

報告番号	※甲	第	号
------	----	---	---

主論文の要旨

論文題目 複数の Gestalt 要因による触覚ディスプレイの提示能力向上

氏名 小村 啓

論文内容の要旨

2019年に日本がISSで使用するロボットの遠隔操作技術の実証実験が開始された。また高齢社会の中、遠隔医療の需要が高まっている。このような状況において、リアルな触り心地を提示可能な Haptic デバイスの開発が期待され始めている。Haptic デバイスを実現する方法は2通りあると考えられており、一つが触覚受容器に直接所望の感覚を再現する方法であり、もう一つが大腦皮質における統合処理の結果生起される錯覚現象を利用する方法である。前者は、皮膚に存在するマイスナー小体、パチニ小体、メルケル細胞、ルフィニ終末の4種類の感覚受容器の反応の複合によって触り心地が生起するとした触覚原色の仮説に基づく手法である。この仮説に従えば、実物を触ったときと同じ刺激をそれぞれの機械受容器に直接与えれば実物の触り心地が提示可能であると考えられる。しかし、手に感覚受容器が17,000個近く存在するためにそれらすべてに実物を触ったときの刺激を与えることは事実上不可能である。従って本論文では、後者の方法を採用することとした。すなわち、触覚研究のもう一方の研究要素である中枢神経における感覚処理研究の成果を錯覚による Haptic デバイスの演出法に活用するというアプローチを採用することである。

そこで本論文では、上述の後者のアプローチに従って、実物の手触り感を再現する Haptic デバイスを実現することを研究の最終目標に掲げる。その達成のために、触覚と探索運動の関係、視覚と触覚の統合による錯覚現象、錯触の調査により触覚情報の統合現象について明らかにして、触覚のVRにおける形状、硬さ、材質感認識の演出方法を確立することを研究目的とする。本論文では、この研究目的を達成するために下記3項目を実施した。

- (1) 触覚の求心性信号と骨格筋への遠心性信号が形状認識に及ぼす影響
- (2) Pseudo-Haptics に代表される多感覚統合による表現の拡張
- (3) 触覚の錯覚現象の機序についての調査とその Gestalt による解釈

以下に本論文の構成と成果について述べる。

第1章では、研究の背景と目的を述べる。すなわち、Haptic デバイスが現代社会に求められている状況やそれに対する研究状況を述べた後に、実物の手触り感を再現する Haptic デバイスを実現することを掲げて、触覚のVRにおける形状、硬さ、材質感認識の演出方法を確立することを研究目的とすることを述べる。また、本論文の構成を示す。

第2章では、触覚の求心性信号と骨格筋への遠心性信号が形状認識に及ぼす影響について述べる。まず触覚の基本的な感覚処理である能動触と受動触についての調査を行う。能動触と受

動触は、遠心性コピーと呼ばれる運動に対するシミュレーションが存在するか否かという点において大きく異なる。すなわち、能動触と受動触それぞれの触覚の知覚精度を比較することで、脳内で行われる運動計画の役割を知ることが出来る。そこで、知覚精度として角度弁別閾を採用し、心理物理学実験手法である恒常法を用いて能動触と受動触の比較を行った。その結果得られた結論を以下に示す。

- 受動触による調査の結果、4 水準の提示速度条件 (45, 90, 130, 170 mm/s) において、45 mm/s ~ 90 mm/s の条件で知覚精度が最大になった。これは感覚受容器の SA I (メルケル細胞) と FA I (マイスナー小体) を最も効率よく発火させることができる速度であるためである。
- 能動触の方が受動触よりもエッジ方向の知覚精度が良いとは必ずしもいえなかった。遠心性のコピーの情報がなくても、受動触は能動触と同程度の精度であったことは、受動触では物体との接触速度と物体形状を同時に精度よく獲得していることを示している。
- 能動触運動は、感覚受容器が物体の形状識別タスクを行う上で最も効率が良くなる接触速度である 90 mm/s に近づくように、探查速度を制御していることが明らかになった。

上述の結論にあるように、能動触が受動触に精度の点で優位になる結果を得ることができなかった。受動触では遠心性コピーに代わる何らかの情報を獲得して精度を維持している可能性がある。このため今後は、その遠心性コピーに代わる情報とは何か探索を継続する予定である。また点図ディスプレイの提示能力向上に向けては、2 つの取り組みを行う予定である。1 つは人間の神経系に基づく触覚認識現象を適用することである。方法として確率共鳴を使用し、適切なレベルの振動触覚刺激を使用することで人間の感度が向上させることが可能となる。もう一つは、感覚受容器の性質に着目し、接線刺激を使用して SA II (ルフィニ終末) を励起することで表現感覚を向上させることを計画している。

第 3 章では、Pseudo-Haptics に代表される多感覚統合による表現の拡張について述べる。

Pseudo-Haptics とは視覚刺激によって触覚に影響を与える現象である。この Pseudo-Haptics を利用すれば、視覚刺激の効果により少量のアクチュエータで開発した触覚ディスプレイにおいても多彩な触り心地を映像で与えることが可能であると考えた。そこで本論文では、Pseudo-Haptics の視覚刺激に加えて触覚刺激を変化させることで程度表現の幅を広げることが可能であるか否か調査した。その結果得られた結論を以下に示す。

- 液晶ディスプレイに映されたボタンを押すという課題において、Pseudo-Haptics 単独の刺激 (コンプライアンス係数 1, 2, 3, 4, 5, 6 cm/N の 6 条件) では、4~5 段階の硬さを提示可能であった。
- 一方、触知ピンの高さを利用した触覚刺激単独での硬さ提示 (触知ピンの高さ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 mm の 5 条件) では、2 段階の硬さを提示可能であった。
- Pseudo-Haptics と触覚の融合提示ならば、視覚・触覚単体での諧調表現より諧調数が向上して、6~7 段階の諧調表現が可能となった。

以上から、硬さ提示装置として十分な性能ではないアクチュエータによる触覚ディスプレイを用いても視覚刺激のアシストにより表現能力を広げることが可能であることを示した点で Haptic デバイス開発に資するものであるといえる。今後は、硬さ以外の感覚、例えばテクスチャ認識に対しても Pseudo-Haptics がどのように貢献できるか調査を進めたい。また、性差の検討や年齢差の検討も必要なるものと考えられる。特に、今後高齢社会を考えると、高齢者向け VR の需要も見込まれるために、20 代の被験者に対する実験に留まらず、加齢の影響も考慮した実験的検討も実施したいと考えている。

第 4 章では、触覚の錯覚現象の機序についての調査とその Gestalt による解釈について述べる。そこで、感覚処理過程で感覚受容器からの入力以上の感覚が生起する現象である触錯覚現

象の調査を行った。本論文では、Velvet Hand Illusion (VHI)に生じる滑らかな感覚の触錯覚現象に着目する。この錯覚現象は、Gestalt 理論の全体は部分の総和ではないという考え方によく一致していることから、Gestalt の Prägnanz の法則のフレームワークに従って調査を進めて、Gestalt 理論に基づく VHI の機序解明を目指す一連の実験を実施した。以下に本実験の結論を示す。

- 点図ディスプレイでは、線の運動は 1 ドットずつ順に移動させることによって表示させるために、掌に触覚の仮現運動を生起することになることを示した。
- 点図ディスプレイの触知ピンで構成した線の仮現運動の認識に関しては、18, 23, 32, 40, 54, 80, 150 mm/s の 7 水準の速度条件で比較したところ、80 mm/s の時に最大になり、速度が増加あるいは減少しても仮現運動の認識は低下した。また、仮現運動速度が 18 mm/s 程度になったときにほとんど仮現運動が生起しなくなった。
- 2 本の平行線を構成する点間距離が掌の 2 点弁別閾(13 mm)より広いと VHI は生起しなくなることから、線で囲まれることが VHI の要件であることが分かった。すなわち、VHI 生起には触覚の Gestalt の閉合の要因と共通運命の要因が同時に満たされることが要件であることを明らかにした。
- VHI を生起する平行線の最短の線長(閾値)についての調査で、必要な線長は最低 27.8 ± 3.5 mm 必要であることが明らかになった。これは、掌で生起する触覚の Gestalt の最小サイズを示しており、触覚の Gestalt に関する重要な知見の一つである。

今後は、触覚の Gestalt についてより深い検討を進め、触覚の Gestalt を変化させてそれにより惹起される材質感を自在に変化することを可能とすることを目指す。このため、4 つの触覚の感覚受容器に神経自由終末も加えて合計 5 つの触覚関連の受容器を選択的に刺激する仕組みを追加して、Gestalt によって生まれる材質感のコントロールの可能性を調査することを計画している。なお、仮現運動速度、点間距離、平行線の線長の三つのパラメータ間に存在する交互作用、およびパラメータの決定順序が結果に及ぼす影響についても今後の研究の中で明らかにしたい。

第 5 章では、結論と今後の展望を述べる。すなわち、本研究の成果は、革新的な Haptic ディスプレイを設計する上で、移動機構装備するか否かの判断、視覚アシストを追加することによる精度向上の見積もり、および VHI を生起させる上での刺激図形のサイズの下限を定めた点で有効な知見を提供していることを述べた。また前述の各章で述べたように、本研究で取り上げたのは研究段階の技術であることから、本論文の三つの実施項目について今後も引き続き調査を進める必要があることも述べた。