


図 5.2 3D CAD ツールによるモデリング

5.3. 複数の独立した内部空間の設計

本研究では3Dプリンターの積層式印刷を活用して、手動では制作が難しい複数の独立した内部空間をインタフェース内に設計した。考えられる応用例として、インタフェース内に二重構造を作って豊富な触覚体験を提供したり、複数の部屋を並べて指や膝に装着するジョイントサポーターを制作したりする事が挙げられる。

一方、印刷時、膜と内部ビーズのモデルをそれぞれ用意して一つに合わせる追加の作業が求められる。この過程で、モデルがうまく合体できなくなると、印刷時問題が発生しやすい。この点を踏まえて、今後ユーザーにガイドラインを提供したり、より簡単に印刷できる手段を探すべきである。

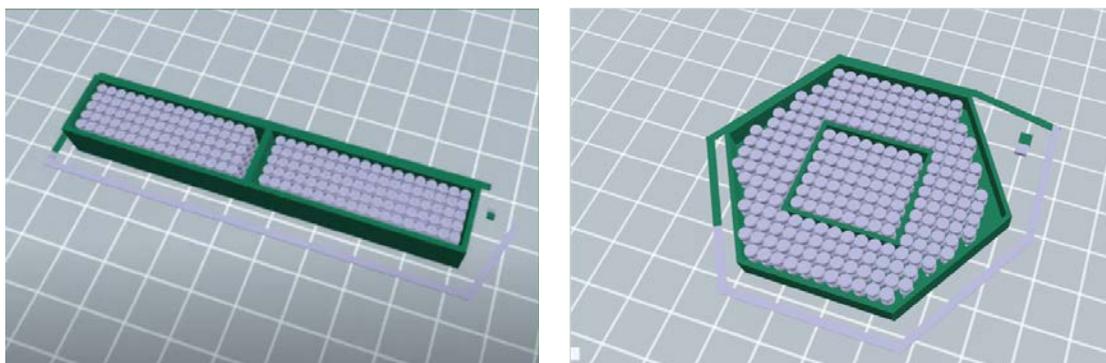


図 5.3 複数の独立した内部空間

5.4. 剥がしやすいビーズの塊の構造

本研究では一度の作業で複数素材を用いたインタフェースの制作と、膜とビーズのカプセル化を並行するために、簡単な圧力でも剥がしやすいビーズの塊をモデリングした(図5.4)。3Dプリントの特性上、印刷物の形状は固定される場合が多い。そこで、本研究ではビーズのレイヤ間に格子状のサポートを自動生成して、ビーズの間の接着を最小限に収める。このことにより、印刷時は形状を保ち

ながらも、印刷後は軽く押しつぶすことで簡単にビーズ間の配列を崩し、ビーズを剥がす事ができる（図 5.5）。

一方、課題として、印刷後圧力をかけてデバイス内部のビーズの塊を潰す時、膜に穴が空いてしまうことが多かった。その時は変形に耐えられなさそうな部分をエラストマー素材のシートで覆って、問題を未然に防止した。さらに今後は、プロトタイプの完成度を一層高めるために、変形に耐えられる素材で膜を制作する予定である。



図 5.4 剥がしやすいビーズの塊



図 5.5 押し潰し

5.5. 実生活での活用例

提案する手法から考えられる、実生活での活用例は大きく3つある。一つ目は、硬さを制御できる柔らかいプロダクトである5.6。ファブリック材質の椅子やソファの場合、プロダクトの全部位において一貫した硬さを持つため、それぞれの使用者にとって座り心地の良い製品を探さなければいけない。そこで、本研究から提案する応用例は、自作することを想定し、ユーザーの好みに応じてプロダクトの内部構造をカスタマイズし、吸引を活用して自分にとって座り心地の良い硬さに調整することができる。

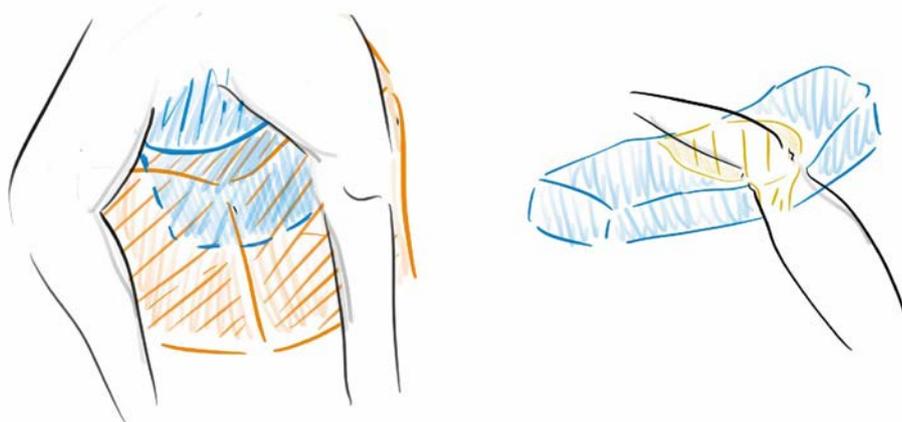


図 5.6 硬さを変更できる柔らかいプロダクト

二つ目は、身体的障害を持つユーザー向けに自作できるジョイントサポーターである。人はそれぞれ異なる身体的特徴を持っているため、同じ部位でも関節の長さは異なる。その点に着目して今回の応用例は、ユーザーの関節に合うジョイントサポーターを制作し、ユーザーの好み（回復の進み具合）に応じてプロダクト内の空気の密度を制御することで、関節を曲げられる限度を調整できる。この例に関しても同じくユーザーが自作することを想定しているため、外傷の回復にかかるコストを減らせると考える。

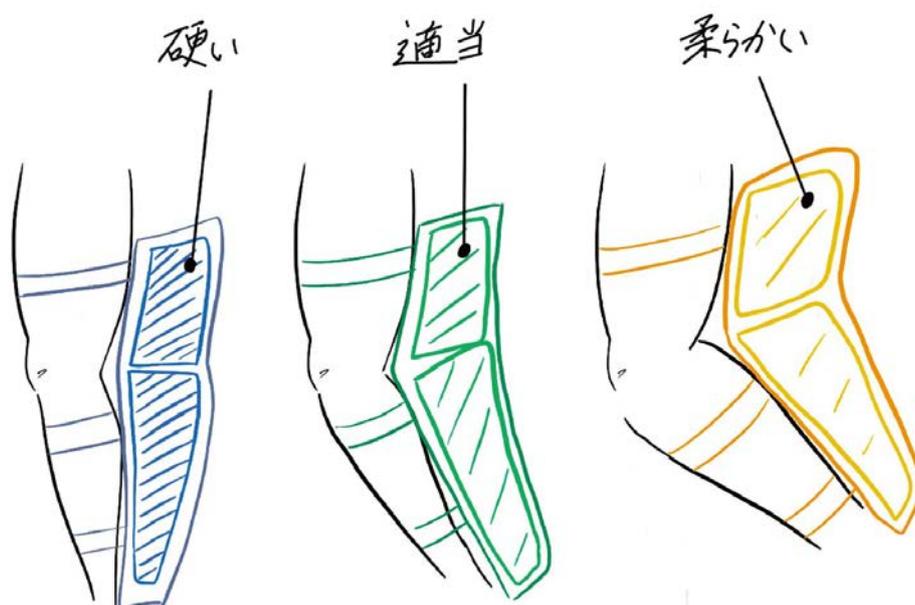


図 5.7 関節の曲げ具合を調整できるジョイントサポーター

最後の三つ目は、第4章のプロトタイプでも実証しているコントローラーである。本アイデアは、柔軟な形状変化ができるコントローラーであり、形状の変化に応じて、入・出力のシステムが変わる。具体的に、ユーザーはコントローラー一個だけで目的に応じた異なるセンシングによる制御を行うことができる。さらに、今後は磁性素材を用いてインタフェースの自動的な形状変化を意図することもできると考える。

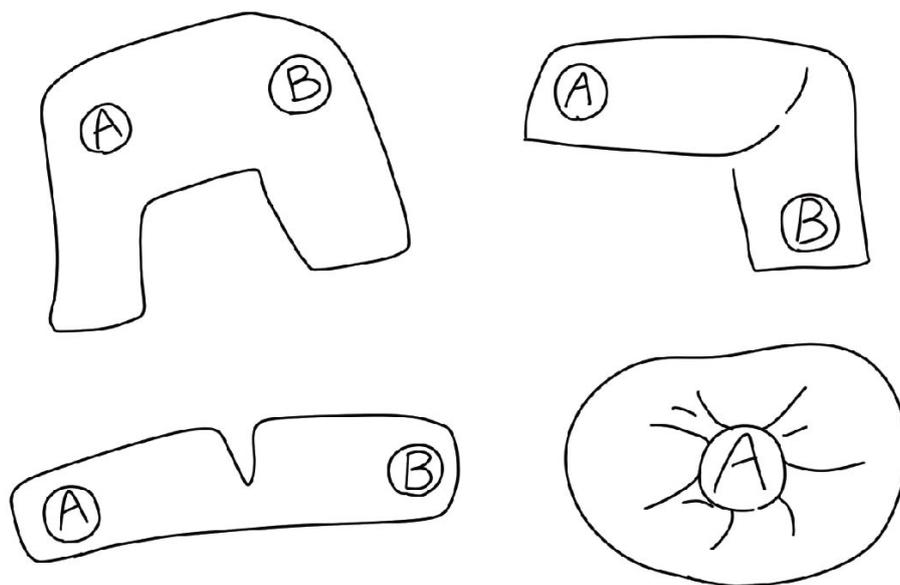


図 5.8 形状に応じて異なるセンシングができる

5.6. ユーザーフィードバック

以下では時系列順にプロトタイプを使ってもらったユーザーの体験に対する感想をまとめる。KMDの学内と、KMD Forum 2021では、上記の三つ目の応用例に関する感想を受けた。そしてショーケースでは、二つ目の応用例に関する感想を受けた。

学内

コントローラーのプロトタイプ制作後、教員と学生たちに本プロトタイプを体験してもらった。全体的に、デバイスのさまざまな形への柔軟な変化に対して、面白いという反応が多く、「次作が気になる」のようなポジティブな感想をもらった。また、導電性ビーズによる抵抗値測定に関しても、形状が固定されて硬くなった状態のデバイスでコンピューター上の信号を制御する時も、今まで感じられなかった触覚体験ができたという感想をもらった。

KMD Forum 2021

KMD Forumでは、一般人たちにコントローラーのプロトタイプを使ってもらった。以前の体験と同じく、柔軟な形状変化と変形による信号制御に関してポジティブな反応が多かった。体験者の中で、手動ではなく自動で形状を変化できたら他に面白い体験ができそうだという意見をもらった。そこで、なお、磁性素材を含む新たな素材の応用の必要性を感じた。

KMD Plenary & Showcase 2021

2021年度のKMDプレナリーミーティング後開催されたショーケースでは、ジョイントサポーターに関するフィードバックをもらった。本研究で提案しているジョイントサポーター以外にも、腰や背中など、さらに大きなサイズでの活用が期待されるという意見をもらった。確かに、現段階の応用例に満足せず、身体の曲面的な部位に関しては、範囲を広げてチャレンジする価値があると感じた。

5.7. その他の課題

本研究では、機能性材料に着眼して変形可能なインタフェースを3D印刷する手法について提案している。提案した手法は明確な新規性がある一方、いくつかの課題も存在する。今回は、それらについて触れながら、今後の研究の方向性について述べる。

5.7.1 他研究との比較

第2章と第3章で言及していた、マルチマテリアル3Dプリンターを用いたメタマテリアル配列のセンサ [18] は、その応用例としてウェアラブルデバイスを掲げていたため、本研究の掲げるビジョンや目的と共通点がある。両方とも事前設計されたモデルをもとにした制作が特徴ではあるが、モデリングの段階で構造要素の配列を作成する時においては、当研究から習うべきことがあると判断した。例えば、当研究ではいくつかの異なる素材のレイヤーを交互に重ねて造形しているが、デバイスの柔軟性を保つために、真ん中のレイヤーのパターンが交差する部分を意図的に空けてモデルを作成していた。これにより、印刷物は曲がった時、真ん中の空いている空間を活かして一層柔軟に変形できる。これらを参考に、本研究でも独立した部屋の間スペースを置くことで、全体的な曲がり具合を向上させることができると考えた。

5.7.2 量産化

第1章では、本研究のビジョンとして、誰もが自分の好みに応じて変形可能なデバイスを制作できる未来を掲げると述べた。そして、そのための働きの一環として、本研究では3D印刷手法を活用している。しかし、ユーザーに幅広く使ってもらうためには、同手法を使うためのハードルを下げる必要がある。この側面からいろんな課題が指摘される中、同手法の量産化は今後のために必ず解決しなければならない課題である。具体的に言えば、3Dプリンターの最も大きい課題である長い印刷時間は、ユーザーの自由な制作を妨げる要因となる。自由な制作が難

しかったら、同手法が市場に浸透し、量産化されることも実現しづらくなる。したがって、長い印刷時間を短縮させる技術の導入を待つ、あるいは長い印刷時間を想定した新しいライフスタイルまでデザインしていくことが、同手法が市場化するために不可欠なことであり、今後のもう一つの解決すべき課題なのである。

第 6 章

結 論

6.1. 仮説検証

本研究では、機能性材料の特徴と製造におけるデジタルファブリケーションの高い効率性に着眼し、3回にわたってプロトタイプ制作を行った。その結果、両者を同時に活かせるマルチマテリアル 3D プリンターを用いることで、第 1 章で述べた仮説を検証することができた。その内容は以下のとおりである。

6.1.1 複数の機能性フィラメントを用いた 3D 印刷手法の変形可能なインタフェース制作と実生活への応用可能性

まず、PLA や導電性フィラメント、TPU フィラメントなど、いろんな機能性フィラメントを用いたプロトタイプ制作を通して、複数の機能性フィラメントを掛け合わせた、さらなる応用が可能だと判断した。今後の拡張できる素材として磁性フィラメントが考えられ、フィラメントとの組み合わせが期待される。

次に、3D CAD ツールによる膜とビーズの精巧な事前設計のみならず、手軽に剥がせるビーズの塊のモデリングが実現できた。これらの点から、印刷後の組み立てを省略することによって、変形可能なインタフェースの製造プロセスを簡素化することができた。

最後に、インタフェース内に複数の独立した内部空間を作れる点から、より豊富なハプティック体験が実現できる。そのため、身体を固定する具合を制御するジョイントサポーターや、豊富なハプティック体験を楽しめるソファなどの柔らかい製品への活用が注目される。

6.2. まとめ

第1章では、日常で使われるデバイスに着眼して、形状が固定されていて直感性が落ちるといふ、かつて普及されていたデバイスのデメリットについて述べた。それにつなげて言及したのが形状が変更できる柔らかいデバイスであった。柔らかいデバイスは高い柔軟性から、日常生活の中でもユーザーに活用される可能性が比較的高いと考えた。それで、それらのニーズに応えるために本研究では、ユーザーが自分の好みに応じて変形可能なデバイスを作ることを目的として掲げた。さらに、達成手段として、機能性材料やマルチマテリアル 3D プリンターを用いたインタフェースの 3D 印刷手法について提案した。最後に、目標達成に貢献できる二つの仮説、そして本研究の掲げるビジョンについて述べた。

第2章では、最初、既存のセンサと柔らかい日用品を用いたセンシングの研究から機能性を持つ素材に興味を持ち、その後機能性材料を用いたソフトセンサの制作に関連する研究について調べた。その結果、機能性材料は柔軟に形状変化できるデバイスの制作によく使われたことがわかり、更に視野を広げてシェイプ・チェンジング・インタフェースについて調べることになった。シェイプ・チェンジング・インタフェース、そしてそれに含まれるジャミング・ユーザ・インタフェースは、比較的自由的な形状変化を用いてコンピューターの信号を制御したり、実生活で使われる物に代替されたりできることが確認できた。その反面、これらのインタフェースの製造プロセスは複雑であり、材料を手動で作るなどの予備作業が求められていたため、それらを簡素化させる必要性を感じた。そこで着目したのがデジタルファブリケーションツールである。同ツールを使えば、3D CAD のようなソフトウェアを通じて作りたいものを事前に細かくモデリングし、3D プリンターのようなハードウェア機器を通して自動製造できる。実際、同手段を用いてインタフェースを制作した研究事例を参考にして、変形可能なインタフェースの制作の実現可能性について調べた。その結果、異なる二つのフィラメントが使えるマルチマテリアル 3D プリンターを用いることで、異なる性質の機能性フィラメントを使った、インタフェースの制作に入ることになった。

第3章では、実装に入るに前もって、本研究の指向するビジョンと、研究計画について述べた。前章で取り上げた小麦粘土を用いた形状認識の研究を参考に、周

辺環境のものを使ったソフトセンシングできるインタフェースを制作したかった。そのため、小麦粘土を用いた音楽インタフェースの制作を計画した。次に、柔軟に変形できるインタフェースのデメリットである、手動で作るのが難しく製造プロセスが複雑だという特徴から、デジタルファブリケーションに着眼した。そして、同手段を用いることで本来の目標であるユーザーの好みに合わせた変形可能なデバイス制作が実現できると仮説を立てた。そこから、機能性フィラメントと3Dプリンターで作ったインタフェースの形状変化をテストし、結果的にマルチマテリアル3Dプリンターを用いたデバイスの制作に入るという計画を立てた。

第4章では、3段階におけるプロトタイプの実装に入った。各段階から目指したゴールを制作を通じた検証を経て、変形可能なインタフェースの制作における、それぞれの機能性材料の有効性をテストした。簡略的な結果として、小麦粘土は抵抗値の測定が不安定であること、そして磁性フィラメントは磁石の引力を使うにはもっと工夫したモデリングが必要になることがわかった。その反面、マルチマテリアル3Dプリンターを使った導電性フィラメントやTPUフィラメント基盤のプロトタイプ制作を通して、形状変化による信号制御システムの変化を確認し、他の機能性材料を用いたさらなる応用例が期待された。更に、3D CAD ツールであるRhincerosとGrasshopperを通して、ユーザーに応じた手軽なモデリング、そして二重構造など独立した二つの内部構造を制作することも確認できた。このことは、3Dプリンターしか貢献できない特徴であり、本研究のビジョンとして将来、ユーザーが提案した手法を用いて豊富な直感体験できるソファのような柔らかい製品や、体を固定し和らげることできるジョイントサポーターなどを自家制作できると考えるようになった。

最後に第5章では、本研究から貢献できたことを並べ、それぞれについて再度整理し、他研究に比較できる明確な新規性をアピールした。また、提案手法を用いることで、将来のユーザーがどんなことが実現できるか、ユーザーシナリオを表現し、ユーザーフィードバックからそれに対する実現可能性を裏付けた。一方、本研究の不足しているところを他研究と比較しながら今後の改善すべき課題について語った。一例として、内部空間の間に余白の空間があった方が、比較的柔軟性の高い動きにも対応できるということが挙げられた。

本研究で大きく関連している機能性材料と3Dプリンターは前述のように3段階に渡るプロトタイプ制作から得た知見をもとに、当初設定した仮説の検証を行っている。前段階の実装から発見したことをベースに新たな素材やツールの体験へと段々規模を拡張していったところは、それぞれの異なる振る舞いが一つの研究の中で有機的な流れを示し、それらが大きな役割を果たして結果的に初期設定した仮説に答えられる段階に辿り着くことができたと考える。その反面、確実な検証のために第5章で語っているユーザーテストに関しては、十分なデータを測定していないのは事実である。詳しく言えば、豊富な触覚体験が期待されるハプティックデバイスと、関節を固定する具合を調整できるジョイントサポーターは、ワークショップなどを通して一般のユーザーによる体験のフィードバックを十分受けていないため、提案手法によって考えた応用例が社会に明らかな貢献をしているとは確実言えない。そこで今後は提案手法の有効性を確かめるためにプロトタイプのユーザーテストを踏まえた研究計画を立てたい。可能ならば、ユーザーを年齢や職業、性別などのセグメント別に分けて、それぞれのセグメントに最も求められるデバイスとその構造を調べ、それぞれに応じたファブリケーションツールのパッケージを作ることができたら、本研究の掲げるビジョンに向けて一歩進めることができると考える。本研究では、主に機能性材料を使う3Dプリンターを用いたインタフェースの製造自動化について調べ、そのメリットの検証を行った。確かに、3Dプリンターの場合、未だに改善すべき課題が多い。印刷物の状態は印刷時のパラメーターだけでなく、造形の種類、そしてフィラメントとプリンターの状態にも影響を受けやすいため、正常な印刷のためにはケアすべき点がたくさん存在する。それにもかかわらず、3Dプリンターのようなデジタルファブリケーションツールは、今後我々のライフスタイルに大きな影響をもたらすと考える。本論文でも述べたように、組み立てコストを削減する製造自動化をはじめ、マルチマテリアル3Dプリンターのコントリビューションを鑑みた時、本研究を含む関連研究は、今後新たに出現する新技術に力を入れられ、だんだん拡大するだろう。その新技術の中にはきっと印刷技術だけでなく、新開発される機能性素材もあると考えられる。そんな中で、未来の人間が思ったものを自分で自家制作できる日が徐々にやって来ると信じながら、今後も研究に進んでいきたい。

謝 辞

本研究の指導教員であり、幅広い知見からの的確な指導と暖かい励ましやご指摘をしていただきました慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の山岡潤一専任講師に心から感謝いたします。文系のバックグラウンドから来た私にとって、HCI や素材に関することはとても遠い存在でした。しかし、山岡先生の手厚いサポートのおかげで、研究するために必要な知識や、研究の進め方について学習できました。ありがとうございます。

また Future Crafts Project の第 1 期生としてプロジェクトや制度の立ち上げと一緒に励んでくれた同期の皆様にも感謝の気持ちをお伝えします。先輩という存在がない状況下でお互いに励まし合いながら成長してきたこの 2 年間、とてもいろんなことを学び成長できて嬉しい限りです。この 2 年間の縁を大事にして、卒業後も一緒に頑張っていきたいです。

関内の研究施設を共有して頂いた JST ERATO 川原万有情報網プロジェクトの皆様にも、心から感謝いたします。おかげさまで、去年は単に自分の研究を行うだけでなく、関内の素晴らしい先生や学生たちの研究から、普段では得られないいろんな経験ができました。色々とお世話になりました。ありがとうございます。

入学して現在に至るまで私の研究に常に興味を持って手厚い指導をしてくださった Kai KUNZE 教授に心から感謝いたします。Kai 先生のおかげで、リサーチの仕方や、リサーチクエスションと仮説を立てるテクニックを鍛えることができ、とても勉強になりました。ありがとうございます。

常に学生たちに熱意を持って指導してくださった Pai 先生にも心から感謝の気持ちをお伝えします。おかげさまで、提案手法の新たな応用例や引用文献の探し方について深く学ぶことができました。ありがとうございます。

ブランディングについて教えてくださった Matthew WALDMAN 教授にも心か

ら感謝いたします。イノベーション・パイプラインの授業から、ブランドデザインの授業まで、視覚デザインのみならず、ブランディングに関しても、音楽や映像など、いろんな素材を活用した実用性の高い演習ができました。卒業しても Matthew 先生から学んだことをキャリアに積極的に活かしたいと思っております。なお、毎回のプレイリストの共有もありがとうございます。いつものインスピレーションになります。

TEI 2022 の Camera-Ready Version の提出締め切りの直前まで、さまざまな助言のみならず実験の計画から移行まで前向きに手伝ってくれた慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の修士課程2年の加藤敬太に心から感謝いたします。

参 考 文 献

- [1] Gota Kakehi, Yuta Sugiura, Anusha Withana, Calista Lee, Naohisa Nagaya, Daisuke Sakamoto, Maki Sugimoto, Masahiko Inami, and Takeo Igarashi. Fuwafuwa: Detecting shape deformation on soft object using directional photorefectivity measurement. In *SIGGRAPH '11: ACM SIGGRAPH 2011 Emerging Technologies*, SIGGRAPH'11, 2011.
- [2] 山岡潤一, 笈康明. Neondough: 光る粘土を用いた粘土細工. ヒューマンインタフェース学会論文誌, pp. 341–350, 2012.
- [3] Lijun Teng, Karina Jeronimo, Tianqi Wei, Markus P Nemitz, Geng Lyu, and Adam A Stokes. Integrating soft sensor systems using conductive thread. In *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2018.
- [4] Ryosuke Nakayama, Ryo Suzuki, Satoshi Nakamaru, Ryuma Niiyama, Yoshihiro Kawahara, and Yasuaki Kakehi. Morphio: Entirely soft sensing and actuation modules for programming shape changes through tangible interaction. In *DIS '19: Proceedings of the 2019 on Designing Interactive Systems Conference*, DIS'19, 2019.
- [5] Keisuke Watanabe, Ryosuke Yamamura, and Yasuaki Kakehi. foamin: A deformable sensor for multimodal inputs based on conductive foam with a single wire. In *CHI EA '21: Extended Abstracts of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA'21, 2021.
- [6] Majken K. Rasmussen, Esben W. Pedersen, Marianne G. Petersen, and Kasper Hornbæk. Shape-changing interfaces: a review of the design space

- and open research questions. In *CHI '12: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI'12, 2012.
- [7] Harpreet Sareen, Udayan Umapathi, Patrick Shin, Yasuaki Kakehi, Jifei Ou, Pattie Maes, and Hiroshi Ishii. Printflatables: Printing human-scale, functional and dynamic inflatable objects. In *CHI '17: Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, pp. 3669–3680, Denver, CO, 2017. Association for Computing Machinery. doi:10.1145/3025453.3025898.
- [8] Qiuyu Lu, Jifei Ou, João Wilbert, André Haben, Haipeng Mi, and Hiroshi Ishii. millimorph - fluid-driven thin film shape-change materials for interaction design. In *UIST '19: Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '19, pp. 663–672, New Orleans, LA, 2019. Association for Computing Machinery. doi:10.1145/3332165.3347956.
- [9] Lining Yao, Ryuma Niiyama, Jifei Ou, Sean Follmer, Clark Della Silva, and Hiroshi Ishii. Pneui: pneumatically actuated soft composite materials for shape changing interfaces. In *UIST '13: Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '13, pp. 13–22, St. Andrews, United Kingdom, 2013. Association for Computing Machinery. doi:10.1145/2501988.2502037.
- [10] Daniel Groeger, Elena Chong Loo, and Jürgen Steimle. Hotflex: Post-print customization of 3d prints using embedded state change. In *CHI '16: Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, pp. 420–432, San Jose, CA, 2016. Association for Computing Machinery. doi:http://dx.doi.org/10.1145/2858036.2858191.
- [11] Junichi Yamaoka, Ryuma Niiyama, and Yasuaki Kakehi. Blowfab: Rapid prototyping for rigid and reusable objects using inflation of laser-cut surfaces.

- In *UIST '17: Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, pp. 461–469, QC, Canada, 2017. Association for Computing Machinery. doi:10.1145/3126594.3126624.
- [12] Sean Follmer, Daniel Leithinger, Alex Olwal, Nadia Cheng, and Hiroshi Ishii. Jamming user interfaces: Programmable particle stiffness and sensing for malleable and shape-changing devices. In *Proceedings of the 25th annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '12, pp. 519–528, Cambridge, MA, 2012. Association for Computing Machinery. URL: <https://doi-org.kras1.lib.keio.ac.jp/10.1145/2380116.2380181>.
- [13] Jifei Ou, Lining Yao, Daniel Tauber, Jurgen Steimle, and Ryuma Niiyama Hiroshi Ishii. jamsheets: Thin interfaces with tunable stiffness enabled by layer jamming. In *TEI '14: Proceedings of the 8th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, TEI '14, pp. 65–72, Munich, Germany, 2014. Association for Computing Machinery. doi:10.1145/2540930.2540971.
- [14] Takayuki Hirai, Satoshi Nakamaru, Yoshihiro Kawahara, and Yasuaki Kakehi. xslate: A stiffness-controlled surface for shape-changing interfaces. In *Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '18, pp. 1–4, New York, NY, 2018. Association for Computing Machinery. doi:10.1145/3170427.3186496.
- [15] Xiangxiang Wang, Linyuan Wu, Bin Fang, xiangrong xu, haiming huang, and Fuchun Sun. Layer jamming-based soft robotic hand with variable stiffness for compliant and effective grasping. *Cognitive Computation and Systems*, Vol. 2, , 03 2020. doi:10.1049/ccs.2020.0003.
- [16] Liang He, Huaishu Peng, Michelle Lin, Ravikanth Konjeti, François Guimbretière, and Jon E. Froehlich. Ondulé: Designing and controlling 3d printable springs. In *UIST '19: Proceedings of the 32nd Annual ACM Sym-*

- posium on User Interface Software and Technology*, UIST '19, pp. 739–750, New Orleans, LA, 2019. Association for Computing Machinery. doi:10.1145/3332165.3347951.
- [17] Alexandra Ion, Johannes Frohnhofen, Ludwig Wall, Robert Kovacs, Mirela Alistar, Jack Lindsay, Pedro Lopes, Hsiang-Ting Chen, and Patrick Baudisch. Metamaterial mechanisms. In *UIST '16: Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, pp. 529–539, Tokyo, Japan, 2016. Association for Computing Machinery. doi:10.1145/2984511.2984540.
- [18] Leon Yeong Wei Loh, Ujjaval Gupta, Yingxi Wang, Choon Chiang Foo, Jian Zhu, and Wen Feng Lu. 3d printed metamaterial capacitive sensing array for universal jamming gripper and human joint wearables. In *Advanced Engineering Materials*, 2021.
- [19] Gerard David Howard, James Brett, Jack O'Connor, Jordan Letchford, and Gary W. Delaney. One-shot 3d-printed multimaterial soft robotic jamming grippers. In *Soft Robotics SoRo*, Vol. 8, USA, 2021. Mary Ann Liebert. doi:<https://doi.org/10.1089/soro.2020.0154>.
- [20] Fabian Hemmert, Susann Hamann, Matthias Löwe, Anne Wohlauf, and Gesche Joost. Shape-changing mobiles: Tapering in one-dimensional deformational displays in mobile phones. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '10, p. 249–252, New York, NY, USA, 2010. Association for Computing Machinery. doi:10.1145/1709886.1709936.
- [21] Marcelo Coelho, Hiroshi Ishii, and Pattie Maes. Surfex: A programmable surface for the design of tangible interfaces. In *CHI '08 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '08, p. 3429–3434, New

- York, NY, USA, 2008. Association for Computing Machinery. doi:10.1145/1358628.1358869.
- [22] Jonas Togler, Fabian Hemmert, and Reto Wettach. Living interfaces: The thrifty faucet. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Tangible and Embedded Interaction*, TEI '09, p. 43–44, New York, NY, USA, 2009. Association for Computing Machinery. doi:10.1145/1517664.1517680.
- [23] Chris Harrison and Scott E. Hudson. Providing dynamically changeable physical buttons on a visual display. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '09, p. 299–308, New York, NY, USA, 2009. Association for Computing Machinery. doi:10.1145/1518701.1518749.
- [24] Ivan Poupyrev, Tatsushi Nashida, and Makoto Okabe. Actuation and tangible user interfaces: The vaucanson duck, robots, and shape displays. In *Proceedings of the 1st International Conference on Tangible and Embedded Interaction*, TEI '07, p. 205–212, New York, NY, USA, 2007. Association for Computing Machinery. URL: <https://doi-org.kras1.lib.keio.ac.jp/10.1145/1226969.1227012>, doi:10.1145/1226969.1227012.
- [25] Irmandy Wicaksono, Caroline Rozendo, Runzhou Ye, Jaleesa Trapp, V. Michael Bove Jr., Canan Dagdeviren, and Hiroshi Ishii. Perform: Deformable interface for the exploration of sound through shapes. In *CHI EA '18: Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI'18, 2018.
- [26] Aubrey Colter, Patlapa Davivongsa, Donald Derek Haddad, Halla Moore, Brian Tice, and Hiroshi Ishii. Soundforms: Manipulating sound through touch. In *CHI EA '16: Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI'16, 2016.

- [27] 大槻道夫. 粉体のジャミング転移:「流れる固体」の物理. アンサンブル, Vol. 16, No. 2, pp. 88–93, 2014. doi:10.11436/mssj.16.88.
- [28] T. S. Majmudar, M. Sperl, S. Luding, and R. P. Behringer. Jamming transition in granular systems. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 98, p. 058001, Jan 2007. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.98.058001>, doi:10.1103/PhysRevLett.98.058001.
- [29] Sangbae Kim, Cecilia Laschi, and Barry Trimmer. Soft robotics: a bioinspired evolution in robotics. *Trends in Biotechnology*, Vol. 31, No. 5, pp. 287–294, 2013. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2013.03.002>.
- [30] Junichi Yamaoka, Mustafa Doga Dogan, Katarina Bulovic, Kazuya Saito, Yoshihiro Kawahara, Yasuaki Kakehi, and Stefanie Mueller. Foldtronics: Creating 3d objects with integrated electronics using foldable honeycomb structures. In *CHI '19: Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, pp. 1–4, Glasgow, Scotland UK, 2019. Association for Computing Machinery. URL: <https://doi-org.kras1.lib.keio.ac.jp/10.1145/3290605.3300858>.