

# 五感への感覚刺激提示技術の開発

栞野 晃希, 前田 大輔, 泉 巖, 川崎 佑太

## Development of Technology for Presenting Sensory Stimuli to the Five Senses

Koki KUWANO, Daisuke MAEDA, Iwao IZUMI, Yuta KAWASAKI

### 抄 録

VR（仮想現実）空間と現実空間との複合現実環境を構築して機械設計業務や旅行の疑似体験に活用する技術が進展している。しかし、VR空間で扱われる感覚情報は主として視覚・聴覚であるため現実空間との間に感覚の差異が生じ、VR空間では十分な臨場感・操作感を得ることができないことが課題となっている。そこで、VR空間における臨場感や操作感を創出するため、視覚・聴覚を含めた人の五感に訴える感覚刺激の提示技術を開発した。具体的には、VR空間における手指による物体操作を対象として、手指に装着した振動装置により物体への接触や持ち上げ時の触覚および反力を疑似的に生成できる疑似力覚生成装置の開発と、送気装置（ブロウ）を用い香料を送気して匂いを提示する嗅覚刺激提示装置の開発を行った。

キーワード：五感, 感覚刺激, 触覚, 嗅覚, VR

### 1. はじめに

サイバーフィジカルシステム、デジタルツイン、VR（仮想現実）等の概念や技術が身近になってきている。私たちの身体が存在する現実空間からコンピュータ上に作られたVR空間にアクセスして分析やシミュレーションを行い、現実空間にフィードバックするこれらの技術は、既にロボットの遠隔作業や機械設計業務の効率化、また旅行の疑似体験などに活用されている。たとえばVRゴーグルは、サイバー空間に作った仮想的な環境や物体をゴーグルのディスプレイやヘッドフォンに提示することで操作者が現実空間に存在するような錯覚を抱かせ、適切な判断や操作を可能とする装置である。

VR空間において環境や物体を認識するために利用されている感覚は、五感のうち視覚と聴覚が主だったものである。そのため、五感を利用している我々にとって、環境や物体を認識するには、これらの感覚だけでは不十分であり、実体験との乖離やVR空間からフィードバックされた情報が十分に伝わらないといった課題がある<sup>1)</sup>。

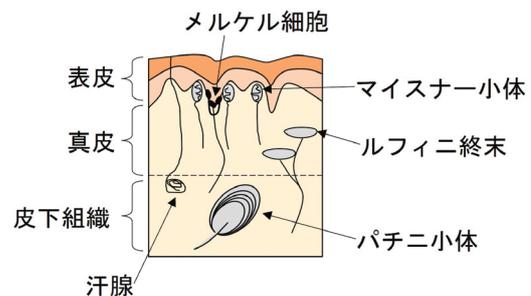
そこで、本研究では遠隔作業時のVR空間における臨場感や操作感を創出するため、視覚・聴覚以外の感覚である「触覚」と「嗅覚」に着目し、これらの感覚を利用するための刺激提示技術の開発に取り組んだ。

### 2. 感覚刺激提示技術の開発

#### 2.1 触覚刺激提示技術

##### 2.1.1 触覚刺激による疑似力覚生成装置の開発

触覚とは皮膚に物体が触れたときに生成される感覚であ



マイスナー小体：荷重変化に反応  
数 Hz ~ 200 Hz

メルケル細胞：荷重強度に反応  
DC~100Hz

パチニ小体：荷重の発生に反応  
約 70 ~ 1000 Hz

ルフィニ終末：皮膚変形に反応  
変位

図1 機械受容器と振動検出能力

事業名：経常研究

課題名：五感による擬似的な経験創出のための感覚刺激生成技術の開発

る。人の皮膚には振動や皮膚の伸展等に反応する、機械受容器と呼ばれる微小な神経の終末部がある。特に手足の指腹部や手のひら等のヒトの無毛部には、主要な機械受容器としてパチニ小体、マイスナー小体、メルケル細胞、ルフィニ終末の4種類が存在している<sup>2)</sup>。これらの機械受容器はそれぞれ、刺激への応答性が異なる(図1)。これらの応答は、刺激を受けた瞬間の応答(ダイナミック応答)と、刺激を受け続けている際の応答(スタティック応答)の2種類に分類される。さらに、これらの機械受容器に与えられる刺激の特性により、様々な錯覚が生じることが知られている。たとえば、一方に強い加速度と逆方向に弱い加速度をもつ非対称振動を受けた場合、振動しているにもかかわらず一方に牽引される感覚(疑似力覚)を誘発する<sup>3,4)</sup>。

そこで、本研究では触覚刺激による力覚の生成とその明瞭度を調べるため、疑似力覚生成装置を開発した。非対称振動の発生に利用できる振動装置として、重りを回転運動、あるいは往復運動をさせる方式(図2左上)、金属板を変形させる圧電方式(図2右上)、スピーカの仕組みを使ったスピーカ方式(図2中央下)などの振動装置が市販されている。今回、皮膚の機械受容器の振動検出能力に幅広く対応可能で、強い振動を発生可能なスピーカ方式の振動装置(Vp2・㈱アクーヴ・ラボ製)(以下、振動スピーカ)を選定した。図3に開発した疑似力覚生成装置を示す。

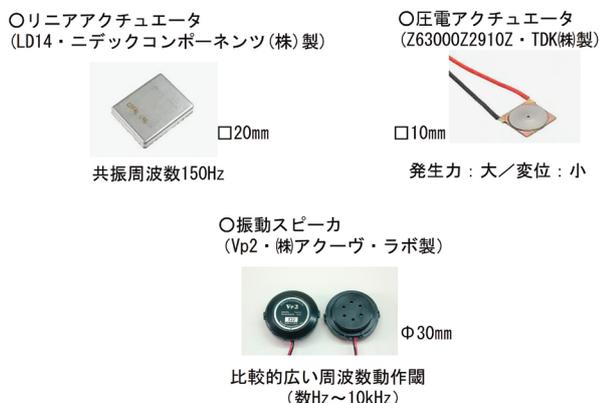


図2 振動装置と特性

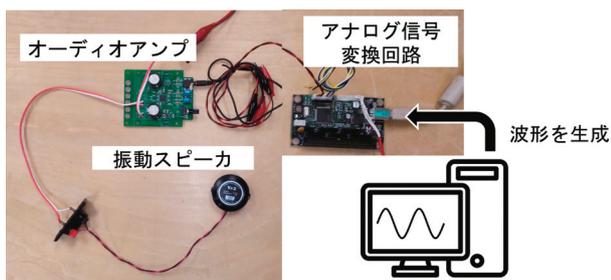


図3 疑似力覚生成装置

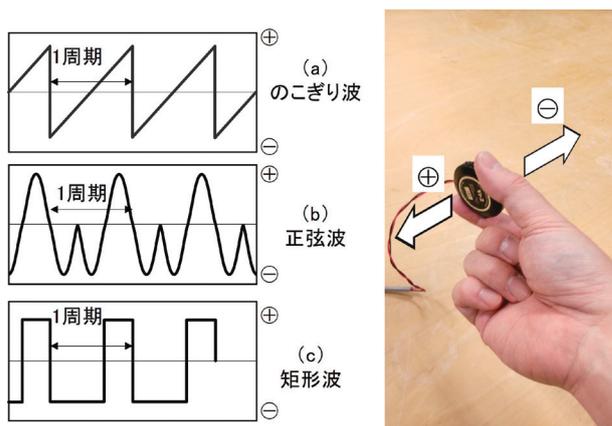


図4 非対称振動による疑似力覚の生成

### 2.1.2 疑似力覚の生成

振動波形として正負に非対称な形状を有する、(a) のこぎり波、(b) 正弦波の組み合わせ、(c) 矩形波などを選択し(図4左)、周波数やデューティ比を調整して力覚の生成と明瞭度を次のように調べた。

振動スピーカを手指で把持し、電圧振幅を一定とした(a)、(b)、(c)それぞれの波形ごとに、力覚の生成の有無と明瞭度の主観評価を行った。繰り返し周波数を20Hzから200Hzまで10Hz刻みで波形を提示し、さらに波形(c)ではデューティ比を0.6から0.9まで0.1刻みで提示した。その結果、すべての波形において繰り返し周波数が約60Hzで強く力覚を感じることがわかった。次に、繰り返し周波数を60Hzに固定し、力覚の明瞭度を各波形間での一対比較法で評価した。その結果、(a)のこぎり波で最も明瞭に力覚を感じることがわかった。

また、振動スピーカの把持方法、手指への装着方法による影響についても併せて検討した。その結果、図4右に示すように母指と示指(人差し指)や中指で把持した場合に明瞭であり、手掌や手背に配置した場合、力覚を感じることはなかった(図5)。力覚の生成方向は振動スピーカの振動方向であり、図4に示す波形の場合、+の方向に力覚が生じることが



図5 振動スピーカの把持、装着方法

わかった。このことについては、前述の機械受容器のうち、せん断変形に応答するルフィニ終末は指先に多く分布しているため、手指で把持した場合、振動方向がせん断変形を生じさせることから、力覚が生成したと考えられる。

## 2.2 嗅覚刺激提示技術

### 2.2.1 嗅覚刺激提示装置の開発

嗅覚とは鼻腔内の嗅覚受容体に匂い物質が付着することで生じる感覚である。匂い物質は揮発性の分子化合物であり、それを鼻腔に、ねらいとする濃度で届ける方法が嗅覚刺激提示技術である<sup>5)</sup>。ここで、匂い物質の揮発量を制御する方法が考えられるが、それには匂い物質を含む固体や液体を温度制御したり、また過熱対策を施すなど複雑な仕組みが必要となる。そこで、本研究では比較的容易に制御できる因子として、次の①、②に着目し、これらが嗅覚刺激濃度に与える影響を調べることにした。

- ①匂い物質（香料）を送気する量（以下、送気量）
- ②香料を放出する香料送気口と嗅覚受容体との距離（以下、香料距離）

ここで、②については、嗅覚受容体を「匂いセンサ」(VOC\*ガスセンサ、BME688・ボッシュ社製)で代替した。この匂いセンサは濃度を電気抵抗値として出力し、濃度が高いほど、低い抵抗値を示す。ただし、一般に匂いセンサは濃度に対して出力値は非線形であり、かつ同じ濃度の匂いであっても温度や湿度、気圧、また分子量に近い物質の混入等により値が変わる。したがって、本研究では濃度の絶対値でなく、一定の温湿度（室温26℃、湿度65%）とした室内における上記因子による抵抗値に基づく相対的な影響を調べた。

構築した嗅覚刺激提示装置を図6に示す。香料を送気する送気装置（送気ブロウ）として、圧電式マイクロブロウ（MZB1001T02・村田製作所<sup>6)</sup>製）を使用し、送気する香料は市販されている香料成分（ひのきオイル・アロマセラピー<sup>7)</sup>製）を使用した。同香料0.1mLを脱脂綿に含浸させ、ブロウで送気し、送気量（L/分）はブロウ電圧によって制御した（送気量はブロウ電圧と線形関係）。香料距離は150mm、200mm、300mmとし、送気量はブロウ電圧を11.5V（0.60L/分）、20.0V（1.13L/分）に設定し、香料を送気した。なお、香料入りボトルの容量は有限なため、送気前にボトル内の匂

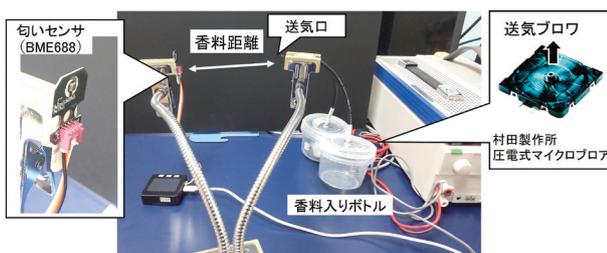


図6 嗅覚刺激提示装置

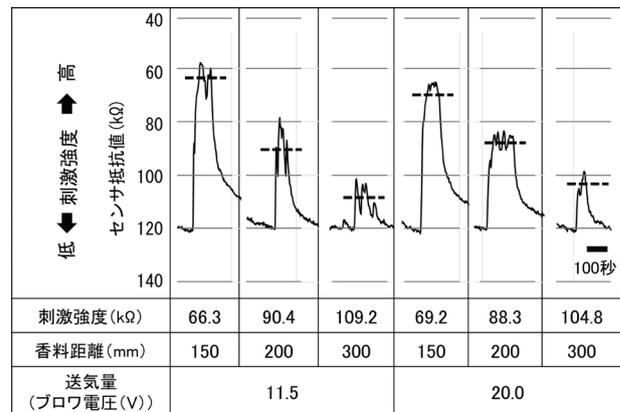
い濃度を一定値にし、さらにブロウの運転は送気を開始して匂いセンサの値が定常値と確認できた時点で停止しデータを取得した。

### 2.2.2 嗅覚刺激実験結果

実験結果を表1に示す。図の縦軸（センサ抵抗値：kΩ）は香料による嗅覚刺激濃度を表し、濃度が高いほど抵抗値は低下する。ブロウ電圧が11.5Vの場合、香料距離が大きくなるほど、匂いセンサで計測された刺激濃度が低下することがわかる。この傾向はブロウ電圧を20.0Vとした場合も同様であった。距離が大きくなるほど、香料成分が拡散することで、刺激濃度が低下すると思われる。一方、香料距離を150mmとし、ブロウ電圧を11.5Vと20.0Vとした場合の刺激濃度は大きく変わらないことがわかる。このことは、香料距離を200mm、300mmとした場合も同様であった。この結果から、本装置のような一定濃度の匂い物質を貯留し、ブロウ等で送気する方法の場合、嗅覚刺激濃度は送気量の影響を受けないこと（送気量では制御できないこと）、また香料距離に大きく影響を受けることがわかった。

(※VOC：揮発性有機化合物。植物由来の香気成分に含まれる。)

表1 嗅覚刺激強度の測定結果

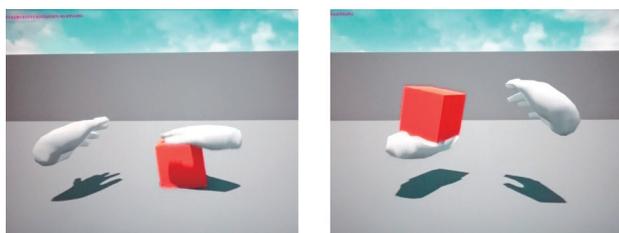


## 3. VR空間内の物体操作への適用

VR空間内に配置した3D物体の操作を対象とし、開発した感覚刺激提示技術の有効性を確認する実験を行った。図7に構築したシステムの外観を示す。VR空間内に操作対象となる立方体をUnreal Engine (Epic Games社製)で作成し、これをトラッキング装置 (LeapMotion・LeapMotion社製)で取り込んだ手指の動きに追従する手指モデルで操作する。このとき触覚刺激を提示し、立方体の操作感覚を評定した。操作は「接触」、「押しつけ」、「持ち上げ」とした(図8)。2.1.1項で説明した実験で、振動スピーカを母指と示指等の手指で把持した場合に力覚を感じやすいことを確認している。その



図7 仮想物体の操作感の評定



接触感と押しつけ

重さ

図8 仮想物体との接触、反力生成時の様子

| 操作種類              | 接触  | 押しつけ | 持ち上げ |
|-------------------|-----|------|------|
| 聴覚刺激<br>: ホワイトノイズ | ON  |      |      |
| 触覚刺激<br>: 振動      | OFF |      |      |

図9 仮想物体操作時の刺激提示

ため、グローブの同様の位置にゴムベルトで振動スピーカを装着してウェアラブルな形態とした。図9のように各操作に同期させ、触覚刺激として振動スピーカから60Hzの「のこぎり波」を提示し疑似力覚を生成した場合と、比較対象として聴覚刺激としてスピーカからホワイトノイズを提示した場合のそれぞれの操作感覚を比較した。

その結果、「接触」においては、聴覚刺激および触覚刺激のいずれによっても接触感覚が得られた。ただし、「押しつけ」と「持ち上げ」においては、聴覚刺激のみでは「接触している」ことと感覚にとどまり、触覚刺激による疑似力覚および反力によって、重さのある立方体として認識でき、実際に近い操作感覚が得られることがわかった。

#### 4. まとめ

遠隔作業の臨場感や操作感を創出するため、人の五感のうち、触覚と嗅覚に訴える感覚刺激の提示技術を開発した。VR（仮想現実）空間の手指による物体操作において、振動スピーカへ60Hzの「のこぎり波」を印加することで疑似的力覚と反力を生成し、より実際に近い操作感覚が得られることを確認した。また、送気ポンプ（ブロウ）を用いた香料送気による嗅覚刺激提示装置を開発し、嗅覚刺激濃度を制御するパラメータの一つとして、香料距離が重要であること確認した。

触覚刺激提示技術はVR空間内や遠隔からの作業において臨場感を向上させ、操作対象を的確に認識する技術として活用可能であり、また嗅覚刺激提示技術を組み合わせることで、バーチャル体験等のエンターテインメント分野を含め様々であり、場面や目的に応じて本研究成果を活用する予定である。

#### 参考文献

- 1) 古賀広志 他：仮想現実空間と観光の課題：世界遺産三重津海軍所跡の事例，情報システム学会 第12回全国大会論文集，Vol.12，S2-A.3，(2016)
- 2) 中谷正史：皮膚を支配する機械受容器と指腹部の構造的な機能，システム／制御／情報，Vol.64，No.4，pp.126-130，(2020)
- 3) 雨宮智浩：触覚・身体感覚の錯覚を活用した感覚運動情報の提示技術，基礎心理学研究，Vol.36，No.1，pp.135-141，(2017)
- 4) 小村 啓 他：触覚ディスプレイの技術動向，トライボロジスト，Vol.69，No.8，pp.572-577，(2024)
- 5) 平澤佑啓 他：嗅覚と化学：匂いという感性，化学と教育，65巻10号，pp.492-493，(2017)