

令和 4 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K20315

研究課題名(和文) sEMGを用いた物体への把持・負荷力推定による視触覚変形提示システムの実現

研究課題名(英文) Visual-Tactile Deformation Presentation System by Grasping and Load Force Estimation on Objects Using sEMG

研究代表者

伴 祐樹 (Ban, Yuki)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・特任講師

研究者番号：20789391

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は物体を把持する際にかかる力の方向と大きさをsEMGに基づいて推定することで、Pseudo-hapticsによる物体変形インタラクションを実現することにある。前腕部の筋電から把持物体にかかっている力を推定し、それに基づいてバーチャル物体を変形させることで実際に把持している物体は変形していないにもかかわらず、VR空間では物体を変形させているかのような体験を生成した。実験の結果、前腕部筋電から把持物体にかかっている負荷力の方向を90%の精度で推定できることを示し、本推定手法を用いることでVR空間における物体の変形感を提示できることを確かめた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

把持物体への力計測はVRを始め様々な分野で研究されてきたが、そのほとんどが物体表面か手袋の指部に対して圧力センサを貼付・内蔵する手法であり、計測したい物体毎にセンサの貼付が必要であることや、手袋型デバイスでは手指の動きが制限されるといった課題を抱えていた。本研究の成果により、身の回りの物体をそのままVRシステムの入力インタフェースとして活用できるようになり、現状物体表面を押下した際への硬軟感提示程度に止まっていた視触覚物体変形手法を飛躍的に拡張させることができる。本研究はPseudo-haptics研究を実環境に展開する上で重要な意義を持つ。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to realize object deformation interaction using pseudo-haptics by estimating the direction and magnitude of the force applied to the grasped object based on sEMG. The forces applied to the grasped object were estimated from forearm EMG, and the virtual object was deformed based on the estimated forces. The experimental results showed that the direction of the applied force on the grasped object can be estimated with 90% accuracy from the forearm EMG, and it was confirmed that this estimation method can be used to present the sensation of object deformation in VR space.

研究分野：Virtual Reality

キーワード：Pseudo-haptics sEMG クロスモーダル Virtual Reality

## 1. 研究開始当初の背景

触力覚を物理的に再現するデバイスなしで、ユーザの身体位置を反映する映像に空間的变化を加えるだけで疑似的な触力覚を提示可能な Pseudo-haptics が注目を集めている。この現象を用いることで、物体の重さや形状等の知覚を変化させる手法が提案されている。その中で、実物体を把持し変形させる動作を行った際、把持する力に応じてバーチャル物体の視覚的な変形度合いを変化させることで Pseudo-haptics を生起させ、物体の硬軟感を提示する取り組みが行われている。しかし、そのためには把持物体にかかる力を計測する必要があり、物体もしくは手袋の指部に対して圧力センサを貼付・内臓せざるを得ず、システムの複雑化や把持の際のユーザビリティの低下を招くという問題を抱えていた。

一方、把持力を計測する別の方法として、前腕部の表面筋電位(sEMG)を活用する研究が盛んに行われている。sEMG は筋が収縮する際の各筋線維より生じる活動電位であり、その筋電信号強度が筋活動度に対応するため、筋電義手の動作支援システム等での活用が研究されている。しかし先行研究では、本研究で想定するような、物体に様々な向きの力をかけるといった状況が少なく且つデータ収集が困難なため、物体把持における力推定については物を握る際の握力のみでの推定等、把持力の方向が限定的な状況への適用に留まっていた。以上を踏まえ申請者は、視触覚変形システムに特化したデータ収集システムを構築し、把持物体へかかる様々な力の方向、大きさとその際の前腕部 sEMG の対応データを収集して両者の関係を学習させることができれば、sEMG を計測する小型の筋電計を腕に装着するだけで、把持物体にかかる捻り、曲げ等の多様な種類の力情報を簡易に利用できるようなと考えた。

## 2. 研究の目的

本研究では、把持物体に力を加えた際の前腕部 sEMG の変化に着目し、物体に対する掴み・引っ張り・曲げ・ねじり等の種類の把持操作中に発生する力の方向と大きさを推定する学習モデルを構築し、簡易なデバイス構成で物体変形感を提示可能な視触覚変形提示システムを実現することを目的とする。

## 3. 研究の方法

個人内でも、物体を捻る等の同一種類の把持操作を`横向きで/ドアノブの様に正面から掴んで捻る` `掌全体で握って/指先のみで掴んで捻る`等異なる向き・掴み方(把持姿勢)で行う場合、sEMG の値は異なる。そのため想定される様々な把持姿勢に対応可能な力推定手法を構築する。具体的には、学習データを収集するために、把持物体へのせん断方向の力(負荷力)計測に加え、グローブ型圧力センサにより押下方向の力(把持力)を計測し、その際筋電計により前腕部 sEMG を同時に計測できるデータ収集システムを構築する。多様な把持姿勢・把持物体形状に対応できるように、把持姿勢等を識別し、単一条件下での学習モデル(以下単一モデルと呼称)のうち適したものを選択的に使用して推定を行う手法を構築する。

加えて、筋電位強度と筋発揮力の関係は個人間で異なるため、画像処理等の深層学習では効果が実証されている転移学習の手法を援用し、学習済みモデルを補正するための少量データによる短時間の転移学習で個人に適用する手法を検討する。

最終的に、多様な方向の力入力に対応可能な把持物体への力推定手法を Pseudo-haptics による物体変形インタラクションに適応させ、簡易なデバイス構成で物体変形感を提示可能な視触覚変形提示システムを実現する。物体-手間にかかる押下・剪断方向の推定値に応じてバーチャル物体やバーチャルハンドを変形または姿勢操作する視覚フィードバックを提示することで、実際には変形しない物体を把持しているにもかかわらずバーチャル物体を変形操作している感覚を提示する手法を簡易に実現する。

## 4. 研究成果

### (1)前腕部 sEMG からの物体への把持力・負荷力推定

物体を把持している際の物体にかかる把持力・負荷力を計測し、それと同時に前腕部の筋電情報を計測して両者の関係性を学習することで、前腕部 sEMG から物体への把持力・負荷力を推定する機械学習モデルを構築した(図1)。具体的には、静電容量式6軸力センサ(Dypick, ワコーテック社)を把持物体に装着して物体表面に感圧センサ(スイッチサイエンス)を貼付することで物体にかかる負荷力・把持力を計測し、物体を把持している手の上腕に筋電計測系(Thalmic Lab 社製 Myo: 8ch 筋電系)を2個装着した(図2)。これにより物体にかかっている  $f_x, f_y, f_z$  [N],  $m_x, m_y, m_z$  [N・m] という6軸周りの力と、把持力を計測することができる。Myo を前腕部に2個装着したのは、筋電情報を二次元面で捉えることで発揮する力の推定精度向上を狙ったためである。Myo 一個あたり8チャンネルの筋電位センサでは計測値として-128~127 までのデジタル値が 200Hz のサンプリングレートで得られる。このストリーミングデータに対してフレーム数 128 ごとにハミング窓をかけて FFT 処理し、強度データのみを取り出した。学習モデルの構築に

あたっては、入力としてそのままのデータを用いる等様々なアプローチを試みた結果、上述した方法が最も安定してモデルを構築できることが明らかになった。

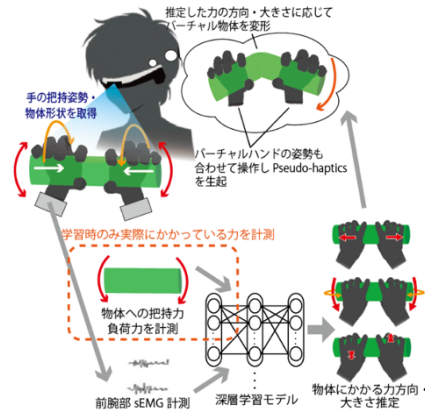


図 1 sEMG による力推定を用いた視触覚物体変形提示

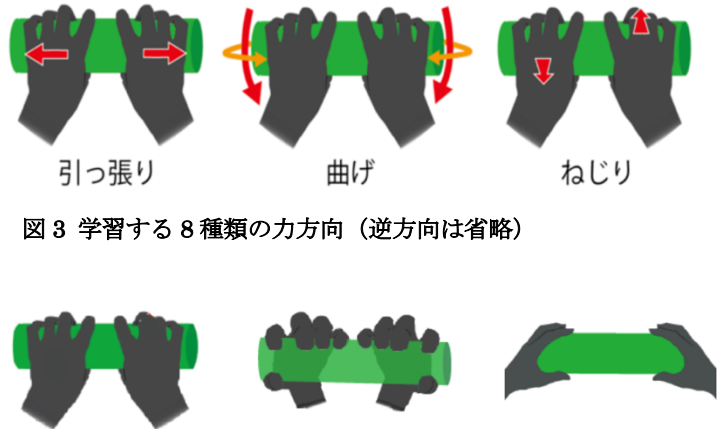


図 3 学習する 8 種類の力方向 (逆方向は省略)

図 4 複数の把持姿勢に対してのモデルの構築

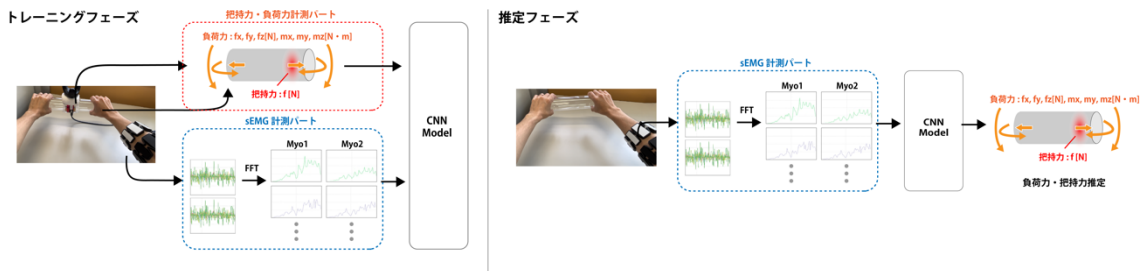


図 2 前腕部 sEMG を用いた物体への負荷力・把持力推定

学習モデルとしては、Convolutional Neural Network を用い、筋電情報を入力として 6 軸方向の負荷力と 1 方向の把持力を推定した。構築した把持力推定手法の精度を評価するためユーザスタディを実施し、引っ張り(引)、押し込み(押)、曲げ(上、下、手前、奥の 4 方向)、ねじり(右手が奥向き/手前へ向かうねじりの 2 方向)の 8 種類の方向への力をかけさせた(図 3)。またその際、図 4 に示すように複数の把持姿勢でモデルを構築した。各方向の入力に対し、実際に計測した 6 軸力センサ値の大きさと前腕部 sEMG から推定した値とを比較することで、本手法により各方向への力入力の大きさがどれほど正確に推定できるかを確かめた。比較の際は、力方向の識別については、推定した 6 軸力方向の値のうち最も絶対値の大きいものが、実際の入力方向と一致しているかどうかで判別した。力の大きさについてはそれぞれの力方向の値について、Normalized Root Square Error (MRMSE)を算出した。実験の結果、いずれの把持姿勢であっても力方向については 90%程度、力の大きさについては 15%以下の誤差精度で推定できることを確かめた。

この実験では、3つの把持姿勢に対してそれぞれ異なるモデルを構築していたが、同一形状の物体であっても把持の仕方は多種多様であるため、そうした把持姿勢の違いをも吸収できるようなモデルを構築できることが望ましい。そこで本研究では、入力データとして前腕部 sEMG のスペクトルデータだけでなく、デプスカメラより計測した手腕の把持姿勢(ボーンデータ)も同時に入力し、把持物体への負荷力・把持力を出力するモデルの構築を試みた。しかし、検討の結果本アプローチでは学習が進みにくいことが明らかになった。そのため、ボーンデータから把持姿勢を分類するモデルを別途構築し、その分類結果をもとにそれぞれの把持姿勢下で構築したモデルを適用させるという手法に変更した。実験の結果、把持姿勢の分類については 95%以上の精度で実行可能なことを確かめた。

## (2) 個人差に対する補正手法の構築

データセットに含まれないユーザの把持操作中に発生する力の方向と大きさを推定する手法を構築し、被験者実験を通じてその効果を確かめた。具体的には、StarGAN を用いて同一個人の特定の把持姿勢のデータを元に異なる把持姿勢の疑似データを生成することで少量の取得データでの把持力推定を行った(図 5)。実験の結果、データセットに含まれないユーザのデータであっても、曲げ姿勢データを元にするすることで、力方向については 80%以上、大きさについては 70%以上の精度で推定が可能であることを確かめた。

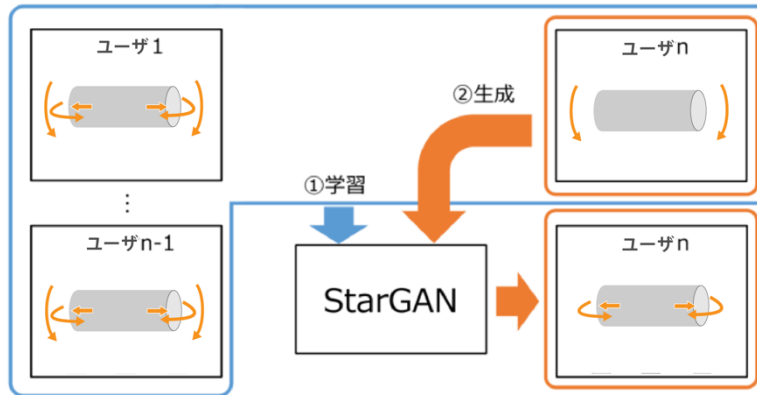


図 5 StarGAN による特定姿勢データからの複数把持姿勢データの生成

(3) sEMG による力推定を用いた Pseudo-haptics による物体変形提示

以上の取り組みにより構築した sEMG による力推定手法をもとに、実際には変形しない物体を把持しているにもかかわらず、物体にかけた力に応じてバーチャル物体を変形させる視覚フィードバックを実装し、実際にバーチャル物体を変形させる感覚を提示できるかを検証した。

実験は 15 名の被験者を対象に行なった。本実験では、力を加えた際の変形量を様々に操作してバーチャルな硬さを提示することによって、物体の硬さに対する知覚がどのように変わるか、また自身が物体を変形させているという体験のリアリティに対する評価がどのように変化するかを検証した。長さ 300[mm]直径 60[mm]の亚克力製円筒物体に対して、引っ張り、曲げ、ねじりの 3 方向への力をかけさせた。力を加えた際の変形量については、引っ張り方向については 0.2, 0.4, 0.8[N/mm]の三段階、曲げ、ねじりについては 95.6, 144, 287[N/rad]の三段階の硬さを設定し、それぞれに対して力を加えた際のバーチャル物体の硬さと変形感のリアリティについて 7 段階評価(1:非常に柔らかい, 7 非常に硬い, 1:全くリアリティがない, 7 非常にリアリティがある)で回答させた。試行回数は各硬さ、力方向の組み合わせにつき一回ずつ、計 9 回であった。試行の順番は被験者間でバランスが取れるようにした。

実験の結果、バーチャルに設定した物体の硬さに応じて、実験参加者が知覚する硬さも変化することが確かめられた(図 6)。しかし一方で、バーチャルな硬さがある一定値を下回った際には変形に対するリアリティが急激に低下し、知覚する硬さについても提示されたバーチャルな硬さに追従しなくなるという結果が得られ、知覚操作可能範囲の限界があることが示唆された。

以上(1)~(3)の成果は IEEE Transaction on Haptics に投稿中である。

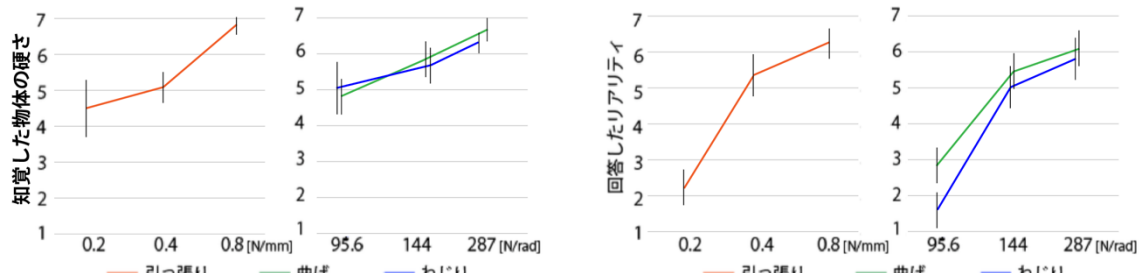


図 6 sEMG による力推定を用いた物体変形による物体の硬さ知覚, 変形のリアリティについての評価

(4) Pseudo-haptics 研究の整理 (刺激設計から応用展開まで)

本研究課題に取り組む中で報告者らは、この 20 年間様々な Pseudo-haptics にまつわる研究が発表されてきたにもかかわらず、それらを包括的に整理した文献が存在しないことに気がついた。そこで、Pseudo-haptics についての一連の個別先行研究から得られた知見を、デザインからアプリケーションの提案に至るまでサーベイ論文の形に整理をした。Pseudo-haptics を誘発するための、対象の触覚特性に基づく視覚刺激設計についてまとめ(図 7)、擬似ハプティクスを設計する際に特に問題となる、視覚刺激とユーザ入力 mismatches を視覚化するための回避設計と Pseudo-haptics と物理刺激の組み合わせ設計についてまとめた。最後に、Pseudo-haptics を用いたトレーニング、アシスト、エンターテイメントなどのアプリケーション提案も行った。本サーベイ論文は学術研究者だけでなく、触覚提示手法として擬似ハプティクスを利用しようとするアプリケーション開発者にも役立つと思われる。

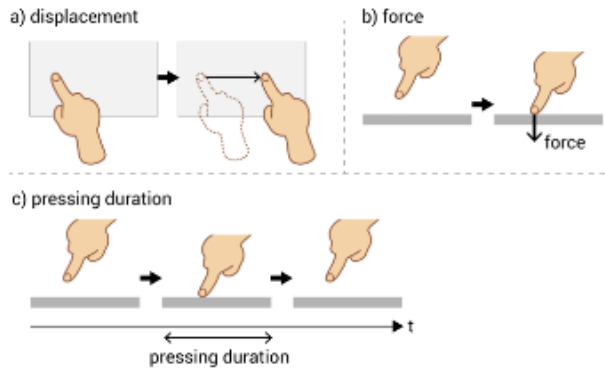


図 7 Pseudo-haptics を誘発するための、対象の触覚特性に基づく視覚刺激設計

(5)

Pseudo-haptics を用いた打撃感提示

Pseudo-haptics の強みは特殊な装置を用いずに多様な触感を提示できる点にある。その強みを生かす検討の一環として、既存の VR コントローラ内臓の振動子では提示が困難な打撃感を、視覚刺激を変調することで増強することを考えた。本研究では格闘ゲームなどに実装されているヒットストップと呼ばれる視覚刺激を活用する方法を検証した。ヒットストップとは「打撃の瞬間にアニメーションを停止する」もしくは「遅延を加える」ことを指す。この視覚刺激の例題として、VR 空間におけるテニスゲームを取り上げた。ヒットストップの実装としては図 8 に示すように、アニメーションを停止もしくは遅延させる時間をパラメータとして制御した。システムを実装し効果を確認する被験者実験を行った結果、ヒットストップの提示時間が大きくなるにつれ打撃感、プレゼンス、体験の楽しさの評価が増加し、0.2 秒の時に最大になった。ヒットストップは視覚フィードバックのみでは効果が薄い、振動刺激と組み合わせることで、これらの評価向上に対して高い効果を持つことが示唆された。

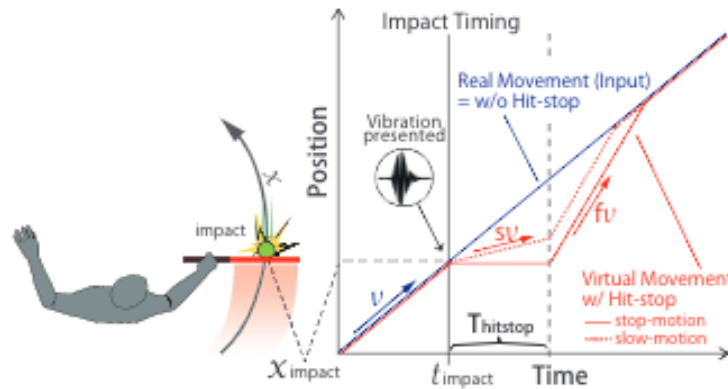


図 8 ヒットストップを用いた Pseudo-haptics による打撃感提示

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ujitoko Yusuke, Ban Yuki	4. 巻 14(4)
2. 論文標題 Survey of Pseudo-haptics: Haptic Feedback Design and Application Proposals	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Haptics	6. 最初と最後の頁 699-711
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TOH.2021.3077619	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 伴 祐樹、宇治土公 雄介	4. 巻 24
2. 論文標題 バーチャル紐を用いることによるタッチスクリーンでのPseudo-haptics効果の向上	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本バーチャルリアリティ学会論文誌	6. 最初と最後の頁 389-399
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18974/tvrsj.24.4_389	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Yuki Ban, Yusuke Ujitoko
2. 発表標題 Hit-Stop in VR: Combination of Pseudo-haptics and Vibration Enhances Impact Sensation
3. 学会等名 IEEE World Haptics Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kenichi Ito, Yuki Ban, Shin'ichi Warisawa
2. 発表標題 AlteredWind: Manipulating Perceived Direction of the Wind by Cross-Modal presentation of Visual, Audio and Wind Stimuli
3. 学会等名 SIGGRAPH Asia 2019 Emerging Technologies (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenichi Ito, Yuki Ban, Shin'ichi Warisawa
2. 発表標題 Manipulation of the Perceived Direction of Wind by Cross-modal Effects of Wind and Three-dimensional Sound
3. 学会等名 2019 IEEE World Haptics Conference (WHC) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Ujitoko, Yuki Ban, Koichi Hirota
2. 発表標題 Presenting Static Friction Sensation at Stick-slip Transition using Pseudo-haptic Effect
3. 学会等名 2019 IEEE World Haptics Conference (WHC) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuki Ban
2. 発表標題 Displaying Deformation of Virtual Objects Using Visuo-Haptic Interaction
3. 学会等名 International Display Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019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

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
---------	---------