

力・振動・温度を触原色とする触感提示デバイスにおける 触感再現手法

田島 優輝^{*1} 加藤 史洋^{*1} 井上 康之^{*1} 舘 暉^{*1}

Tactile Sensation Reproducing Method of a Haptic Display that Presents Force, Vibration, and Temperature as Haptic Primary Colors

Yuki Tajima^{*1}, Fumihito Kato^{*1}, Yasuyuki Inoue^{*1}, and Susumu Tachi^{*1}

Abstract --- Presenting realistic tactile sensation increases the reality of VR applications. However, it is difficult to realize such a device by using a single tactile stimulus (e.g. only vibration). Therefore, we developed a complex tactile presentation system that presents stimuli of force, vibration, and temperature to cutaneous receptors, and also presents a force sensation to proprioceptor, based on the Haptic Primary Color Principle. This paper describes the system configuration, the control method, and two experiments using the tactile presentation system. In the first experiment, the parameter sets were estimated for reproducing tactile texture of multiple materials, and the evaluation for a degree of similarity between display stimuli and tactile feeling of each material was conducted. In the second experiment, the evaluation for the relevance of Japanese onomatopoeia to tactile sensations, was conducted, and some onomatopoeia had strong connections with specific tactile feeling reproduced by the system. The sequence of experiments suggested that our proposed system had the ability to reproduce smooth tactile feeling, such as smooth and slippery, with relatively high fidelity; however, softness feeling, such as soft, fluffy, and mushy, was suggested relatively difficult to reproduce. Moreover, according to these findings, we estimated parameter sets of the proposed device to represent specific tactile feelings, and found that a pair of contrasting tactile feelings (e.g. smooth and rough) was reasonably located on opposite side of the tactile stimulus coordinate space from one another.

Keywords: haptics, haptic primary colors, virtual reality, telexistence, haptic display device

1 はじめに

日常で感じる様々な触感を提示できるデバイスは、VR アプリケーションのリアリティを向上させる。触感提示機能が実装された今日の VR デバイス[1][2]の多くは振動によるものである。振動による触感提示は振動モジュールを用いれば簡単に実装できるが、原理上、圧覚や温度感覚などに作用しないため、提示触感のバリエーションに制限がある。そのため近年では、多様な触感の提示を目的として、振動と他の触刺激を組み合わせた複合型触感提示が提案されている。塩川らは、超音波振動と力覚提示を併用して、粗さ感、硬軟感、摩擦感を複合的に提示した[3]。Nakatani らは、指腹部に振動と温度を提示するモジュールを提案した[4]。しかし、複合型触感提示においても、日常で感じる触感の表現に十分な手法は確立されていない。これに対して我々は触原色理論に基づいたアプローチを行っている。

触原色理論とは力・振動・温度を組み合わせることで、様々な触感の提示が可能になる、とする理論である[5]。

力・振動・温度はそれぞれ異なる触覚受容器を活動させる。具体的に、圧力がメルケル細胞、せん断力がルフィニ終末、低周波振動(30Hz 程度)がマイスナー小体、高周波振動(200Hz 程度)がパチニ小体、温度が自由神経終末を、それぞれ一定の選択性で活動させ、主な皮膚感覚受容器を網羅している。したがって力・振動・温度を重畳して提示すれば、触覚受容器の活動を高い自由度で制御でき、多様な触感の提示が実現できる。

触原色理論に基づく触感提示手法の確立を目的として、本論文では、力(せん断力と垂直力)・振動・温度を提示する触感提示システムを構築した。せん断力・振動・温度は指腹表面で皮膚感覚への刺激として提示され、垂直力は指の深部感覚への刺激として提示される。各触刺激の強度や周波数をパラメータ制御することで、提示触感を変化させることができる。

構築システムの評価指標としては、①システムで提示できる触感の種類と、②それらの触感を提示するためのパラメータセットの妥当性が重要な指標となる。

①の評価のために、13 種類の試料の触感を再現する上で、最適となるパラメータセットを同定し、提示触感と試料触感との類似度を評価した(3.1 実験 1)。また、試

*1 東京大学

*1 The University of Tokyo

料触感を「つるつる」「ざらざら」といった24種類のオノマトペで評価した(3.2 実験2)。2つの結果を考察することで、本システムがどのような触性質の提示に適しているのか推定した。

②の評価については、2つの実験結果を対応付け、「つるつる」「ざらざら」などの触感オノマトペを提示するパラメータセットを推定した。類似した研究としては、Tomitaらが電気刺激による触感提示システムを用いて、入力信号周波数とオノマトペとの対応を求めた[6]。本研究ではTomitaらとは異なる触刺激(力・振動・温度)を用いて、オノマトペと触刺激パラメータを対応付けた。多元的なパラメータを用いるため、多様な触感オノマトペを表現できると考えられる。以下、本論文では、開発した触感提示システムの構成や制御手法について述べたあと、実施した実験および実験結果と、その考察について述べる。

2 力・振動・温度を触原色とした触感提示システム

触感提示システムは接地型デバイスと装着型デバイスから構成される。接地型デバイスは垂直力の提示を行い、装着型デバイスは指腹にせん断力、振動、及び温度刺激を提示する。

2.1 接地型デバイス

接地型デバイスはアクチュエータを用いて指腹に平板(ペンタブレット)を押し当てることで、垂直力を提示する。垂直力は指の押下動作に対する抵抗力として、深部感覚(位置覚、抵抗覚)に作用する。触原色理論では皮膚感覚への触感提示を想定しているが、硬軟感が皮膚感覚と深部感覚の両方を加味して知覚される[7]ことから、リアリティのある触感提示のために深部感覚提示を用いた。接地型デバイスの構成図を図1に示す。デバイスは2つのモータと釣り糸、ペンタブレット、2つの免荷錘で構成される。ペンタブレットはシステム全体において唯一のセンシングデバイスであり、ペンタブレットでタッチを感知することが、全ての触感提示のトリガーとなる。タッチを感知すると2つのモータが駆動してペンタブレットを引き上げ、指腹に押し当てる。免荷錘は図のように釣り糸を介して定常的にペンタブレットを引き上げ、モータの駆動力を補助する。指腹に提示される垂

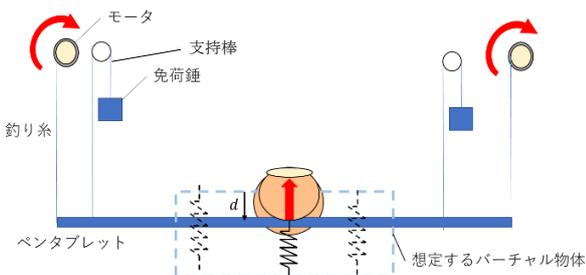


図1 接地型デバイスの基本構造
Fig.1 The structure of ground type device

直力は2つのモータの駆動電流 I_d に依存する。駆動電流 I_d と、提示垂直力 F_n との関係式は事前実験の結果から次のような関係になっていることがわかった。

$$\begin{aligned} 0 \leq I_d \leq 22 \text{ のとき} & \quad F_n = 0 & \quad N \\ 22 < I_d \leq 160 \text{ のとき} & \quad F_n = 0.101 \cdot (I_d - 22) & \quad N \end{aligned}$$

設置型デバイスで垂直力を提示することで、バーチャルな物体の垂直抗力を表現する狙いがある。垂直抗力がバネモデルに従うと仮定し、基準位置からの沈み込み量 d mm に比例した提示垂直力 F_n を提示した。したがって、2つのモータ駆動電流 I_d は次のようになる。

$$I_d = \frac{Kd}{0.101} + 22 \quad \text{mA}$$

ここで K は想定するバネモデルのバネ係数である。本研究では 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 10.0, 10.0~ N/mm の合計9通りのバネ係数を用意した。なお、10.0~設定時のみ、電流制御ではなく位置制御により垂直力を提示する。位置制御では実験参加者の押下動作に対し、沈み込みが生じないように制御がなされる。実際のバネ係数を求めることが難しいため、下限値として 10.0 N/mm を設定した。

本デバイスでは DC モータ (333358, Maxon motor 社)、ペンタブレット (Intuos Pro S, ワコム社) を用いた。ペンタブレットの重さは、モータや免荷錘と接続するための台座や金具と合わせて 1010g であった。免荷錘は 200g のものをペンタブレットの両サイド、計2つ接続した。ペンタブレットではタッチの有無、およびタッチの水平位置を 133Hz で取得した。タッチを感知すると 3ms 程度の遅延でモータコントローラ (EPOS2 24/2) に制御信号が渡されたあと、十分短い遅延でモータが駆動される。タッチが感知されている間、220Hz 程度の更新周期でモータの駆動電流が更新される。基準位置からの沈み込み量 d はモータエンコーダ情報から算出した。なお、バネ係数 K を 10.0 に設定した場合は、モータコントローラにより 1000Hz の制御周波数で位置制御がなされ、押下時に沈み込みを知覚することはなかった。

2.2 装着型デバイス

装着型デバイスは、先行研究の Gravity Grabber[8]と振動-温度提示モジュール[4]を統合したものである。

2.2.1 Gravity Grabber

Gravity Grabber (以下、GG) は2つのモータでベルト

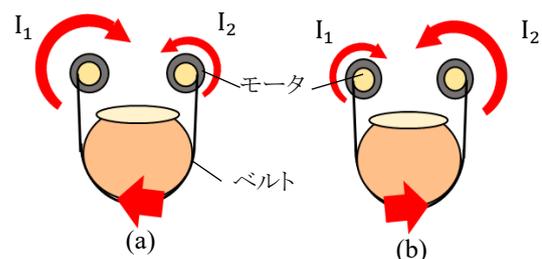


図2 Gravity Grabber の基本機構
Fig. 2 The structure of Gravity Grabber

を巻きとり、ベルトを指腹に押し当てたり、指腹を接線方向に引っ張ったりすることで触感を提示するシステムである。GGの触感提示イメージを図2に示す。図中上部の赤矢印の方向と大きさは、モータトルクの印加方向と大きさを表し、下部の赤矢印は提示せん断力の方向を表す。実験に用いたデバイスでは、初期状態として、2つのモータの駆動電流に初期電流 I_{init} を設定し、最低張力でベルトを張っている。触感提示を行う際には片方のモータの駆動電流を大きくしてベルトを一方方向に引っ張り、指腹にせん断力を提示する。提示せん断力は物体を撫でる際に生じる摩擦力を想定しているため、摩擦力の生成モデルに準じた電流算出式を用いた。クーロン摩擦と粘性摩擦を加味した摩擦生成モデルを用い、モータの電流値は下記のように決定した。

紙面右方向に指を動かすときには、せん断力を左方向に提示する(図2(a))ので、

$$I_1 = \mu \cdot 100 + v \cdot |\dot{d}_h| + I_{init} \quad \text{mA}$$

$$I_2 = -I_{init} \quad \text{mA}$$

紙面左方向に触れるときには、せん断力を右方向に提示する(図2(b))ので、

$$I_1 = I_{init} \quad \text{mA}$$

$$I_2 = -(\mu \cdot 100 + v \cdot |\dot{d}_h| + I_{init}) \quad \text{mA}$$

ここで I_1, I_2 は左右のモータの駆動電流、 μ はクーロン摩擦系の摩擦係数、 v は粘性係数である。 \dot{d}_h は指の水平方向速度であり、指のタッチ位置を時間微分して得られる。本研究では v を $200\text{mA} \cdot \text{s/m}$ 、 I_{init} は 30mA に設定した。また、摩擦係数 μ については0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6の9通りを用意した。本デバイスではDCモータ(333358, Maxon motor社)、 $12 \times 70\text{mm}$ のアセテートフィルムをベルトとして用いた。モータとベ

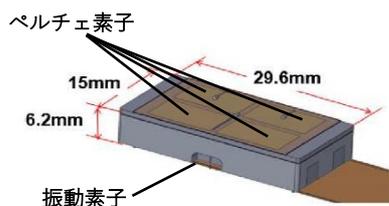


図3 振動・温度提示モジュール模式図
Fig.3 The structure of vibro-thermal tactile unit

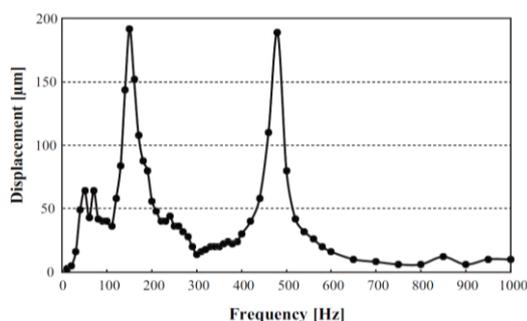


図4 振動素子の周波数特性 ([4]より引用)
Fig.4 Frequency characteristics of the vibro-thermal tactile unit (cited from [4])

ルトは $\phi 8 \times 15\text{mm}$ のナイロン製プリーで接続した。なお、モータの電流制御速度は2.1で示したのと同様である。

2.2.2 振動・温度提示デバイス

振動と温度を提示するデバイスがACCEL「身体性メディア」プロジェクト[9]によって提案されている。デバイスの模式図を図3に示す。

デバイス内部にはアルプス電子が提供する振動素子「フォースリアクタ™ AF シリーズ」を小型化したものが実装されている。振動素子の周波数特性を図4に示す。マイスナー小体の振動変位の知覚閾値は 40Hz 付近では $10\mu\text{m}$ 程度[10]、パチニ小体は 200Hz 付近では $0.1\mu\text{m}$ 程度[10]であり、双方の知覚閾値をカバーする。振動提示には正弦波信号を入力し、振幅係数 A と振動周波数 F の2つのパラメータで提示振動を制御した。振動提示では物体を撫でる際に生じる振動の再現を期待している。物体に触れる速度が低速(1m/s 以下)であるとき、指の速さに比例した振幅強度の振動が生じると仮定し、入力する信号の振幅は以下のように設定した。

$$|\dot{d}_h| \leq 1\text{m/s} \text{ のとき } A \cdot |\dot{d}_h| \cdot 120 \quad \text{mV}$$

$$|\dot{d}_h| > 1\text{m/s} \text{ のとき } A \cdot 120 \quad \text{mV}$$

振動振幅係数 A は0, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5, 1.8, 2.1, 2.4, 2.7の10通り、振動周波数 F については10, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 750, 1000Hzの12通りを用意した。なお、入力信号振幅の更新周期は 120Hz 程度である。

デバイスの上部にはペルチェ素子(KSMH029F, KELK社)[11]が実装されている(図3)。提示する触刺激間で時間的同期性を確保するため、知覚応答性が高い[12]冷温刺激に限定して提示を行った。ペルチェ素子は駆動電圧によって熱効率が変動しやすく、駆動電圧に比例した冷却強度が得られるとは限らない。そのため、素子の駆動電圧は 5.0V に固定し、素子駆動時間 T により冷温刺激の強度を制御した。ペルチェ素子を 5.0V で 1000ms 駆動した際のモジュール表面温度の測定結果を図5に示す。測定はモジュール表面に人差

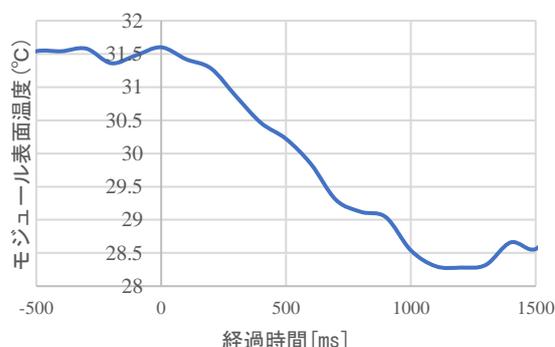


図5 ペルチェ素子駆動(1000ms)時の表面温度変動
Fig.5 Temperature on the module surface when driving Peltier device (driving time is set to 1000ms)

し指を接触させて、熱平衡状態にして行なった。図中横軸の 0ms は、モジュール駆動開始時刻である。測定結果から 150ms ではおよそ 0.5°C, 300ms ではおよそ 1.0°C, 450ms では 1.25°C, 900ms では 2.5°C 程度の温度低下が生じる。冷覚受容器は 29°C 付近で最も発火[12]し、また、冷覚受容の温度低下速度閾値は 0.3°C/s 程度[12]であるから、十分な冷却能力を有していると言える。本研究では、素子駆動時間 T として、0, 150, 300, 450, 900ms の 5 通りを用意した。

GG と振動・温度提示デバイスを統合して装着型デバイスを構築した。デバイスを正面から見た模式図が図 6 である。ナイロン製の保持具が GG のモータを保持し、モータの先にはモータブリー、そしてベルトが連結されている。また、10mm 幅の伸縮性バンドが保持具に接着されており、振動・温度提示モジュールを保持する。デバイスを装着した際には、指腹に GG のベルトが直接接触し、その上から振動・温度提示モジュールが一定の圧力で指腹に押しつけられる。そのため、提示する各触刺激が十分な強度で指腹に伝達される。バンドの下端には導電性のポイントを配置し、ペンタブレットにてタッチ情報を取得できるようにした。

2.3 システムの統合

接地型デバイスと装着型デバイスを統合したシステムの外観を図 7 に示す。図の青枠部分が接地型デバイスであり、青枠中下側の黒い平板がペンタブレットである。丸赤枠部分は装着型デバイスである。装着型デバイスは取り回しを考慮し、配線部分を指ぬきのグローブに縫い付けて使用した。四角赤枠部分には試料片を固定するための治具を設けた。

装着型デバイスを右手人差し指に装着し、ペンタブレットに触れると、ペンタブレットでタッチが感知され、触刺激が上記のパラメータ制御のもと提示される。タッチの終了を感知すると、全触刺激の提示がストップする。

3 実験

構築したシステムを用いて 2 つの実験を行った。どちらの実験も触感材料として、後述の試料片をシステム内の治具に固定して行った。第 1 の実験では、デバイスが提示する触感(以下、提示触感)が、試料片の触感(以

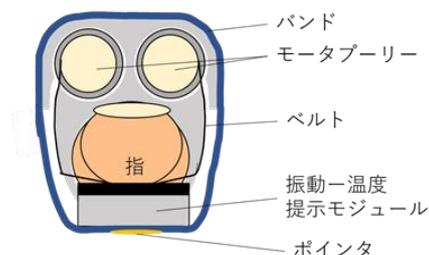


図 6 装着型デバイスの模式図
Fig.6 Figure of the wearable device

下、試料触感)に最も類似するようなパラメータセットを同定した。さらに、同定したパラメータセットを設定した状態で、提示触感と試料触感との類似度を評価した。第 2 の実験では試料触感を、24 種類のオノマトペを評価軸として官能評価した。

2 つの実験で使用した試料片の素材はタイル、ウレタンフォーム(薄・厚)、砂壁、紙粘土、アルミ板、わた、麻、ゴムフォーム(薄・厚)、エイ革、MDF 板、畳の 13 種類である。タイルは表面処理がされており、表面が滑らかである。ウレタンフォームはスポンジのような柔らかい素材で、表面には発泡性の細かい(粒度 1mm 以下)ざらつきがある。厚さは 5mm 程度の薄い試料と、20mm 程度の厚い試料を用いた。砂壁は MDF 板の表面に 1~5mm 程度の粒度の砂礫を接着したものである。紙粘土は乾燥前の紙粘土を板の上に盛ったものであり、柔らかく、表面が湿っている。アルミ板は表面処理がされており、表面が滑らかである。わたはポリエステル製の人工わたを 20mm 程度の厚みで板に盛ったもので、非常に柔らかい。麻は 2mm 程度の間隔で織られた麻を MDF 板に貼り付けたものである。ゴムフォームは柔らかく、表面には目視で粒度を測定できないほどの、極微細な発泡によるざらつきがある。厚さは 3mm 程度の薄いものと、10mm 程度の厚いものを用いた。エイ革の表面には直径 1~4mm 程度の凸形状パターンがある。エイ革も麻と同様に MDF 板に貼り付けて使用した。MDF は表面処理がなされた合成木材であり、表面は比較的滑らかである。畳は、イ草が 2mm 程度の間隔で織られた、いわゆるゴザの部分を MDF 板に貼り付けたものであり、異方性のある材料である。畳、麻、エイ革は単体では薄くて柔軟な素材だが、MDF に貼り付けて使用したため、MDF と同様の剛性を持つ。

上記の 13 種類の素材を 100mm×100mm に加工し、試料片として用いた。実験参加者は実験 1 では 22~36 歳の男性 4 名、実験 2 では 22~36 歳の男性 5 名であった。以下、実験の具体的手順について述べる。

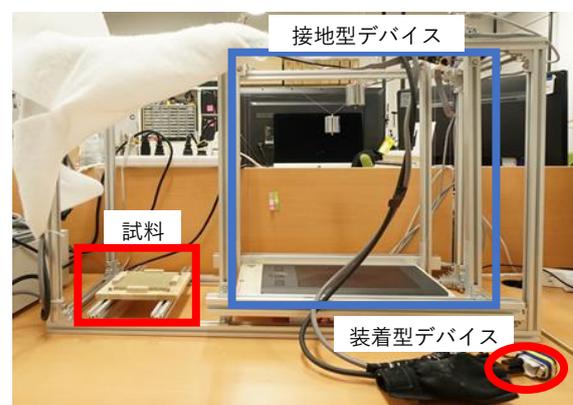


図 7 触感提示システム外観
Fig.7 The image of haptic presentation system

3.1 実験 1: 試料片の触感に類似する触感を与えるパラメータセットの同定

実験参加者は左手で試料触感、右手で提示触感を体感し、双方の触感が類似するようにパラメータをバネ係数 K 、摩擦係数 μ 、振動振幅 A 、振動周波数 F 、素子駆動時間 T の順に同定する。同定対象のパラメータが 5 種類あり、また、パラメータごとに 5~12 の自由度がある。その全ての組み合わせを網羅的に探索してパラメータを同定するのは現実的でないため、本実験では下記に示す手続きでパラメータ同定を行った。

- ① あるパラメータの組み合わせの基準刺激を提示し、試料触感との類似度を評価する。
- ② 基準刺激に対して一つのパラメータの値が最小幅で変化した比較刺激を提示し、試料触感との類似度を再評価する。
- ③ 上記のうち類似度がより高く評価された方を次の標準刺激として選択し、基準刺激の類似度がこれ以上大きくならないパラメータの値が決定されるまで①②の工程を繰り返す。
- ④ 一つのパラメータの同定後、他のパラメータも同じ手続きで同定する。このとき、同定完了済みのパラメータはリセットせず、そのまま同定結果の値を設定した状態で残りの同定過程を行う。
- ⑤ 一つの試料触感について全パラメータの同定が完了したら、試料触感との類似度をアンケートにより評価(後述)したあと、全パラメータをリセットして、初期パラメータ(後述)を設定する。

同定順序の決定理由について述べる。同定順序の決定では、パラメータ同定による提示触感への影響が、パラメータ間で独立かどうか重要なファクタとなる。一つのパラメータの同定が、すでに同定されたパラメータによる触性質を著しく変質させた場合、同定過程がうまく働かなくなるからである。独立でないパラメータについては、他のパラメータへの影響度の大きい方を先に同定する。パラメータ間の独立性について、パラメータと触性質との関係性、および、システム仕様の双方の面から考える。

触性質の知覚次元の観点から各パラメータを整理すると、ばね定数 K は硬軟感、摩擦係数 μ は、指腹のせん断変形量のパラメータであるから摩擦感、振幅係数 A と振動周波数 F は振動のパラメータであるから粗さ感(ファイン粗さ)と摩擦感、モジュール駆動時間 T は温冷感や湿潤感に作用すると考えられる[15]。このことから、摩擦係数 μ と振動パラメータ(A , F)のいずれも摩擦感に作用するが、その影響の優先度についてはまだ未解明な点が多く[15]、知覚次元の観点のみでは同定順序を決定するには至らなかった。一方で、システム仕様の観点からパラメータに着目すると、バネ定数 K や摩擦係

数 μ は指腹にダイナミックな変形を与えるため、振動や温度の知覚強度や性質を変化させる。したがって、振幅係数 A 、振動周波数 F 、素子駆動時間 T より先に同定する必要がある。また、提示する振動の強度と、試料触感による振動の強度に著しく差がある状態では、振動周波数の比較が難しいため、振幅係数 A の同定を振動周波数 F より先にすることが現実的である。また、素子駆動時間 T は素子の駆動回数の増大に伴って発熱が発生するため、駆動回数を最小限にするために同定順序を最後にすることが要求される。その結果上述の同定順に帰着した。

実験時の環境設定について述べる。実験中、実験参加者は装置の正面に着席し、右手に装着型デバイスを装着して、接地型デバイスに触れた。左手は素手で、試料片の表面に触れた。試料片側(左手側)には暗幕で実験参加者側から試料が見えないようにし、視覚による実験結果への影響を排除した。実験中、左右の手は、同一の触れ方でそれぞれの触感を体感するよう教示した。触れ方はバネ係数 K を同定する際と、それ以外のパラメータを同定する際で異なる。バネ係数 K は主に押下方向の触感に影響するため、500gf 程度の力で垂直方向に押下して比較を行うよう教示した。バネ係数 K 以外のパラメータの同定の際には、100gf 程度の力で、左右水平方向に 1.0m/s 程度の速度で指を動かすよう教示した。なお、双方の触り方について、実験前に 1 分程度の練習を課した。また、畳については、い草が織られている方向と平行に触れるように指示した。同定を行う際には制限時間は設けなかったが、1 つの試料について全パラメータの同定が完了するのに要した時間は 6~7 分程度であった。また、同定開始時に設定する初期パラメータは、振動周波数 F が 100Hz で、それ以外のパラメータは 0 に設定した。

実験手続き⑤に示した、同定パラメータセットによる提示触感と試料触感の類似度評価では、バネ係数 K 以外のパラメータを同定するときと同様の触り方で評価を行った。評価のスケールは「全く類似していない」を 1、「非常に類似している」を 7 とした 7 段階であった。

3.2 実験 2: オノマトペによる試料触感の評価

実験参加者は、3.1 でバネ係数 K 以外のパラメータを同定したときと同じ要領で試料片に触れた。このときの触感が、特定のオノマトペ、例えば「つるつる」に感じるかアンケートにより評価した。評価のスケールは「全く感じない」を 0、「非常に感じる」を 6 とした 7 段階である。評価軸とするオノマトペには、日常的に使用されているオノマトペを選定するために、坂本ら[13]がインターネットの検索結果数が大きいものを基準として選定した 43 語のうち、試料触感と対応がありそうなものとして、「ふさふさ」「さらさら」「かさかさ」「がさがさ」「ざらざら」「じょりじ

より「ごつごつ」「べたべた」「ごわごわ」「もこもこ」「もちもち」「ふわふわ」「ぬるぬる」「ぬめぬめ」「べとべと」「つぶつぶ」「つるつる」「すべすべ」の 18 語を選定した。更に「擬音語・擬態語 4500 日本語オノマトペ辞典」[14]から、試料触感と対応がありそうな、「がたがた」、「こちこち」、「じりじり」、「ねちゃねちゃ」、「べちゃべちゃ」、「ぶにぶに」の 6 語を選定し、合計 24 語を選定した。

4 実験結果

実験 1 の結果を表 1 に示す。表 1 は 13 種類の試料についてのパラメータ同定結果の被験者間平均、及び標準偏差を表す。なお、平均値と標準偏差の算出において、バネ係数 K の「10.0～」の結果は下限値の 10.0 として処理した。「10.0～」の回答が 1 つでも得られた試料はセラミックタイル(2 回)、砂壁(4 回)、アルミ板(2 回)、麻(4 回)、エイ革(3 回)、MDF(4 回)、畳(3 回)であり、これらの平均値結果の横には「～」を付記している。また、同定パラメータセットによる提示触感と試料触感との類似度の評価結果についても、同様に被験者間の平均値と標準偏差を算出した。類似度の結果は図中の各試料の最下段に記している。

表 1 パラメータ同定結果, 及び, 類似度評価結果
Table 1: The results of estimated parameters and similarity

タイル			ウレタンフォーム(厚)		
	平均値	標準偏差		平均値	標準偏差
バネ定数K	8.75～	4.69	バネ定数K	1.69	0.32
摩擦係数μ	0.18	0.20	摩擦係数μ	1.35	0.43
振幅係数A	0.60	0.73	振幅係数A	1.84	0.16
周波数F	220.00	193.52	周波数F	250.00	86.60
素子駆動時間T	150.00	183.71	素子駆動時間T	37.50	64.95
類似度	4.25	1.09	類似度	3.75	0.83

砂壁			紙粘土		
	平均値	標準偏差		平均値	標準偏差
バネ定数K	10～	0.00	バネ定数K	2.50	1.46
摩擦係数μ	1.35	0.22	摩擦係数μ	0.70	0.33
振幅係数A	2.55	0.26	振幅係数A	0.30	0.21
周波数F	150.63	202.58	周波数F	190.00	120.62
素子駆動時間T	37.50	64.95	素子駆動時間T	75.00	129.90
類似度	4.00	1.00	類似度	3.25	0.83

アルミ板			わた		
	平均値	標準偏差		平均値	標準偏差
バネ定数K	8.75～	4.69	バネ定数K	0.38	0.22
摩擦係数μ	0.20	0.14	摩擦係数μ	0.25	0.17
振幅係数A	0.45	0.34	振幅係数A	0.79	0.57
周波数F	333.75	305.23	周波数F	88.75	43.36
素子駆動時間T	337.50	64.95	素子駆動時間T	0.00	0.00
類似度	5.00	0.00	類似度	3.25	0.43

麻			ゴムフォーム(薄)		
	平均値	標準偏差		平均値	標準偏差
バネ定数K	10～	0.00	バネ定数K	8.25	3.03
摩擦係数μ	1.30	0.30	摩擦係数μ	1.15	0.46
振幅係数A	2.33	0.13	振幅係数A	1.28	0.58
周波数F	150.00	50.00	周波数F	287.50	174.55
素子駆動時間T	0.00	0.00	素子駆動時間T	0.00	0.00
類似度	4.75	0.83	類似度	3.50	0.87

エイ革			ゴムフォーム(厚)		
	平均値	標準偏差		平均値	標準偏差
バネ定数K	8.75～	4.69	バネ定数K	5.00	0.00
摩擦係数μ	1.38	0.25	摩擦係数μ	0.55	0.48
振幅係数A	1.35	0.86	振幅係数A	1.20	0.76
周波数F	306.25	221.06	周波数F	587.50	308.98
素子駆動時間T	0.00	0.00	素子駆動時間T	0.00	0.00
類似度	3.50	1.12	類似度	4.25	0.83

MDF			ウレタンフォーム(薄)		
	平均値	標準偏差		平均値	標準偏差
バネ定数K	10～	0.00	バネ定数K	1.50	0.94
摩擦係数μ	0.48	0.37	摩擦係数μ	1.10	0.30
振幅係数A	0.75	0.34	振幅係数A	1.73	0.25
周波数F	207.50	110.31	周波数F	237.50	225.35
素子駆動時間T	37.50	64.95	素子駆動時間T	0.00	0.00
類似度	4.50	1.12	類似度	3.75	1.09

畳		
	平均値	標準偏差
バネ定数K	8.75～	4.69
摩擦係数μ	0.48	0.36
振幅係数A	2.63	0.13
周波数F	73.75	77.57
素子駆動時間T	0.00	0.00
類似度	4.00	1.87

次に、実験 2 において、各試料の触感をオノマトペで評価した結果を表 2 に示す。表 2 では、評価値の被験者間平均のうち、上位 3 位までのオノマトペを表している。評価値平均が高いということは、試料の触感が該当のオノマトペのように知覚されているということであり、例えばタイルは「つるつる」とした触感として認識されていることがわかる。

5 考察

実験 1 では、各試料の触感に対応するパラメータセット、および同定パラメータセットによる提示触感と試料触感との類似度について表 1 のように結果を得た。実験 2 では各試料触感とオノマトペとの対応関係を表 2 のように得た。2 つの結果から、本システムが提示できる触感の種類、そして、「つるつる」「ざらざら」などの触感を提示するためのパラメータセットを推定できる。本節では、

表 2 各試料におけるオノマトペの評価値

Table 2: The evaluated value of correspondence between onomatopoeia and samples

タイル		ウレタンフォーム(厚)		砂壁	
	評価値平均		評価値平均		評価値平均
つるつる	6.0	かさかさ	3.2	ざらざら	4.4
すべすべ	3.4	ふわふわ	3.2	がさがさ	4.2
こちこち	2.2	ざらざら	2.4	ごつごつ	4.2

紙粘土		アルミ板		ポリエステルわた	
	評価値平均		評価値平均		評価値平均
ぬめぬめ	4.6	つるつる	4.0	ふわふわ	5.4
ぬるぬる	3.6	すべすべ	3.4	もこもこ	4.2
ねちゃねちゃ	3.2	こちこち	1.6	ふさふさ	3.6

麻		ゴムフォーム(薄)		エイ革	
	評価値平均		評価値平均		評価値平均
かさかさ	4.0	かさかさ	2.2	ざらざら	3.4
ざらざら	3.4	ごわごわ	1.2	つづつづ	3.2
がさがさ	3.2	がさがさ	1.0	がたがた	2.8

ゴムフォーム(厚)		MDF		ウレタンフォーム(薄)	
	評価値平均		評価値平均		評価値平均
かさかさ	2.4	かさかさ	3.4	がさがさ	2.6
つるつる	2.2	さらさら	3.2	ふわふわ	2.6
すべすべ	2.0	すべすべ	2.6	もこもこ	2.4

畳	
	評価値平均
がたがた	2.6
つるつる	2.2
つぶつぶ	2.0

実験結果を各触刺激パラメータに着目して整理し、類似度評価結果をもとに、本システムにおいて提示可能な触感種類について考察を行う。最後に、「つるつる」「ざらざら」などの触感を提示するためのパラメータセットの推定手法、および推定結果について述べる。

5.1 各パラメータについての考察

表1の結果を各パラメータについて整理した。考察に際して、図8～図12のようにパラメータと試料触感の対応関係をマッピングした。図中では横軸にパラメータの大きさをとり、縦軸に試料の名称を示す。●で表したマッピング座標位置は表1中の平均値、エラーバーは標準偏差に対応する。実験参加者が少なく、有効な検定結果を得ることが難しいため、ここでは平均値のみに着目し、特徴的な一部の触感要素について考察する。

5.1.1 バネ定数 K

マッピング結果を図8に示す。なお、タイル、アルミ板、エイ革、畳、砂壁、麻、MDFの同定結果には「10.0～」の結果が含まれており、実際には、Kが10.0より大きな位置にマッピングされると考えられる。試料の触感はおおよそ、 $K < 4.0$ にマッピングされるものと、 $K > 8.0$ にマッピングされるものとに分離される。前者は、わた、紙粘土、ウレタンフォーム(薄・厚)といった柔軟な試料、後者は、ゴムフォーム(薄)、タイル、アルミ板、エイ革、砂壁、MDF、麻でゴムフォーム(薄)以外は剛性のある試料である。また、ゴムフォーム(薄)も厚みが3mmの薄い試料のため、押下時の変形量が小さい。このことから、バネ係数Kが、素材の変形の大小、すなわち硬軟感に作用したと考えられる。また表2より、わたや、ウレタンフォーム(薄)では「ふわふわ」「もこもこ」、ウレタンフォーム(厚)でも「もこもこ」が対応しており、バネ係数Kを小さくすることが、「ふわふわ」「もこもこ」といった柔らかい触感の表現に作用することも示唆された。

5.1.2 摩擦係数 μ

マッピング結果を図9に示す。摩擦係数 μ が小さい領域($\mu < 0.3$)にはタイル、アルミ板、わたが、大きい領域($\mu > 1.3$)には、エイ革、砂壁、麻、ウレタンフォーム(薄・厚)がマッピングされた。また表2より、タイルやアルミ板は「つるつる」「すべすべ」とした滑らかな触感[13]、一方、砂壁、麻、ウレタンフォーム(厚)、エイ革が「ざらざら」、砂壁、麻、ウレタンフォーム(薄)が「がさがさ」といった粗い触感[13]として知覚されている。このことから、摩擦係数 μ の大小が、粗い触感(「ざらざら」「がさがさ」感)、滑らかな触感(「つるつる」「すべすべ」感)の提示に作用したと考えられる。

5.1.3 振幅係数 A および、振動周波数 F

振幅係数Aのマッピング結果を図10に示す。紙粘土、タイル、アルミ板は振幅係数Aが小さい領域($A < 0.6$)に、砂壁、畳、麻、ウレタンフォーム(薄・厚)は大きい領

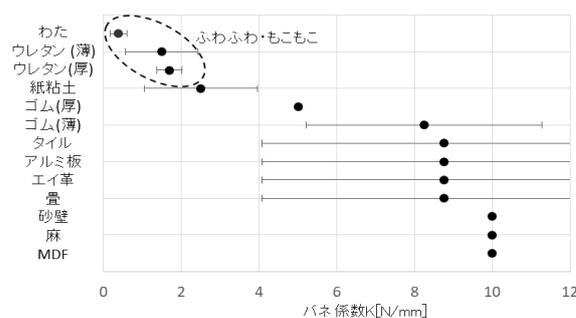


図8 マッピング結果 (バネ係数 K)

Fig. 8 Mapping of spring coefficient K

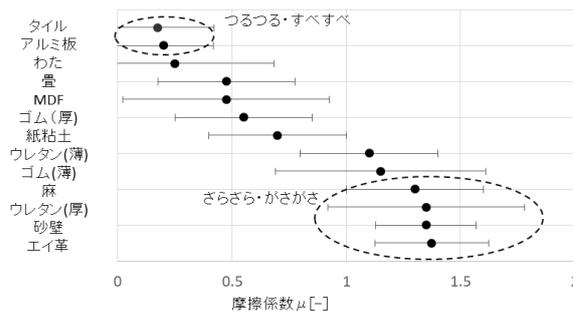


図9 マッピング結果 (摩擦係数 μ)

Fig.9 Mapping of friction coefficient μ

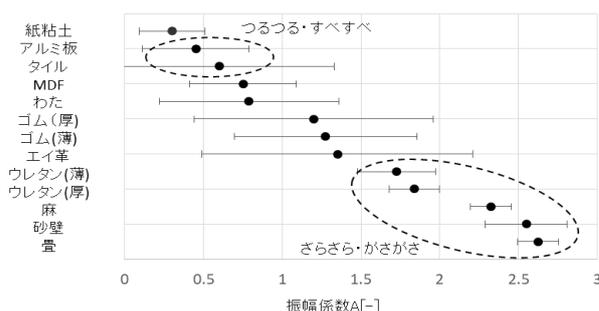


図10 マッピング結果 (振幅係数 A)

Fig.10 Mapping of amplitude coefficient A

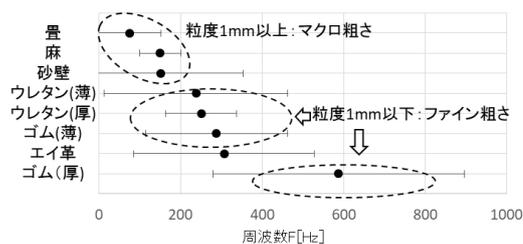


図11 マッピング結果 (振動周波数 F)

Fig.11 Mapping of vibration frequency F

域 ($A > 1.7$) にマッピングされた。表2より、タイルやアルミ板は「つるつる」「すべすべ」の触感として、砂壁などの触感は「ざらざら」「がさがさ」の触感として知覚されている事から、振幅係数Aの大小が、粗い触感(「ざらざら」「がさがさ」感)、滑らかな触感(「つるつる」「すべすべ」感)の提示に作用したと考えられる。この結果は摩擦係数 μ と同様の傾向である。

続いて、振動周波数Fについてマッピングを行った結

果を図 11 に示す。なお、振幅係数 A が小さい状態では振動の知覚強度が小さく、振動周波数 F の同定が難しいことを考慮し、振幅係数 A の平均値が 1.15 以上の、ウレタンフォーム(薄・厚)、砂壁、麻、ゴムフォーム(薄)、エイ革、畳に限定してマッピングを行った。マッピング結果では被験者間の標準偏差が大きいが、砂壁や畳、麻のような、1mm 以上の空間波長の凹凸(マクロ粗さ)を持つ試料は低周波域にマッピングされ、ウレタンフォームやゴムフォームなど、凹凸波長が 1mm 以下のキメの細かい凹凸(ファイン粗さ)を持つ試料は高周波域にマッピングされた。マクロ粗さとファイン粗さでは、それぞれ知覚の機序が異なる[7][15]。結果から 200Hz 付近を境界として、低周波の振動がマクロ粗さを、高周波の振動がファイン粗さの提示に作用したことが示唆された。

5.1.4 素子駆動時間 T

マッピング結果を図 12 に示す。紙粘土、タイル、アルミ板以外の試料が、駆動時間が短い領域 ($T < 50.0\text{ms}$) にマッピングされた。駆動時間が短い領域にマッピングされた試料では「かさかさ」(ウレタンフォーム(厚)、ゴムフォーム(薄・厚))、「がさがさ」(砂壁、麻、ウレタンフォーム(薄))、「ざらざら」(砂壁、麻、ウレタンフォーム(厚)、エイ革)といった乾きや表面の粗さに対応する触感[13][16]が知覚されている。一方、 $T = 75\text{ms}$ にマッピングされた紙粘土は湿り気があり、湿潤感を示す「ぺちゃぺちゃ」「ぬちゃぬちゃ」[19]と音韻的に近い「ねちゃねちゃ」した触感として知覚された。温度提示と湿潤感覚の関係についての知見[20]から、冷温提示が湿潤感の表現に作用したと考えられる。また、 $T > 100\text{ms}$ には、滑らかな触感を持つタイルとアルミ板がマッピングされており、冷温提示が滑らかさの提示にも作用したと考えられる。

5.2 類似度に関する考察

類似度の結果について、5.1 の考察に用いたのと同様に、横軸に類似度の大きさをとり、各試料触感についてマッピングを行った(図 13)。結果からわたや紙粘土、ゴムフォームやウレタンフォームのような、柔らかな素材は類似度が小さく、剛性の高いアルミ板や麻、MDF といった試料は類似度が高くなる傾向が得られた。物体の硬さ提示では、物体をタップした際に生じる振動が重要なファクタとなる[17]。本実験では、ペンタタブレット接触時に生じる振動が、装着型デバイスの伝達関数を經由して、指腹に伝達されたことになる。理想的な触感提示では表現したい硬軟感に応じて、接触時の振動の周波数や減衰係数などを最適化する必要がある。本実験では、用いたペンタタブレットの表面が硬い素材であるため、硬い試料では類似度が向上し、柔らかい試料では類似度が下がったと考えられる。結果的に、アルミ、タイルなどでは比較的高い類似度が得られており、オノマトペと

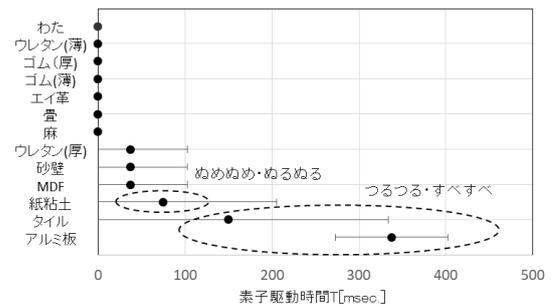


図 12 マッピング結果 (素子駆動時間 T)
Fig.12 Mapping of module driving time length T

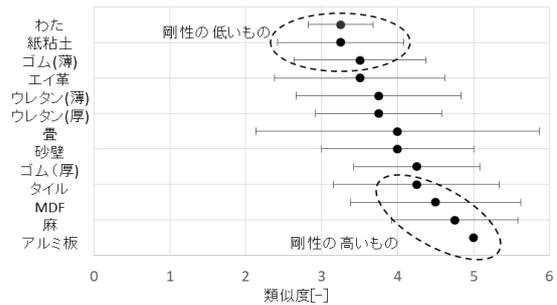


図 13 マッピング結果 (類似度)
Fig.13 Mapping of similarity result

しては「つつる」「すべすべ」といった触感は特にリアルに提示できると考えられる。一方、柔らかい「ふわふわ」「もこもこ」「ねちゃねちゃ」の触感の提示には改善が必要である。また、ウレタンフォームや畳、砂壁など、粗さを有した試料ではアルミなどに比べて高い類似度を得られなかったが、摩擦係数 μ や振動振幅 A を制御することが、粗さ感へ作用することは、5.1 の考察からも確認されている。

5.3 オノマトペに対応するパラメータセットの推定

触感提示装置で触感を提示する際に、オノマトペを用いて、提示したい触感を指示する場合がある。その際、指示されたオノマトペに対応する触感を提示する物理的なパラメータセットを知る必要が生じる。この節では、そのようなパラメータセットの推定法について考察する。

オノマトペを物理刺激のパラメータによって表現したものとしては、振動周波数、水平力持続時間、垂直力持続時間、温度低下速度を、表現要素としたものがあり[18]、特定の触感を再現する上で参考資料となっている。本節では、オノマトペを表現するのに最適なパラメータセット(バネ係数 K、摩擦係数 μ 、振幅係数 A、駆動時間 T)を推定する。なお、振動周波数 F については、実験参加者間で分散が大きかったため除外した。

まず、推定の対象とするオノマトペを選定するために、実験 2 の結果で評価値が高い「オノマトペ-試料触感」のペアを選定した。例えば、「つつる」の評価値が高い試料は、「つつる」していることの信憑性が高く、そのような「つつる」した試料のパラメータ同定結果を参考に

すれば、「つるつる」感を表現するパラメータセットを推定できる。選定にあたって、「オノマトペ-試料触感」のペアを選出する評価値の基準が必要になるが、今回用いた試料片では、オノマトペで表現しやすい試料とそうでないものが混在しており、厳密な基準を設けることが困難である。今回は試験的に、各試料の評価値の上位3位を示した表2の結果の平均値「3.1」より評価値が高いものを基準としてペアを選出した。対象となるペアのデータを、オノマトペ-試料【評価値】のように表すと、かさかさ-麻【4.0】、かさかさ-ウレタンフォーム(厚)【3.2】、かさかさ-MDF【3.4】、がさがさ-麻【3.2】、がさがさ-砂壁【4.2】、さらさら-MDF【3.2】、ざらざら-麻【3.4】、ざらざら-砂壁【4.4】、ざらざら-エイ革【3.4】、すべすべ-タイル【3.4】、すべすべ-アルミ板【3.4】、つぶつぶ-エイ革【3.2】、つるつる-タイル【6.0】、つるつる-アルミ板【4.0】、ぬめぬめ-紙粘土【4.6】、ぬるぬる-紙粘土【3.6】、ねちゃねちゃ-紙粘土【3.2】、ふさふさ-わた【3.6】、ふわふわ-ウレタンフォーム(厚)【3.2】、ふわふわ-わた【5.4】、もこもこ-わた【4.2】が該当する。

パラメータセットの推定過程について述べる。上述のペアにおいて、該当試料が1件のみのオノマトペ(ごつごつ、さらさら、つぶつぶ、ぬめぬめ、ぬるぬる、ねちゃねちゃ、ふさふさ、もこもこ)については、ペアの試料のパラメータ同定結果をそのまま用いた。該当試料が複数あるオノマトペについては、実験1で求めた「試料触感-同定パラメータによる触感」の類似度と、実験2で求めた「オノマトペ-試料触感」の評価値の積を求め、その値に比例した重みつき平均の結果により、パラメータを推定する。実験1の類似度は、同定したパラメータと試料触感との対応の妥当性を、また、実験2の評価値は、オノマトペと試料触感との対応の妥当性を表しており、双方を加味した形でパラメータを推定できる。例えば、「かさかさ」は麻、ウレタンフォーム(厚)、MDFにおいて該当データがある。実験1の類似度はそれぞれ4.75、3.75、4.50であった。また、実験2で求めた「かさかさ」の評価値は麻が4.0、ウレタンフォーム(厚)が3.2、MDFが3.4であった。したがって、類似度と評価値の積を求め、それぞれの同定結果の重みの比は、麻:ウレタンフォーム(厚):MDF=19.0:12.0:15.3となる。それぞれの試料のパラメータ同定結果を上記の比で加算し、正規化を行うことで、「かさかさ」の結果を求めた。

上記の手法により求めた、パラメータ推定結果は表3のようになる。表3の結果をもとに、マッピングを行ったのが図14である。なお、図中ではバネ係数Kは結果の値が7.85以上のものと、2.50以下のものとで2極化したため、マッピングを簡素化するために7.85以上のものを▲、2.50以下のものを●で表現した。

特定のオノマトペについて注目すると、「ざらざら」「がさがさ」「つぶつぶ」「ごつごつ」のような、粗さや表面凹凸

表3 オノマトペに対応する各パラメータ

Table 3 The parameters corresponding to onomatopoeia

	ばね定数K	摩擦係数 μ	振幅係数A	素子駆動時間T
ごつごつ	10.00	1.35	2.55	37.50
がさがさ	10.00	1.33	2.44	19.69
さらさら	10.00	0.48	0.75	37.50
ざらざら	9.67	1.34	2.16	14.46
つぶつぶ	8.75	1.38	1.35	0.00
すべすべ	8.75	0.19	0.52	251.35
つるつる	8.75	0.19	0.53	232.42
かさかさ	7.85	1.04	1.68	22.11
ぬめぬめ	2.50	0.70	0.30	75.00
ぬるぬる	2.50	0.70	0.30	75.00
ねちゃねちゃ	2.50	0.70	0.30	75.00
ふわふわ	0.91	0.70	1.21	15.23
ふさふさ	0.38	0.25	0.79	0.00
もこもこ	0.38	0.25	0.79	0.00

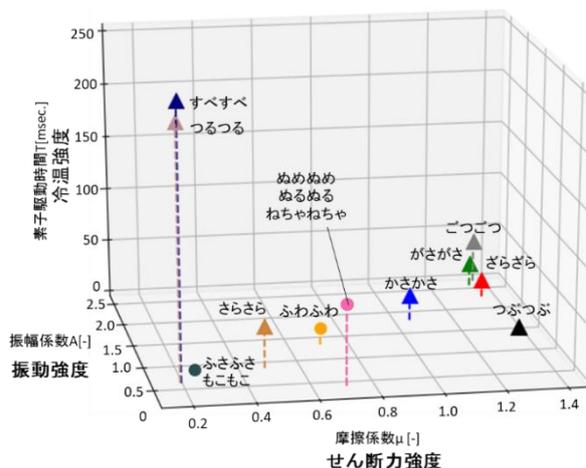


図14 触刺激空間にマッピングされたオノマトペ

Fig.14 Mapping of onomatopoeia in the tactile stimulation parameter space

に関するオノマトペは、摩擦係数 μ 、振幅係数Aが高く、素子駆動時間Tが小さい位置にプロットされる傾向にある。議論のため、摩擦係数 μ は指腹表面のせん断力強度、振幅係数Aは振動強度、素子駆動時間Tは冷温強度と読み替えると、一定強度のせん断力と振動を触刺激として与えれば「ざらざら」等の触感表現に寄与すると考えられる。一方「つるつる」「すべすべ」のような滑らかな触感には、摩擦係数 μ と振幅係数Aが小さく、素子駆動時間Tは大きい位置にマッピングされている。「ざらざら」等とは逆に、せん断力と振動はあまり与えず、且つ、一定強度の冷温提示を行うことで「つるつる」「すべすべ」感の表現に寄与すると考えられる。物体の粗さ・滑らかさにおいて両極的な印象のある「つるつる」や「ざらざら」といった触感が、触刺激を軸とした空間においても、両極的な位置にマッピングされるというのは、直感的にもっともらしい結果である。これ以外の触感についても、実験サンプル数の充実性やパラメータの完全独立性を担保した結果ではないが、図13、14の推定結果を参照することで、対象のオノマトペの表現に対応した物理パラメータセッティングが行える。ただし、この結果は使用した素材や物理パラメータが限定されており、また被験者数も少ないため、今回提案した方法論を用いて、より精緻なオノマトペと触原色との対応関係を求めて行くことが今後の課題である。

6 まとめ

触原色理論に基づいた触感提示手法の確立を目的として、触感提示システムを構築し、その構成と制御手法について説明した。システムは接地型デバイスと装着型デバイスの2つのデバイスで構築され、指腹にせん断力、振動、温度、更に、指の深部感覚に力覚を、設定パラメータに応じて提示する。本システムを用いて2つの実験を実施し、実験1では試料触感を表現するパラメータセットを推定し、さらに、提示触感と試料触感との類似度を評価した。実験2では試料触感とオノマトペの対応関係をそれぞれ得た。実験1と実験2の結果から、本システムが「つつる」「すべすべ」といった滑らかな触感を比較的高いクオリティで表現できる一方、「ふわふわ」「もこもこ」「ねちゃねちゃ」といった、柔らかい触感の表現は比較的困難であることが示唆された。さらに、実験結果をもとに、提案デバイスにおいて「つつる」「ざらざら」感などの触感を表現するパラメータセットを推定した。推定結果では、「つつる」「ざらざら」といった両極的な触感が、触刺激の空間上においても両極端な位置にマッピングされるなど、直感的にもっともらしい結果を含んだ結果が得られた。

謝辞

本研究は国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)の戦略的創造研究推進事業(ACCEL)「触原色に立脚した身体性メディア技術の基盤構築と応用展開」の支援によって行われた。ご支援いただいた篠田裕之(東京大学大学院新領域創成科学研究科教授)に感謝の意を表す。

参考文献

- [1] Oculus Rift: <https://www.oculus.com/rift/>
- [2] VIVE™: <https://www.vive.com/jp/>
- [3] 塩川雄太, 田蔵淳史, 昆陽雅司, 前野隆司: 超音波振動子と力覚呈示装置の統合に基づく複合触感呈示法: 日本機械学会論文集 C 編 75 巻, 132-140, (2009.1)
- [4] Masashi Nakatani, Katsunari Sato, Kunio Sato, Yuzuru Kawana, Daisuke Takai, Kouta Minamizawa, Susumu Tachi: A novel multimodal tactile module that can provide vibro-thermal feedback: AsiaHaptics, (2016.11)
- [5] Susumu Tachi, Kouta Minamizawa, Masahiro Furukawa, Charith Lasantha Fernando: Haptic media construction and utilization of human-harmonized “tangible” information environment: Proceedings of the 23rd International Conference on Artificial Reality and Telexistence, 145-150, (2013.12)
- [6] Hirobumi Tomita, Satoshi Saga, Hiroyuki Kajimoto: Onomatopoeic-based Classification of Generated Sensation on Electrostatic Tactile Display: In Proceedings of IEEE WorldHaptics 2017, WIP-26, (2017.6)
- [7] 岡本正吾: 粗さ・摩擦・硬軟・温冷の触知覚機序 - 触感/テクスチャはこうして感じられている - (Web 文献): http://www.mech.nagoya-u.ac.jp/asi/ja/member/shogo_okamoto/
- [8] Kouta Minamizawa, Souichiro Fukamachi, Hiroyuki

- Kajimoto, Naoki Kawakami, Susumu Tachi: GravityGrabber: Wearable Haptic Display to present Virtual Mass Sensation: ACM SIGGRAPH 2007: Emerging Technologies, Vol. 8 (2007.8)
- [9] Tachi_Lab - ACCEL Project: https://tachilab.org/jp/accel_project.html
- [10] S. J. Bolanowski, Jr., G. A. Gescheider, R. T. Verrillo, C.M. Checkosky: Four channels mediate the mechanical aspects of touch: The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 84, 1680-94 (1988.12)
- [11] 株式会社KELK: <http://www.kelk.co.jp/thermo/index.html>
- [12] Robert F. Schmidt, 岩村吉晃(翻訳): 感覚生理学第二版: 55-63 (1989)
- [13] 坂本真樹, 田原拓弥, 渡邊淳司: オノマトペ分布図を利用した触感覚の個人差可視化システム: 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 21 巻, pp.213-216 (2016.9)
- [14] 小野正弘: 擬音語・擬態語 4500 日本語オノマトペ辞典: 小学館出版(2007)
- [15] Shogo Okamoto, Hikaru Nagano, Yoji Yamada: Psychophysical Dimensions of Tactile Perception of Textures: IEEE Trans. Haptics, Vol. 6, 81-93 (2012.6)
- [16] 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: 日本感性工学論文誌 13 巻, 353-359 (2014.4)
- [17] Kosuke Higashi, Shogo Okamoto, Yoji Yamada: What is the Hardness Perceived by Tapping?: EuroHaptics 2016 Proceedings, Part I, of the 10th International Conference on Haptics: Perception, Devices, Control, and Applications, Vol. 9774, 3-12 (2016.7)
- [18] 舘暲, 南澤孝太, 梶本裕之, 佐藤成成, 仲谷正史: 触覚情報変換装置・触覚情報変換方法、および、触覚情報変換プログラム: 国際公開番号: WO2017/175867A1 (2017.10)
- [19] Maki Sakamoto, Junji Watanabe: Exploring Tactile Perceptual Dimensions Using Materials Associated with Sensory Vocabulary: Frontiers in Psychology, Vol. 8 (2017.4)
- [20] 潮田ひとみ, 仲西正, 中島利誠: 湿度刺激と湿潤感覚の関係: 日本繊維製品消費科学会論文誌 42 巻, (2001.2)

(2018年7月27日受付)

[著者紹介]

田島 優輝 (学生会員)



2016年熊本大学工学部機械システム工学科卒業。2018年東京大学大学院新領域創成科学研究科複雑理工学専攻修士課程修了。現 KDDI 株式会社。

加藤 史洋 (正会員)



2008年電気通信大学・電子工学科卒。2010年同大学院・知能機械工学専攻・修士課程修了。同年、東京工業大学大学院・知能システム科学専攻・博士課程・日本学術振興会特別研究員(DC1)。2014年株式会社東芝入社・研究開発センター・インタラクティブメディア部門。2016年博士課

程・修了。同年 東京大学高齢社会総合研究機構・舘研究室・JSTACCEL 身体性メディアプロジェクト・特任研究員。トレイグジスタンス，バーチャルリアリティ，触覚インタフェース，加熱調理シミュレータの研究に従事。博士（工学）。

井上 康之（正会員）



2003 年豊橋技術科学大学知識情報工学課程卒業。2005 年豊橋技術科学大学大学院知識情報工学専攻修了。2010 年 豊橋技術科学大大学院 大学院 博士後期課程博士後期課程電子・情報工学専攻 修了。2011 年電気通信大学大学院情報システム研究科特任助教，2014 年三重大学工部情報工学科研究員，2015 年東京大学高齢社会総合研究機構特任研究員，現在に至る。認知心理学，人間情報学バーチャルリアリティなどに関する研究に従事。博士（工学）。

舘 暲（正会員・フェロー）



1968 年 東大・工学部・計数工学科卒。1973 年 同大・大学院・博士課程修了・工学博士。東大・先端研・教授，同大・工学部計数工学科・教授などを経て，2001 年同大・大学院 情報理工学系研究科・教授。2009 年東京大学名誉教授，慶大・大学院メディアデザイン研究科に移り，教授・国際バーチャルリアリティセンター長などを務める。2015 年からは，東大・高齢社会総合研究機構・舘研究室にて ACCEL 身体性メディアプロジェクト研究代表者としてトレイグジスタンス，バーチャルリアリティ，ハプティクスなどの研究を推進。計測自動制御学会第 46 期会長，日本バーチャルリアリティ学会初代会長。