

基礎論文

触原色原理に基づいた触覚提示システム

井上 康之^{*1} 中 郁己^{*1} 加藤 史洋^{*1} 舘 暲^{*1}

Haptic Presentation System Based on Haptic Primary Colors

Yasuyuki Inoue*, Ikumi Naka*, Fumihiko Kato* and Susumu Tachi*

Abstract --- We constructed a haptic presentation system based on haptic primary color which reproduces various tactile sensations of real materials for interactive VR application. This system consists of two components of wearable tactile display which presents vibration and temperature stimuli and stationary encounter-type haptic display which presents force stimulus. The parameter sets of each stimulus was tuned in advance in order to reproduce tactile sensations of thirteen real material samples. To evaluate this system, we conducted two experiments. In the first, how much influence of force presentation was examined, and it was found that evaluated similarities of most samples were improved by presence of force sense. In the second, multiple regression analysis was conducted to estimate the contribution ratio of each stimulus, and it was found that each material sample had particular weights of stimuli for reproducing the tactile sensation.

Keywords: Teleexistence, Virtual Reality, Haptics, Haptic Primary Colors

1 はじめに

バーチャルリアリティ(VR)における現実感の向上には、多くの感覚情報を整合的に提示することが重要である。特に、VR空間内の物体に触れた際の触覚刺激は、その物体に対する存在感を強めるだけでなく、それがどのような材質で出来ているかという質感情報も表現でき、よりリアリティの高いVR開発につながる。家室ら[1]は、VR空間内にあるバーチャル物体にペン先が触れた時に振動してその物体の表面テクスチャを表現する把持型の力覚提示ディスプレイを開発し、現実の物体をなぞってスキャンした様々な材質のテクスチャ情報をバーチャル物体に付与することを行った。近年では、このシステムと同様に現実世界から記録した材質試料の物性パラメータを触覚刺激として用いることでリアルな触感を提示するバーチャル触覚提示システムがいくつも開発されている(例えば[2])。しかし、振動素子やペルチエ素子など単一の触覚刺激デバイスだけを用いるシステムではその触感の表現能力に限界がある。それに対して、振動や力、温度などを複合的に用いて多様な触感を提示する手法が提案されている。例えば、超音波振動と力覚提示を組み合わせることで粗さ感や硬軟感、摩擦感を提示する手法[3]や、指腹部に振動と温度を提示する手法[4]などがある。しかし、これらのシステムを通じて提示される複合触覚刺激の多くはシステムの構成や特性に合わせてアドホックに調整されたものであり、その触感情報を統一的に扱うことは困難である。

こうした問題意識から、触覚提示システムのデバイス

構成によらず触感情報を統一的に扱うための理論的な枠組みを与えようとする触原色原理が提案され[5]、この原理に基づいた複合触覚提示手法も開発されている[6]。触原色原理とは、生理学的な知見に基づき触覚を皮膚の触覚受容器が受容する3種類の触覚刺激(力・振動・温度)、すなわち“触原色”に分解することで、あたかも色の3原色(RGB)と同じように触覚情報の基本単位として記録・伝送・提示しようとする概念である[5]。目の網膜における視細胞が異なる波長の光を受容するのと同様に、皮膚の各触覚受容器はそれぞれ対応する機械刺激を受容する。すなわち、圧力はメルケル細胞が、せん断力はルフィニ終末が、低周波振動(～30Hz)はマイスナー小体が、高周波振動(～200Hz)はパチニ小体が、温度は自由神経終末が受容する。最近では、これらの触覚受容器を電氣的に刺激することで、各受容器に対応した感覚をバーチャルに作り出す研究もある[7]。触覚受容器を発火させる刺激がその受容器に対応する現実の物理刺激かバーチャルな電気刺激かに関わらず、人間はこれらの触覚受容器から得た刺激の情報を複合的に知覚することで、多様な触感を認知していると考えられている[8]。したがって、これらの触覚受容器に与える各物理パラメータ(力・振動・温度)の組み合わせを人が知覚する触感と対応付けることによって、任意の触感を自由に再現することができると考えられる。ただし、色の知覚と異なり、それぞれの触感を表現するための言葉(オノマトペ)は統一されておらず、個人ごとの解釈のばらつきもあるため、触覚受容器を刺激する物理パラメータと人間が触感として知覚する心理パラメータの対

*1 東京大学

*1 The University of Tokyo

応関係を特定することは容易ではない。

これに対して、田島ら[6]は触覚提示システムが制御可能な物理パラメータを調整することで様々な触覚素材の触感を再現し、それと同時に、それらの実際の触覚素材がどのようなオノマトペで表現されるのかを調べることで、触覚受容器への刺激(物理パラメータ)とその触感(心理パラメータ)の間の対応関係を調べた。具体的には、指腹部に与える振動・温度・せん断力・圧力の物理刺激を制御可能な触覚提示システムを用いて、様々な表面材質を持つ 13 種類の実試料の触感を最も再現する物理パラメータの組み合わせを心理物理学的手法で同定し、また、24 語のオノマトペを用いてそれらの実試料を触った時の印象をアンケート評価した。しかし、この研究では、評定者が物体に触れる時の視覚情報を統制し、指先で感じる触覚情報だけで物理パラメータの同定やオノマトペ評価を行った。そのため、ここで得られた物理パラメータを VR 空間上のバーチャル物体の材質情報として付与し、その物体に触れた時の触感としてインタラクティブに提示した場合に、その刺激が現実の物体を目で見て触った時と同様のリアリティを持つ適切な触感として知覚されるかは確認されていなかった。したがって、この研究で同定された触感に関する物理パラメータを VR 環境で評価する必要がある。また、この研究で示された各試料の触感の再現度(リアリティ)は試料ごとに異なり、この触覚提示システムが制御可能な物理パラメータの範囲によって表現可能な触感の種類やその触感のリアリティに違いがあることが分かった。これは材質の種類(=触感)によってはそれをリアルに再現するために必要な物理パラメータの数が異なることを示唆する。ある触感を再現するのに必要な最小限のパラメータ数やその値の範囲が分かれば、様々なデバイス構成がありうる触覚ディスプレイがそれぞれ表現可能な触感の種類、すなわち触覚ディスプレイの表示範囲が分かるようになり、応用上の大きな意味を持つ。

そこで、本研究では、VR 環境においてバーチャル物体に触感を提示できる VR 触覚提示システムを構築し、先行研究で示された物理パラメータがどの程度の触感のリアリティを再現できるのかを調べた。同時に、それぞれの触感の再現に重要な物理パラメータ(触原色)を解明するため、触覚提示システムの刺激パターンを変え、その評定値の重回帰分析を行うことで各触感に対する物理パラメータの寄与度を調べた。

2 要求仕様

本研究で構築する VR 触覚提示システムが満たすべき要求仕様として、VR の三要素[8]である 3 次元の空間性、実時間の相互作用性、自己投射性という観点からそれぞれ検討する。

3 次元の空間性とは、システムの生成する VR 環境が立体的な広がりを持つものとして提示されることである。この性質を本システムが備えるには、ユーザに対して立体映像の VR 空間を提示し、さらに、VR 空間内にある物体の面の方向や凹凸などの表面形状が触って感じられようにする必要がある。そのため、本システムは立体映像が提示可能な映像デバイス(例えばヘッドマウントディスプレイ)と、バーチャル物体の触感を再現する触覚ディスプレイ装置を使う必要がある。

実時間の相互作用性とは、システムの生成する VR 環境にユーザが働きかけを行うことで、物体に触れたり動かしたりするなどといった相互作用が即座に行われることである。この性質を本システムが備えるには、ユーザの身体動作を VR 空間内に再現して提示し、さらに、ユーザの手がバーチャル物体に触れた時の触感を即座に提示する必要がある。そのため、本システムはユーザの手の代わりになるアバターハンドを持ち、ユーザの手や指の動きを即座にアバターハンドに反映させるための運動計測装置を使う必要がある。実際の手の動きに対するアバターハンドの遅れは相互作用性の妨げとなるため、この運動計測にはリアルタイム性が求められる。また、アバターハンドがバーチャル物体に触れた時、その物体の触感を即座に触覚提示する必要があるため、VR 空間内における接触状況の検知と実世界でのユーザに対する触覚フィードバック刺激の提示にもリアルタイム性が求められる。

自己投射性とは、VR 環境から得られる感覚情報が相互に矛盾なくシームレスにつながることで、あたかもユーザが VR 環境内に入り込んでいるような状態を実現することである。この性質を本システムに持たせるため、ユーザの頭や手の動きをリアルタイムに計測できる身体運動計測装置を用いて、ユーザの視点から見たアバターハンドが実環境のユーザ自身の手の位置と一致するように VR 空間の映像を制御する必要がある。また、触覚フィードバックについても、触れた指の場所からバーチャル物体の材質に対応する触感が提示できる触覚ディスプレイ装置を用いる必要がある。

以上の要求仕様をまとめると、本システムに必要な構成要素は、(1) VR 空間の映像レンダリングや接触判定などを計算するための VR 環境、(2) VR 空間を立体映像として没入提示を行うための映像デバイス、(3) ユーザの頭や手指の動きを計測するための身体運動計測装置、(4) 指先に様々な触感を提示可能な触覚ディスプレイ装置である。これらのうち、(4) について更に詳細な検討を行う。

触覚ディスプレイ装置が提示する触覚刺激は、実世界の物体に触れた時に生じる触感に近似させる必要がある。触原色原理によれば、任意の触感力は力・振動・温度の 3 つの触原色パラメータで再現することができる。

しかし、実世界にある様々な物体の中には、その触感の再現に力・振動・温度の 3 触すべての提示が必須なもの、3 触のうちのいずれかの要素だけで触感が十分再現できるものがある可能性がある。実際の触覚ディスプレイ装置の中には、振動だけ提示可能なものや、振動と温度が提示可能なものなど、様々なバリエーションがあり得る。そのため、材質ごとの触感を再現するのに必要な最小限のパラメータを同定すれば、各構成の触覚ディスプレイ装置でそれぞれ表現可能な触感の範囲が間接的に明らかにすることができ、応用上の大きな意味を持つ。

そこで、本システムでは力・振動・温度の 3 つの触原色パラメータを個別に操作可能な触覚ディスプレイ装置を用いて、バーチャル触感を様々な生成し評価できるような触覚提示システムを構築する。具体的には、物体ごとに異なる触感をユーザに提示するために、装着型と遭遇型の 2 種類の触覚ディスプレイ装置を使用する。なお、装着型の触覚ディスプレイとは直接ユーザの身体に取り付ける装置であり、遭遇型の触覚ディスプレイとはユーザの動きに合わせて背後でマニピュレータが動き必要に応じてユーザに適切に接触することでバーチャル物体に触れた時の抵抗感や表面形状を再現する装置である。そのうち、振動素子や温度素子を組み込んだ装着型の触覚ディスプレイ装置を用いることで皮膚表面への 2 触提示を実現するのは容易である。一方で、物体をなぞった際の凹凸による皮膚変形や、物体を押し込んだ際の筋緊張など力提示の実現は容易ではない。GravityGrabber[9]のような装着型の力提示ディスプレイも提案されているが、モータを使うためデバイスの小型化が難しく指先に装着した時の取り回しが難しい。そのため、装着型の触覚ディスプレイ装置は主に振動と温度の 2 触提示に特化させ、力提示は別の触覚ディスプレイで補完するのが合理的だと考えられる。田島らの先行研究[6]においても、深部感覚の刺激には装着側デバイスとは別の設置型デバイスが用いられていた。それに対して、本システムでは装着型と遭遇型の 2 種類の触覚ディスプレイを用いる。装着型の 2 触覚ディスプレイには、皮膚の感覚受容器が知覚できる範囲の振動と温度の提示を行う機能が求められる。ヒトの振動受容器に関して、マイスナー小体は振動変位 40Hz 付近で約 $10\mu\text{m}$ 、パチニ小体は振動変位 200Hz 付近で約 $0.1\mu\text{m}$ の範囲の振動を知覚する。また、温覚受容器に関して、自由神経終末は約 $15\text{--}45^{\circ}\text{C}$ の範囲の温度を知覚する。したがって、上記を満たす範囲の振動と温度の提示可能なデバイスが必要である。一方で、力提示に用いる遭遇型の触覚ディスプレイには、ユーザの動きに合わせてマニピュレータが動き、VR 空間内でユーザが触れるバーチャル物体の材質の硬さに応じた圧力を提示できる機能が求められる。したがって、ユーザに圧覚を生じさ

せる触覚素材をユーザの指先に移動させるためのロボットシステムが必要である。この触覚素材は指で押した際に触圧覚の感覚閾値 $0.3\text{--}0.5\text{gf/mm}^2$ 以上の反発力を持つ硬さの素材が必要である。また、このロボットシステムはユーザの手の動きをカバーする広い空間可動範囲を持ち、様々な材質の触感を再現するために複数の触覚素材を切り替える機能を備えることが必要である。

上記に挙げた要求仕様に基づき、実際に構築した VR 触覚提示システムの詳細を次節より述べる。

3 VR 触覚提示システム

3.1 VR 環境

VR 環境の構築には既存の 3D ゲームエンジン (Unity 2017.3) を用いた。VR 空間にはユーザの手の位置と姿勢方向に同期して動くアバターハンドと、実際の触覚材質試料を模したバーチャル物体が置かれた (図 1)。各物体にはそれぞれ固有の材質情報が埋め込まれており、アバターハンドの指先が触れることで先行研究[6]で同定された物理パラメータが後述の触覚ディスプレイ装置に送られ、ユーザの指先に各材質に対応する触感が提示された。遭遇型触覚ディスプレイ装置の可動範囲の制約から、空間内に配置できる試料の大きさや数には制限があった。今回の VR 環境では 8 つのバーチャル物体 ($7\text{cm} \times 7\text{cm} \times 2\text{cm}$ の試料板) を縦 2 列に並べて配置した。各バーチャル物体は材質ごとの画像テクスチャが張られており、視覚的にも材質を区別できた。これらのバーチャル物体は、ユーザに対して斜め 45° 傾いた角度で空間上に置かれて、ユーザはこの VR 環境をヘッドマウントディスプレイ (Oculus CV2, Oculus Inc.) を通じて体験した。また、ユーザの装着するヘッドマウントディスプレイと装着型触覚ディスプレイ装置 (3.2 節) には、ユーザの身体運動を計測するためのモーションキャプチャ (3.3 節) のマークが取り付けられていた。

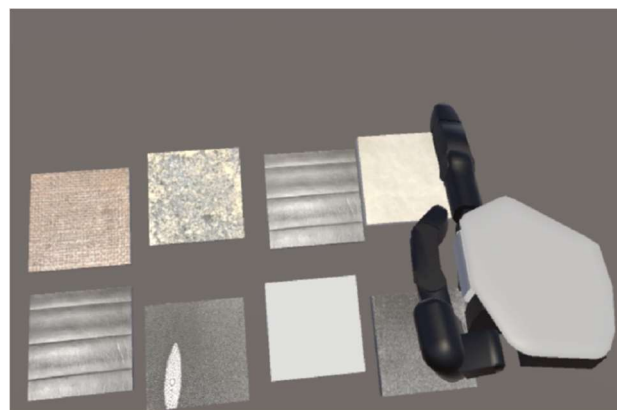


図1 ユーザが体験する VR 空間

Fig.1 VR space for the system user

3.2 装着型触覚ディスプレイ装置

バーチャル物体とアバターハンドが触れた際、ユーザの指先に振動と温度を提示するため、グローブ形状をした装着型触覚ディスプレイ装置を用いた(図 2)。グローブは布製で人差指以外は指サックがない形状であった。グローブの指先と甲部には、JST-ACCEL 身体性メディアプロジェクトによって開発された 2 触覚提示モジュール[10]とその制御基板が取り付けられており、ユーザの指に振動・温度の 2 種類の刺激による触覚提示を行った。この 2 触覚モジュールは縦 14mm、横 27mm、厚み 8mm の直方形で、振動素子とペルチェ素子が組み込まれており、甲部にある制御基板で制御される。振動素子は人間の皮膚の振動受容器の特性に合わせて設計されており、マイスナー小体(反応閾値:10 μ m@40Hz)およびパチニ小体(反応閾値:0.1 μ m@200Hz)を効果的に刺激することが可能である[4]。

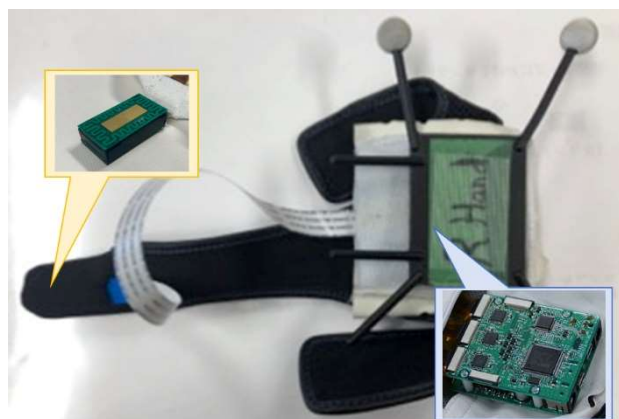


図2 振動温度提示グローブ

Fig.2 Vibration/temperature presentation glove

ペルチェ素子は最大 10°C の冷却が可能であり、これは冷覚神経の発火が最大になる至適温度 25–30°C に対して十分な冷却性能である。ただし、ペルチェ素子は駆動電圧によって熱効率が変動しやすい特性があり、駆動電圧に比例した冷却温度が得られない。そのため、本システムではペルチェ素子の駆動電圧を 5.0V に固定し、電圧を印加する時間長を変えることで冷却温度を制御した。

この 2 触覚ディスプレイ装置を用いて、各材質の触感を再現する振動・温度の刺激をユーザに提示した。その際に用いた各材質に対するパラメータセットは田島らの先行研究[6]で同定した値を用いた。表 1 に本システムで触感の再現を行った材質試料の一覧と、その振動・温度パラメータを示す。なお、振動パラメータはモジュール内の振動素子が出力可能な最大振幅を 1.0 として 0–1 に正規化した値であり、温度パラメータはモジュール内のペルチェ素子に印加する実効電圧を 1 秒毎に PWM 制御で変化させた duty 比の値を示している。

表1 試料ごとの振動温度パラメータ

Table 1 Vibration/temperature parameters for each sample

試料名	振動	温度
アルミ	0.17	0.337
綿	0.30	0.000
MDF	0.29	0.037
ウレタン(薄)	0.49	0.000
ウレタン(厚)	0.70	0.037
砂壁	0.97	0.037
畳	1.00	0.000
エイ革	0.51	0.000
ゴム(薄)	0.49	0.000
ゴム(厚)	0.46	0.000
タイル	0.23	0.150
麻	0.89	0.000
紙粘土	0.11	0.075

3.3 モーションキャプチャ

VR 空間内にあるアバターハンドを実世界のユーザの手の動きに同期して動かすため、光学式モーションキャプチャ装置(Acuity Inc. OptiTrack, Prime13/13W)を使用した。8 台の計測用カメラはユーザの全身運動を常に捕捉できるよう約 1.5m×1.5m×2.5m の計測ブース周辺を覆うように設置された。ヘッドマウントディスプレイと振動温度提示グローブに取り付けたモーションキャプチャの計測用マーカーがユーザの身体運動をリアルタイムに計測し、アバターハンドの提示位置・姿勢を設定した。また、この計測用マーカーは遭遇型触覚ディスプレイ装置(後述)にも取り付けられ、VR 空間内のバーチャル物体とアバターハンドの間の位置の補正に用いられた。

3.4 遭遇型触覚ディスプレイ装置

ユーザがバーチャル物体に触れた時の材質の硬さによる反発力をユーザの指先に提示するため、触覚素材を実世界のユーザの手元に移動させる遭遇型の触覚ディスプレイ装置を開発した。なお、田島らの先行研究[6]で用いられた深部感覚提示デバイスは設置型で、バーチャル物体がある位置まで移動して反力提示を行う機能がなかったため、本研究では新たに別の遭遇型ディスプレイを用いた。具体的には、デルタ機構による広い可動範囲を備えた 6 自由度ロボット(図 3)を遭遇型ディスプレイのアクチュエータとして用い、バーチャル物体の位置や材質の種類に応じて硬さの異なる触覚素材をユーザの手元で適切に移動させることで、バーチャル物体に触れた時の反力提示を行った。このロボットは本来テレイグジスタンスのための頭部ロボットとして開発されたもの[11]を遭遇型の触覚ディスプレイに転用したものであり、広い可動範囲と早い応答性を備える。並進自由度は前後±20cm、左右±17cm、上下±10cm であり、回

転自由度はロール軸 $\pm 51^\circ$, ピッチ軸 $-40^\circ \sim +60^\circ$, ヨー軸 $\pm 100^\circ$ である[11]. 本システムの遭遇型ディスプレイとしてロボットの並進自由度のみを制御し, 回転自由度は用いなかった.

ロボットの頭部に相当する場所に据え付けられた触覚素材の提示部(図 4)は, VR 環境の試料板と同様にユーザに対して斜め 45° 傾いた角度に固定され, 傾斜角を維持したまま各軸方向に並進移動した. また, このロボット頭部の動きは前述のモーションキャプチャで計測され, 実世界と VR 空間の間の位置の校正に用いられた. この触覚素材の提示部を, VR 環境でアバターハンドの指先がバーチャル物体の 5cm 以内に接近した時に, 実世界においてユーザの指先の前に移動させて待ち構えることで, バーチャル物体の触覚提示を行った. 触覚素材は VR 空間内のバーチャル物体の試料版と同サイズ(7cm $\times$ 7cm $\times$ 2cm)であり, ユーザの接触を待ち構えている間, 実世界の触覚素材と VR 空間内のバーチャル物体は全く同じ位置に固定されていた. ユーザが物体に触れて指先で表面を押しても, 実物体の方はロボットのアクチュエータが抵抗することで触覚素材は同じ空間位置を保持し続け, バーチャル物体の方もアバターハンドの指先がその表面をなぞるだけで位置は変化しなかった.



図3 遭遇型ディスプレイのための6自由度ロボット
Fig.3 6DOF robot for encounter-type haptic display

3.5 カパラメータ

触覚素材には, 表面の硬さ(反発力)が異なる4種類の素材が用意され, 柔らかいものから順に, 素材1, 2, 3, 4と名付けられた. いずれもゴム素材から成り, ゴムの種類と厚み, 下地の違いによって硬さが調整された. 各素材の具体的な構成とデュロメータ硬さ(JIS K6253 準拠タイプ A, 押付荷重:約 10N にて計測)は, それぞれ以下の通りである. 素材1:中央部を中空にした 10mm 厚ウレタン下地の上に 0.5mm 厚ゴムシートを張り付けて

内部に綿を封入(硬度 20 未満). 素材2:10mm 厚ウレタン下地の上に 2mm 厚スポンジゴムシートを張り付け(硬度 20). 素材3:4mm 厚 MDF 板下地の上に 2mm 厚多孔質ゴムシートを張り付け(硬度 35), 素材4:4mm 厚 MDF 板下地の上に 3mm 厚ゴムシートを張り付け(硬度 65). なお, 素材1に関しては, 荷重により表面がたわみ正確な値を計測できなかった. また, 全ての触覚素材の表面には同一のフッ素樹脂テープが均一に張り付けられており表面摩擦が一定にされていた.

この遭遇型ディスプレイ装置を用いて各材質の触感を再現させるに当たり, どの触覚素材が各材質についての適切な触圧覚を提示できるのか明確ではなかったため, 事前に4名の実験参加者による主観評価実験を行い, 各材質に対応した触覚素材(力パラメータ)を同定した. 評価実験では, 実験参加者は左手の人差指で実際の触覚試料(13種類)を触りながら, 同時に右手の人差指で力提示用の触覚素材(4種類)に触れた. 左右の指で感じた実試料と触覚素材の間の触感との類似度を試料ごとに7段階で評価してもらい, 参加者全員の平均評定値を算出することで, 平均評定値が最も高くなった触覚素材を, その実試料の材質に対応した力パラメータ(触覚素材の硬さ)に採用した. なお, この事前の評価実験の手続きは4節で述べる実験とほぼ同一であり, 以下の2点, 1. 遭遇型ディスプレイ装置を単体で使い装着型ディスプレイは用いなかったこと, 2. ひとつの実試料に対して4種類の触覚素材を全て割り当てて類似度の評価をそれぞれ行ったことが異なっていた.

この事前の評価実験によって同定された各試料の力パラメータを表2に示す. 今回用意した13種類の試料に関して, 各試料に対応した触圧覚をもたらす触覚素材のデュロメータ硬さは, 20未満の比較的柔軟な素材と, 65の比較的硬い素材の二つに大きく大別され, 20から35の中程度の硬さ(一般的なゴム素材の数値)の素材は, 試料それ自体がゴム素材のものを除いてはあまり現れなかった.

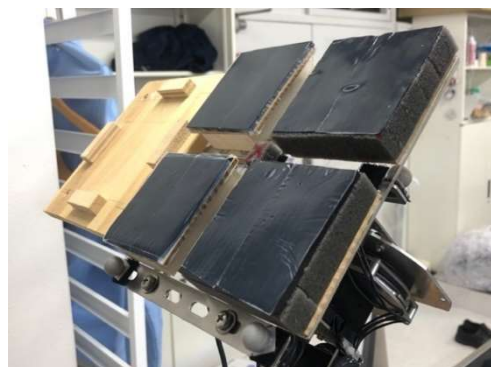


図4 触覚素材の提示部
Fig.4 Presentation place of haptic materials

表2 試料ごとのカパラメータ

Table 2 Force parameters for each sample

試料名	触覚素材	デュロメータ硬さ
アルミ	素材4	65
綿	素材1	<20
MDF	素材4	65
ウレタン(薄)	素材1	<20
ウレタン(厚)	素材2	20
砂壁	素材4	65
畳	素材4	65
エイ革	素材4	65
ゴム(薄)	素材3	35
ゴム(厚)	素材1	20
タイル	素材4	65
麻	素材4	65
紙粘土	素材1	<20

4 実験

開発した VR 触覚提示システムを用いて、システムが提示するバーチャル触感のリアリティを評価して、材質ごとの触感のリアリティに寄与する物理パラメータ(触原色)が何かを明らかにすることを目的とする 2 つの実験を行った。

4.1 実験 1

先行研究[6]および 3 節の評価実験で物理パラメータが同定された 13 種類の材質試料に関するバーチャル触感を VR 環境下で提示されたとき、現実の試料とどれほど類似した触感として知覚されるかを調べた。その際、バーチャル触感を提示する 2 種類の触覚ディスプレイのうち、振動・温度の提示を行う装着型ディスプレイだけで 2 触覚提示を行った場合と、力提示を行う遭遇型ディスプレイも含めた 3 触覚提示を行った場合での類似度の違いを調べることで、各試料の触感再現に必要な物理パラメータを検討した。

4.1.1 方法

実験に用いた材質試料は、表面が滑らかな物や粗い物、摩擦が小さい物や大きい物、圧に対して硬い物や柔らかい物、冷たさを感じる物から温もりを感じる物まで様々な素材から構成された(アルミ板、タイル板、ゴム 2 種類、MDF 板、綿、畳、ウレタン 2 種類、麻、エイ革、紙粘土、砂壁)[6]。これらの材質試料は規格化された 10cm×10cm 角の試料台の上に、できるだけ接触面が平坦になるように加工された状態で取り付けられ、実験参加者が指先でなぞって触れられるようになっていた。これら 13 種類の実試料に対して、それに対応するバーチャル

触感の物理パラメータが VR 触覚提示システムから提示され、両者の類似度が評価できるようになっていた。

20-30 代の男女 5 名が実験に参加した。実験では、参加者はヘッドマウントディスプレイと装着型ディスプレイ(振動・温度提示グローブ)を装着して VR 空間にあるバーチャル物体を観察した。参加者の右前方には遭遇型ディスプレイ(6 自由度ロボット)が置かれて、VR 空間内のアバターハンドとバーチャル物体の位置関係に応じて遭遇型ディスプレイの触覚提示部が移動した。また、参加者の左前方には実試料を置く試料台が設置されていた。実験参加者の課題は、VR 空間内にあるバーチャル物体を右手と連動して動くアバターハンドの人差指で触りながら、同時に、左手の人差指で実試料を右手と同じように触って、左右の指で感じる触感の類似度を評価することであった。その際、3 触提示条件では装着型グローブと遭遇型ディスプレイの両方が触覚刺激の提示を行ったのに対して、2 触提示条件ではバーチャル触感の提示は装着型グローブのみで行われ遭遇型ディスプレイは使われない(触覚素材がバーチャル物体の場所に移動せず右手の人差指が空を切る)状態だった。

触感類似度の評価は、左右の指で実試料とバーチャル物体を上から下になぞる動作を 3-4 回行った後、7 段階のリッカート尺度(-3:全く似ていない, -2:ほとんど似ていない, -1:あまり似ていない, 0:どちらとも言えない, +1:少し似ている, +2:だいたい似ている, +3:非常に似ている)を用いた口頭解答で行った。参加者ごとに、13 試料と 2 刺激条件をランダムな順序で合計 4 回繰り返して、その平均値を各参加者の評価結果として採用した。

4.1.2 結果

図 5 は参加者 5 名の平均値で求めた各試料のバーチャル触感の類似度の評価結果を、2 触提示条件と 3 触提示条件ごとに示したものである。

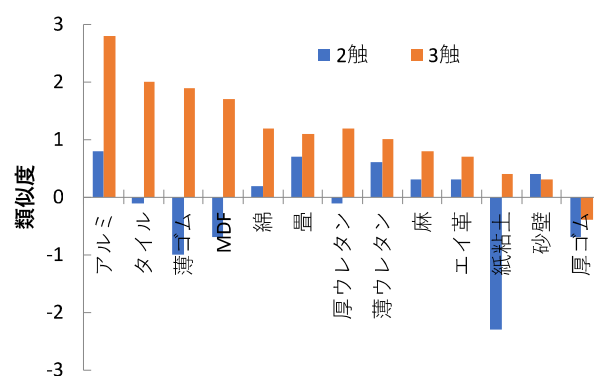


図5 各試料に対する 2 触・3 触提示での触覚類似度

Fig.5 Evaluated sensory similarities of two or three colors presentation for each sample

図 5 から、本システムが提示可能な全ての物理パラメータでバーチャル触感を再現した 3 触提示条件に比べ

て、振動と温度の物理パラメータだけを触感を再現した 2 触提示条件では類似度の評定が全体的に低いことが示された。2 触提示条件の中で最も評価値が高かったアルミや畳などの素材でも、その値は 1 未満であるのに対して、3 触提示条件の場合は半数以上の試料で 1 以上の値であり、ほぼ全ての試料のバーチャル触感は力提示が与えられることでリアリティが向上することが分かった。3 触提示条件の中で類似度が特に高かったのはアルミやタイル、薄ゴムなどの試料であった。その一方で、砂壁や厚ゴムは 3 触提示条件でも類似度はそれほど高くなかった。また、2 触提示条件と 3 触提示条件の間での類似度の変化に着目すると、薄ゴム薄や紙粘土に関するバーチャル触感の類似度が特に向上することがわかった。それに対して、砂壁や厚ゴムなどのバーチャル触感では 2 触提示・3 触提示どちらの場合でも類似度は全体的に小さかった。

4.1.3 考察

本研究で開発した VR 触覚提示システムを用いて VR 環境下におけるバーチャル触感の類似度を評価した結果、材質の種類によって程度は異なるものの力・振動・温度の 3 触提示のバーチャル触感では比較的リアリティがある（＝実試料と類似した）感覚として知覚されることが分かった。それに対して、振動・温度の 2 触提示条件でのバーチャル触感のリアリティは低いことから、物体を触った時の反発力が存在することが触感のリアリティに大きく影響することが示唆される。しかし、材質によっては 2 触提示条件でも比較的類似度が高いと評価され、それに力提示（触圧覚）が加わっても類似度の向上がそれほど顕著ではない試料（例：畳）も存在した。その原因として考えられるのは、本システムで用いた触圧覚を提示するための触覚素材は全て表面が平坦でマクロな表面粗さが存在しないことである。装着型グローブで提示した振動刺激は、比較的滑らかな面の微細な粗さを表現することはできても、面自体のマクロな凹凸による皮膚変形は再現できないため、その点を実試料とバーチャル触感の間の違和感として生じていた可能性がある。その反対に、3 触提示を行うことで類似度が顕著に向上した試料（例：薄ゴム、MDF、綿など）については、指で押した時の反発力が材質の触感を特徴付けるための主要なパラメータであることを示唆する。また、2 触提示でも類似度が比較的高く、3 触提示により更に向上した試料（例：アルミ）については、力・振動・温度いずれも触感の再現に必要なパラメータであることを示唆する。ただし、これらの推察はあくまで 2 触提示と 3 触提示の条件の二つを比較した際の定性的な分析に留まるため、各パラメータが触感のリアリティにどのように影響するかという定量的な違いを明らかにするためには、よりシステムチックな調査が必要である。

4.2 実験 2

実験 1 において実試料と特に似ていると評価されたバーチャル触感に対して、その触感を再現するための主要な触原色パラメータがどれなのか明らかにして、その重要度を定量化することを目的とした。開発した VR 触覚提示システムによって制御可能な振動・温度・力の 3 種類の触覚刺激の提示パターンを切り替えて、その組み合わせによる類似度の評定値の変化から各試料における各触原色パラメータの寄与率の大きさを重回帰分析によって評価した。

4.2.1 方法

20-30 代の男女 7 名が実験に参加した。実験 1 において類似度が高いと評価された 6 種類の触感（アルミ、綿、MDF、畳、薄ゴム、タイル）に対して、1 触提示（力、振動、温度）、2 触提示（力＋振動、振動＋温度、温度＋力）、3 触提示（力＋振動＋温度）の 7 通りの刺激提示パターンの組み合わせについて、実験 1 と同様の手続きによって触感類似度の評価を行った。ただし、実験 2 ではより細かな触感の違いを計測するために、類似度の評価点を 7 段階から 11 段階（0：全く似ていない、10：非常に似ている）に増やした。全ての実験参加者から得られた評価データを用いて、触覚刺激の提示の有無を独立変数、各試行で答えられた類似度の評定値を従属変数とする以下の線形重回帰モデルに当てはめた。

$$y = \alpha x_{force} + \beta x_{vib} + \gamma x_{temp}$$

ここで、 α 、 β 、 γ は力・振動・温度の各刺激を提示が触感の類似度を与える影響力の大きさを示した寄与度（重み係数）であり、 x_{force} 、 x_{vib} 、 x_{temp} は各触覚刺激の提示があったかどうかを 0 または 1 で表現するダミー変数である。この重回帰分析によって、各試料の触感類似度に寄与する触原色パラメータの種類とその影響度の大きさを求めた。

4.2.2 結果

図 6 は重回帰分析によって得られた試料ごとの触原色パラメータの重み係数を示したものである。棒グラフ上部の*は 5% 有意水準で有意差が認められたことを現す。この図から、試料ごとにその触感を再現するために必要な触原色パラメータの種類やそのウェイトの比率は異なっているものの、いずれの試料も力提示がその触感のリアリティ向上に大きな役割を担っていたことが分かる。振動刺激に関しては、表面が滑らかで振動に関する特徴が小さいと思われる試料（アルミ・タイル）を除いては触感のリアリティ向上に寄与していた。温度刺激は、実験 2 で使用した材質試料ではアルミだけが触感リアリティに寄与した。

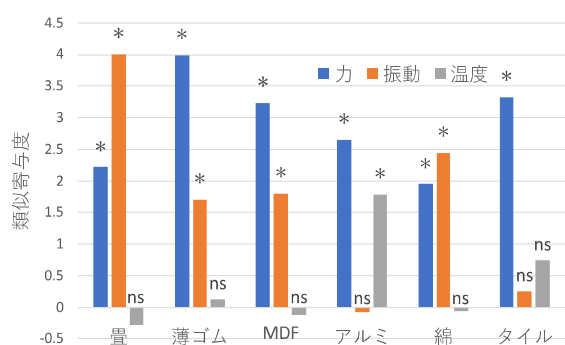


図6 各試料に対する3触ごとの触感寄与度

Fig.6 Estimated contribution ratios of primary colors for each sample

4.2.3 考察

本システムにおいて比較的リアリティの高いバーチャル触感の提示が可能な6種類の試料について、どの触原色パラメータの寄与が各試料にとって重要であるかを重回帰分析によって調べた結果、全ての試料において力パラメータ(触圧覚)の存在が重要であることが示された。この力提示は硬さの異なる様々な触覚素材によって行われたものであり、それぞれの試料にとって適切な反発力が与えられることが触感の再現に寄与したと考えられる。特に、田島らの先行研究[6]においてバーチャル触感の再現性が良くなかった非常に柔らかい試料(綿)についても、本実験では比較的高い評定値が得られたことから、本システムではそれらの試料を表現するのに妥当な触圧覚を提示できたことを示唆する。また、いくつかの試料では、振動パラメータや温度パラメータが力パラメータと同程度かそれより大きくなっていた(振動:量・綿, 温度:アルミ)。これは、それらの試料が振動や温度の次元に主要な特徴情報を有していることを示唆している。そのため、提示するバーチャル物体の材質によっては、振動や温度だけの触覚刺激でもその触感を十分表現できる可能性がある。例えば、Ho & Jones[2]は、本システムで用いた装着型ディスプレイと類似した温度提示デバイスを用いて指で物体に触れた際の熱変化をシミュレーションすることで様々な物体の触感の再現ができることを示している。一方、本システムでは、試料ごとに振動素子の振動振幅やペルチェ素子の駆動時間を変化させていたものの、接触部における機械的な共振や熱移動の厳密なシミュレーションは行っていない。それに関わらず、本システムで提示したバーチャル触感が実試料と比較的類似したものと知覚されていることは、VRの触覚提示において厳密な物理シミュレーションモデルを用いることは必ずしも必要でない可能性を示唆している。例えば、Kajimotoの電気触覚ディスプレイ[7]は、触覚の提示に力や振動などの物理刺激そのものではなく電気刺激を用いてユーザに触覚提示を

行うものである。つまり、人間の知覚を再現するためには物理現象を正確に再現することよりも、感覚系に適切な入力を与えることの方がVRの観点からは重要であり、それが触原色原理の主張でもある。本システムの3触提示ディスプレイ装置は各試料に関する物理的な特性を厳密に再現していないに関わらず、それらに類似した触感を知覚させたことは、システムが提示した物理刺激と実際の物理刺激が人間の感覚系にとって等価な入力であったことを示唆している。しかし、各試料に対するバーチャル触感の類似度の評価点は最大でも7/10程度であり、実物と区別が付かないというほどではなかった。そのため、熱移動シミュレーションなどの細かな表現を触覚提示システムに組み込む手法は依然として有効だと思われる。逆に、そのような細かなシミュレーションを行わなくても、力・振動・温度の触原色パラメータを適切な組み合わせで提示することで、ある程度のリアリティを持つ触感表現が可能であることが今回の実験から示された。

5 まとめ

本研究ではVR空間内の物体に対して、力・振動・温度の3つの物理パラメータを提示することでバーチャル触感を付与するVR触覚提示システムを構築した。このシステムを用いたバーチャル触感の評価実験によって、各材質試料の触感の再現するために重要な触原色パラメータを明らかにして、先行研究との類似点や相違点を検討した。今後の課題としては、本システムが提示するバーチャル触感に関してのオノマトペ評定を行い、田島らの先行研究[6]で行われた実試料に対するオノマトペの評定結果と比較することで、このシステムが提示する触感が本当の意味で元となった実試料と同等の触感(つるつる, ざらざら, など)を再現できているかを調べることが挙げられる。また、皮膚変形に関するせん断力の提示を行うことも挙げられる。さらに、VR空間内にあるバーチャル物体の視覚的なテクスチャ情報と触覚情報の間の整合性を操作することで、VR触覚提示システムが提示するバーチャル触感が視覚情報によってどのように修飾されるかを調べることも重要である。これらの研究を通じて、よりリアリティのあるVR触覚提示技術の開発につながることが期待される。

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] S. Kamuro, Y. Takeuchi, K. Minamizawa and S. Tachi: Haptic Editor; ACM SIGGRAPH ASIA 2012 Emerging Technologies, Singapore (2012.12)
- [2] H. H. Ho, and L. A. Jones: Development and evaluation of a thermal display for material identification and discrimination, ACM Trans Appl Percept., 4(2), pp.1-24, 2007.
- [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(749), pp.132-140, (2009.1)
- [4] M. Nakatani, K. Sato, K. Sato, Y. Kawana, D. Takai, K. Minamizawa, S. Tachi: A novel multimodal tactile module that can provide vibrothermal feedback; AsiaHaptics, (2016.11)
- [5] S. Tachi, K. Minamizawa, M. Furukawa and C. L. Fernando: Haptic Media; Construction and Utilization of Human-harmonized "Tangible" Information Environment, Proceedings of the 23rd International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT), Tokyo, Japan, pp.145-150 (2013.12)
- [6] 田島優輝, 加藤史洋, 井上康之, 舘障: 力・振動・温度を触覚色とする触覚提示デバイスにおける触覚再現手法; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.24, no.1, pp.125-135 (2019.3)
- [7] H. Kajimoto: Electro-tactile Display with Real-time Impedance Feedback using Pulse Width Modulation, IEEE Trans. on Haptics, vol.5, no.2, pp.184-188, 2012.
- [8] 舘障, 佐藤誠, 廣瀬通孝監修, 日本バーチャルリアリティ学会編: バーチャルリアリティ学; コロナ社
- [9] K. Minamizawa, S. Fukamachi, H. Kajimoto, N. Kawakami, and S. Tachi. Gravity grabber: wearable haptic display to present virtual mass sensation. In ACM SIGGRAPH 2007 emerging technologies, SIGGRAPH '07, New York, NY, USA, 2007. ACM.
- [10] JST-ACCEL 身体性メディアプロジェクト: 触覚提示グローブ; https://tachilab.org/jp/accel_project.html
- [11] 山崎喬輔, 井上康之, MHD Yamen Saraiji, 加藤史洋, 舘障: 統合的な視触覚刺激がテレグジスタンスにおける自己位置定位に与える影響; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.23, no.3, pp.119-127 (2018.9)

(2019年7月4日受付)

[著者紹介]

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 年豊橋技術科学大学大学院博士後期課程電子・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学研究科特

任助教, 2014 年三重大学工学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)。

中 郁己 (非会員)



2017 年東京理科大学基礎工学部電子応用工学科卒業。2019 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。現アセットマネジメント One 株式会社。

加藤 史洋 (正会員)



2008 年電気通信大学電子工学科・卒業, 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・博士課程にて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・舘研究室での ACCEL 身体性メディアプロジェクトにて特任研究員としてテレグジスタンス, バーチャルリアリティ, 触覚インタフェースなどの研究に従事。博士 (工学)。

舘 障 (正会員・フェロー)



1968 年東京大学工学部計数工学科卒。1973 年同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・特任教授・特別招聘教授を務める。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テレグジスタンス, バーチャルリアリティなどの研究を推進。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。