

修士論文2021年度

触感見本帳Tactriumの価値開発の実践

—デジタルファブリケーションを用いた硬軟、粗滑の設計を通じて—

慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科

岡崎 太祐

修士論文 2021 年度

論文要旨（日本語）

触感見本帳Tactriumの価値開発の実践

—デジタルファブリケーションを用いた硬軟、粗滑の設計を通じて—

近年、皮膚感覚に着目した触覚、触感領域の研究は視覚、聴覚の感覚研究領域と同等に広がりつつある。特に、3Dプリンタを中心としたデジタルファブリケーション技術を用いることで押し込み感、温冷感覚提示といった多様な触覚、触感技法の提案が行われている。

しかし、触感という触覚・視覚・聴覚・記憶・言語が複合的に合わさった感覚に対して、3Dプリンタで設計可能な柔らかさや粗さといった、触覚に関わる物理特徴量を変えることで、どのような印象を設計ができるかの技法は十分に検討がされていない。

のことから本研究では3Dプリンタを用いて設計可能な硬軟感、粗滑感の設計領域を明らかにし、果物の触感を模したサンプルを併せた触感見本帳Tactriumの開発を行った。この見本帳は硬軟感、粗滑感、色彩をカタログ化し触り比べることで、対話的なモノづくりの支援を促すことを目的とする。特に、ヤング率や表面粗さのような物理特徴量ではなく、「熟したバナナのような柔らかいところと硬いところのある触感」や「桃のように触れた瞬間の肌触りとしつとりした握り心地のある触感」といった、複数の物理特性の複合によって生起する触感イメージを反映した設計支援を可能とすることを検討した。

キーワード：1.ハaptixis,2.内部構造,3.触感設計,4.設計支援,5.3Dプリンタ,
6.メタマテリアル

慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科

岡崎 太祐

Tactrium: Value development practice of the tactile sample book with digital fabrication.

Summary

In recent years, research in the area of tactile and haptic sensation has been expanding as much as the sensory research areas of vision and hearing. In particular, by using digital fabrication technology, mainly 3D printers, various tactile techniques such as push-in sensation and hot/cold sensation presentation have been proposed.

However, it has not been sufficiently investigated what kind of impressions can be designed by changing physical features such as softness and roughness for the sense of touch, which is a complex combination of tactile, visual, auditory, memory, and verbal sensations.

Therefore, in this study, we clarified the design areas of hardness, softness, and roughness that can be designed using a 3D printer, and developed Tactrium, a tactile sample book that includes samples that imitate the tactile sensations of fruits.

The purpose of this sample book is to promote interactive design support by cataloging and comparing material. In particular, we studied the possibility of supporting the design of tactile sensations that are generated by a combination of multiple physical characteristics, such as "tactile sensation like a ripe banana" or "tactile sensation like a peach with a comfortable skin at the moment of touch," rather than physical characteristics such as Young's modulus or surface roughness.

Keyword : 1. haptics, 2. internal structure, 3. tactile design , 4.design support,
5.3D printer , 6. metamaterial

Graduate School of Media and Governance, Keio University
Taisuke Okazaki

目次

序章（リサーチエクエスチョン）	7
1.背景	8
1.1—触感のデザイン	8
1.1.1—触覚と触感の知覚・認知に基づいた定義	8
1.1.2—触感研究の俯瞰	10
1.1.3—能動的にモノに触れる	10
1.1.4—触知覚の質感構造	11
1.1.4.1—触探索行動	12
1.1.4.2—柔らかさ知覚の原理	14
1.1.4.3—粗さ知覚の原理	14
1.2—触感設計のためのモノの材料特性と幾何的特徴	15
1.2.1—材料設計の産業史における歴史的変遷と3Dプリンタの影響	16
1.2.2—触感設計に着目したマテリアル特性	17
1.2.3—触感設計に着目した幾何による介入方法	18
1.2.4—メタマテリアル/Architected materialの概要	20
1.3—触感設計と設計支援に関する先行研究	23
1.3.1—触覚/haptics設計に関する研究	23
1.3.2—設計支援に関する事例	24
2.触感見本Tactriumの製作実践	26
2.1—触感設計ダイアグラム	27
2.2—形状設計	28
2.3.—硬軟設計	29
2.3.1—サンプル形状の定義	29
2.3.2—サンプル形状の出力	31
2.3.3—計測評価	32
2.3.4—Ashby Plotによるヤング率の設計空間の可視化	34
2.3.5—硬軟サンプルの見本帳化	35
2.4—粗滑感設計	37
2.4.1—サンプル作成	38

2.4.2—計測評価	39
2.4.3—粗さ設計考察	40
2.4.4—粗滑サンプルの見本帳の考察	41
2.5—着色	43
2.5.1—着色の先行研究概要	43
2.5.2—製作	43
2.5.3—着色と形状に関する考察	44
2.6—統合型触感モデル設計	45
2.6.1—統合型触感モデルの作成	46
2.6.2—統合型触感モデルの考察	47
2.7—触感見本帳Tactriumのまとめ	49
 3.応用プロダクトを通した設計支援の検討	50
3.1—設計支援を通じた価値開発の概要	50
3.2—電動車いす用コントローラー	51
3.2.1—Iさんの設計支援概要	51
3.2.2—触感設計の導入	52
3.2.3—質的インタビュー	53
3.2.3.1—インタビューまとめ	54
3.2.4—触感価値介入による考察	56
3.2.5—触感設計支援のまとめ	57
 4.まとめ	58
4.1—考察	58
4.2—触感設計における課題	58
4.3—設計支援における課題	58
4.4—触感設計における展望	58
4.5—設計支援における展望	59
4.6—触感デザインとは	60

謝辞

参考文献

Supplement

用語の定義

本論文中に頻出する語について、本論文内における定義と、特にその語を用いることの意図を述べる。

触覚

皮膚感覚によって生じた知覚の総称

触感

人間が皮膚感覚で得られ生じる主観的な体験

触質感

認知科学の文脈で用いる人間が皮膚感覚で得られ生じる主観的な体験

触知覚

人間が皮膚感覚で得られ生じる知覚経験の総称

材料特性

モノの特性の中でウレタンフォーム、シリコンゲルなど材料そのものに着目した特性

機械特性

モノの特性の中でヤング率、摩擦特性など力学に関わる特性

メタマテリアル

材料特性が幾何構造に由来する特性を含み、通常の材料設計では生じない特異な現象が発現している材料

設計

与えられた要求仕様を満たす解をつくること

本論文の構成

本論の構成は以下の通りである。まず序章において、本研究の根底をなすリサーチクエスチョンである「触感の価値を設計と設計支援を通じて明らかにする」ことについて述べる。このリサーチクエスチョンに至った背景説明と、この問い合わせに対する課題を1章で示したあと、2章で課題の検討をエンジニアリングの観点で行い触感見本帳の製作を行った経緯を説明する。3章では設計支援の実践を行い触感価値の貢献と限界について述べる。4章の考察で触感のデザインはいかにして可能なのか考察し結言をまとめる。

序章（リサーチクエスチョン）

本研究では「触感の価値は設計と設計支援を通じて明らかにできるのか」を研究に取り組む上での主要な問い合わせとする。この問い合わせに至った動機として、触感は皮膚感覚で生じる主観的な経験であり、押し込み感の設計技法、温冷感覚提示といった触感体験の多様な手法が近年提案されている。しかし、触感という触覚・視覚・聴覚・記憶・言語が複合的に合わさった感覚に対して3Dプリンタで設計可能な柔らかさや粗さといった、触覚に関わる物理特徴量を変えることで、どのような印象を設計ができるかの技法は十分に検討がされていない。本研究では、デジタルファブリケーションの技術を最大限用いることでできる触感設計空間を明示し、触感という概念がデジタルファブリケーションとどのように関係し、社会とどのように関連付けられるかを明らかにすることを研究の動機とした。その問い合わせへの介入方法として触感価値の探求を触感設計技法と触感設計支援の実践を通して行い、これらの問い合わせを具体的に3つの段階に分けて検討する。

- i. 触感とデジタルファブリケーションはいかに架橋可能であり設計方法を記述できるのか。
- ii. 触感の設計支援の過程をどのように記述できるのか。
- iii. 触感の価値とはどのようにして定義ができるのか。

これらの問い合わせについて1章で基礎的な触感研究の背景領域を紹介し、本研究で取り組む研究領域の位置づけについて述べていく、2章ではFig.1におけるiについて、3章ではiiについて、4章ではiiiについて述べる。

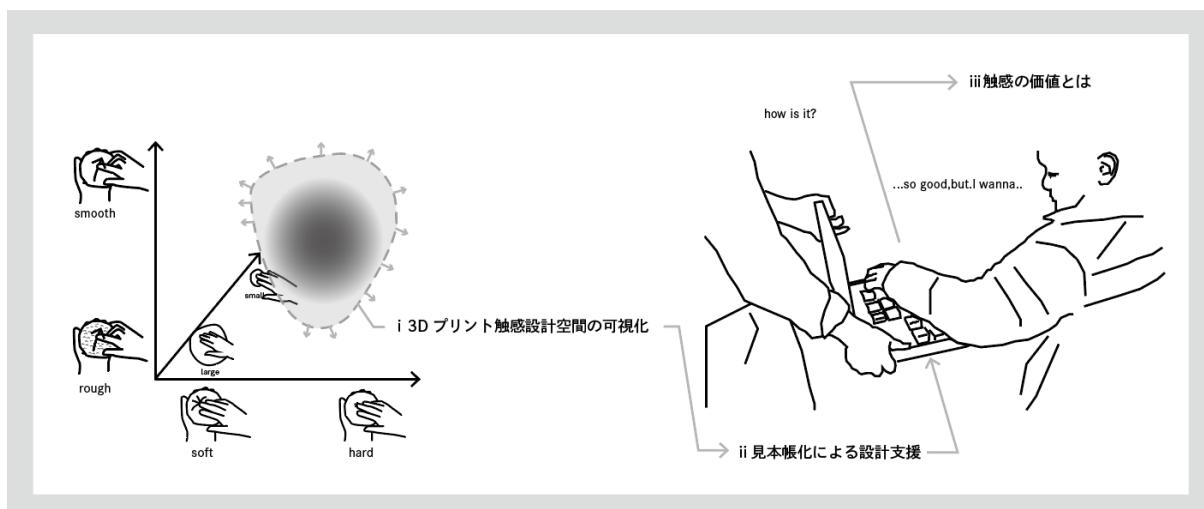


Fig. 1 リサーチクエスチョン構造図

1章 背景

1章では触感と3Dプリンタの既往研究を概観することで、本研究が取り組む「3Dプリンタを用いた触感設計と触感見本帳を作成し設計支援を行う研究実践」が周辺研究といかに関係しているかを明示し、研究の新規性や意味づけを行う。

1.1. 触感のデザイン

本節では本研究で用いられる「触れる・触覚・触感」という概念について、社会科学的な知見と認知科学の研究背景に基づいた定義を行う。端的には本研究が取り組む触感領域は「人がモノに能動的に触れた際に皮膚感覚によって生ずる主観的な経験」であり、本節で周辺研究領域との関係性の記述を行う。

1.1.1. 触覚と触感の知覚・認知に基づいた定義

「触れる」は人間の原始的な動作であり、触れることによってモノを認識したり、情動的印象を抱くことができる。この点の情報処理について浅野・渡辺¹は

"私たちは「今、ここ」にある対象の存在を視覚、触覚、聴覚などの感覚によって目の前にある対象の材質や、表面・内部の状態を認知することができる、そのはたらきや処理過程のことを「知覚 (perception) 」と指す。そして「認知(cognition)」とは、ある知覚情報が入力された時に、それが記憶内の何らかの表象（知覚情報を抽象化することで、記憶内に保持し、意識的に操作することを可能にしたもの）と同じものであると同定する過程を指している"

と説明している。このことから人が対象物に触れる際にも、知覚と認知で異なる情報処理の仕方によってモノの認識をしており、触れた際の異なる意味づけが行われていると考えができる。例えば「カバンの中に手を入れてスマホがあることを確認する」ことは知覚的な現象であり、「温かいコーヒーカップに触ることでホッと安堵すること」や「友人と握手を交わす中で信頼関係を確認する」ということは、知覚情報を抽象化し記憶の中の経験と結びついた認知的な現象であると考えられる。このように「触れる」とは複数のコンテキストが結びつくことで生起する現象であり、動作だけに注目して一意的に解釈することは難しい。この困難さ

について、仲谷は触覚と触感の概念の違いを五感と認知機能を加えた説明をもとに行っている²。

“皮膚感覚を「触覚」と呼ぶのに対し、本書では「触感」という言葉を触ることによって生じる主観的な体験を指して使うことにしたいと思います。実をいうとこの意味での「触感」は、科学で扱いにくい対象です。(中略)触感に科学のメスを入れることが容易でない理由は、それが主観的なものであるからと、もう1つ、触感として感じていることがあまりに多様であるからということがあります。触感は、皮膚からの感覚によって形づくられるわけではありません。他の五感さらには言語や記憶のような高次の認知機能が触覚と組み合わされることで、1つの触感イメージとして感じられるのです。”

これを基に本研究の用語の定義として、触覚とは「皮膚感覚によって生じた知覚の総称」であり、触感とは「人間が皮膚感覚を中心に生じる主観的な体験の総称」とする。このことから触感の設計過程の中には主観的な経験を掬い取る工程が必要であることが示唆され、3章でそれについて言及する。

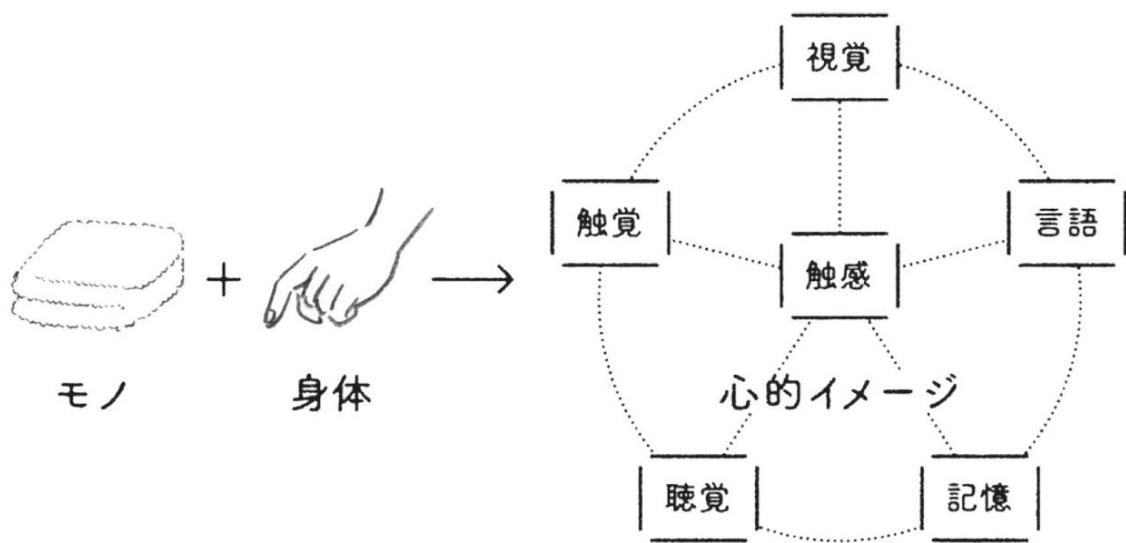


Fig. 2 触感の生成ダイアグラム(nakatani,2016)

1.1.2. 触感研究の俯瞰

触感研究は人とモノの間における皮膚感覚で生じる主観的な経験であることから、人に着目した研究を行うかモノに着目した研究を行うかによって研究アプローチが異なる。本節では人側とモノ側のそれぞれに着目した研究を紹介する。

人に着目した研究領域では、神経科学に基づいた感覚受容器の原理を明らかにすることを目的とした研究や、皮膚感覚と複合的な感覚処理が組み合わさりhaptic invitationと呼ばれる「触りたさ」の原理を研究するものがある³。

モノに着目した研究領域では、HCIと呼ばれる研究領域で積極的に行われ、VR空間でのリアリティを増幅する目的で疑似触覚フィードバックを再現する検討や、人間と道具の操作における触覚との関わりを探索する検討がされている。

また近年ではモノの質感と人間の情動がどのように関係するかを人-モノの両側を検討する感性工学といった複合研究領域でも触感を切り口にした研究がなされている。このように触感研究を概観すると研究のアプローチは着目する方法で様々な領域に広がっていることがわかる。

1.1.3. 能動的にモノに触れる

その中で、本研究では人がモノに触れる際の触感の設計に関する検討を行う。この領域はモノに能動的に触れることによって、どのような経験が設計できるかを検討することが中心的な課題である。人間が能動的にモノに触れること自体についての定義は国分による中動態の概念による解釈⁴や、Rubber Hand Illusionにあげられる触れることへの境界を曖昧にする検討もあるが、本研究では能動的にモノに触れるアクティブタッチを「触れる」ことの定義とする。次章ではモノに触れた際に生ずる触経験について既存研究の援用を行いながら構造を示し、本研究で取り扱うデジタルファブリケーションで介入できる射程について明示を行う。

1.1.4. 触知覚の質感構造

本節ではモノに触れた際の触経験の構造について既存研究の紹介を行い、本研究でのデジタルファブリケーションにおいて介入できる射程について明示する。触感は、モノに触れた際の皮膚における機械受容器(パチニ小体、メルケル細胞、マイスナー小体、ルフィニ終末)の変形による触覚情報と、触れる際の文脈が合わさることで生じる主観的な経験である。文脈に対して物理特徴量が直接的に介入することは難しいことから、デジタルファブリケーションは触れる物体の物理特性を変えることで、皮膚と物体の間で生ずる触覚情報に対して貢献できると推測できる。

人がモノに触れた際に得られる触知覚について、岡本は触り心地には階層性があることに言及し、心地よい、高級感がある、何度も触りたいといった価値判断に影響する触感は、より低いレイヤーである素材の知覚を組み合わせることによって設計され、温冷、硬軟、マクロ粗さ、ミクロ粗さ、摩擦の5つからなる素材の知覚を組み合わせることで設計されており、これらと記憶や言語と組み合わさることで価値判断を伴う触感経験を構成できることを報告した⁵。白土も同様に触感分類の検討に関して、布、皮革などの材料を触り比べる実験を実施し、粗さ感、冷温感、乾湿感、硬軟感の4つの因子で分類ができると報告した⁶。渡辺は同様の材料の触り比べを行い「ふわふわしてて、なめらかである、でこぼこしている、べとべとしてる」といったオノマトペと快・不快の関係性について報告した⁷。

これらの触知覚の要素は手の動作と関係性があることはLeaderman,Klatzkyによって報告されており、全体形状、エッジ、テクスチャ、重さといったモノの情報と撫でる、押すといった動作について関連があることが知られている⁸。またKlatzkyはモノに触れた際の分類において優先的に判断される要素を「大きさ」「形状」「硬軟感」「テクスチャ」の中で類似度の分類を行ったところ、開眼条件では形状が分類の第一基準になり、閉眼条件では硬軟感、表面形状が第一基準になることを報告した⁹。これらのこととは硬軟感、表面形状、形状のバリエーションは多様な動作や触感分類を生み出すことを示唆する。

これらのことから、3Dプリンタを用いることによって可能になる形状やヤング率や表面粗さといった物理特性を変える設計は、モノに触れた際の材質知覚や対象に触れる際の手の運動に影響を及ぼすことができると言える。加えて、材質知覚の要素である表面粗さが人の快不快にどの程度影響するか¹⁰、柔らかさが人の快不快にどのように関係するか検討はされている¹¹ことから、3Dプリントによる硬軟感・粗滑感の設計を行うことで心地よい質感を設計できることが示唆される。しかし、触感と価値判断の関係性について基礎的な認知原理は十分に明らかにされていないことから、触感設計には物理量に基づいた設計以外の文脈を取り入れる工程を、設計の中に組み入れる必要性があることも同時に示唆される。このことから本論文では価値判断

を伴う触感設計方法について、人間の知覚メカニズム、モノの物理特性、社会的文脈との接続の各側面から検討を行う。次項では人間の知覚メカニズムとして「形状と触れること」「硬軟感と触れること」「粗さと触れること」の知覚原理について紹介する。

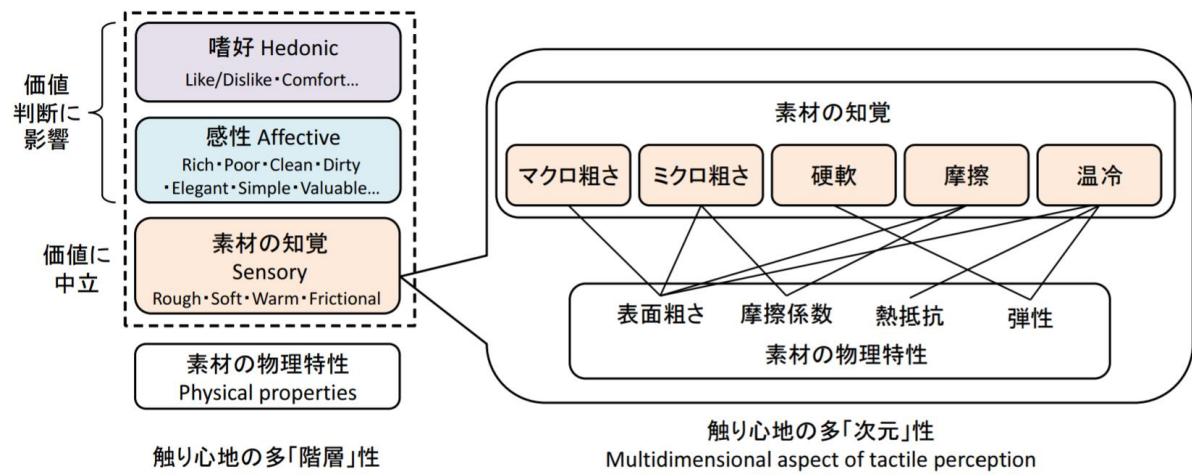


Fig. 3 触覚の物性次元の構成(okamoto,2013)

1.1.4.1 触探索運動

人は、テクスチャを感じたいときには素材表面を横になぞることで滑らかさや、でこぼこを感じ、硬さを感じたいときには素材を押し込み、ふわふわしてる、がっちりしていることを感じ、温度を感じたい時には指をモノに当て、ひんやりしていることを感じ取る。このように知覚したい触覚情報と動作の間には適当な関係性があることが知られ、これは触探索動作と呼ばれている⁸。このことを利用して3Dプリンタを用いることで「インフィル率による硬軟感の制御によって押し込み動作を可能にする出力物の作成」、「表面のテクスチャの付与によって撫でる動きを可能にする出力物の作成」といった物理特徴と動作を誘引する出力物を作ることが可能であることが示されている¹²。



固さ



テクスチャ



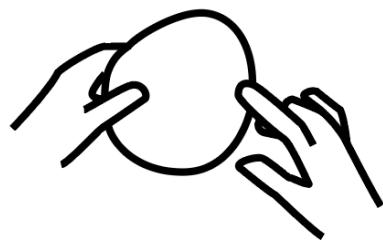
温度



重さ



全体の形



細かい形(エッジ)

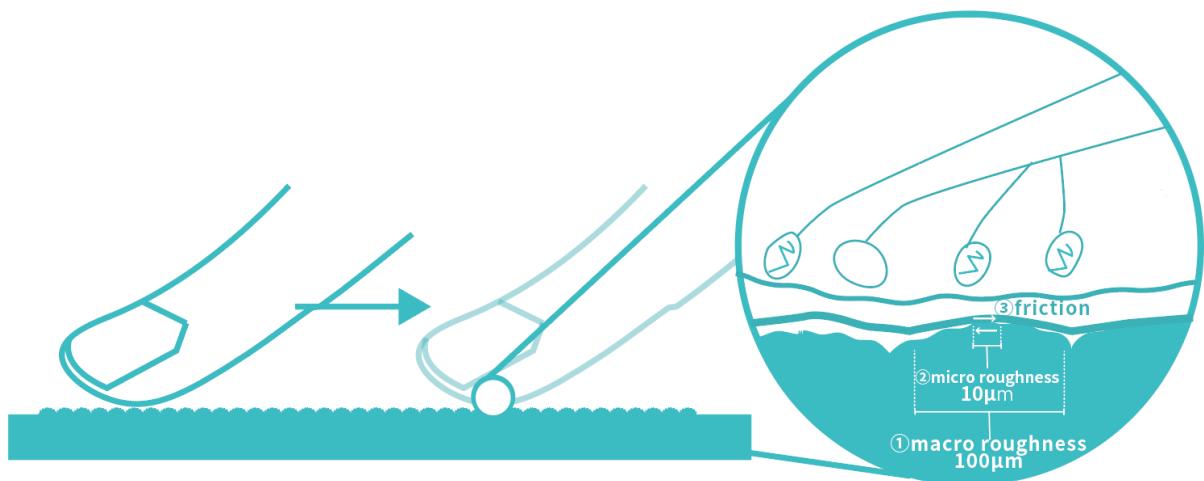
Fig. 4 触探索運動に基づく形状(Leaderman,Klatzky.1987)

1.1.4.2 柔らかさ知覚の原理

人がモノに触れた時に「ふにふにしている、やわらかい」と感じる。柔らかさ知覚をする際に、やわらかさ(softness)と快感情(pleasantness)には正の相関関係あることが知られ、指先、前腕における柔らかさにおいて、好ましい柔らかさは皮膚と同等の柔らかさであることが報告されている¹¹。このことは3Dプリンタを用いてマテリアルやインフィル率を変え、硬軟感を変えることで人に好ましい触感を設計することを支持する。また、柔らかさ知覚は、皮膚の機械受容器の変形によってのみ支配されているだけでなく、触れる前に得られる視覚情報によって柔らかさを予測することや、皮膚とモノの接触面積との関係性など材料特性以外の複合的な刺激によっても柔らかさ知覚が生じていることが示されている¹³。このことは、柔らかく心地よい触感は柔らかい材料で設計するだけではなく、指先の形状や、モノの視覚情報といった複合的な要因を含めた設計によって想起されることが示唆され、心地よい柔らかさを設計するには接地面での形状、視覚情報、硬さ柔らかさを複合的に検討する必要が推察される。

1.1.4.3 粗さ知覚の原理

表面形状における知覚は皮膚の機械受容器であるマイスナー小体、メルケル細胞、パチニ小体の機械的な変形によって生じ、それを生じさせる表面形状に関わる物理要因をマクロ粗さ、ミクロ粗さ、摩擦の3要素に分類されることが知られている⁷。マクロ粗さは触れたり、押し込んだ際に皮膚の変形を知覚できる100 μm程度の凸間距離を持つ形状を指し、指を押し当てた時「でこぼこ」していることを知覚するために発現するメカニズムであると考えられる。ミクロ粗さは指先をなぞることで質感を感じることができる数μm~数十μm程度の凸間距離を持つ形状であり、さらさら、ざらざらを知覚する際に発現するメカニズムであると考えられる。摩擦特性は皮膚と物体の間で生じる摩擦現象によって生じ、乾湿感やすべりに影響する。このうち撫でた際の表面摩擦は物体そのものの材料特性と油脂の付着や劣化が生じる表面状態によって定まるため、3Dプリンタで制御することは難しいが、物体の表面形状の凸間距離によって設計ができるマクロ粗さとミクロ粗さについては寄与することができ「でこぼこ、ざらざら」といった粗さ知覚を設計できることが示唆される。この粗さ知覚については表面の粗さの凸間距離が広がるにつれて roughness と unpleasantness が増加することが報告されており¹⁰、3Dプリンタによって設計できる粗さが快・不快に影響を及ぼすことを示唆する。



粗さ知覚メカニズム（指先の凹み / なぞりによる周波数成分 / 摩擦力によって粗さ知覚される）

Fig. 5 粗さ知覚のメカニズムのダイアグラム

1.2. 触感設計のためのモノの材料特性と幾何的特徴

前節では触感設計に関する知覚メカニズムについて言及を行った。本節ではモノの観点から触感設計との関わりを説明する。本研究では3Dプリンタを用いて触感の設計を行うことから、出力に用いる材料が持つ材料特性と、3Dプリンタで設計できる自由度の高い幾何構造によって得られる物理特性の可能性をここでは説明していく。

触感設計において「形状」「柔らかさ」「粗さ/テクスチャ」「温冷感」は知覚や価値判断に大きく影響し、多くの物理特性によって構成される。柔らかさを構成する物理特性は、ヤング率、反発特性、非線形範囲の変位荷重応答と、複数の要素が上げられ、粗さに関わる物理特性は触れるだけでも皮膚の変形を知覚できる $100\mu\text{m}$ 程度の凸間距離を持つ表面形状や、皮膚と物体の間で生じる摩擦特性があげられ、材料に備わる特性と幾何形態それぞれが触経験に寄与していることがわかる。

この節では触感を作り出す材料そのものが産業のなかでどのように開発され、3Dプリント技術による幾何の自由度が、触感設計空間の拡張にどのように貢献しているのかについて言及する。特に着目する材料はFFF方式で用いられる代表的な材料である熱可塑性ポリウレタン(TPU)と液槽光重合法の1つであるDLP方式で用いられる、代表的な軟質レジンの主成分であるウレタンアクリレートの材料特性について述べる。

1.2.1. 材料設計の産業史における歴史的変遷と3Dプリンタの影響

触感設計は先に述べた硬軟・粗滑・温冷が重要な要素であるが、その背景の材料設計の産業・工業的歴史的背景としてmike ashbyによる設計概念を紹介する。1990年代にmike ashbyによってプロダクトは材料と設計と製造と機能が連動しながら、技術革新が行われていることが唱えられ、Ashbyは材料イノベーションの指針として、Ashby map¹⁴と呼ばれる材料比較手法を考案した。これは今までに再現されていない材料空間を明らかにすることで、プロットされていない領域の材料開発イノベーションを行い産業発展を推し進めることを提唱した。Ashbyによって当時の産業技術で可能な材料空間が示され、世の中に実現されていない材料開発が推し進められた。しかしラティス構造といった軽くて剛性のある構造が考案されるものの、当時の産業装置では製造方法がなく理論上の材料であった。

しかし現在では3Dプリンタの普及によって製造可能な条件が整い、FEMやMaterial Infomationcsといった物理現象の課題に対して、計算機的手法を用いた材料開発を行う方法が浸透していくことで、ラティス構造をはじめとした今までには理論上のマテリアルであったものが実際に用いられるようになった。さらに材料研究領域では、メタマテリアルと呼ばれる幾何構造と材料特性を一体的に設計することで新しい機能を発現させる設計概念が提唱されており、触感設計においてもその技術が応用されることが期待されている。

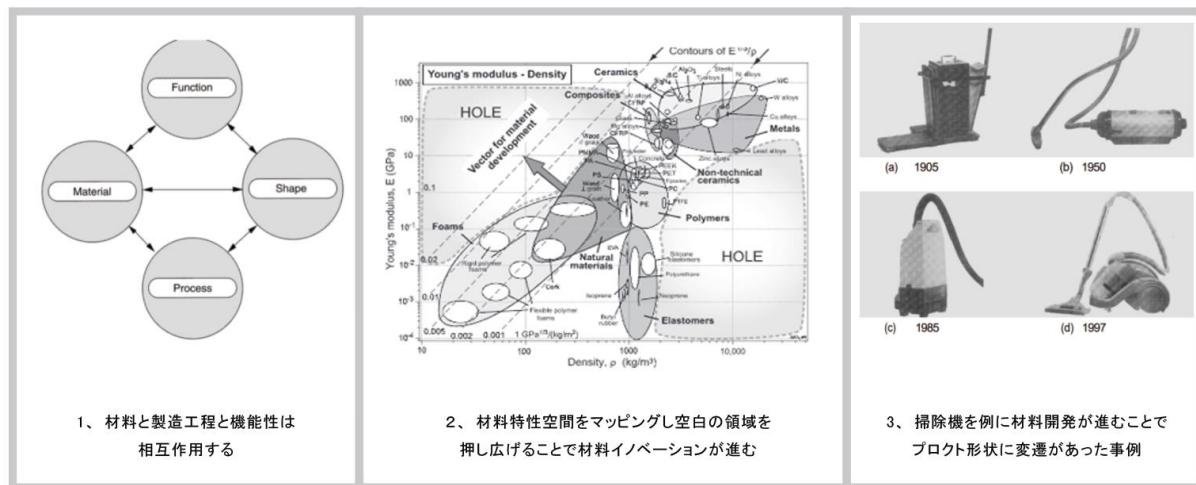


Fig. 6 Ashbyによって提唱された材料開発とプロダクトイノベーションの関係性(Ashby, 1992)
 1.材料と製造工程と機能性は相互作用する, 2.材料特性空間をマッピングし空白の領域を押し広げることで材料イノベーションが進む, 3.掃除機を例に材料開発が進むことでプロダクト形状に変遷があった事例

1.2.2 触感設計に着目したマテリアル特性

本節では3Dプリントで用いるマテリアルの材料化学に基づいた特性について言及する。これは自由な幾何形状が設計できる3Dプリンタの特性を用いた触感設計を行う本研究において、ヤング率や表面粗さといった幾何によって設計介入ができるものと、摩擦特性や熱伝導性といった材料が支配的な特徴を持つ物理特性を分類するためである。触感設計に用いる材料は多岐にわたるが、本節ではFFF/DLP方式の3Dプリンタで柔らかいものを設計する際に、代表的に用いられる熱可塑性ポリウレタン(TPU)と軟性レジンの主成分であるウレタンアクリレートについて紹介する。

TPUはイソシアネートとポリオールによるウレタン結合によって構成される架橋構造をもつた高分子である。分子構造に着目するとイソシアネートとポリオールは異なるガラス融点をもつことから、ある温度においてソフトセグメントであるポリオールがハードセグメントであるイソシアネートの部分に比べ弾性的性質をもちながら結合しており、この特性が弾性に寄与する。加えて高分子全体の架橋構造の密度によってTPUのバルク材としての柔らかさは定まっている。ウレタンアクリレートはウレタン結合に更にアクリレートがラジカル重合することによって形成される物質である。この特性から常温では溶液中に分散された小さい分子の状態であるが、 $205\text{ }\mu\text{m}\sim460\text{ }\mu\text{m}$ の紫外線を受けることでウレタンアクリレート同士がラジカル重合し架橋構造を作ることで造形物が構成される。熱可塑性材料であるTPU、光造形材料であるウレタンアクリレートの柔らかさは高分子全体の架橋構造の密度と分子構造におけるソフトセグメントとハードセグメントの構造によって材料特性が定まる。このようなナノ、マイクロスケールの構造によって、材料の摩擦特性や反発特性が定まっていき、触感設計に関わる物理特性を構成している。触感設計にはこのような材料化学によって定まる材料特性の側面は多くあり、材料選択そのものが触感設計に大きく影響するが、内部に多くの空気を含む形態を持つことで柔らかさをもつポリウレタンフォームやシボ加工によって表面形状を作ることで粗滑感を設計するといった幾何の介入でも触感に寄与することができるため、材料と幾何の両方の設計アプローチが特定の触感設計に必要である。

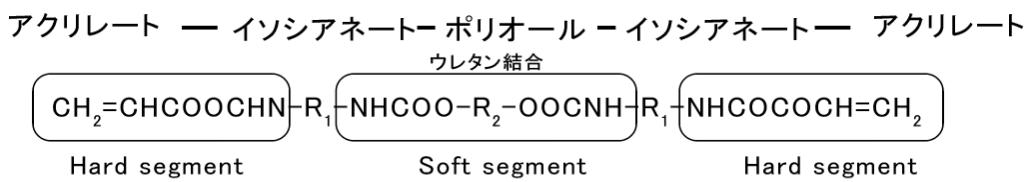


Fig. 7 ウレタンアクリレートのメソスケールの架橋構造に着目した材料特性

1.2.3. 触感設計に着目した幾何による介入方法

前節で触感設計は材料に備わる特性の影響だけでなく、材料の形状/形態によっても特性が変わることに言及した。しかし幾何構造の介入するスケールごとに影響を与える触経験は異なり、それについて本節では言及する。例えばセンチメートル単位での形状の変化は触探索運動に影響を与え、多様な動作を誘引する形状を設計できる。メソスケールでの設計介入は内部構造を与え、かさ密度を減らし軟性化させることや表面のシボ加工は粗さ知覚の変化を及ぼすことができる。ナノスケールでの介入は材料に備わる物理特性を変える。センチメートル単位、ナノメートル単位での設計介入については1.1.4.1、1.2.2にて言及したことから本節では特にメソスケールでの内部の幾何構造の設計についての説明を行う。

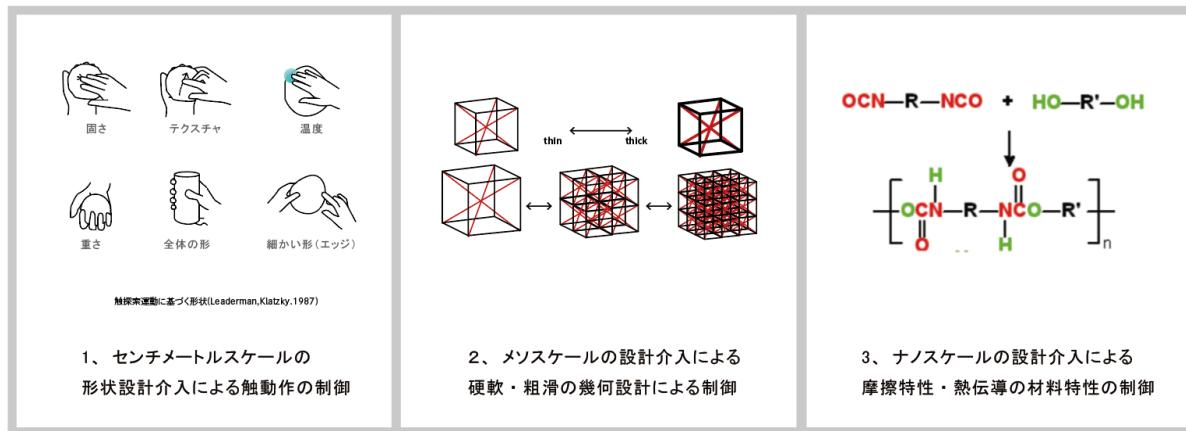


Fig. 8 スケール毎の設計できる触感要素

3Dプリンタの構造で周期的に単位幾何が配置されたものをラティス構造と呼び、単位幾何構造を変えることで様々な材料特性を発揮することができる。良く知られた単位幾何構造として結晶構造と極小曲面があげられ、それぞれの特徴として結晶構造は金属や石のナノレベルの分子構造モデルとして研究がされていることから、無数の幾何パターンが知られており、極小曲面は力学的安定性があり、少ない材料で軽量かつ強固な材料設計ができるといった利点がそれであることが知られている。

加えて造形可能性の観点からみると造形精度が高いDLP方式においては造形する幾何構造のパターンの自由度は高いが、FFF方式においては出力できる幾何パターンにはオーバーハングによって制約がある。しかし体心立方格子、面心立方格子といった結晶構造の一部についてはFFF方式での出力が確認されており、扱いやすい単位幾何構造であることが知られている¹⁵。これらのラティス構造が触感設計に与える汎用的な特徴は単位幾何のかさ密度を変えることでできる軟性化であり、かさ密度が小さくなることで材料の単位体積にかかる応力が大きくなり、このことによってひずみが大きくなり、大変形が生じ軟性化させることができる。

このような単位幾何構造の特性について突き詰めることで、双安定性¹⁶や部分的に柔らかさを変えること¹⁷によって多様な機械変形をもたらし触感に影響を与えることが期待される。このような幾何構造と物理特性を一体的に取り扱う材料設計を総称してArchitected material、メタマテリアルと呼び次節で詳述を行う。

1.2.4. メタマテリアル/Architected materialの概要

Architected material(以下A-matと呼ぶ)、メタマテリアルとは前節で言及した物理特性を幾何構造と一体的にとり扱う材料設計方法である。この中で特異な機能を発現するものについてメタマテリアルと呼び、軟性化など汎用的な特徴が設計された幾何構造をA-matと定義する。A-mat、メタマテリアルは幾何構造が密接に関わり、自由度の高い形状を出力できる3Dプリンティングと相性がよく、FEMなどの計算機的設計方法を用いて、特定の物理課題に最適化された幾何形状の探索するアプローチが音響、光学、機械分野のメタマテリアルの研究が盛んである。例えば振動メタマテリアルは振動幅のバンドギャップを埋める特性方程式を解くことができる幾何形状の探索を行い、ある周波数帯の振動を抑える材料設計を行っている¹⁸。

触感に着目したA-mat、メタマテリアル研究としては、柔らかさを自在に割り当てる事例¹⁷や、マルチマテリアルを用いることで振動の伝播制御を行う事例¹⁹、Adidas 4DFDWなど運動特性応答課題において踏み込みを推進力に変えるアウトソールの事例²⁰などが存在し、メタマテリアル研究は3Dプリンタによって、身近な触感を再現することにも、今までにない触感を再現することにも貢献する可能性があることが示唆される。

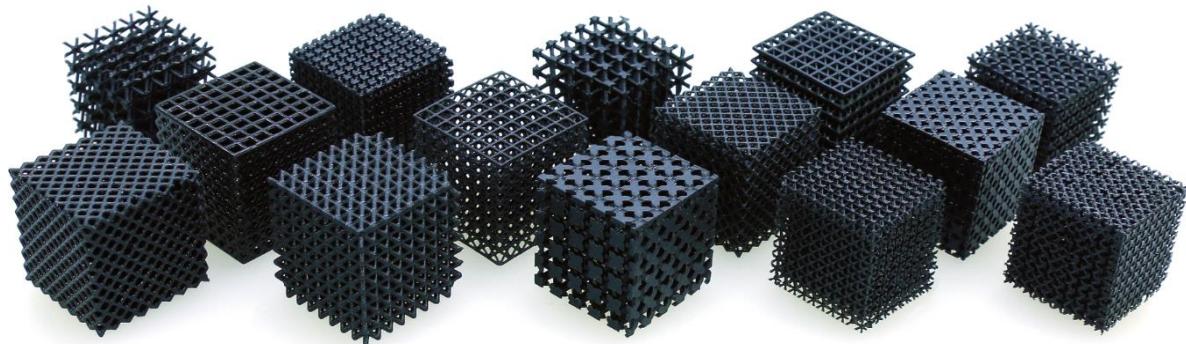


Fig. 9 メタマテリアル概観



Fig. 10 部分的に柔らかさの異なる幾何構造を割り当てる事例(Kuipers,2020)

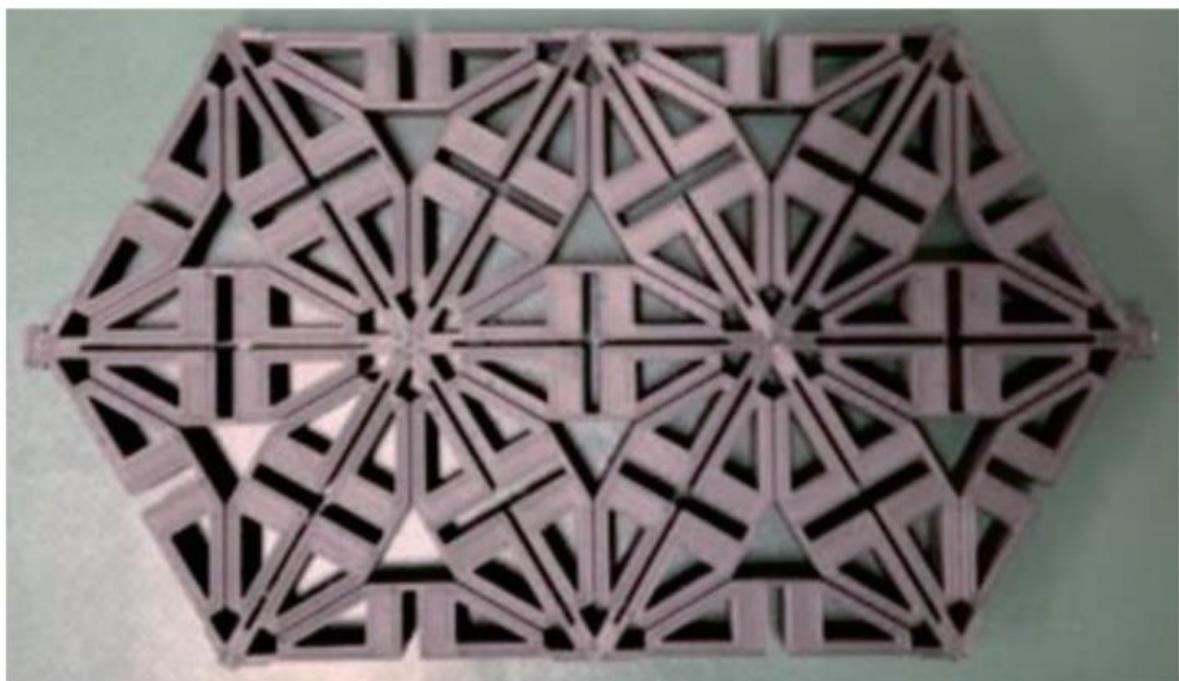


Fig. 11 振動抑制メタマテリアル概観(水上,2020)



Fig. 12 Adidasの4DFDWによる踏み込み運動を推進力に変えるメタマテリアル

1.3 触感設計と設計支援に関する先行研究

前節までに触感研究を人・モノの両側面から研究の概要を示し、本研究で取り扱う触感ファブリケーションが横断領域であることを明示した。しかしリサーチクエスチョンである「触感の価値は設計と設計支援を通じて明らかにできるのか」について、前節までの言及では3Dプリンタを用いることで形状、硬軟感、粗滑を設計できる可能性についての示唆に留まり、価値開発に言及をしていない。このことから触感という概念がどのような文脈で社会と接続されているのか、触感を用いた応用研究と、設計支援の先行事例を援用し位置づけを行う。前者では触覚を生じさせるデバイス開発がどのように応用され、価値を構築しているかについて紹介し、後者の設計支援では触感がどのように社会的位置づけがされており、課題について紹介することで、本研究で実質的に取り組む課題を明示する。

1.3.1 触覚/hapticsを設計する研究

デジタルファブリケーション技術を用いた触感研究は導電性機能付与²¹といった技術開発を通じて、触れる際のインタラクションポイントの設計を通じ、人間とどのようなフィードバック関係が検討できるかの研究がされている。これらの研究はVR空間でのリアリティを増幅させたり、材料質感だけでは設計が困難であった安心感といった情動的な触経験を与えるインターフェースに応用されている²²。

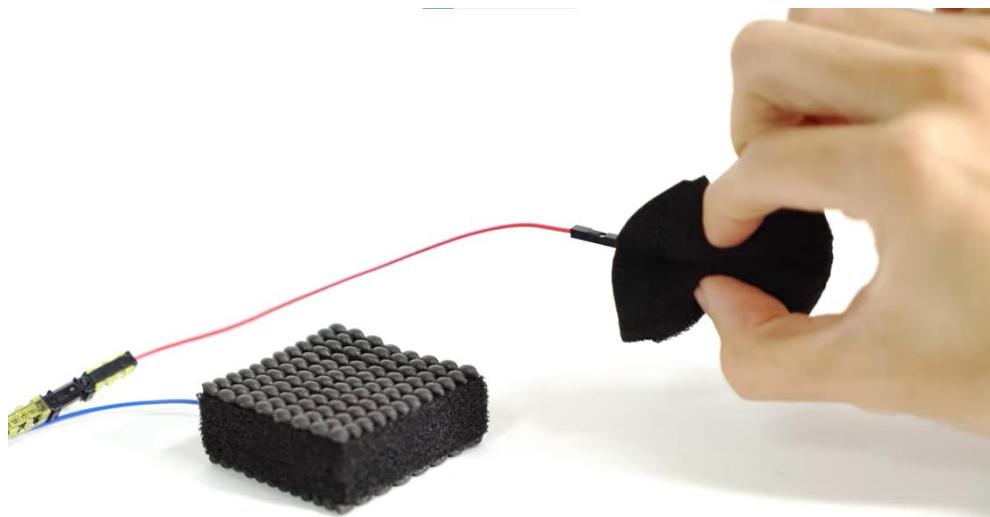


Fig. 13 アクチュエーター/センサーを導入した触感研究事例 (nakamaru,kakehi,2019)



Fig. 14 空気圧触感によって情動的なインターフェースの設計例 (Kyung,Ishii,2020)

1.3.2 触感による設計支援に関する研究

設計支援とは、開発された材料や技術に社会的位置づけを与え、価値を創出することを目的に行われる。設計支援の仕方によって、生産者と消費者の関係性が定まり、価値の創成が行われることから²³、用途が定まっていないものを扱う研究領域では重要な概念である。触感に関わる設計支援の例として3つの事例の紹介を行う。

株式会社Taicaのαゲル触感見本帳²⁴では、開発されたαゲル材料が、どのようなものに応用できるか探索可能性を広げることを目的として、「アスカ-C」、「針入度」といった物理特徴量ではなく、どれくらいの柔らかさでどんな触り心地なのか、視覚的にわかりやすく柔らかさがイメージしやすい餅や唇といった既存物の触感と対応づけを行い、応用事例を探索するツールとして用いられている。

次に実際にものづくりが行われる設計支援研究ではOmniSoft²⁵が例としてあげられる。この研究では座り心地や触り心地が柔らかくなることに、価値があることを前提として、3Dプリンタ設計工程の中に、ゴムやスポンジといった既存のモノの柔らかさを割り当てるCADを提供し、ユーザーに対する設計支援が行われている。しかしOmnisoftであげられる限界は設計できる柔らかさの範囲と造形可能性に関しては十分な検討がされていないことである。

最後に触感による価値設計の取り組みとして山崎らは、自動車に用いられる人口皮革を対象に表面形状の要素と「しっとり感、滑らか感」といった印象を心理物理実験に基づいて結びつけることで、個人や車種に応じて好ましい表面触感を領域を示し、それが設計可能であるモデルを報告している²⁶。この事例の価値は心地よい触感が設計できることではなく、多様な触感が設計できることを示すことによって、人によって異なる様々な好ましさに対応ができることに

あると考えられる。

これらの例をもとに触感設計支援の課題を考察すると、柔らかさや粗さを変えることが、人の印象にどのように影響するのかを検討する際には物理特徴量ではなく、既存のモノに例えることや柔らかさを比較することで、より実感に即した探索が可能になることが示唆される。また a ゲル触感見本帳が応用先を見つけるツールとして開発されていることや、OmniSoft の応用がサドルや椅子といった比較的平易な例に留まっていることなどから、触感を出発点とする応用のアプローチは現状十分に開拓されていないことが指摘できる。人口皮革の例においても、触感自体ではなく、様々なバリエーションに対応できる触感を設計可能なシステムに対して価値が置かれていることがわかる。このことは触感の良し悪しは主観的な経験であり、1人1人によって異なるために、その価値づけに関する新たなアプローチが必要であることを示唆しているとまとめられる。2章で詳述する触感見本帳 Tactrium では、この課題の解消が検討された。



Fig. 15 a. 設計支援の概念図, b. a ゲル触感見本帳

c. OmniSoft 柔らかさに着目した設計支援に関する研究事例

2章 触感見本帳Tactriumの製作実践

1章では触感設計を、3Dプリンタの特性である幾何形状の自由度を生かすことで、物理特性を変え硬軟・粗滑感といった触感設計に生かせることを示唆した。本章では硬軟・粗滑の触感設計支援をするツールとして触感見本帳「Tactrium」を提案する。Tactriumとは触覚を指す「Tactile」とTerrarium・Aquarium・Planetariumといった図鑑・標本を示すものに用いられている接尾語「-arium」を併せた触感の見本帳を表す造語である。Tactriumで提供される触感見本帳は植物図鑑のように素材の知覚を分類した触感空間を提示することを目的とした。

Tactriumを用いることで、3Dプリンタで開発が可能な触感領域を可視化し、ユーザーが好ましい物理特徴量の触感を選んだり、既存材料との比較を行うことで、材料特性だけでは抽出されていない複合的な触感情報を引き出しプロダクト設計を反映させることができるようになる。本章では主に3Dプリント可能な物理量の設計空間の明示を硬軟感と粗滑感と視覚情報で行う。3章では電動車いすコントローラーの設計支援を例に触感設計支援の効用に言及する。

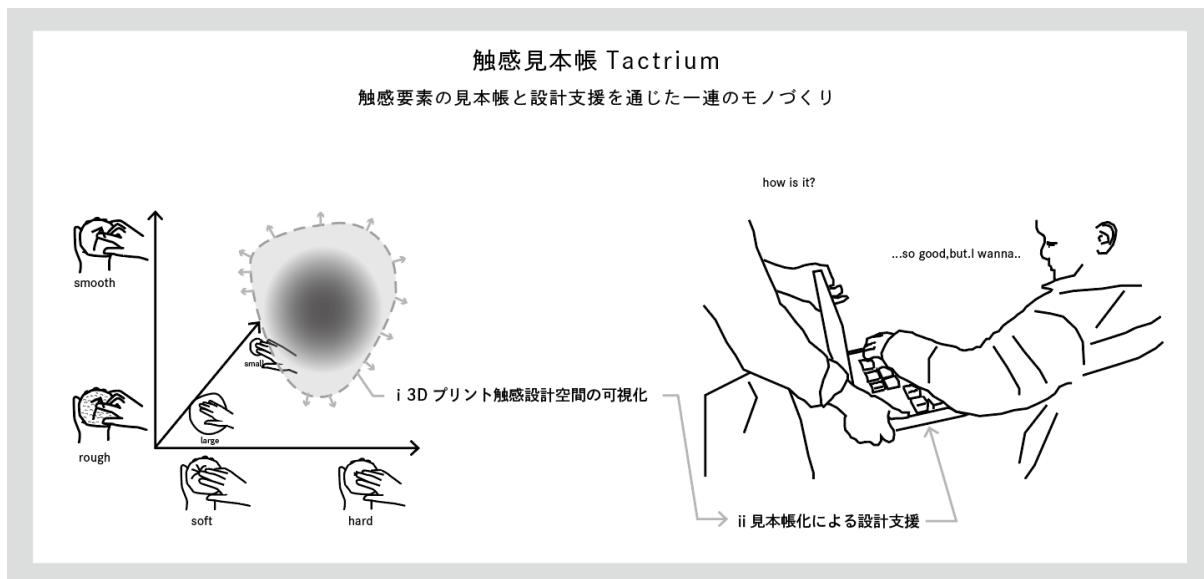


Fig. 16 触感見本帳Tactriumの概要

2.1. 触感設計ダイアグラム

本節では材料特性と幾何構造に基づいた触感設計方法の概要をまとめる。1章では触感の構成要素について形状—硬軟感—粗滑—温冷が寄与することを示し、本章ではそれらを実際の設計方法について述べる。設計方針としてFig. 17に上げられるようにモノを表面と内部構造に分け、表面は粗さ、色彩が寄与し内部構造は硬軟感が寄与すると仮定しそれぞれの設計方法について言及する。温冷感については3Dプリンタによるマテリアルの幾何構造の検討では十分なバリエーションの設計ができないことから本研究では検討しない。

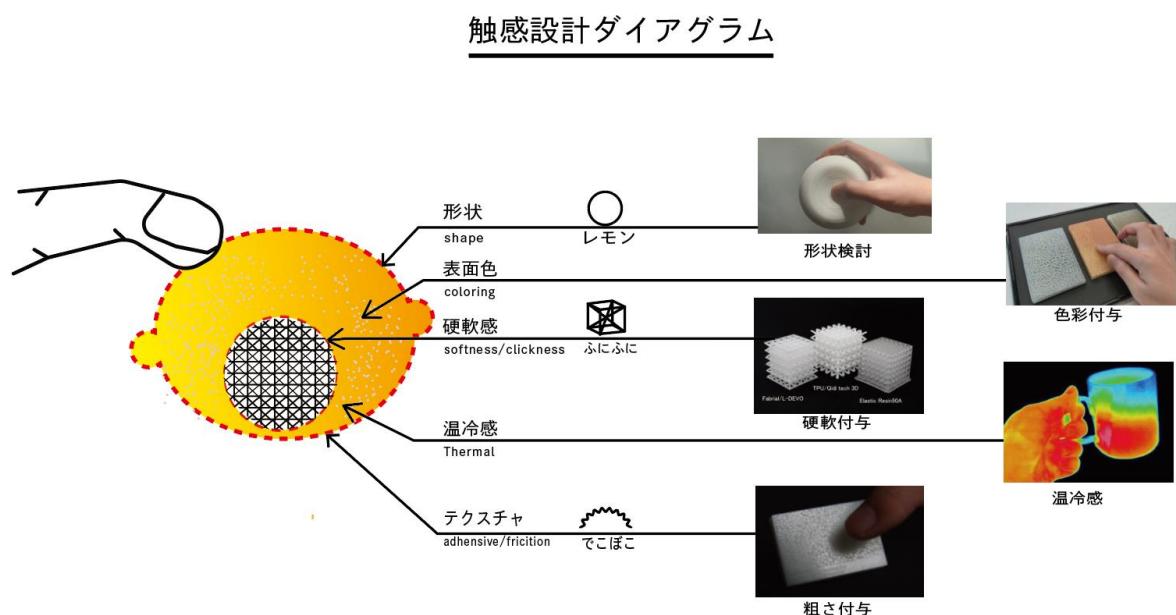


Fig. 17 触感設計概要

2.2. 形状設計

1-1.4.1にて触探索運動は形状—硬軟感—粗滑感—温冷と関係性があることを指摘した。このことから触感の見本帳として探索動作として撫でやすく、持ちやすく、押しやすい形状のサンプルを用意することは設計支援者との意思疎通で重要であると考え、橿円球を押しつぶした赤血球のような触探索を誘引しうる形状の検討を行った。



Fig .18 握る・押す・撫でる、を促す橿円球の形状検討

2.3. 硬軟設計

本節ではデジタルファブリケーションを用いて設計しうる硬軟感の設計方法を示す。主な取り組みは2点である。1つ目は3種類の3Dプリンターマテリアルの出力条件を基に造形可能なラティス構造を探査し出力した。2つ目は柔らかさの物理特徴量の1つであるヤング率を押し込み型硬さ試験機Yawasaを用いて計測を行い、材料比較チャートであるAshby Mapにヤング率一密度のプロットを行い、3Dプリンタで設計可能空間とウレタンフォームやシリコンといった既存材料との位置関係を明らかにした。

2.3.1 サンプル形状の定義

本検討ではTPU、Form3のElastic Resin50A、FABRIAL™-Rの3つの材料を用いて設計空間の可視化を行った。サンプルの作成には熱溶解積層方式(材料押出法)の造形可能性が確認されている4パターンの幾何学構造を基本に、新たに単純立方格子と面心立方格子に基づく構造を加え、それぞれについて全体を囲むフレーム・梁の有無を整理し、Fig.21aに示す6パターンを基本モデルとし、この幾何構造を周期的に並べ、格子数、柱太さといった設計パラメータを変えることでここでラティス構造のモデリングを行い、サンプルの出力を行った。

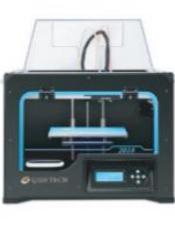
3D Printer					
	Maker	Fusion technology	QIDI Technology	Formlabs	
	Product	L-DEVO Medical Model	QIDI-TECH I	Form3	
	Method	FDM	FDM	SLA	
Material		  			
	Maker	JSR	SainSmart	Formlabs	
	Product	FABRIAL-R(TPE) filament	TPU flexible filament	Elastic 50A Resin	

Fig. 19 サンプル設計に用いたマテリアルと機材

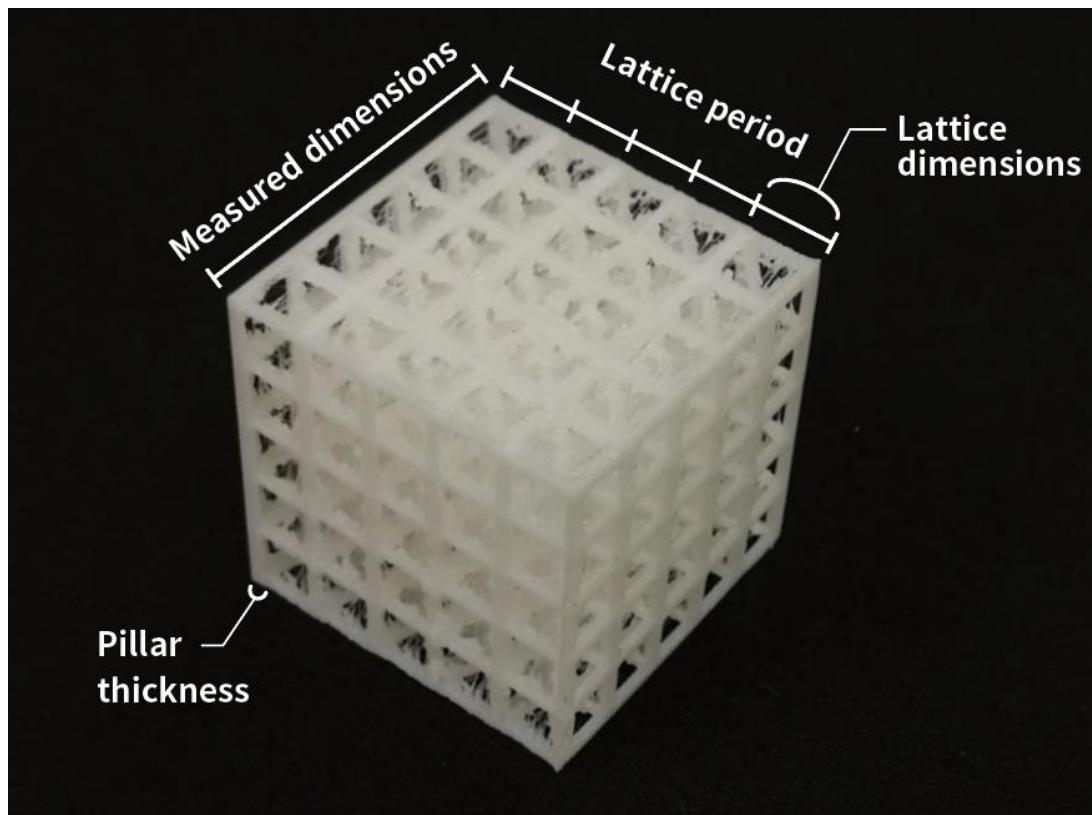


Fig. 20 硬軟感サンプル設計変数

2.3.2 サンプル形状の出力

本節ではモデリングしたサンプルの出力条件について言及を行う。FABRIAL™-R filamentを用いて製作された22個の構造体の造形には、FFF方式の3DプリンタL-DEVO M3145TPのエクストルーダー部及びファームウェアを軟質フィラメント用に調整したL-DEVO Medical Model（株式会社フュージョンテクノロジー）と生体適合性のある軟質フィラメント「FABRIAL™-R filament」（JSR株式会社）の組み合わせが用いられている。ノズル径は 0.4mmとし、ライサーはSimplify 3Dを利用し、造形ピッチを0.25 mmに設定して22個の出力物を製作した。

次に熱溶解積層方式の3DプリンタQIDI-TECH I (Qidi Technology社)とSainSmart 社のTPU Flexible Filamentを用いて先行研究のモデルに基づく22個の計測体の出力を試みた。ノズル径は0.4 mmとし、造形ピッチを0.15 mmに設定をして造形を行った。22種のモデルのうち、出力できた計測体は21個となった。この理由は利用した3Dプリンタの造形性能とフィラメントの性質の差により、出力中にモデルの形状が崩壊してしまう（印刷に失敗する）モデルが含まれたためである。この現象はモデル4の外枠の存在しない体心立方格子のうち、柱太さ1.2 mm、格子寸法5 mmのモデルで生じた。体心立方格子は立体の対角線にあたる筋交い部分の造形においてオーバーハングが生じやすく、サポート無しで造形することが困難である。L-DEVO/FABRIAL™-Rで造形できた立体物がQIDI TECH I / TPU Flexible Filamentでは造形が出来なかった原因は、L-DEVO は Medical Modelとしてエクストルーダーとファームウェアが独自に改善され造形精度が高いが、QIDI TECH I では装置にそうした工夫が無いことだと考えられる。

最後に光造形方式(液槽光重合法)の3D プリンタ 「Form3」 に紫外線硬化式の液体レジン素材 「Elastic 50A Resin」 を用いて、新たに制作した125個のモデルデータすべての造形を試みた。この場合には、造形の安定性を向上させるため、モデルの底面に35 mm × 35 mm × 1 mm の床板を追加した。3D CAD上で設計した3Dモデルのうち、「Form3」用のプリントデータ制作ソフト「PreForm」の設定によりラティス構造の内部に構造サポートが自動的に形成される場合が散見された。ラティス構造内部に構造サポートを形成した場合、格子構造そのものが造形できたとしても造形後のサポート除去は技術的に困難であった。また、形状を優先して十分な構造サポートを追加しない場合、PreFormソフトウェアの仕様上、そもそも造形を開始することができないことが判明した。こうした状況から、構造サポートの事後除去が困難な3Dモデルを除外して造形することとした。以上の検討の結果、最終的に造形することができた構造体をFig.21bに示す。L-DEVO/FABRIAL™-R filamentでは22個、QIDI-TECH I /TPU Flexible Filamentでは21個、Form3/Elastic 50A Resinでは23個の合計66個となった。

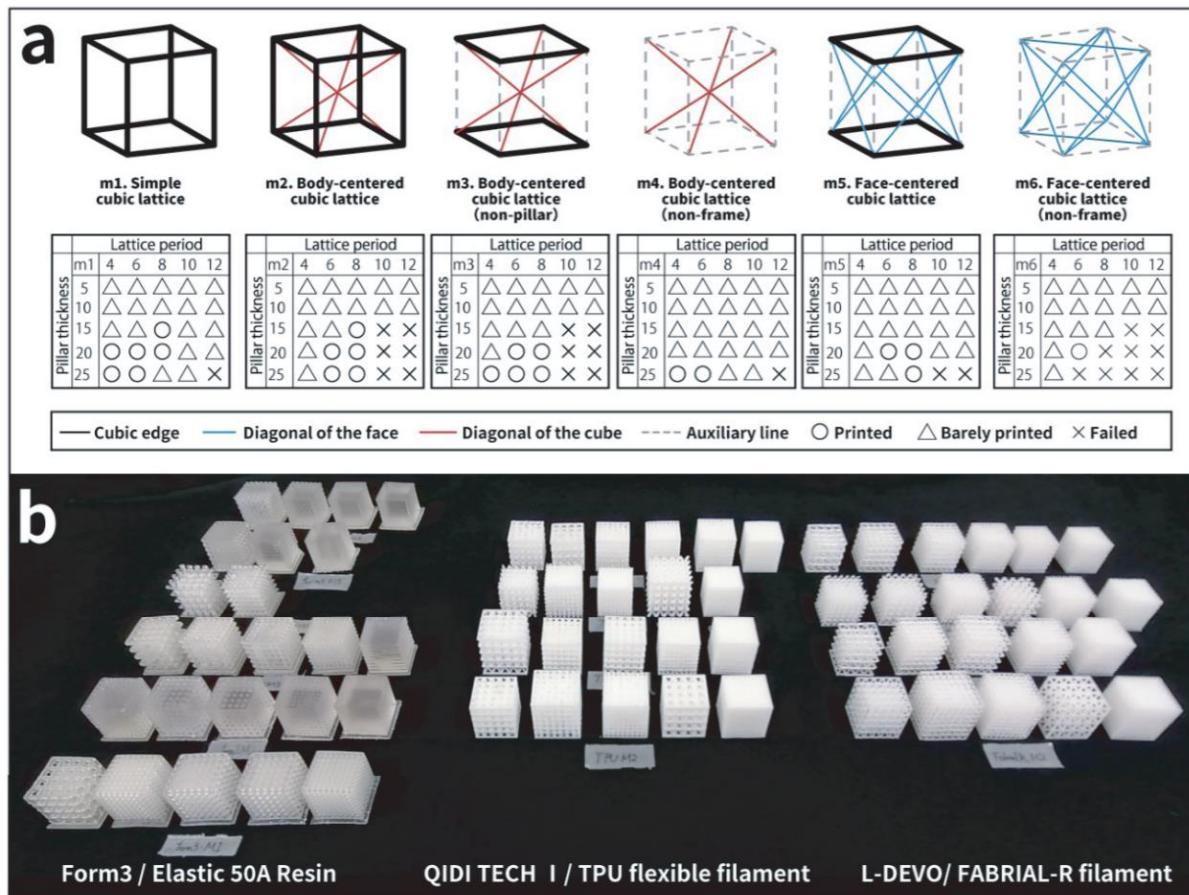


Fig. 21 硬軟感サンプル群

2.3.3 計測評価

造形サンプルについて、その密度とともに、機械特性の1つとしてヤング率の計測を行った。計測には押し込み型硬さ試験機 YAWASA MSES5012-1-SL (テック技販、京都) (Fig.22) を用いた。標本は定盤の上に乗せられ、圧力センサーに球面上のプローブ ($\phi 30\text{ mm}$) を取り付けた。この状態から、 0.5 mm/s の一定の速度で、標本の中央部に対して 5 N の荷重に達するまで荷重をかけた。Fig.22aでは計測前の造形サンプルについて、Fig.22cでは最大荷重付近での変形を示す。各造形サンプルに対して5回ずつ測定実験を行い、推定したヤング率の平均値を計測結果とした。また、造形物の密度は造形物の重量を電子天秤 (エー・アンド・ディ社、EW-1500I) を用いて重量を測定し、外形寸法を電子ノギス (Mitutoyo、CD-15AX) で3辺の計測を行った結果より体積を求め、空隙を含んだかさ密度を算出した。

造形サンプルに対して計測を行った結果をFig.23に示す。造形サンプルの密度とヤング率の間で単回帰分析を行った。有意水準は 0.05 と定めた。全体サンプルの回帰係数は $r=0.39$ 、自由

度調整済み決定係数はAdjusted R²= 0.13 (p<0.01)であった。このことから密度とヤング率の間には統計的有意な正の関係が示された。FABRIAL™-Rで造形したサンプルでは、回帰係数がr=0.68、自由度調整済み決定係数はAdjusted R²=0.43 (p<0.001)であった。TPU Flexible Filamentで造形したサンプルでは回帰係数がr=0.44、Adjusted R²=0.15 (p=0.053)であった。Elastic 50A Resinで造形したサンプルでは回帰係数r=0.80、Adjusted R²=0.61(p<0.001)であった。以上より、FABRIAL™-RとElastic 50A Resinで造形したサンプルでは密度とヤング率との間の回帰係数に統計的有意な関係があることが示唆され、ラティス構造に間隙を与え、かさ密度を小さくすることでヤング率を下げるこことを統計的有意に示した。

一方でTPU Flexible Filamentで造形したサンプルの密度とヤング率との間の統計的有意な回帰係数は得られなかった。この原因には、ラティス構造を支える柱太さの大小がヤング率の大小を支配していることを推察できる。この結果から、ラティス構造を持つ造形サンプルのヤング率を支配する要因は、全体の密度とラティス構造を支える柱太さ径の2つであることが示唆される。また実際にサンプルを作成して得られたヤング率について3つの造形手法の設計範囲における上限値と下限値は、FABRIAL™-Rでは1600-110 kPa、TPU Flexible Filamentでは2100-100 kPa、Elastic 50A Resinでは1500-58 kPaであった。それぞれの材料で間隙がないように100%充填で製作したバルク材では、TPU Flexible Filamentではヤング率4100 kPa、Elastic 50A resinではヤング率2300 kPaであった。このことからラティス構造を用いることで、上記に示した範囲のヤング率について、材料自体が固有に持つ材料特性よりも柔らかくすることができますことを示した。

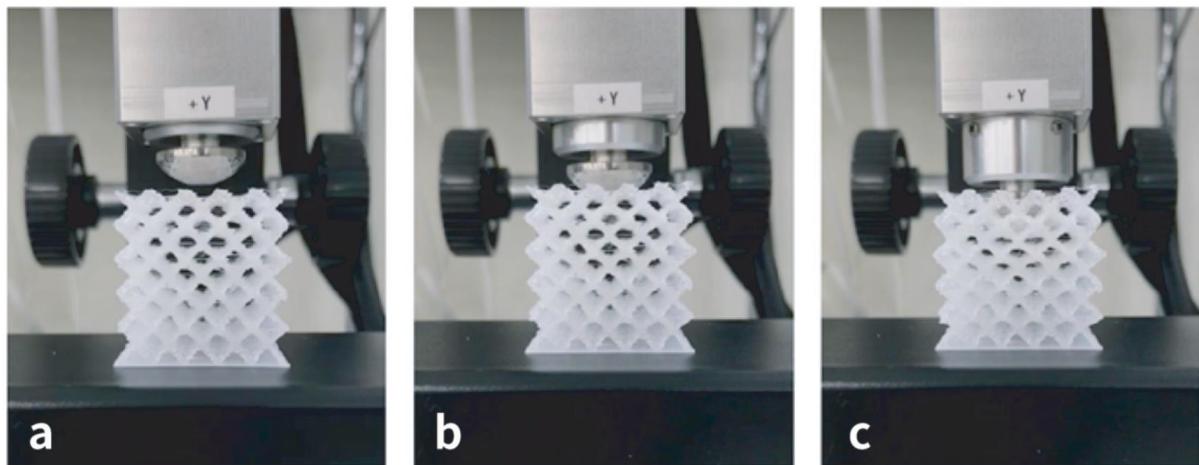


Fig. 22 押し込み型硬さ試験機Yawasaでの計測

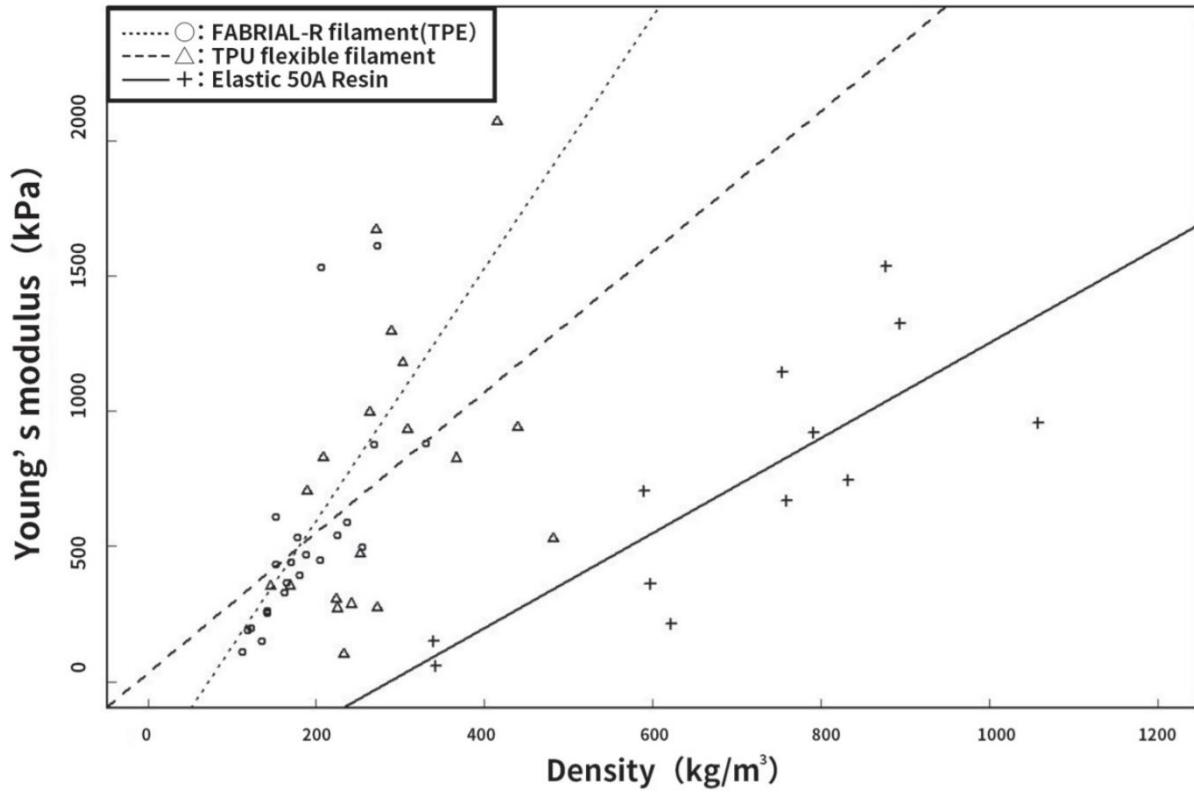


Fig. 23 出力した試験体のヤング率とかさ密度の散布図

2.3.4 Ashby Plotによるヤング率の設計空間の可視化

材料比較データベースとして知られるANSYS Granta Selector²⁸を用いて本研究で設計したラティス構造の機械特性をプロットした。結果をFig.24に示す。密度とヤング率の2軸からなるAshby mapにプロットした結果、既存材料との比較ができるようになった。今回使用した材料によって囲まれたAdditive manufacturing領域はフォーム材とエラストマー材の一部の領域と重なる領域があることが確認できる。フォーム材ではウレタンフォームと近い位置にマッピングされるラティス構造があることがわかった。例えばクローズドセル構造のポリウレタンフォームのヤング率は1600-1490 kPa、密度は370-330 kg/m³であり、TPUで出力した体心立方格子の柱太さ1.2mm、格子周期6のモデルではヤング率は1670 kPa、密度は270 kg/m³であった。エラストマー材に含まれるポリスチレン系熱可塑性エラストマーであるSBS、SISではヤング率は1830-570 kPa、密度は1000-900 kg/m³であり、Elastic 50A Resinで出力した単純立方格子の柱太さ2.0mm、格子周期8のモデルではヤング率は740 kPa、密度は830 kg/m³であった。このようにヤング率と密度の機械特性に着目した材料比較において類似した機械特性が作り出せることが示唆できる。

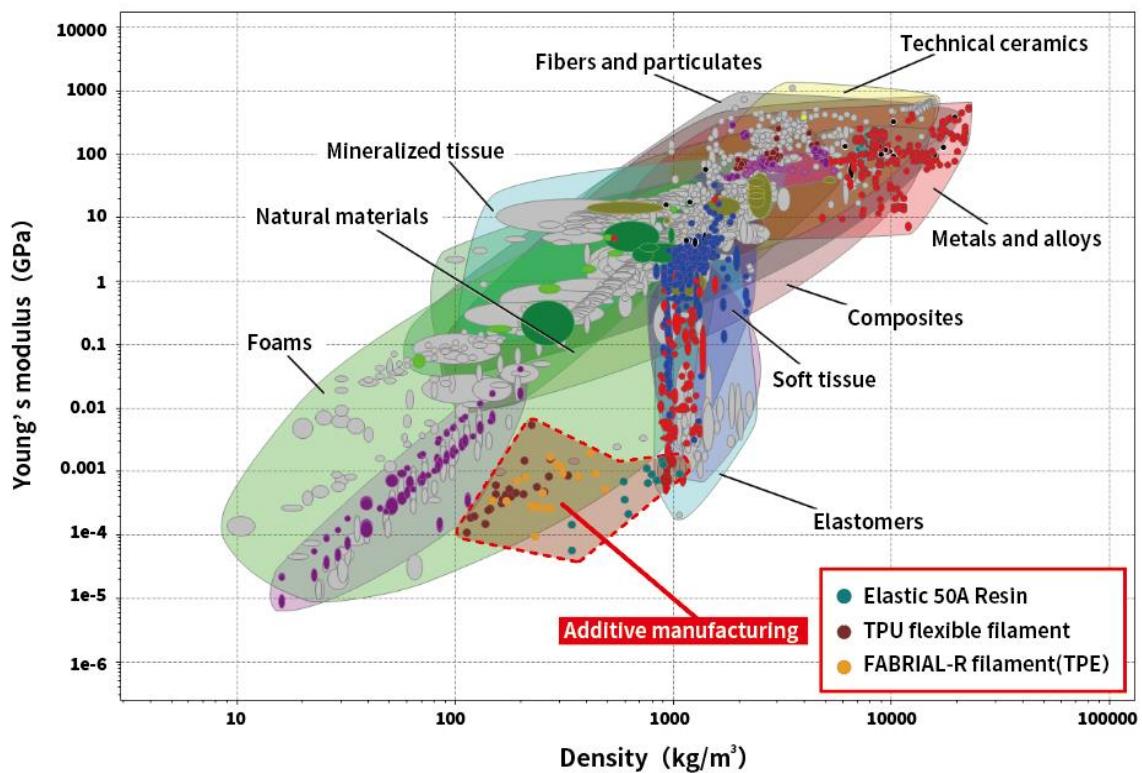


Fig. 24 AshbyMapプロット

2.3.5 硬軟サンプルの見本帳の考察

計測結果からウレタンフォームからバルク材のゴムと同等のヤング率の範囲の3Dプリントによるサンプルが得られた。これらに加えてウレタンフォーム、スチレンフォーム、スタイルフォーム、ゴム材の既存材料と出力したサンプルをキューブ形状にして収納ボックスに格納した。これを硬軟感の見本帳とした。これらのサンプルは感温性があることから温度によって柔らかさが変化するが、ウレタンフォームと同等程度の柔らかさから、ゴム材料と同等の柔らかさが得られた。これらのサンプルを触り比べると、フォーム材料とポリマーでは材料組成も内部構造も異なることから同等のヤング率のフォーム材と3Dプリンタによるサンプルでも異なる質感がある。例えば触れた際の摩擦感はポリマーでは皮膚との間にしっかりとグリップ感があり、フォーム材ではサラッとした質感がある。押し込みの質感はポリマー材に比べてスチレンフォーム材は押し込んだ力が反発してくるような質感が感じられた。このように柔らかいという触感を複数の材料を比較しながら、複数の触索動作で検討することでヤング率だけでなく、反発特性や、表面の印象といった複数の要素が柔らかい質感を構成するのに関わっていることが示唆される。

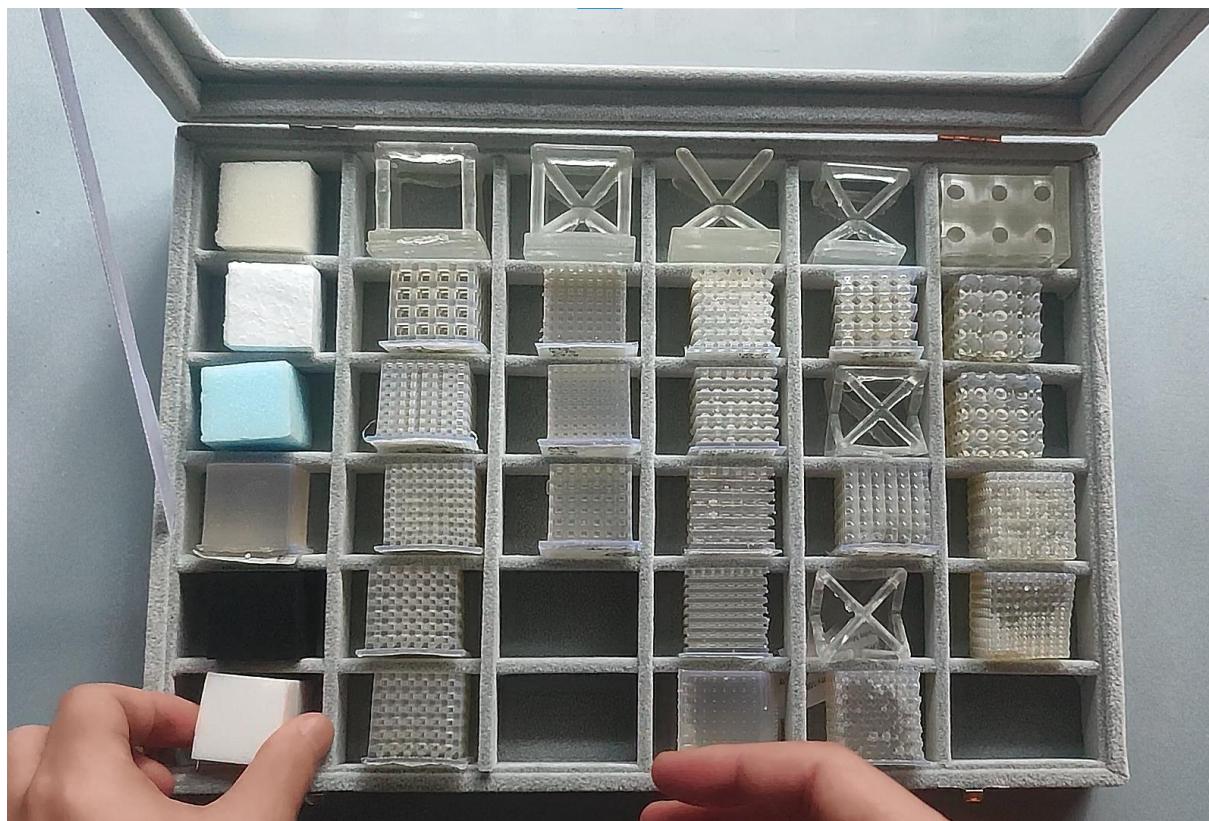


Fig. 25 ヤング率のサンプルと既存物との比較が可能になった硬軟見本帳

2.4. 粗滑感設計

本節では3Dプリンタを用いて設計しうる粗滑感の設計方法を示す。粗滑感は材料知覚の主要な因子であり、粗さ知覚原理は1.1.4.3で言及した。本節での主な取り組みは3点である。1つ目は光造形方式の3Dプリンタを用いて表面粗さの異なる皮膚や果物の表皮に見られるようなボロノイパターンによる粗さサンプルを作成した。2つ目は粗さの物理特徴量の1つである表面粗さ R_a を3D形状測定機KEYENCE VR3200 G2を用いて計測を行い、3Dプリンタによる粗さ設計空間を検討した。3つ目は設計可能空間を基に粗滑感の見本帳を作成した。

2.4.1 サンプル作成

光造形方式の3Dプリンタは数十 μm の精度で造形を行うことができることから、皮膚の変形を知覚できる100 μm 程度の凸間距離を持つ形状であるマクロ粗さとミクロ粗さの設計が技術的に可能である。粗さに関わる表面形状の設計パラメータは幾何形状の周期性、凸間距離、到達最大深度、深度の分散と非常に多くのパラメータを含み、その中における粗さ知覚を支配する要因の検討は一部で行われているものの²⁷十分に明らかになっていない。本研究では、設計支援に役立てることが目的であることから、できるだけ広い範囲の粗さ設計を行う。サンプルの作成は人間の皮膚や皮革製品にも現われているボロノイ幾何形状を用いて、25mm×44mmのプレートに対してFig.26bに示される分割数・オフセット間隔を設計パラメータとして調整し、硬質、軟質レジンを用いて粗さ計測用のサンプルを行った。この変数を選定した理由は、分割数を増やすことで凸間距離は小さくなり、オフセット間隔を大きくすることで凸間距離は大きくなることから断面曲線の周波数成分に寄与し表面を撫でた際の「でこぼこ、ざらざら、さらさら」といった多様な表面粗さ知覚を設計することができると検討したからである。

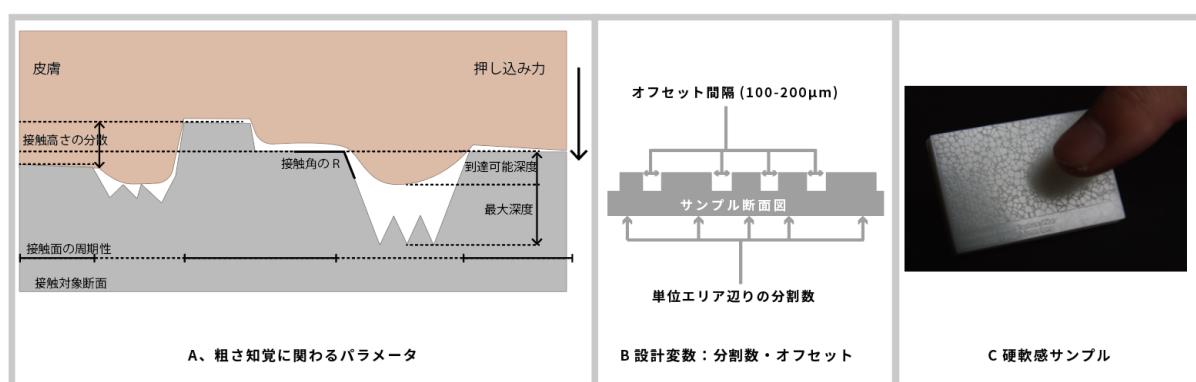


Fig. 26 粗さ設計ダイアグラム

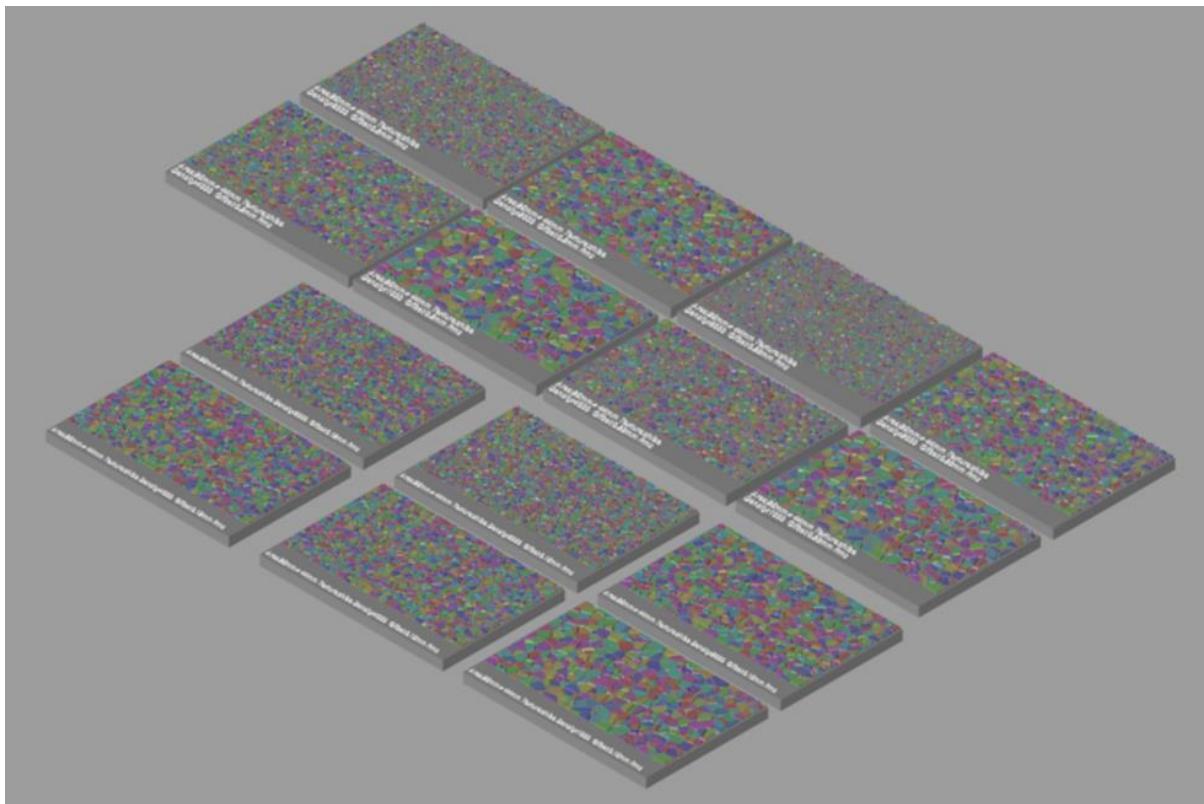


Fig. 27 出力サンプルモデル

粗さサンプル	材質	Area	Texture	Segment	Offset	Height	Ra
No1	硬質レジン	25mm × 44mm	Voronoi	4000	0.12mm	0.2mm	-
No2	硬質レジン	25mm × 45mm	Voronoi	8000	0.12mm	0.2mm	-
No3	硬質レジン	25mm × 45mm	Voronoi	4000	0.15mm	0.2mm	-
No4	硬質レジン	25mm × 45mm	Voronoi	8000	0.15mm	0.2mm	-
No5	硬質レジン	25mm × 45mm	Voronoi	1000	0.15mm	0.2mm	-
No6	硬質レジン	25mm × 45mm	Voronoi	2000	0.15mm	0.2mm	-
No7	硬質レジン	25mm × 44mm	Voronoi	1000	0.2mm	0.2mm	-
No8	硬質レジン	25mm × 45mm	Voronoi	2000	0.2mm	0.2mm	-
No9	軟質/硬質レジン	25mm × 45mm	Voronoi	4000	0.2mm	0.2mm	-
No10	軟質/硬質レジン	25mm × 45mm	Voronoi	8000	0.2mm	0.2mm	-
No11	軟質/硬質レジン	25mm × 45mm	Voronoi	1000	0.23mm	0.2mm	-
No12	軟質/硬質レジン	25mm × 45mm	Voronoi	2000	0.23mm	0.2mm	-
No13	軟質/硬質レジン	25mm × 45mm	Voronoi	4000	0.23mm	0.2mm	-
No14	軟質/硬質レジン	25mm × 45mm	Voronoi	8000	0.23mm	0.2mm	-/0.045

Table. 1 出力サンプルパラメータ



Fig. 28 分割数2000、オフセット距離0.2mmの出力サンプル

2.4.2 計測評価

ボロノイ分割サンプルの粗さ計測を3D形状測定機を用いて行った。比較のために粒度80、粒度150の紙やすり（TRUSCO社）、人工皮革を用いて計測を行った。計測して得られた3Dイメージの中で、平坦な状態が目視で確認できる部分について20mmの区間の凹凸状態の線粗さを3か所で計測し傾き補正を行い、断面曲線と表面形状の滑らかさを示す値であるRa値を得た。

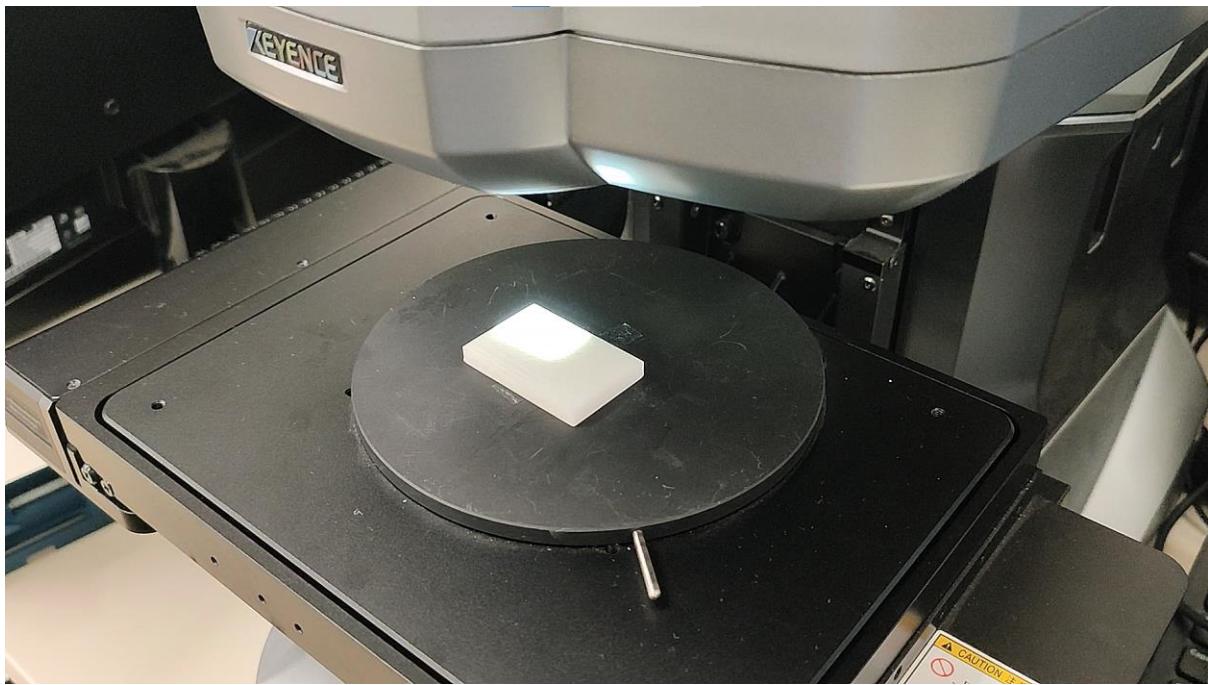


Fig. 29 表面粗さ計測

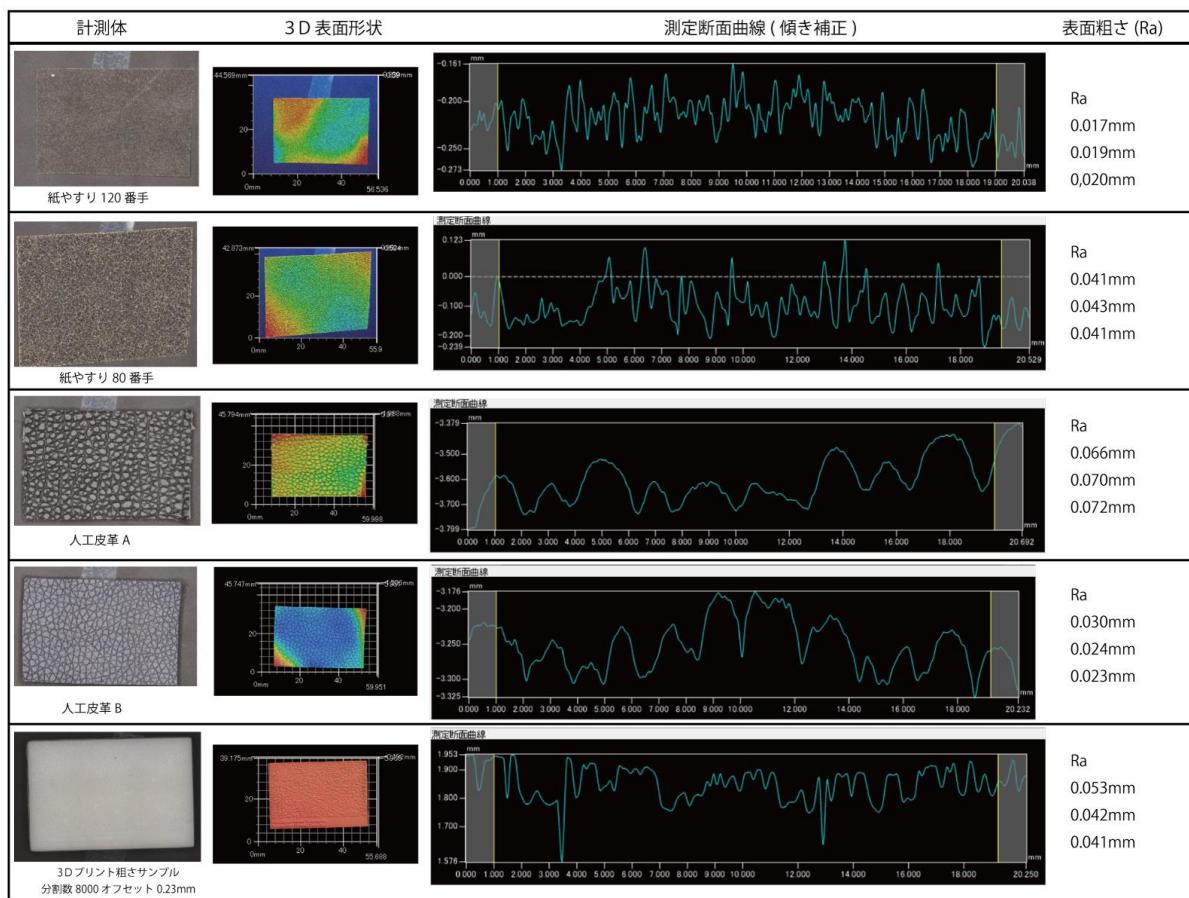


Fig. 30 粗さ計測結果

2.4.3 粗さ設計考察

本節では3Dプリントサンプルの設計パラメータが粗さ知覚とどのように関係するか考察する。計測で得られた測定断面曲線に注目すると、紙やすりは人工皮革に比べて周波数成分が細かいことが確認できる。このことは断面曲線の周波数成分はなぞる際のざらつきに影響を与えることが示唆され、ボロノイ分割数を増やすことは断面曲線の凹凸が増え、周波数成分が細かくなることに寄与し、オフセット間隔を広げることは凸間距離が大きくなることで周波数成分が大きくなることを示唆し、なぞりにより細かいざらつきに関わると推測できる。

また表面Ra値に着目すると80番手の紙やすりの平均Ra値0.041mm、120番手の紙やすりの平均Ra値0.018、人工皮革Aの平均Ra値は0.069mm、人工皮革Bの平均Ra値は0.025mmであった。紙やすり、人工皮革をそれぞれ比較するとRa値が大きい値であるほど指で触れた際に凸凹を強く感じることがわかる。このRa値は断面曲線の高さ方向の大きさによって定まるところから、今回の設計サンプルでは検討を行っていないサンプルの深さ成分によって影響する可能性が推測できる。

2.3.4 粗滑サンプルの見本帳の考察

前節までに3Dプリントで再現できる粗さ知覚のパラメータを検討し、人工皮革といった既存物の比較を行うことで、設計パラメータと粗さ知覚の関係を考察した。この検討で得られたサンプルを収納ボックスに整理し見本帳を作成した。この見本帳で作成したサンプルは高さ方向の深さが一定であることから、周波数成分は分割数とオフセット距離を制御することで撫でた際の、ざらつきの程度についてバリエーションが得られているものの、 $100\mu\text{m}$ によって知覚できるマクロ粗さに関する触れた際の押し込み感に関するバリエーションが十分に得られていないことが観察できる。得られたサンプルを帆布や人工皮革、紙やすりと触り比べて比較すると人工皮革と3Dプリンタのサンプルの間の触感の差は撫でた際に同等の触感が感じられるが、皮革が用いられるソファや鞄は触れた際に押し込む変形も伴い、硬質のサンプルでは押し込み変形時に違いが感じられる、軟質粗さサンプルと人工皮革を比較すると表面に触れた瞬間の柔らかさや摩擦感が異なることが感じられる。このことから3Dプリンタの見本帳を作ることで既存の材料との触り比べることで粗滑感が複数の物理的特徴で構成されていることが示唆される。



Fig. 31 粗さ触感見本帳

2.5 着色

本節では3Dプリンタ出力物に色彩を付与する方法について概説する。造形物に色彩を与え視覚情報量を増やすことはモノの認知に密接に関わり、設計した触感に視覚情報を加えることによってユーザーの文脈情報を設計しやすくすることが期待できる。製作としてUVカラー印刷での色彩付与の実践を行ったことについて報告を行う。

2.5.1 着色の先行研究概要

デジタルファブリケーションを用いた着彩手法はFFF方式であればQuadFusion、インクジェット方式のstratasys J55 Prime²⁹が知られている。本節では光造形手法として相性がよいUVカラー印刷機(Mutoh VJ-426UF)を用いて着色を行い、その造形可能性について言及する。

2.5.2 製作

UVカラー印刷技術検討としてシート材に皮膚画像の着彩を行い造形物に画像をプリントできることを確認したFig.33。これによって前節までに言及した硬軟設計と粗さ設計の技法を応用することでFig.34にあるような果物の色彩をもち、表皮のテクスチャとその果物の硬さに準ずる触感サンプルを作成できることが確認できた。



Fig. 32 自分の肌の表皮画像を印刷した作例



設計支援 | フルーツ触感見本帳

Fig. 33 メロン・オレンジ・キウイの硬さに類似した硬軟・粗滑サンプル

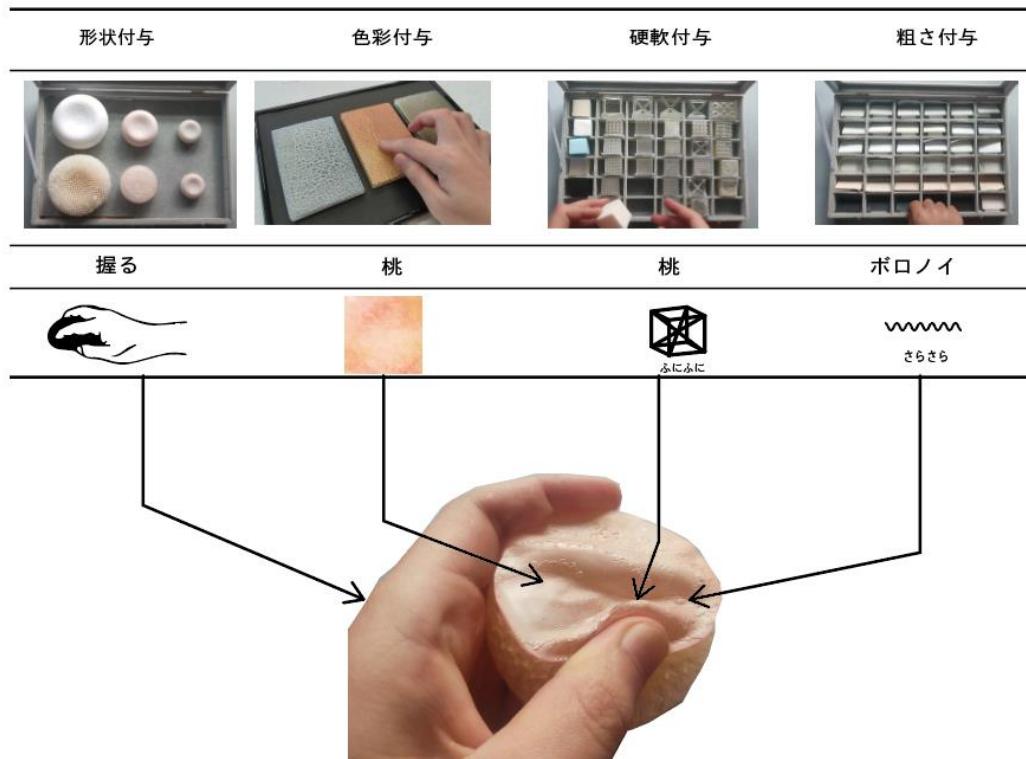
2.5.3 着色と形状に関する考察

UVプリンタを用いて着色を行い、形状を作成するには単純な形状である円筒や立方体形状に制限されるものの、この手法を用いることで、立体形状に対して粗さ、硬軟感、色彩を付与した触感設計ができる可能性を示すことができた。この可能性はTactriumの触感サンプルは粗滑や硬軟といった物理特徴量を示した見本帳ではなく、果物の表面、動物の表皮の視覚情報を与えることで、サンプルに物理的に設計されていない触感イメージを引き出すことが期待できる。

2.6. 統合型触感モデルの設計

前節まで触感の設計方法は材料特性、幾何的特徴に着目し、硬軟・粗滑・視覚情報の検討を行うことで触感を再現領域を示し、それらに近しい材料特性を持つスチレンフォームやゴム材といった既存物との比較ができるような見本帳や、実際の果物に近い質感を持つ果物を模したシート材の作成ができることを技術的に確認したが、課題として硬軟サンプル、粗滑サンプル、形状サンプル、視覚情報サンプルが独立している。素材の知覚が複合的に合わさることで価値判断の伴う触感の設計できることが示唆されていることから、これらの形状、粗滑、硬軟、視覚情報は統合されることが望ましい。このことから、検討した形状に視覚情報、硬軟感、粗滑感を付与することを行った。

触感見本帳Tactrium 標準サンプル



触感情報を統合し、複合的な印象を設計する

Fig. 34 3Dプリンタで設計できる触感要素を統合したサンプルの検討

2.6.1 統合型触感モデルの作成

本節では触感設計要素を統合するモデルの製作(Fig.35)を行った。本研究では形状、硬軟、粗滑、色彩情報の検討を行い、触探索運動に基づいた形状、硬軟感、粗忽感、視覚情報が設計できることが示された。これらをFig.36の設計概要に基づいて触感統合モデルを作成した。

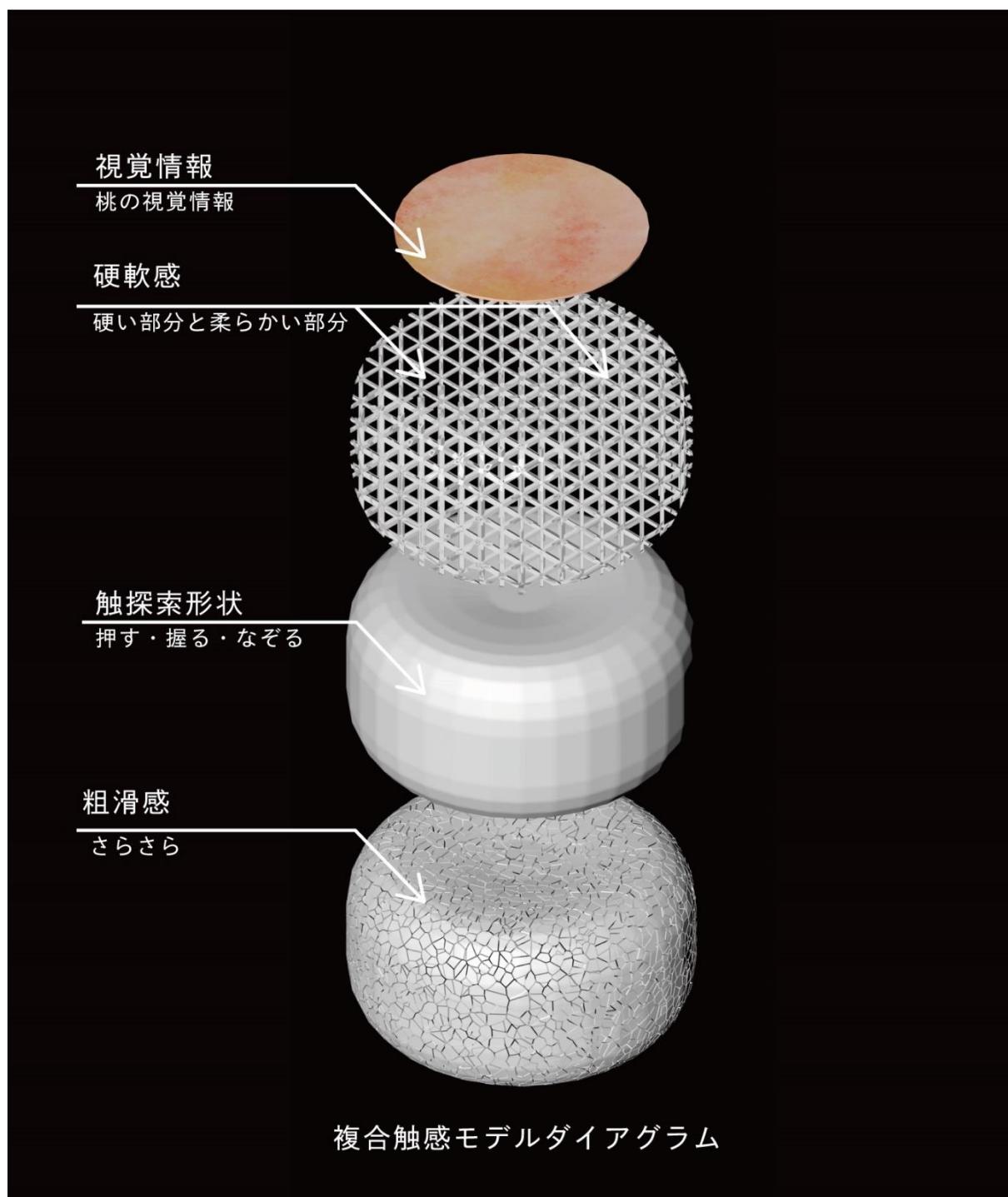


Fig. 35 視覚的イメージを含んだ複合的な触感モデルダイアグラム

2.6.2 統合型触感モデルの考察

統合型の触感モデルでは、従来の課題であった独立した触感要素である形状・硬軟感・粗滑感・色彩を複合化した触感見本を製作することができる。Fig.35の作例では、触れる・握る・押し込むことを検討した。押し込み、握り込みのパターンによって、多様な柔らかさ、硬さを得ることができ、何度も触ることを促すような印象が感じられる。加えて視覚情報は、Fig.37にあげられるような果物の触感見本を見比べ、触り比べることで、桃の触れた瞬間の肌ざわりや、レモンの凹凸感といった、立方体形状のヤング率の検討や、プレート形状で表面粗さの検討では引き出すことが不十分であった、触感の印象を引き出す可能性が示唆される。

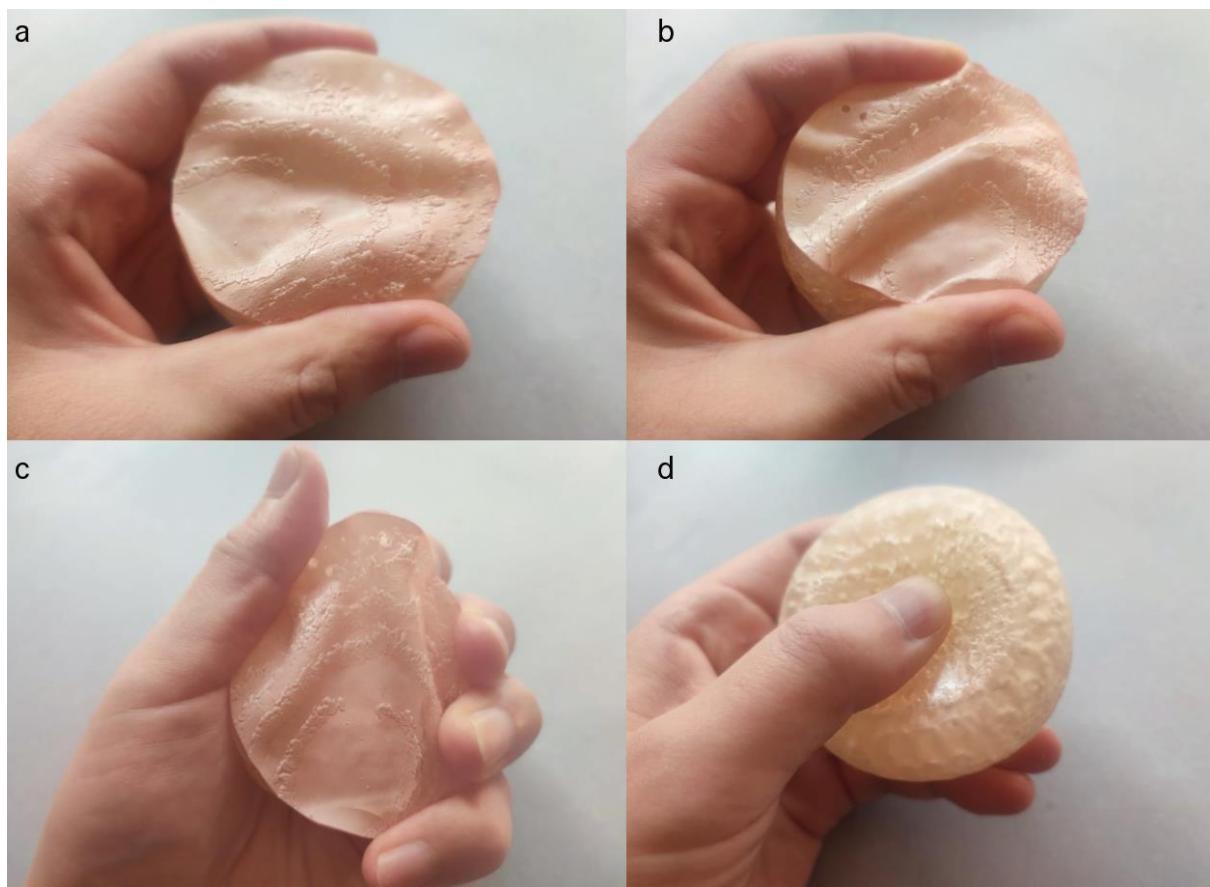


Fig. 36 統合型触感モデルの触れる検討 a.硬い部分を保持する様子 b.柔らかい部分を握りこむ様子 c.全体を押しつぶして、握りこむ様子 d.窪み形状に対して押し込みを行う様子



Fig. 37 シート材のキウイの触感見本、立体形状を検討したレモン、
シート材の桃を張り付けた触感見本

2.7. 設計触感見本帳Tactriumまとめ

Tactriumを用いることで、3Dプリンタで設計できるヤング率と表面粗さの設計空間を示した。この設計空間の中で見本を触り比べることで「もう少しこの部分を柔らかくしてほしい」といったニーズから、「桃のような肌ざわりの椅子が欲しい」「熟れたバナナのような柔らかさのマウスが欲しい」といった触感のニーズを抽出できると考えられる。これは、Tactriumは硬さ柔らかさ、粗さ滑らかさの設計空間を可視化したことに加えて、視覚と形状に関して複合的な触感見本を作成したこと、「○○を握った時の第一印象の触感」といった複数の物理特性によって構成されている触感を対話的に設計支援を可能とすることが示唆される。このことを、3章では実際に触感見本帳Tactriumを用いて対話的設計方法を行うなかで検証し、触感がどのように貢献可能かを検討した。

3章 応用プロダクトを通した設計支援の検討

前章において触感の形状・硬軟・粗滑・色の要素にわたって再現する技法を検討し、それを触感見本帳Tactriumというかたちでまとめた。これは見本帳の形式にすることで、様々な触感を触り比べたり、それを基に議論することができる素地を検討するためであった。しかし本研究のリサーチクエスチョンである「触感の価値を設計と設計支援を通じて明らかにできるのか」において価値を十分に明らかにはできていない。あげられる課題として実際に触感を求めるニーズを探し出すことや、そのニーズに対してどのような支援方法が具体的に有用であり、どのような貢献があったのかを明らかにすることがある。本章では触感プロダクト設計支援を、電動車いすコントローラーを題材に行った。支援では硬軟感を中心に設計支援を行ない、サンプルを通じることで主観的な要求を引き出し、触感設計支援で行ったことについて記述、考察を行った。

3.1. 設計支援を通じた価値開発の概要

本節では、本研究で行う設計支援の概要と目的について述べる。触感設計によって価値を満たすには、触感設計支援の介入による効果の記述が必要である。このことから本節では電動車いすコントローラーを例にして触感設計支援の実践を行った。支援の工程はTactriumの提供、そこから得られる質的インタビューを行うことで触感の設計支援における知見と課題を記述し、触感を中心に置いた支援方法の開拓を行う。

触感価値の循環



触感によって介入は大きくはないことから価値の還流構造が必要である。

Fig. 38 触感設計の価値創出のフロー

3.2. 電動車いす用コントローラー

3.2.1 Iさんの設計支援概要

小児麻痺を患っている電動車いすテニスプレイヤーのIさんは、既存品のコントローラーでは車いすテニスを行っている際の操作性が満足できていないという課題を感じていた。このことから2021年3月に行われた2020TOMメイカソンtokyoにて、自分に合った形状の操作コントローラーの3Dプリンタによる設計支援を受け、手離れの症状の改善を図った。このコントローラーの満足度をより向上することを目的として、触感に着目した設計介入を行った。本研究の触感設計が介入する以前の3Dプリントによる設計支援の工程は、ヒアリングを行い操作時にコントローラーの形状が小さいことによって、掌握がしづらく手離れが起こる課題が見つかった。この課題に対してアイデアスケッチを行い、車いす用コントローラーを既製品の形状からドアノブ型形状への設計介入を行うことで掌握課題の解決をはかるに至った。



Fig. 39 調査対象者Iさんとメイカソンでの製作物



Fig. 40 本プロジェクトの進行

3.2.2 触感設計の導入

2021年の5月下旬より著者が触感見本帳Tactriumを用いて本プロジェクトに参加し触感による支援を図った。2021年3月に行われたメイカソンにて設計支援を受けた3Dプリントコントローラーの満足度を向上することを目的としてTactriumによる触感設計介入を行い、価値創出ができないかについて検討を行った。

設計支援を行った当時には、色彩のサンプル例や形状のサンプル例が得られていなかったことから、協力者Iさんにはコントローラーができる光造形方式3Dプリンタによる製造過程について、内部構造と表面形状の設計介入ができる説明を行った。そしてラティス構造の硬軟サンプルとボロノイ分割がされた粗滑サンプルの提示を行い、触れながらコントローラーの硬軟感、表面粗さの検討を対話しながら行った。この検討の中で選んだラティス構造はヤング率700kPa程度のスタイルフォームに近しい、硬すぎず柔らか過ぎないものを選択した。これは硬すぎると疲労感を感じ、柔らか過ぎるものについても握力の調整が必要で疲労感を生じることから、硬すぎず柔らかすぎないものがコントローラーの操作として適当であるという理由が得られた。表面の粗さについてはFig.28にあげられる人口皮革のような多少の凹凸(シボ)のあるサンプルを選択した。



触感見本帳Tactriumの使用

Fig. 41 Tactriumを使った設計支援の様子(2021年12月撮影)

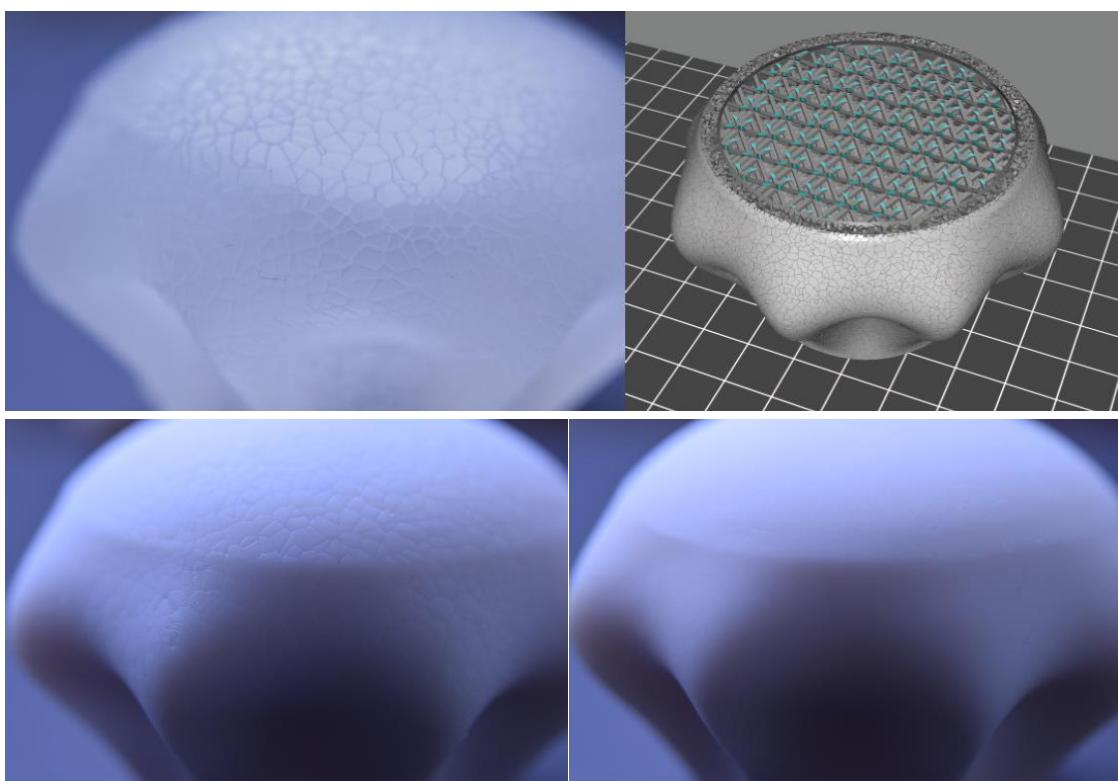


Fig. 42 軟質シボ有コントローラーと比較用の硬質シボ有コントローラー

3.2.3 質的インタビュー

車いすコントローラーの提供を1ヶ月使用した後に、触感の設計介入による影響を評価することを目的として半構造化インタビューを行った。インタビューの生データは付録に掲載した。

3.2.3.1 インタビューまとめ

インタビューの目的は協力者が競技スポーツをやっていることから、テニスプレー時の運動障害の緩和や、よりよいパフォーマンスができるることを支援することに着目し、コントローラーへの設計介入による改善が図れないか、ニーズを得ることを目的とした質問項目を設けた。手法は半構造化インタビューの形式で行い、SCAT (Steps for Coding and Theorization) を用いて分析を行った。SCATを用いた理由は実験対象者が1名であることから丹念にインタビュー結果を考察することで、触感設計の新たな問い合わせ探索できると考えたためである。

【あらかじめ準備した質問】

Q1.ハンドコントローラを最初に作ろうとした経緯と動機

Q2.触感の検討をする以前にはどういった形状を試されたんですか？

Q3.個人的に理想の形とか思い浮かぶこととかはあるか？

Q4.沢山のバリエーションがあることによって選ぶ楽しさがあるか？

Q5.コントローラーはテニスプレーにどのくらい影響しているのか？

Q6.今後の活動の目標はありますか？

【インタビューの流れで行った質問】

Q7.実際に具体的にプレーしていてどういった違和感があったんですか？

Q8.テニスを行っているなかで生じる課題は硬さが原因ですか？

Q9.この形状の良さってどういうところにありますか。

【インタビュー結果の考察】

インタビューの結果から被験者さんにとって、車いすコントローラーがテニスプレーの中で与える要因が大きいこと、なかでも形状に関して改善したい要求があったことがわかった。加えて作成するサンプル数の少なさが求められることがわかった。硬軟感やテクスチャの付与がテニスプレーの中でどのような貢献を果たしているのか満足度を高めていることは口述として

得られたものの、「いい感じ」「感覚的に違う」といった複合的に価値判断がされていることが推察でき、触感の介入がどのように満足度を向上させているかについてはより詳細な分析が必要であると考えられる。



Fig. 43 インタビューの様子 (2021年9月13日撮影)

SCATによる分析結果

ストーリーライン

被験者はメイカソンでの欲求の不確かさがあり課題提案の必要性があった。そこでヒアリングを行ったところ、被験者が競技で使用している既存品の道具のカスタマイズを行うことにした。課題として既存品の操作では疲労感があり、具体的には既存品を掌握する際の腕側での運動障害が生じていることがわかった。このことからプロダクトの基本形状、調整形状、硬さ、テクスチャを設計要件として段階的に改善することによって、被験者にとってのコントローラーの機能条件を満たしていくと仮説をたてた。設計支援の手順としては運動課題の原因を探索するために、複数の試作品の提供と、原因から得られた仮説を解決するための試作品の設計が存在し試された。また手腕の掌握運動の構成要素、課題を解決する要件を被験者自らで定めることの難しさがあった。製作するプロトタイプは発散的でなく収束することが安定した運動出力を行うために求められた。これらの活動はスポーツによる生活充実やウェルビーイングに寄与する。コントローラー以外の外的要因として、症状の悪化と運動の熟達がありコントローラー以外の外的要因、バイアス、心理的因素を取り除き運動の熟達、打球への反応が改善することを示すことがプロジェクトの目的として立ち上がった。

論理記述

- i 被験者はものづくりの欲求の不確かさがあり課題提案の必要性を感じている。
- ii 既存品では形状が細いところから操作する際に握力が求められ疲労感が生じることからカスタマイズすることがニーズとして存在した。
- iii プロダクトの基本形状、部分形状、硬さ、テクスチャといった設計要件のうち支配的に重要な要素は形状であり、テクスチャは大きく影響しない要素である。
- iv 設計支援の手順として運動課題の原因を探索するための試作品の提供と原因から得られた仮説を解決するための検証が必要である。
- v 製作するプロダクトは複数でなく収束することが安定した定まったテニスの運動出力ができることから望まれる。

3.2.4 触感価値介入による考察

触感見本帳Tactirumを用いることで得られる知見として、この一連の設計者と協力者Iさんの間のやり取りによって設計者はユーザーとの間で触感サンプルを通じてやりとりを行ったことから、プロダクト設計に質感を反映が容易であったことが上げられる。

一連の検討から、触感の変化は触れた瞬間に「いい感じ」「硬さが丁度いい感じ」という複合的な印象によって得られる価値判断は設計支援を行っていく中で度々確認されたものの、それが何によって起因しているのかは明らかにできなかった。このことはFig.43のコントローラーの手元の映像を観察すると、握力ではなく腕を動かすことによってコントローラーの操作を行っていることが推測され、コントローラーの満足度に貢献している要素は指先に触れる部分の柔らかさだけでなく、手のひらとコントローラーの摩擦感など複数の要因が考えられることからも、物理特性とコントローラーの満足度を限定していくことは困難であることが考えられる。

一方課題は設計者と支援者の間の質問形式にあると考えられる、6月の支援時にはコントローラーの形状に付与する硬軟感、粗滑感として適当なものはどれかという選択させる形式で質問を行ったことから、協力者Iさんからのこんな触感や質感のコントローラーを求めていたといった要望を十分に引き出すことができなかった。触感見本帳を提示した際の設計者とユーザーの間でのコミュニケーションは自由度と制限の間を調整する必要があり支援の仕方を決定するうえでとても重要であり、このことは2.6で作成している統合型の触感サンプルの有用性を支持し得る。



Fig. 44 コントローラーの操作に関する手元映像

3.2.5 触感設計支援のまとめ

本研究では触感見本帳Tactriumを通じた設計支援ができる事を確認した。触感がコントローラーの満足度に直接的に貢献している記述が十分に集められたとは言えないものの、触れた瞬間に「いい感じ」「硬さが丁度いい感じ」というような質感介入による変化があったことは度々、口述として確認することができた。今後は「いい感じ」「ちょうどいい」といった、複合的な要素によって経験される価値判断に対して、硬軟感や粗さといった物理特性がいかに満足度に貢献しているかを検討するのではなく、部分的に硬軟感の違う見本といった新たな触感見本の提供を行い、質的インタビューを通じることで、主観的な経験である触感の構成概念を明らかにすることで触感設計支援ができると考えられる。

4章まとめ

これまで1,2,3章で3Dプリンタを用いた触感の設計空間の可視化と触感見本帳Tactriumを用いた設計支援を行ってきた。これらの結果、考察を基に本研究のリサーチクエスチョンである「触感の価値を設計と設計支援を通じていかにして明らかにできるのか」について考察を行い、触感の価値について言及を行う。

4.1 考察

2章で触感設計技法の検討を行い、触り心地の階層モデルの素材の知覚に分類される硬軟感、粗滑感の設計空間を示し、これらに加えて視覚情報と形状を統合した触感見本の作成を行った。3章では硬軟感と粗滑感の設計支援を車いすコントローラーを対象に実際に行った。この一連の触感設計と設計支援によって触感によるものづくり支援が行えることを確認した。しかし、皮膚感覚を中心にして生じる主観的な経験を設計に反映させて工程の記述は不十分であった。これは提示した触感見本がプレート形状や立体形状といった触作行動を誘引しない、情報量の少ない形状であったこと、テニスプレーといった統制された動作におけるパフォーマンスを向上させることを狙って支援を進めていたことが理由としてあげられる。

4.2 触感設計における課題

本研究の3Dプリンタで示した触感設計空間を形状・硬軟・粗滑・色について現在のデジタルファブリケーションを用いて示し、統合型の触感見本の作成を行った。複合的な触感設計は快感情と材料特性の関係性を複雑にし、評価を困難にするが、多彩な触感が設計できることは「触れた瞬間の印象」、「何度も触りたくなる触感」といった複合的な触感を設計をするための道筋となると考えられる。複合的な触感設計の課題は3点あげられる。1点目は触感設計空間を拡大させていくことである。そのためにセンサーやアクチュエーションを用いた、温冷感提示に関する検討や極小曲面を利用した幾何構造の検討を行うことで多様な触感の設計サンプルの検討を行えると考えられる。

4.3 設計支援における課題

設計支援の課題は材料情報以上の触感情報を設計支援者から引き出す質問の仕方や、サンプルの提示の仕方であると考えられる。設計支援のニーズを探索し、新たな協力者を見つけるこ

とについて課題として挙げられる。このことからTactriumを通じて主観的な経験を引き出すワークショップや設計支援法の検討が今後の課題である。

4.4 触感設計における展望

触感は多様な研究領域と結びつくことで材料研究、運動計測、感性研究と様々な研究と接する反面、触覚ではなく、複合的な概念である触感が無ければ成立しない研究はまだ十分に示されていないと考えている。しかし複合的な印象設計が適した学問体系であることが認められていくことで、例えば硬い材質で設計されることが必然的に行われて車や電化製品に柔らかさやや動きなどを付与していくことで親しみを持たせるといった研究ができるかもしれない。



Fig. 45 果物を触感を持たせたマウスカーバーの作成

4.5 設計支援における展望

触感見本帳Tactriumを用いることで多様なパートナーと共に創ができる素地ができたことから、多くの研究者と複合的な印象を中心とした触感設計を行っていくことが今後望まれる。そのためにも、本研究で製作した触感見本帳のデータベース化を積極的に推し進め、サイエンスコミュニケーションなどと一緒にワークショップなどを行うことで触感価値の記述を進めることが望まれる。

4.6 触感デザインとは

本研究のリサーチクエスチョンとしてあげていた「触感の価値を設計と設計支援を通じていかにして明らかにできるのか」について本節では言及し本研究の結論とする。本研究ではデジタルファブリケーションを通して形状・硬軟・粗滑・色彩の要素を用いて触感の設計可能な空間を示し、それらを統合したサンプルを示した。皮膚感覚を中心にして生じる主観的な経験を設計に反映させて工程の記述は不十分であるものの、触感見本帳Tactriumを通じて、設計者とユーザーの間で触感コミュニケーションが可能になり、硬軟サンプルと粗滑サンプルを用いて実際に設計支援ができる事を確認した。このことからTactriumを通じて主観的な経験を引き出すワークショップや設計支援方法の探求が求められることが示唆される。

今後の触感研究における重要な課題は、設計支援の中で「馴染む感じ、いいかんじ」といった複合的な印象が設計介入によって得ることはできたものの、それが材料特性、視覚情報などの要素が貢献しているのかを明らかにすることは設計支援のケースの多様性を考えると、すべてに対して解をもつことは現実的な触感価値設計の試みではない。このことから触感が研究においては複合的な印象「経過時間の中での質感印象の変化」や「使っていて何度も触れたくなるかどうか」といった複合的な触感の記述を重ねていくことで、要素還元的なアプローチでは示すことが難しい、触感の価値が示せるようになると考えられる。

触感デザイン

触感は主観的な経験であることから、主観的な経験を設計プロセスの中に反映させることが望まれる、それによって得られる、価値の要素については今後の研究課題とする。

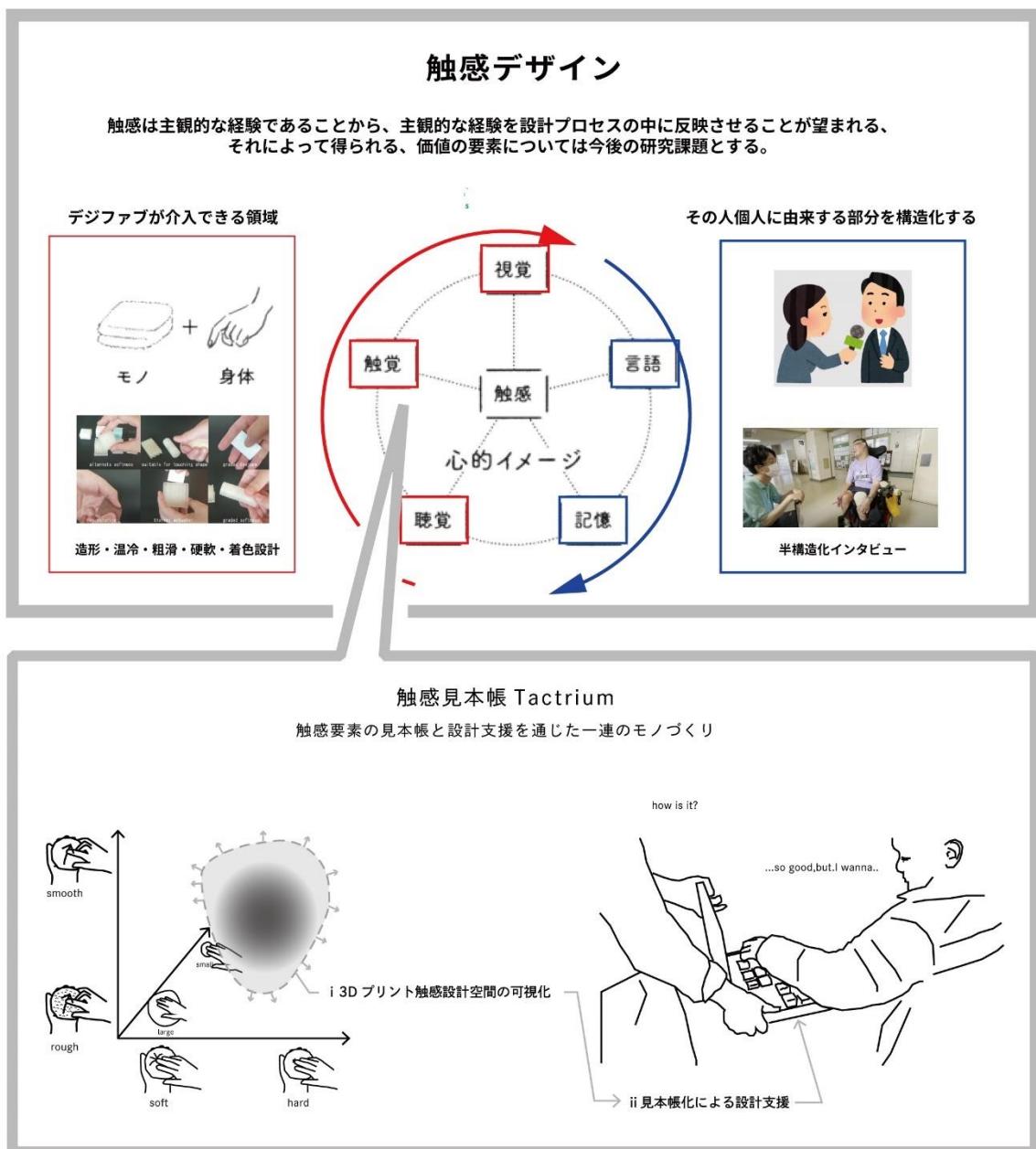


Fig. 46 触感デザインと価値ダイアグラム

謝辞

4年半にわたって触感とデジタルファブリケーションについて研究に取り組みました。興味が向くままに自由な時間を過ごせたことを人生の幸せに思います。特に大学院を過ごしていく中での、この2年間は、それ以前の自分が思い返すことが難しいほどの密度と成長がありました。

図らずともこの道に誘ってくださった田中浩也先生と仲谷正史先生の2人に深く感謝したいです。2人と出会ったことで研究が好きになり、自分を知る多くの機会を頂きました。お2人がいなければ今の自分は存在しません。重ねて感謝を申し上げます。

また自分と幾多の研究を一緒にさせて頂き、多くの時間を注いでくださり叱咤を下さった淺野義弘さんに感謝を申し上げたいです。

研究の進みが悪くうまくいかず慌てふためいてしまった時に、いつも支えて下さった田岡菜さんと鈴木貴晴君と金田ゆりあさんに感謝を申し上げます。

日頃の研究のディスカッションをしたM2同期である黄、酒井、賀下、荒井、木曾、植崎に感謝を申し上げます。それぞれと議論したことが有機的に繋がって修論の結論へと向かっていき今の自分を作ってくれました。修論を終えられたことの幸運は皆との出会いです。

研究のサポートをしてくださった櫻井智子、有田悠作、長内心、西門亮、小佐野幹大、青山新にも感謝します。この方たちがいなければ研究は途中でくじけていました。

最後にいつも見守ってくれ、時に叱咤激励をしてくれる4人の家族にも深く感謝を致します。これからも仲良くいられたらと思います。

からの研究に胸を膨らませ皆に再び会える日を心待ちにしています。

2022/1/27

岡崎太祐

参考文献

- [1] 浅野倫子・渡邊淳司,第3章 言語と記号、岩波講座コミュニケーションの科学1巻、言語と身体性、岩波書店
- [2] 仲谷正史,三原聰一郎,南澤孝太,箕康明,2016,第1章、16p,触覚入門
- [3] Haptic Invitation of Textures: Perceptually Prominent Properties of Materials Determine Human Touch Motions
- [4] 國分功一郎『中動態の世界—意志と責任の考古学』（医学書院、2017年）
- [5] Okamoto, S., Nagano, H., & Yamada, Y. (2013). Psychophysical dimensions of tactile perception of textures. *IEEE transactions on haptics*, 6(1), 81–93. <https://doi.org/10.1109/TOH.2012.32>
- [6] 白土寛和,前野隆司,触感呈示・検出のための材質認識機構のモデル化:日本バーチャルリアリティ学会論文誌 vol.9, No.3, pp. 235-240(2004)
- [7] 渡邊 淳司, 加納 有梨紗, 坂本 真樹, オノマトペ分布図を利用した触素材感性評価傾向の可視化, 日本感性工学会論文誌, 2014, 13巻, 2号, p. 353-359, 公開日 2014/04/30, Online ISSN 1884-5258, <https://doi.org/10.5057/jjske.13.353>, https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjske/13/2/13_353/_article/-char/ja,
- [8] Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. (1987). Hand movements: A window into haptic object recognition. *Cognitive Psychology*, 19(3), 342–368
- [9] Klatzky, R. L., Lederman, S. J., & Reed, C. (1987). There's more to touch than meets the eye: The salience of object attributes for haptics with and without vision. *Journal of Experimental Psychology: General*, 116(4), 356–369. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.116.4.356>
- [10] Kitada, R., Sadato, N., & Lederman, S. J. (2012). Tactile perception of nonpainful unpleasantness in relation to perceived roughness: effects of inter-element spacing and speed of relative motion of rigid 2-D raised-dot patterns at two body loci. *Perception*, 41(2), 204-220. <https://doi.org/10.1080/p7168>
- [11] Kitada, R., Ng, M., Tan, Z. Y., Lee, X. E., & Kochiyama, T. (2021). Physical correlates of human-like softness elicit high tactile pleasantness. *Scientific reports*, 11(1), 16510.

<https://doi.org/10.1038/s41598-021-96044-w>

- [12] Cesar Torres, Tim Campbell, Neil Kumar, and Eric Paulos. 2015. HapticPrint: Designing Feel Aesthetics for Digital Fabrication. In Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology (UIST '15). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 583–591. DOI:<https://doi.org/10.1145/2807442.2807492>
- [13] Kinya Fujita , Hisayuki Ohmori, A New Softness Display Interface by Dynamic Fingertip Contact Area Control, 5th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics, Jul. 2001
- [14] M.Ashby, 'Designing Architected Materials', Scripta Materialia, 68.1 (2013), 4-7 <<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2012.04.033>>
- [15] Construction of an Architected Material Database Using Ashby Map for Designing Valuable 3D Printed Products, Okazaki,
- [16] Kamagaya, Development of Shape Memory and Shock Absorbing Metamaterials Using 3D Printing, 2020
- [17] Kuipers, T., Wu, J., & Wang, C. C. L. (2019). CrossFill: Foam Structures with Graded Density for Continuous Material Extrusion. CAD Computer Aided Design, 114, 37-50. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2019.05.003>
- [18] Koichi Mizukami, Takahiro Kawaguchi, Keiji Ogi, Yoichiro Koga. Three-dimensional printing of locally resonant carbon-fiber composite metastructures for attenuation of broadband vibration. Composite Structures. 2020
- [19] 佐久間 亮太(筑波大学)、平木 剛史(筑波大学), 3次元硬軟構造の一体印刷を用いた振動伝播構造設計の基礎検討, VR学会,
- [20] Adidas 4DFDW, "4DFWD", <https://www.adidas.com/us/4DFWD>, (accessed 2021-02-25).
- [21] Keisuke Watanabe, Ryosuke Yamamura, and Yasuaki Kakehi: "Foamin: A Deformable Sensor for Multimodal Inputs Based on Conductive Foam with a Single Wire," In Extended Abstracts of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '21). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 189, 1-4. DOI:<https://doi.org/10.1145/3411763.3451547>
- [22] Kyung Yun Choi, Jinmo Lee, Neska ElHaouij, Rosalind Picard, and Hiroshi Ishii. 2021. ASpire: Clippable, Mobile Pneumatic-Haptic Device for Breathing Rate Regulation via Personalizable Tactile Feedback. Extended Abstracts of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Association for Computing Machinery, New York, NY, US

A, Article 372, 1-8. DOI:<https://doi.org/10.1145/3411763.3451602>

[23] 人工物工学入門 共創によるものづくり, 藤田 豊久, 太田 順

[24] TAICA, "HAPTICS OF WONDER 12-tectile a GEL sample book", '<https://taica.co.jp/gel/collection/haptics/>', (accessed 2021-02-25).

[25] Jeeeun Kim, Qingnan Zhou, Amanda Ghassaei, and Xiang 'Anthony' Chen. 2021. OmniSoft: A Design Tool for Soft Objects by Example. Proceedings of the Fifteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 15, 1-13. DOI:<https://doi.org/10.1145/3430524.3440634>

[26] 山崎陽一・谿雄祐・飛谷謙介・井村誠孝・長田典子・楠見昌司 (2018). 感性に響く触感創生手法の検討

[27] Tymms, C., Zorin, D., & Gardner, E. P. (2018). Tactile perception of the roughness of 3D-printed textures. *Journal of neurophysiology*, 119(3), 862-876. <https://doi.org/10.1152/jn.00564.2017>

[28] ANSYS, "GRANTA Selector Smart materials choices.", <https://www.ansys.com/products/materials/granta-selector>, (accessed 2021-02-25).

[29] stratasys J55 Prime, "THE J55™ PRIME 3D PRINTER Possibilities at every turn.", <http://www.stratasys.co.jp/3d-printers/j55-prime> (accessed 2022-01-25).

[30] Christian Schüller, Daniele Panizzo, Anselm Grundhöfer, Henning Zimmer, Evgeni Sorkine, and Olga Sorkine-Hornung. 2016. Computational thermoforming. *ACM Trans. Graph.* 35, 4, Article 43 (July 2016), 9 pages. DOI:<https://doi.org/10.1145/2897824.2925914>

Supplement

一宮さんインタビュー 2021/09/13@若葉台公園

岡崎：今までやってきたこと活動とかを20分くらい聞きたいと思います。よろしくお願ひします。メイカソンに参加してハンドコントローラ（ジョイステイック）を作ることになったと思いませんけど、最初に作ろうという経緯にお話しを伺いたいです。どういうモチベーションで参加されたとか伺いたいです。

一宮：知人伝いで関わることになって。何をやるのかも自分ではわからなくて。何がやりたいのか自分でもわかんなかったんだけど、あんまりないなあと思ってたんだけど、ちょうど自分がその頃身体の具合が悪くなって、ジョイステイックとか傘の持ち手とかがいいかなあと思って。

岡崎：始めはニーズが自分でわからなかっただんですね。どうしてコントローラー（ジョイステイック）になったのか聞いてみたかったんですけど。（深堀）

一宮：メーカーの元々付いていた既製品が細くて使いづらいなあと思っていたからもう少し自分に合ったコントローラー（ジョイステイック）があったらなあと思って。

岡崎：先ほど、3Dプリンタと既製品のものとの違いについて少し課題を挙げていただきましたが、実際に具体的にプレーしていてどういった違和感があったんですか？

一宮：自分の力の出し方とか抜けないほうが多いんで、そういう時にギュッと力が入っちゃって手とか肘とかが疲れたりしていたんで、自分に合ったコントローラーだったら力が抜けて操作できるかなあと思って。

岡崎：力が抜けないっていうのはどういった感じなんですか。

賀下：握ってから開くのが速やかにできない？

岡崎：既存のものだと硬すぎて、って感じなんですか？

一宮：いやー形状でしょうね。

岡崎：最初の試作段階を賀下さんがいくつか作ってくれて今は柔らかいコントローラーをやっていますが、どういった形状を試されたんですか？

一宮：最初は3タイプくらいよくわからないのを作って、マウス型とかも試したりしたり、キノコ型のようなものとか、あともう一個、なんだったかな、引っかかる部分が全くないと使いづらかったです。それで賀下さんがつくっているやつがいいなって

岡崎：それが今使っている形状ですよね、この形状の良さってどういうところにありますか。

一宮：指が広がるところとか、手のひらに球面があたったりするのもいいかなって思います。前は平べったかったので。

岡崎：他のやつはなんで良くなかったんですか。指先にひっかからないとか、フィット感とかがないとかってことですかね。プレーの時には使ってみたんですか

一宮：マウス型も持ちやすくてよかったんですけど、引っかるところが全くなくってプレーでは使ってないです。賀下さんが作って頂いたのが初めてです。

岡崎：形状っていうのが一番重要な要素で、次に不隨して柔らかさ、大きさとか、今は細かい高さとかを調整したりしているってことですね

一宮：そうですね。

岡崎：個人的に理想の形とか思い浮かぶこととかはありますか？

一宮：本当に自分でもわからないのが正直なところで、。本当に試行錯誤やっていくしかなーいなと感じますね。

岡崎：色々なバリエーションを提供させてもらっていますが、沢山あることによる楽しさってありますか？

一宮：ありますね。プレー 자체を考えるにあたって一つに固めるのが理想的ですけど、日常生活でいえば、たくさんあることはそれはそれで選ぶ楽しさはあると思います。

岡崎：プレーの中ではなんで一つに決めたほうがいいんですか？

一宮：やっぱりおんなじモノ触って練習することで、それだけブレもないですし。ただその日の身体の状態で腕のハリ具合とかで高さの違いは欲しいかなって

岡崎：そうですよね。次に競技としての電動車いすについてお聞きしたいのですが、電動車いすによるテニスのどんなところに競技の楽しさを感じていますか？

一宮：スポーツとしての楽しさとしては、電動車いすを使ってもテニスが出来るというのが楽しいところですね。

岡崎：モーター駆動という点でアシストが加わると思いますが、どのくらい車いすの性能が影響しているんですか？

一宮：全てモーターなので、100%ですね。ぼくはたまたま普通の車いすが漕げないから電動車いすを使っているけれど、普通の車いすが漕げるならそっちのほうが絶対にいいですね。動きやすいと思います。

岡崎：では次に、今後の活動の目標に関してお伺いしたいと思います。テニスプレーを継続していく中で今の目標とかってなんでしょう？

一宮：身体が一回、重度になってしまったので、コンディションを整えて、前の状態・プレーに近づけるのが目標ですね。

岡崎：前の状態に近づいていくためにどういうところを課題と感じていますか？

一宮：そうですね。難しいところだけど、練習やって改善していくしかないですね。

岡崎：着座している姿勢とかも関係するんですよね。

一宮：はい、姿勢とかも多分関係すると思うんですよね。

岡崎：最後に、ジョイステイックの要因はテニスプレーにどのくらい影響しているんですか？

一宮：ジョイステイックの影響は割合的にはかなり大きいと思います。この操作によって、ボールに近づいて打つまでの動作全てをやっているので、ここの操作で、打てるか打てないかが決まっちゃうので。

岡崎：今後、ジョイステイック制作への期待を最後にお願いします。

一宮：やっぱり自分の身体に合って、使いやすいものが一番いいかなって。それで1つの形になってくれた方がいいかなて、

研究業績

- Award

1,計測自動制御学会優秀講演賞 2021

2,計測自動制御学会若手奨励賞2020

- Domestic Journal/ 国内学会論文誌

1,3D プリントプロダクト価値創出設計のためのAshby Map に基づくArchitected Material データベースの構築,岡崎太祐、仲谷正史、田中浩也,2021年10月

- International Conference / 国際学会論文誌

1 ,Polymers,Mechanical Properties and Reliability of Parametrically Designed Architected Materials Using Urethane Elastomers, Jun Morita,Taisuke Okazaki ,Masashi Nakatani and Hiroya Tanaka ,2020.03

- Domestic Conference/ 国内学会・シンポジウムにおける発表

1,計測自動制御学会システムインテグレーション部門「デジタルファブリケーションを用いた押し込み感の触感設計技法」(口頭発表),2020年12月

2,4D and Functional Fabrication マテリアルデザイン・FABプロセス「Ashby map を用いた3D Print 可能な architected structures の特性把握」(口頭発表),2020年10月

3,日本生活学会(オンライン)COVID-19 下におけるホームラボのデジタルエスノグラフィー(口頭発表),2021年6月

- International Conference / 国際会議における発表

1,A 3D-printed haptic material library for quantifying the force-displacement relationship,2021 IEEE World Haptics Conference, WHC 2021

2,Feature Quantification of Material Softness Perception Using the Force-Displacement Relationship,2021 IEEE World Haptics Conference, WHC 2021

- Outreach

1,Make: Japan社 『生き物としての力を取り戻す50の自然体験 一身近な野あそびから森で生きる方法

まで』にて『自然を感じHapticScape（ハプティックスケープ）を描こう』執筆