

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K11976

研究課題名（和文）疑似触力覚の大きさと筋活動の関係

研究課題名（英文）Pseudo-haptic sensation and muscle activity

研究代表者

岩永 光一（IWANAGA, Koichi）

千葉大学・デザイン・リサーチ・インスティテュート・教授

研究者番号：70160124

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：疑似触力覚の発生を定量的に評価し、その機序を検討することを目的とした。コンピュータ画面上のカーソルを肘関節屈曲動作で操作する実験系を構築し、主観的等価点として疑似触力覚の大きさを安定して評価することができた。疑似触力覚は眼球運動を抑制した条件でも発生するが、眼球運動を伴う場合に比べて小さくなった。また、疑似触力覚の個人差は、動作時の力覚の知覚感度と関係していることが明らかになった。さらに、脳波を用いて疑似触力覚の発生と脳活動の関連を検討したが、一定の知見を得るには至らず検討を継続している。本研究によって、疑似触力覚の発生機序に関する今後の研究につながる重要な成果を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は体性感覚の錯覚である疑似触力覚について、生理学、心理学などの研究手法を統合することによって定量的評価とその発生メカニズムの解明にアプローチするものである。錯覚は日常生活においても経験される人間の感覚特性であるが、主観的であり定量的に評価することが困難であることから定性的な研究に留まっていた。本研究は人間科学における新たな可能性を示すものとして、その学術的意義は多大である。また、疑似触力覚は、近年の発展と実用化が目覚ましい仮想現実や拡張現実などの人工環境への応用が期待され、より人間特性を考慮したヒトと人工環境とのインタフェースの可能性を拡大するものとして、社会的意義も極めて大きい。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study was to quantitatively evaluate the pseudo-haptic sensation and to examine its mechanism. We constructed an experimental setup in which a cursor on a computer screen was manipulated by elbow flexion movements, and were able to stably evaluate the magnitude of the pseudo-haptic sensation as a point of subjective equality. Although pseudo-haptic sensation occurred even in the condition in which eye movements were suppressed, it was smaller than that with eye movements. In addition, it became clear that inter-individual differences in pseudo-haptic sensation were related to the perceived sensitivity of force sensation during movement. Furthermore, we examined the relationship between the occurrence of pseudo-haptic sensation and brain activity using electroencephalography, but we did not reach a certain level of insight. This study has produced important results that will lead to future research on the generation mechanism of pseudo-haptic sensation.

研究分野：生理人類学

キーワード：疑似触力覚 筋活動 脳活動 眼球運動

## 1. 研究開始当初の背景

触力覚とは、物体の接触や物体から受けた力に対して生じる感覚の総称であり、皮膚の機械受容器や筋紡錘などの感覚受容器によって形成される。一方、物理的な接触や力による刺激が加えられない場合でも、視覚的な刺激によってあたかも触力覚が生じたかのような錯覚を自覚することがあり、疑似触力覚と呼ばれている。コンピュータマウス等の操作デバイスを用いて画面上のカーソルを操作する時に、操作者の意思とは無関係にカーソルの移動速度が減速しマウスの動きが遅くなると、マウスを操作する手に抵抗が加わったかのような錯覚が生じることが報告されている[1]。また、並んで停止している相手方の車両が動き出すと、自らの車両が動いたかのような全身的な運動感覚を経験することがあり、これも疑似触力覚の一例である。疑似触力覚は、仮想現実(バーチャルリアリティ)等の人工的に構築される視覚空間において、物理的な力を与えずに触力覚を提示する手法として注目され研究されている。しかしながら、疑似触力覚の発生メカニズムについては依然として明らかになっていない。

これまで疑似触力覚に関して多くの研究が行われているが、疑似触力覚が錯覚であることから、被験者自身による主観的回答を指標とすることで疑似触力覚の発生とその錯覚量を定性的に評価してきた。しかし、そのような定性的評価は、個人ごとに評価の基準や尺度が異なったり評価結果が設問内容に左右されるといった問題点が存在し、疑似触力覚の発生や大きさに与える要因や条件を調べることは困難であった。そこで、研究代表者らは、疑似触力覚の錯覚量を力の単位(ニュートン, N)を用いて定量化することを検討した[2]。そこでは、マウスに代わって力覚提示装置を用い、VR環境内でカーソルを操作させる実験系を用いた。カーソルの移動速度を変化させたときの操作抵抗を力覚提示装置によって設定し、精神物理学的手法(恒常法)を使用して疑似触力覚の主観的等価点を求め、疑似触力覚の大きさを物理量として評価することを可能にした。これにより、疑似触力覚と筋活動や脳活動、眼球運動等の関係を検討することが可能となり、疑似触力覚の発生メカニズムを検討することとした。

## 2. 研究の目的

本研究は、次の課題を検討することによって疑似触力覚の発生メカニズムにアプローチすることを目的とした。

- ・体性感覚受容器、特に筋紡錘などの深部感覚受容器の関与の有無を明らかにする
- ・視覚情報の関与を確認するために、眼球運動が疑似触力覚に与える影響を検討する
- ・中枢神経系における情報処理の影響を調べるために脳波の事象関連電位との関連を検討する

## 3. 研究の方法

### (1) 実験系の概要

研究代表者らは、すでに力覚提示装置を用いた疑似触力覚の定量的評価のための実験系を構築している[2]。しかし、本研究では、筋活動や脳活動、眼球運動などの測定・評価を同時に行う必要があったため、統制された一定の動作による実験系を再構築する必要があった。そのため本研究では、力覚提示装置を入力装置として使用し、肘関節の屈曲によるカーソル操作を行う実験系を再構築した。被験者は椅子に座り、操作肢(右上肢)の上腕部を机の上に置き前腕を回外した状態で力覚提示装置の操作部を把持した。被験者が肘関節を伸ばした状態から屈曲させると、コンピュータ画面上のカーソルが下から上へ移動した。使用した椅子と机の高さは、被験者ごとに無理なく操作が行える高さに調節した。

### (2) 疑似触力覚の定量的評価

疑似触力覚の評価は、恒常法による主観的等価点を求めることによって行った。実験では、被験者に上に記した肘関節屈曲によるカーソル操作を行ってもらった。操作中、被験者はコンピュータ画面上を移動するカーソルを見ていた。肘関節の屈曲によって画面下部から上部へ移動するカーソルの移動速度は、移動範囲の中間点において条件ごとに設定された速度に変化した(減速または加速)。速度変化の条件は、実験によって異なることもあったが、おおむね5条件(-60%:60%の減速、-30%:30%の減速、0%:変化無し、+30%:30%の加速、+60%:60%の加速)程度であった。移動範囲の中間点での速度変化と同時に力覚提示装置によって与えられるカーソルの操作抵抗を変化させ、主観的には操作抵抗の変化が感じられない操作抵抗変化の大きさをプロビット分析の手法によって求め、主観的等価点とした。求めた主観的等価点は、実際に生じている操作抵抗の変化を相殺する主観的な操作抵抗変化の大きさを表しており、当該の速度変化条件における疑似触力覚の大きさを表している。

### (3) 脳波の事象関連電位

疑似触力覚の発生に関連した脳活動を検出することを目的として、事象関連電位を計測した。脳波を導出する電極は、脳波キャップを使用して国際10-20電極法に従う19部位に配置した。バンドパスフィルタは0.08~30Hzに設定し、アーチファクトを除去するために独立成分分析を

行った。カーソルの速度変化時点であるカーソル移動の中間点を起点（トリガー）として、速度変化条件ごとに加算平均を行い事象関連電位を得た。

#### 4. 研究成果

##### (1) 疑似触力覚の定量的評価

本研究では、一定の動作時の疑似触力覚を評価するために、統制した肘関節の屈曲によるカーソル操作を対象として実験を行った。恒常法によって得られたデータを解析した結果、肘関節の屈曲による操作においても、プロビット分析による主観的等価点として疑似触力覚が評価できることが確認された。また、カーソルの速度変化率と得られた主観的等価点（全被験者の平均値）との間には、有意な正の相関関係（相関係数 0.99）があることが確認された。この結果から、カーソル速度の1%の変化に対して0.0041 N相当の疑似触力覚が発生することが明らかになった。さらに、このカーソル速度変化率と主観的等価点の相関関係は、各被験者個人内においても高度に維持されており（相関係数 0.78~0.99）、本研究で構築した肘関節屈曲による実験系においても、被験者個人に対して安定して疑似触力覚を評価できることが明らかとなった。

以前の研究代表者らの研究では[2]、本研究と同様の力覚提示装置を入力装置として使用していたが、その操作は特に統制していなかった。結果として、カーソルの操作には、手関節、肘関節、肩関節の動作が関与していたことが推測され、各関節の関与の程度も被験者個人によって異なっていたことが予想される。しかしながら、得られた結果はおおむね本研究の結果と一致するものであり、疑似触力覚の発生と評価は操作する動作自体には大きく依存しない可能性が考えられる。ただし、カーソル速度変化率と主観的等価点（平均値）との相関関係から求めたカーソル速度変化率あたりの疑似触力覚の大きさは、本研究の0.0041 Nに対して動作を統制しなかった先行研究では0.0020 Nであり、統計的に有意な差異が認められた。カーソル速度変化率あたりの疑似触力覚の大きさは、視覚情報の変化を体性感覚情報に変換する感度を表していると考ええると、動作に関与する関節が多くなるほど感度が低下した結果であると解釈することもできる。疑似触力覚発生メカニズムを考えるうえで、興味深い知見である。

##### (2) 疑似触力覚に対する眼球運動の影響

本研究では、疑似触力覚と脳活動の関係を検討するために、脳波の事象関連電位の計測を計画した。一般に脳波の計測では、眼球運動に伴う電位変化が脳波に混入しアーチファクトとなることから、実験条件によっては被験者に閉眼状態を維持させ眼球運動をなくすよう指示したり、視覚刺激を提示する場合には注視点を同時に提示して眼球運動を抑制するなどの措置が取られる。本研究の研究課題である疑似触力覚は、視覚刺激の変化によって誘発される体性感覚の錯覚であるので、視覚刺激の呈示は必須であり、さらに顎台によって頭部を固定した状態で移動するカーソルを視覚的にとらえるためには、カーソルの動きを眼球の運動（円滑性追従眼球運動）によって視認することは容易に理解できる。本研究では、疑似触力覚発生時の脳波計測の可能性を確認するために、眼球運動の有無が疑似触力覚の発生に与える影響を検討した。

実験では、それまでに行ってきた実験に従って眼球運動を統制しない条件に加えて、コンピュータ画面の中央に注視点を設け、実験中は常に注視点を見るように被験者に指示した条件を設定し、両者を比較した。実験中は眼球電図を計測し眼球運動を電位変化として記録し、眼球運動の有無について確認した。カーソルがコンピュータ画面の下から上まで移動する約600ミリ秒の間眼球電図の電位変化を調べた結果、眼球運動を統制しなかった条件では、直線的に電位が陰性方向にシフトすることが観察され、円滑性追従眼球運動が生じていたことが確認された。また、注視点を設けて眼球運動を抑制した条件では、眼球電図の電位はほぼ一定に維持され、良好に眼球運動を抑制できたことが確認された。この両条件下において恒常法によるプロビット分析を行い疑似触力覚の大きさを評価した結果、両条件において疑似触力覚が生じたことが確認された。しかしながら、疑似触力覚の大きさは、眼球運動を抑制した条件では抑制しなかった条件の約85%であった。統計解析の結果も踏まえて、眼球運動を抑制しても疑似触力覚は発生するが、その大きさは眼球運動を抑制しない場合よりも小さくなることが明らかとなった。

注視点を設けて眼球運動を抑制した場合、被験者はカーソルの動きとその速度変化のほとんどを周辺視によって知覚していることになる。しかしながら、今回の実験で設定した注視点はコンピュータ画面の中央であり、カーソルの速度変化が生じる地点と一致している。従って、疑似触力覚を発生させるカーソルの速度変化は注視点上で知覚していること、さらに今回のカーソルの運動範囲はそれほど大きくないことから周辺視でも十分に知覚可能であったことを考えると、眼球運動を抑制した効果はそれほど大きなものではなかった可能性がある。しかしながら、眼球運動抑制の有無によって発生した疑似触力覚の大きさに有意差があったことは注目すべき結果であると考えている。眼球運動を抑制することによって疑似触力覚の大きさが縮小されたことは、その発生において眼球運動が何らかの重要な役割を持つことを示していると考えられる。疑似触力覚の発生メカニズムを検討する上で、重要な知見であると考えている。

##### (3) 疑似触力覚と脳活動

疑似触力覚は体性感覚の錯覚であり、接触や運動などの実際の動的な刺激が加えられないにも関わらず接触や運動などの身体感覚を自覚する。従って、その発生には中枢神経系における何らかの情報処理が関与していることは容易に推測できる。本研究では、疑似触力覚の発生と脳活動

の関連を明らかにする第一歩の試みとして、脳波の事象関連電位の計測を行った。カーソルがコンピュータ画面の中央部を通過する時点を中心として約 100 試行の脳波を平均加算し誘発電位を得た。被験者 8 名について、特に Fz、Pz、Cz に注目して解析したところ、100~400 ミリ秒の区間において疑似触力覚を発生させた条件では対照条件に比べて陰性に大きく変動する傾向がみられた。この結果は、予想外の出来事に対する脳の反応を表す可能性はあるが、統計的な検討も含めて被験者数の増加や実験系の再検討など、検討を継続している。本研究の実験系では、先に記した通り、注視点を設けることによって眼球運動に由来するアーチファクトの混入はほぼ防ぐことができたと考えているが、カーソル操作のための肘関節の運動が脳波に及ぼす影響は無視することができず、今後の検討の余地がある。さらに、機能的核磁気共鳴画像法などの脳機能計測技術を用いて、より詳細に検討されることが期待される。

#### (4) 疑似触力覚の個人差からみた発生メカニズム

本研究の実験系で得られたカーソルの速度変化率と疑似触力覚の大きさ（主観的等価点）との間の正の相関関係は、プールされた被験者の平均値に対するのみならず、各個人の被験者においても普遍的に観察されたことは、先に記したとおりである（「4. 研究成果 (1) 疑似触力覚の定量的評価」を参照）。そこで、10 名の被験者を対象に各被験者の相関と回帰直線の傾きを調べた結果、相関は重相関係数で 0.82~0.99 であり、いずれも高度に有意な相関を示した。しかしながら、各個人の回帰直線の傾きは 0.17~0.60 の範囲にあり、個人による変動が大きかった。そこで、この回帰直線の傾きの個人差を説明する要因について検討したところ、操作肢に与えられる操作抵抗に対する丁度可知差異が、回帰直線の傾きと有意に相関することが分かった。この丁度可知差異は、力覚提示装置が与える運動抵抗の物理的大きさと抵抗感覚の主観評価とのプロビット分析によって得られるもので、操作抵抗の弁別に関する各被験者個人の特性をあらわすものと解釈することができる。10 名の被験者に関する相関では、回帰直線の傾きと丁度可知差異の間には、重相関係数 0.84 の有意な正の相関が認められた。丁度可知差異の大きな被験者ほど物理的な力刺激の変化を検出する感度が低いということができる。一方、回帰直線の傾きは視覚刺激の変化（カーソルの移動速度の変化）によって誘発される疑似触力覚の発生感度を示すと解釈することができる。従って、物理的な体性感覚刺激に対する知覚感度が、主観的な疑似触力覚の発生に関係している可能性を示しており、物理的な力の変化を知覚しにくい人ほど、発生する疑似触力覚が大きいという可能性を示している。疑似触力覚の発生メカニズムに関する新たな研究の方向性を示す結果であると考えている。

#### (5) 研究成果のまとめ

本研究は、これまで定量的なアプローチが行われてこなかった疑似触力覚の発生メカニズムについて、末梢の感覚受容器、中枢神経系、視覚情報などの観点から総合的に検討することを目的として計画された。当初の計画では、操作肢の筋電図を計測することによって疑似触力覚の発生と筋活動の関係を明らかにすることが含まれていたが、筋電図計測に関する実験系の整備が遅れ、実施には至っていない。しかし、上述した通り、再構築した実験系によって疑似触力覚を安定して評価することができ、眼球運動が疑似触力覚に与える影響や疑似触力覚の個人差を説明する要因などについて有益な知見を得ることができた。

#### <引用文献>

1. A. Lecuyer, S. Coquillart, A. Kheddar, P. Richard, P. Coiffet (2000) Pseudo-haptic feedback: Can isometric input devices simulate force feedback? Proc. IEEE Virtual Real. Annu. Int. Symp. 83-90
2. 五十棲啓, 石橋圭太, 岩永光一 (2020) 視覚刺激の変化が誘発する力覚の定量的評価に関する研究. 人間工学 56(5) 208-211

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Hiraku Isozumi, Keita Ishibashi, Koichi Iwanaga
2. 発表標題 Differences in perception of pseudo-haptics between individuals
3. 学会等名 The 16th International Congress of Physiological Anthropology (Kota Kinabalu, Malaysia) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiraku Isozumi, Keita Ishibashi, Koichi Iwanaga
2. 発表標題 Quantifying of pseudo-haptics using a psychophysical method
3. 学会等名 The 15th International Congress of Physiological Anthropology (Oregon) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 五十棲啓、石橋圭太、岩永光一
2. 発表標題 眼球運動の統制の有無が擬似触力覚に与える影響
3. 学会等名 日本生理人類学会第83回大会（京都）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 五十棲啓、石橋圭太、岩永光一
2. 発表標題 擬似触力覚の定量化に関する基礎的研究
3. 学会等名 日本生理人類学会第82回大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	石橋 圭太  (ISHIBASHI Keita)  (40325569)	千葉大学・デザイン・リサーチ・インスティテュート・准教授    (12501)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------