

人工触感呈示システムを用いた触感認知に関する基礎研究

才脇直樹¹ 谷口まき² 吉田晃典³ 田所諭⁴

1: 奈良女子大学 2: 奈良女子大学大学院 3: 神戸大学大学院 4: 東北大学大学院

和文抄録: 我々は、高分子ゲルアクチュエータを用いて、布の触感のようなさわり心地に関する質感を再現するディスプレイの開発を行ってきた。今回は、アクチュエータで与える人工的な触感刺激が被験者にどのように感じられたかに関する評価実験と、人工的な触感刺激が脳の体性感覚野をアクティベートする様子を f-MRI で可視化し触感認知について考察した結果を報告する。

Basic Research on Brain Activity under Virtual Tactile Feeling Stimulus

Naoki Saiwaki¹, Maki Taniguchi², Akinori Yoshida³ and Satoshi Tadokoro⁴

1: Nara Women's University 2: Graduate School of Nara Women's University

3: Graduate School of Kobe University 4: Graduate School of Tohoku University

Abstract: We developed the artificial tactile feeling display using ICPF actuator. In this paper, the artificial tactile feeling stimulus generated by the actuator were evaluated by the experiments. Moreover, cerebral somatosensory area activated by the tactile feeling stimulus were observed by f-MRI. We are under consideration about tactile feeling cognition based on an experimental results.

1. はじめに

我々はデニムやタオルなどの布地を撫でたときのような触感に注目し、仮想呈示を実現するための基礎研究としての感覚計測と仮想触感呈示装置の開発に取り組んできた[1][2]。現在、形状や力のフィードバックについては盛んに研究されているが、布のような非剛体における繊細な材質感や触り心地といった「質的情報」を含んだ触感に関しては、質の違いを表現するために制御されるべきパラメータやそれらの相互関係について、まだ十分明らかにされていない。最近では、視覚や聴覚に対しては非常にリアルな仮想現実を呈示できるようになったが、人間は五感を統合的に活用しており、よりリアリティを増すためには触感の表現が必要不可欠である。例えば、触感を呈示できるようになる事でインターネットや仮想空間に触感を加えたよりリアルなバーチャルリアリティシステムの構築や、視覚障害者の利用を考慮したユニバーサルなコミュニケーションツールの提案なども可能になる。

今回の報告では特に、仮想触感呈示装置を用いて触感に関する感じ方と脳機能の計測に取り組んだ結果について報告する。最終的には、触感を伝達する仮想触感呈示装置を用いて、布のような、ざらざら、ふわふわ、さらさらなどの触り心地、素材感、質感を与えたときの、刺激に対する指先の受容器と脳における認知活動の関係性を脳機能計測装置によって分析しモデル化することがテーマである。このようなアプロ

ーチが実現すると、従来の形容詞尺度による感覚評価に加えて脳活動計測に基づいて仮想触感呈示装置をより客観的に評価することも可能になると考える。

しかし、現在の段階では、脳における触感認知に関する研究例は視覚などの他感覚と比べて少なく、特に制御可能な人工触感呈示装置を使用したさわり心地の分析に関する報告例はほとんどない。今回、恐らく世界で初めての取り組みとして、人工触感呈示装置をMRI内に持ち込み、刺激時の脳活動の様子を計測することに挑戦した。

2. 触感の生物学的特性

2.1 触感の認知機構

五感のうち触感(覚)と定義される感覚には、触、圧、振動感覚などの機械的感覚や温冷感覚、痛覚を含む皮膚感覚と、体の位置や方向、動き、緊張、抵抗感覚などの自己受容感覚がある[3][4]。これらの感覚刺激は皮膚下の受容器や関節、筋肉によって検出され、神経を通じて中枢神経系に送られる。中枢神経系で視床を経由した刺激信号は脳の第一次体性感覚野(SI)に投射され処理される。SIの領域は頭頂葉の中心溝のすぐ後ろの中心後回付近でヘアーバンドのように横長な形をしており、頭頂から順に身体の部位ごとに神経の投射領域が決まっている(Fig.1)。

体性感覚野には、その他にも外側溝上壁に領野をもつ第二次体性感覚野(SII)があり、この2つの感覚野はSI、SIIの順に階層的に処理が行われていると考

えられているが[4]、その働きは十分には解明されていない。触感の認知では手を動かす触運動を伴うこともあり、体性感覚野以外にも、運動野や高次感覚連合野、条件によっては視覚野も含めたマルチモーダルな処理が行われている。

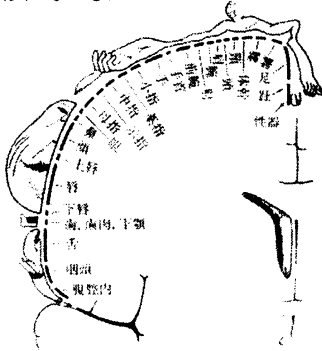


Fig.1 Projection field map of somatosensory area [4].

2.2 機械的感覚の認知と末梢神経系の特性

触感覚のうち機械的感覚では、刺激を検出する4つの受容器が解剖学的に見られている。それらはマイスナー小体、パチニ小体、メルケル触盤、ルフィニ終末という。受容器はそれぞれ末梢神経に繋がっており、順応の早さと受容野の広さによって2×2の計4パターンに分類される。ここで順応とは皮膚に静的な変位刺激を加えた際に神経信号が発生しなくなるまでの時間の長さのことで、順応が遅いタイプは刺激の始めと終わりにのみ電気信号が発生するのに対して、遅いタイプは刺激が生じている限り神経パルスを生じ続ける。また受容野とは皮膚の様々な部位に変位を与えた際にある対象の神経に活動を生じさせることができる領域である。

- FA I・・・順応が速く、受容野の狭いユニット
- SA I・・・順応が遅く、受容野の狭いユニット
- FA II・・・順応が速く、受容野の広いユニット
- SA II・・・順応が遅く、受容野の広いユニット

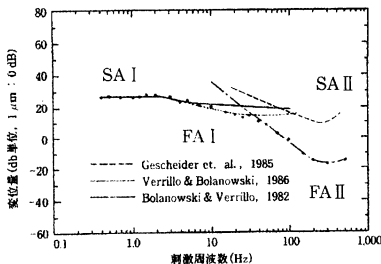


Fig.2 Threshold of oscillating stimulus [4].

受容器と神経のユニットはFA Iがマイスナー小体、SA Iがメルケル触盤、FA IIがパチニ小体、SA IIがルフィニ終末と関連付けられると考えられている。またこれらのユニットは振動刺激に対して異なる

検出閾曲線を示す(Fig.2)。

Fig.2 からわかることは、10Hz 以下の低周波刺激ではSA I、100～200Hzの高周波刺激ではFA IIをそれぞれ刺激しやすいなど、刺激される受容器が周波数によって特徴的な分布を有していることである。

3. 仮想触感呈示装置

仮想触感の呈示には機械的感覚を再現する ICPF アクチュエータ装置を使用した。これは ICPF(Ionic Conducting Poly Gel Film)というイオン導電性高分子ゲル膜の両面に金メッキを施した接合体を加工したものである。ICPFは湿潤状態で両面に電圧を印加すると内部のイオン移動によって屈曲運動を行う性質があり、皮膚に任意の振動刺激を与えることができる。Fig.3に示したようにくし型のICPF膜が多数配置され、両面のフレキシブル基盤を通じて電圧を印加している。基盤はケーブルを通じてPCに接続されており、RT-Linuxで電圧、波形、周波数などのパラメータや時間の制御を行っている[1][2]。

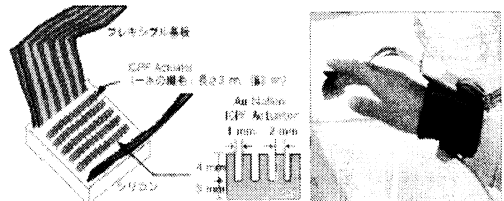


Fig.3 Artificial tactile feeling display.

仮想触感呈示装置は2章で概観したような受容器の特性のなかでも、とりわけ振動刺激に対する受容器の検出閾の違いを利用してそれぞれの受容器を選択的・複合的に刺激を行い、機械的感覚の再現を試みている。例えば、やわらかい感じは、20Hzと30Hzの周波数を0.6:0.4で合成すると得られ、ざらざらした感じは、20Hzと180Hzの周波数を1:0.4で合成すると得られる。また、5Hz以下の低周波刺激によって圧感が生成することも確認されており、圧感分布マップを用いて凹凸のある触感を呈示することも可能である。[5]。

4. 仮想触感呈示装置を用いた評価実験

4.1 触感刺激の判別検査と触運動

まず、仮想触感と実素材を比較して、

1. 視覚情報がある場合の健常者/視覚情報がない場合の健常者/視覚障害者、それぞれの触感の正確さ
2. 実素材/人工触感の触運動の違い

の二つの観点からそれぞれの結果を検証した。被験者は20代男女の健常者5名、40～50代女性の視覚障害者(全盲)3名である。

実験条件

実験は健常者と視覚障害者に分けて行い、様子を2~3台のビデオで撮影した。一つは触運動の様子を撮影するため真上に固定し、残りは左右に設置し全体を映した。ICPF 触感ディスプレイは右手人差し指に装着してもらった。

実験の際、磁場式トラッカ Polhemus社製FASTRAKを用いて、手首の三次元座標、速度、加速度、フィールド情報、実験開始からの時間、ロール、ピッチ、ヨーといった手の運動情報をリアルタイムに記録した。また、人工触感を呈示するフィールドは一つにつき20 cm×20 cmで、四つのフィールドにより四つの触感素材を同時に呈示した。素材については予備実験で傾向差が顕著であったタオル・ボア・レザー・フリースを用いた。四つのフィールドを生成するために調整する触感アクチュエータのパラメータ例は下記のようなものである。

- ・ WAVE_LENGTH 波長(粗さ)
- ・ WAVE_AMP 波の高さ(凸の高さ)の最大値
- ・ WAVE_AMP_OFFSET 波の高さの初期値
- ・ PRESS_MAP_AMP 圧覚
- ・ ACCEL_AMP_MAX 加速度に応じた振動の最大値
(摩擦感のような感じ)
- ・ ACCEL_AMP_OFFSET 加速度に応じた振動の初期値

なお、それぞれの触感を生成するためにあらかじめ予備実験を行い、ヒューリスティックにチューニングを行った。また、視覚情報出力用PCの液晶ディスプレイには、この四つのフィールドの人工触感と対応した画像を表示し、条件によって被験者に視覚イメージを与えた。

Fig.4に実験中の様子を、またFig.5に記録された被験者の触運動の一例を示す。



Fig. 4 Situation of an experiment

実験結果と考察

健常者・視覚障害者ともに個人差が大きいですが、視覚障害者は表面形状、特に毛足など当初こちらが予期していなかった要素を鋭く感知し、それを温度と深く結びつけて触感を認知しているようであった。一方、健常者の場合全体的に感覚が低いのみならず、温度感覚は二次的要素に後退し、摩擦感や抵抗感といった圧覚

が中心となる機械刺激によって似ている・似ていないを判断する傾向にあり、それが触運動にも反映しているように見えた。

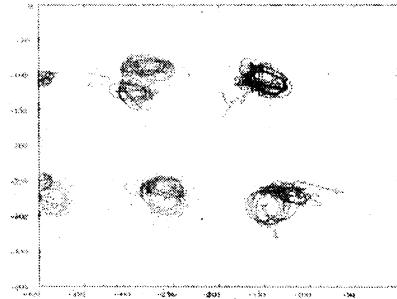


Fig. 5 Locus of the finger on tactile feeling operation

いずれにせよ、この実験から明らかになったことは、指先のセンサ系における刺激のモデルだけでは理解できない複雑な触感認知過程が存在し、それについて知見を得るためには刺激時における脳活動を調査する必要があるということであった。そこで、f-MRIを用いた脳機能計測実験を行った。

4.2 触感刺激に対する脳活動の計測実験(f-MRI)

予備実験

f-MRIは均一磁場の中で高速に磁場反転させて撮像するため、強力な電波源そのものである。従って磁場を発生する仮想触感呈示装置を駆動しながら計測が可能であるかどうかについてあらかじめ検討する必要があった。そこで、事前に装置の相互影響の有無について検証を行った。

本番の実験を行うために満たすべき条件は以下の2つである。

1. f-MRI画像に影響を与えない
2. f-MRI装置が発する磁界の影響を受けない

予備実験では、あらかじめ仮想触感呈示装置の金属部品を取り除いたところ、相互のノイズによる影響は計測誤差範囲内であり、f-MRI計測室内で仮想触感呈示装置を使った実験が可能であることを確認した。

実験条件

Fig.6に示すように、仮想触感呈示装置を用いて右手人差し指に正弦波刺激を与え、課題遂行時の脳活動を計測した。刺激は150Hzあるいは10Hzに加えて触運動の有無を合わせた計4種類とし、安静、課題をそれぞれ20秒、12秒ずつ計5回行った。被験者は20代男性1名であり、前節の実験と同様に体を動かさないこと、計測中は目を閉じることなど、手順説明を行ってから実験を行った。本実験の撮像パラメータ

は以下の通りである。

TR : 4000ms, TE : 30ms, Flip angle : 79° ,
Slices : 36 枚, Field of view : 192mm,
Thickness : 3mm, Matrix : 64×64

実験結果と考察

計測で得たデータは f-MRI の標準的な解析ソフトである SPM2 を用いて空間補正や統計処理を行い画像化した(Fig.7).

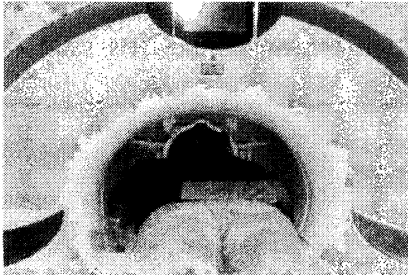


Fig.6 Experiment situation by f-MRI.

実験結果と考察

計測で得たデータは f-MRI の標準的な解析ソフトである SPM2 を用いて空間補正や統計処理を行い画像化した(Fig.7).

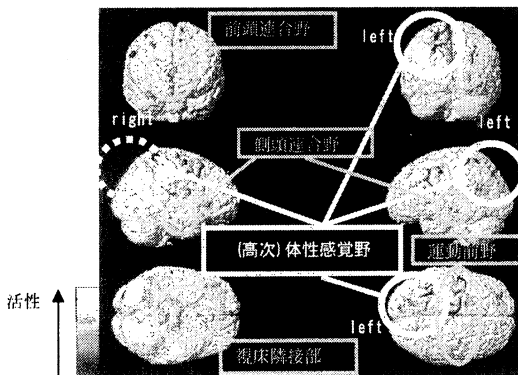


Fig.7 Typical result of visualizing brain activity

Brodmann の細胞構築学的皮質領野区分によると、大きく活動が確認できたのは、左脳の 5, 7 野にあたる高次体性感覚野と運動前野、各連合野であった。これは、運動を伴わない場合でも、触感刺激を与えるだけで運動野にも活動が現れる、という従来の仮説を裏付ける結果である。少なくとも、仮想触感呈示装置で発生させた指先刺激に対する応答が f-MRI で可視化できることは確認することができた

5. まとめと今後の課題

今回、仮想触感呈示装置で発生させた触感の認知に関する実験を行った結果、以下のようなことが明らかになった。

1. 被験者から、特に制御されていない温度やテクスチャ表面形状、触運動相互の関係が指摘されるなど、触感が他の感覚と結びついている様子が伺えた。
2. 仮想触感呈示装置で発生させた刺激に対する脳活動を f-MRI で測定が可能であること、但しそれは計測方法や手段によることがわかった。

以上の結果に基づいて、今後以下の4つについてさらに取り組む予定である。

1. f-MRI で観測された脳活動部位について、近赤外線を用いる f-NIRS で計測を試みた場合にも刺激に応じた脳活動が確認できるかどうか。これが可能であれば、より簡便に検査を行うことができ、様々な実験を工夫できる。
2. 今回は実験環境の理由から f-MRI 内部で手を動かしたりリアルタイムに人工触感を制御することができなかったため、工夫して再挑戦する。
3. 実素材に真似て合成された一見複雑な触感刺激と実素材の間で、触運動や脳活動に差が現れるかどうか。
4. マルチモーダルな刺激時における触感と他の感覚との関係性はどうか。

なお、課題と安静時の可視化された結果を統計的に比較する以外にも、全く考え方の異なる高精度な分析手法の導入についても現在検討中である。

参考文献

- [1] 新宅加奈子、才脇直樹、昆陽雅司、赤澤和伸、吉田晃典、田所諭：布の触感ディスプレイ開発のための感覚計測、第48回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集、pp63-64 (2004)
- [2] Akinori Yoshida, Satoshi Tadokoro, Naoki Saiwaki and Maki Taniguchi, "Artificial Tactile Feel Display for Textile Fabrics", Proceedings of the 11th International Conference on Human-Computer Interaction (HCI05) (2005)
- [3] 岩村吉晃：タッチ、pp.2-19, 医学書院(2001)
- [4] 東山篤規、宮岡徹、谷口俊治、佐藤愛子：触覚と痛み、ブレーン出版 (2000)
- [5] 昆陽雅司、田所諭、高森年、小黒啓介：布の手触り感覚を対象とした触感ディスプレイの研究、第5回ロボティクスシンポジウム予稿集、pp. 170-175 (2000)