

令和 5 年 6 月 17 日現在

機関番号：22604
研究種目：若手研究
研究期間：2019～2022
課題番号：19K20325
研究課題名（和文）偏加速度振動に生じる疑似力覚と電気刺激を併用したVRグローブと提示制御手法の開発

研究課題名（英文）Development of VR Glove and Presentation Control Method Using Pseudo Force Generated by Asymmetric Vibration and Electrical Stimulation

研究代表者
ヤエム ヴィボル（Yem, Vibol）
東京都立大学・システムデザイン研究科・助教

研究者番号：20808258
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、バーチャルリアリティやテレオペレーションのための、機械刺激と電気刺激を併用した、触感再現のグローブとその提示制御手法を開発している。基本的に指先における触覚電気刺激と機械刺激の感覚特性とそれぞれの併用の感覚特性を明らかにするのである。本研究成果として主に2点ある。一つ目は、指先における機械振動刺激と電気刺激の相互作用に関する現象を検討した。二つ目は、これまでに触覚電気刺激による生起する感覚の強さのばらつきを減少させるために、皮膚インピーダンスの推定による電気刺激の感覚閾値の推定手法を提案した。それらの成果を触覚やバーチャルリアリティに関する国内外学会にて発表した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
機械刺激と電気刺激を併用することで、機械刺激のみと比較して広い範囲の触感を提示することが可能となり、触覚ディスプレイも小型・薄型・軽量化を実現できる。一方で触覚電気刺激は生起される感覚の強さにばらつきが大きく、実用化の妨げとなっている。そこで、本研究で提案した刺激電流閾値を推定する手法により今後の実用化に繋がることを期待できる。また、あらゆる触感再現手法を開発するために、電気刺激と機械刺激の相互作用を理解する必要がある。本研究の成果がその手法の開発に貢献できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we are developing a glove that reproduces tactile sensation and its presentation control method using both mechanical and electrical stimulation for virtual reality and teleoperation. Basically, we investigate the sensory characteristics of electro-tactile stimulation and mechanical stimulation at the fingertip, and the sensory characteristics of their combination of these stimuli. There are two main results of this study. First, we investigated the phenomenon of the interaction between mechanical vibration stimulation and electrical stimulation at the fingertip. Second, we proposed a method for estimating the sensory threshold of electrical stimulation by estimating skin impedance in order to reduce the variation in the intensity of the sensation. These results were presented at domestic and international conferences on the fields of haptics and virtual reality.

研究分野：バーチャルリアリティ、ハプティクス

キーワード：VRグローブ 疑似力覚 電気刺激 力触覚提示

1. 研究開始当初の背景

我々は実際の物体を掴むまたは放すと、指先に反力および物体表面との接触面積の変化を知覚し、これらの感覚の統合によってその物体の硬軟感または粘着感および形状を認識する。従って、これらの感覚をバーチャル物体に対して再現するためには、物体の反力と皮膚上の接触面積変化を同時に提示することが必要である。従来、バーチャル環境への応用や遠隔作業などのために、物体の反力を手に提示する外骨格型グローブが数多く開発されている。しかし、物理的な力の提示には一般に装置が大型となり、ウェアラブル装置として活用しがたい。また、立体的な形状を提示するためには、物体との接触面積をコントロール可能な機構にしなければならず、実現は困難である。

力触覚提示装置を小型化するには、物理的な力の代わりに、擬似力覚という錯覚や電気刺激で感覚受容器を直接刺激する方法がある。申請者の研究では、指先に取り付けた DC モータに鋸波等の非対称な波形(機械刺激による非対称の振動)を与えると疑似力覚が生じることを見出し、この現象を利用してバーチャル物体の反力を表現できる小型な力触覚グローブを開発している。また、陰極皮膚電気刺激と腱電気刺激により物体の硬軟感や粘着感のある範囲で表現可能であることを確認できた。電気刺激は、マトリクス状の電極を利用するため、物体の形状を提示可能となっている。こうした研究成果から申請者は、広い範囲および高精度で物体の硬軟感、粘着感および立体的な形状を提示するために、擬似力覚と電気刺激の併用を考えた。しかし、これらの感覚提示において各刺激の明確な担当や有効な刺激の組み合わせる方法がまだ明らかになっていない。

2. 研究の目的

本研究では、指先における擬似力覚と電気刺激を併用した手法で、物体の硬軟感や粘着感の範囲を広く、立体的な形状の認識精度を最大化する制御アルゴリズムを開発している。このために本研究では、多数の非対称振動の波形を与えて生じる疑似力覚と各感覚の強度・精度(多指で物体を掴むとき形状を認識する精度)との関係、パルス幅やパルス繰替え周波数(refresh frequency)などの電気刺激のパラメータと各感覚の強度・精度との関係を調査する。各感覚の軸において疑似力覚と電気刺激の特徴点および主担当を見出し、これに基づいてマルチ刺激の提示方法を最適化する。

基本的に本研究では、指先にあらゆる触感再現の手法を見出すために電気刺激と機械刺激の併用によって生じられる感覚特性や相互作用を検討するのである。また、今後の実用化のために研究開始当初の目的に加え電気刺激の安定化の手法も検討した。

3. 研究の方法

研究開始当初の計画では、所望な触感を再現する手法を開発するために、疑似力覚の特徴・主担当の探索、陰極皮膚電気刺激と腱電気刺激の特徴・主担当の探索および、疑似力覚と電気刺激を併用した提示手法の最適化と刺激空間の構築の3つの観点で研究を行う予定である。

しかしながら、上記の項目を実施する前に電気刺激と機械刺激の相互作用を調査しなければならないと気づき、所望な触感を再現する手法の開発の第一段階として、この観点に関する複数回の実験を行った。すなわち、電気刺激により機械刺激の知覚強度が変更するか、または、機械刺激により電気刺激の知覚強度が変更するか、この現象を明らかにするための心理実験を実施した。また、電気刺激の実用化のために、電気刺激を安定化しなければならない。ここで本研究では、皮膚の抵抗値とキャパシタンス値をリアルタイムで推定する手法を提案し、これらの値に基づき安定化手法を検討する。

4. 研究成果

本研究の成果として、電気刺激と機械刺激の相互作用および、電気刺激の安定化の二つに分かれる。

4.1. 電気刺激と機械刺激の相互作用

本実験では、所望な触感再現の手法を開発するために、機械刺激の振動周波数における、電気刺激と機械刺激の相互作用の減少を検討する。このために、以下の3つの刺激条件で実験を実施した。

感覚閾値の近傍における相互作用

実験の様子と実験装置は図 1.a~c に示す。実験参加者は神経疾患を持たない10名(男性5名、右利き9名、 22.0 ± 1.0 歳)であった。

電気刺激の閾値を測定した後、電気刺激の電流をその閾値の1.2倍の強さにした。そして、機械刺激を電気刺激と同じ強度まで感じるように機械刺激の強度を調整させた。続いて、電気刺激と機械刺激を同時に与える時、各刺激の強度が減少/増幅するように感じるか調査した。結果は、図 2.a と図 2.b に示す。1Hz 以外の周波数において、電気刺激により機械刺激を強く感じさせる

ことが分かった．すなわち，機械刺激が電気刺激により感じやすくなる（図 2.a）．これに対して電気刺激の強度は，各機械刺激の周波数において有意な変動が見られなかった．すなわち，機械刺激が電気刺激の強度に影響を与えないことが分かった．

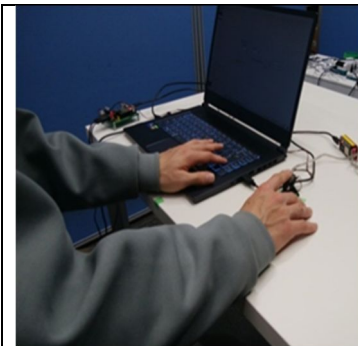


図 1.a 実験の様子．実験参加者は右手の人差し指を電極の上に置き，左手で各刺激の強度を調整する．

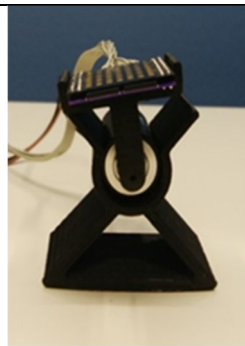


図 1.b 機械刺激の振動と電気刺激を提示する実験装置．電極を DC モーターで駆動するアームに取り付けた様子．

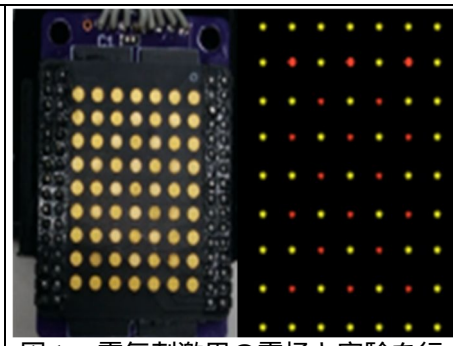


図 1.c 電気刺激用の電極と実験を行う時の刺激点（赤い点）

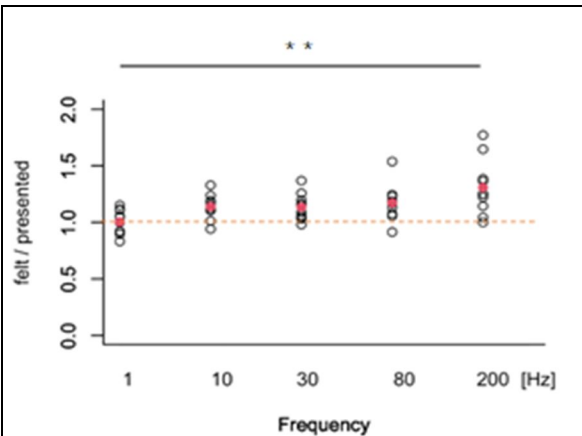


図 2.a 横軸は機械刺激の振動周波数，縦軸は単独で提示した強度に対する，電気刺激と融合した機械刺激の知覚強度の割合．丸プロットは各被験者のデータ，赤プロットは平均値．1 を超える場合，電気刺激により機械刺激の強度をより強く感じさせることを意味する．

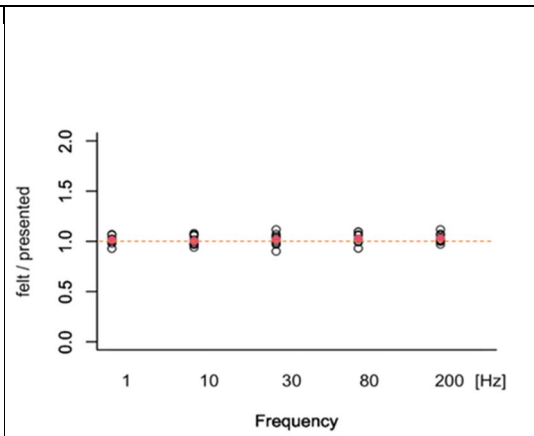


図 2.b 横軸は機械刺激の振動周波数，縦軸は単独で提示した強度に対する，機械刺激と融合した電気刺激の知覚強度の割合．1 を超える場合，機械刺激により電気刺激の強度をより強く感じさせることを意味する．

感覚閾値より十分に強く知覚させる条件における，同じ知覚強度の機械刺激による電気刺激への影響

実験では，感覚閾値の近傍ではなく，主観的に十分に強く感じられる刺激における機械刺激の影響を検討する．また，機械刺激を電気刺激と同じ強度で実施する．実験参加者は神経疾患を持たない 14 名（男性 9 名，女性 5 名， 22.0 ± 1.0 歳）であった．

実験の結果は，図 3.a に示す．この結果により，すべての機械刺激の振動周波数において，感覚閾値より十分に強く知覚させても機械刺激が電気刺激の知覚強度に影響を与えないことが分かった．

感覚閾値より十分に強く知覚させる条件における，比較的強い知覚強度の機械刺激による電気刺激への影響

では，機械刺激が電気刺激と同じ強度であったのに対し，本実験では機械刺激を電気刺激と同じ強度で感じるように調整してもらってから機械刺激の負荷電圧を 2.5 倍高く設定した．すなわち，機械刺激を十分に電気刺激より強く感じるようにした．実験参加者は，皮膚に神経疾患のない 11 名（男性 7 名，女性 4 名， 22.0 ± 1.0 歳）であった．

実験の結果は図 3.b に示す．この結果により，すべての機械刺激の振動周波数において，機械刺激を電気刺激より強く感じさせる時も，機械刺激が電気刺激の知覚強度に影響を与えない．

図 2 と図 3 の結果から，電気刺激によって機械刺激の感覚強度を強く感じさせ，機械刺激は電気刺激の知覚強度に影響を与えないことが明らかになった．電気刺激は，電極アレイの刺激点により物体の形状や指腹との接触面積を提示するためによく使われている．一方で，機械刺激の振動は，表面粗さの提示などに広く応用されている．電気刺激は機械刺激の強度を有意に強く感じ

させるため、機械刺激で表現される表面粗さの感覚に影響を与えると予想できる（例えば、より粗く感じる）。これに対して、機械刺激は電気刺激への影響を及ぼしにくいと期待できる。したがって、両方の刺激を併用しても、形状や接触面積のコントロールをしやすと考えられる。

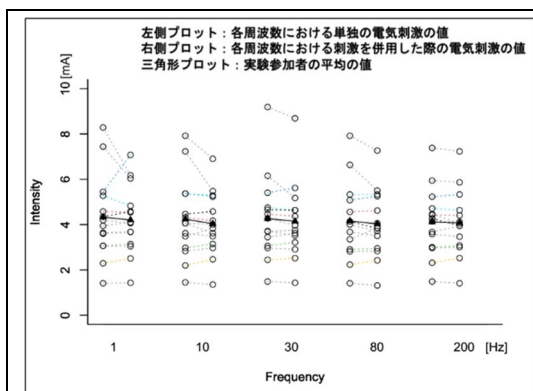


図 3.a 同じ知覚強度の機械刺激による電気刺激への影響 (N = 14). 縦軸は電流の強度, 横軸は、機械刺激の振動周波数.

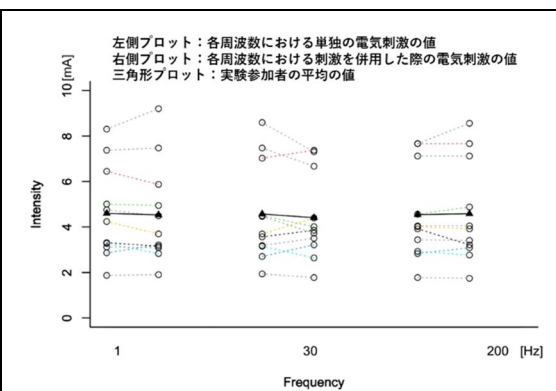


図 3.b 比較的強い知覚強度の機械刺激による電気刺激への影響 (N = 11) 縦軸は電流の強度, 横軸は、機械刺激の振動周波数.

4.2. 電気刺激の安定化

電気刺激の安定化手法を検討するために、皮膚の抵抗値 (R) とキャパシタンス値 (C) をリアルタイムで推定する手法を提案した。皮膚の電気的モデルとして、 RC - R 回路が良く採用されている。先行研究によると RC と直列に接続される抵抗の値は小さいため、本研究は、図 4.a に示すように、 R と C の並列接続電気回路を皮膚のモデルとした。従来、皮膚インピーダンスの測定には、Cole-Cole 円弧法が多く用いられてきた。これは、入力信号が複素平面上の正弦波電圧の場合、出力信号の振幅と位相の変化を円弧状に描くことで、近似式によりインピーダンス値を推定するものである。しかしこの方法は長時間の電気刺激を必要とするため、リアルタイムに皮膚インピーダンスを観察するには限界があった。これに対して本研究では、刺激の電流パルスごとのインピーダンスの測定を可能とするために、電極間の電圧波形に最小二乗フィッティング法を用い、皮膚の抵抗値とキャパシタンスを推定する。電気刺激の安定化手法を検討するために、皮膚コンデンサ成分に蓄えられるエネルギーの検討と皮膚のインピーダンス推定値による感覚閾値の推定を行った。

皮膚コンデンサ成分に蓄えられるエネルギーの検討

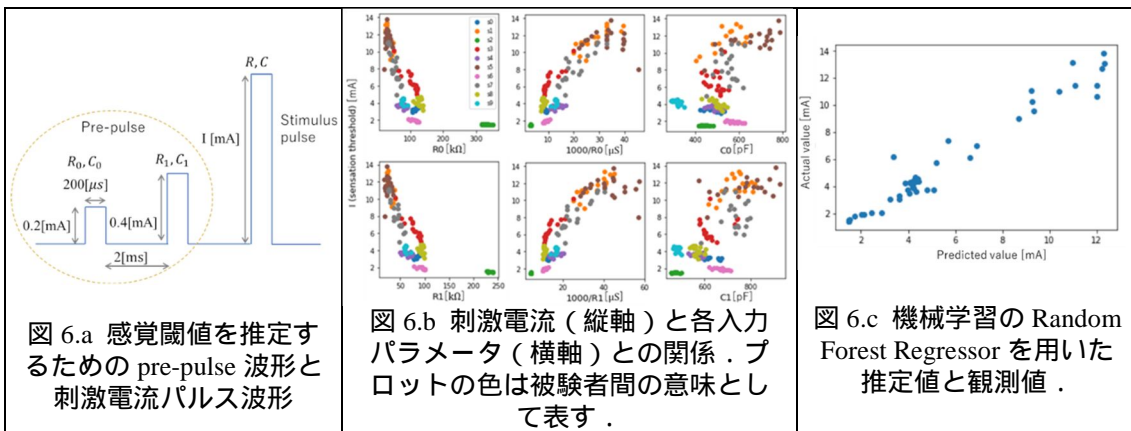
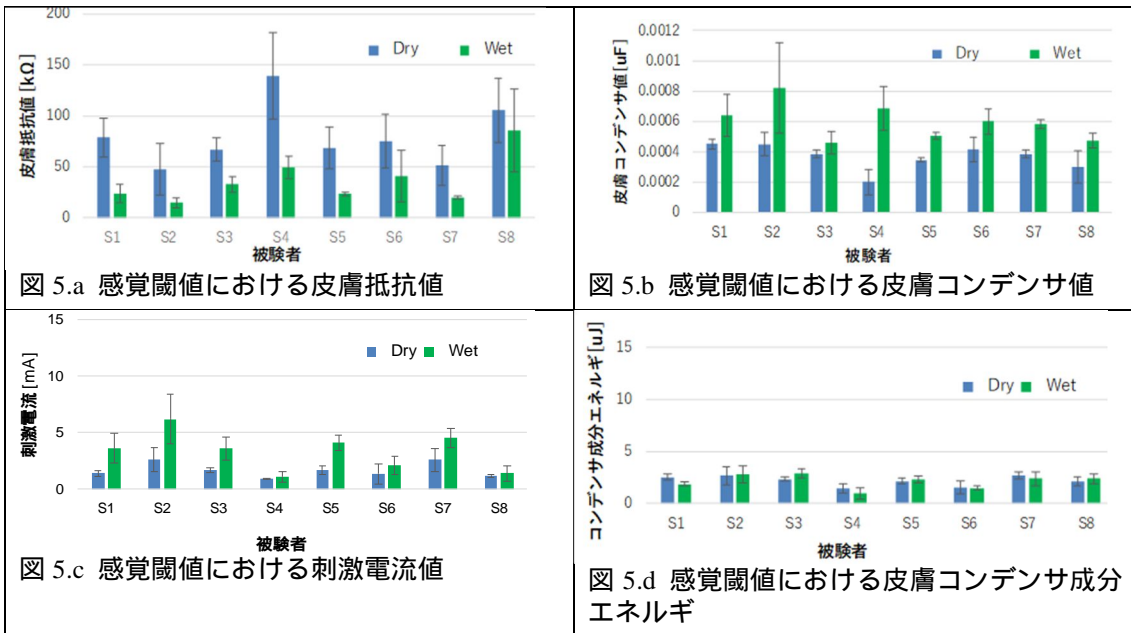
男性 7 名と女性 1 名、22 歳から 25 歳までの大学院生を採用し本実験に参加させた。実験を行う際に、各実験参加者を椅子に座らせ右手の人差し指を電極の上に置くように伝えた。乾燥条件 (Dry) では指をティッシュでよく拭かせた。湿潤条件 (Wet) は、今回は指先の皮膚をアルコールジェルで濡れさせることで擬似的に状態を作成した。実験の装置と様子を図 4.b に示す。

各被験者の皮膚抵抗、キャパシタンス容量、感覚閾値の電流とキャパシタンス成分のエネルギーの測定の結果を図 5.a - 5.d に示す。図 5.a と 5.b により、アルコールジェルで指先の皮膚を濡れさせたことで皮膚抵抗が減少し、皮膚コンデンサの容量が増加したことが分かる。この結果は、先行研究と同様の現象であった。手が湿った時、より広い面積の抵抗とコンデンサが関与することによって皮膚的電気回路がさらに並列接続される状態であると考えられる。

皮膚が湿った時、ほぼすべての実験参加者において閾値の電流が増加したことが確認された。電流が増加したのは、抵抗が低く、電極間の電圧が下がるため、十分なエネルギーを与えるためには電流を上げる必要があったためと考えられる。また皮膚表面だけを電流が流れてしまい、皮膚深部に到達しなかったためとも考えられる。この結果から、電気刺激制御においてコンデンサ成分の同定と、そのコンデンサに貯まるエネルギーを一定とする制御を採用することが安定な感覚提示につながる可能性が示された。

皮膚のインピーダンス推定値による感覚閾値の推定

10 名の実験参加者が本実験に参加した (男性 6 名女性 4 名, 20-38 歳)。実験を行う際に、各実験参加者を椅子に座らせ、右手の人差し指をほぼ一定の接触力で軽く電極の上に置くように伝えた。本実験では、皮膚を湿潤状態に保つため、実験の前に指先の皮膚に 20% 尿素配合クリームを薄く塗布し、1 分程度持ってから計測を行った。なお乾燥状態ではインピーダンスは非常に高くなり、個人差も大きいため、本研究は湿潤状態にしてある程度安定化させた上で電気刺激を行うことを前提とした。電流パルスを図 6.a に示す。実験は上下法により感覚閾値を測定するタスクであり、上昇と下降との変更点において、pre-pulse の R_0 , C_0 , R_1 , C_1 と刺激電流の閾値 I を記録した。



感覚閾値における刺激電流と各入力パラメータとの関係および感覚閾値（電流値）の推定値と観測値の関係をそれぞれ図 6.b と図 6.c に示す．図 6.b によると，刺激電流は皮膚のキャパシタンスとほぼ比例関係にあることが分かる．これは，先行研究でも確認されていたが，一方でばらつきが大きく正確に刺激電流を推定するためには，キャパシタンスのみでは不十分であることが分かった．また，刺激電流は皮膚のコンダクタンス（抵抗の逆数）ともほぼ比例関係にあり，刺激電流の推定のための重要な入力パラメータであると考えられる．測定の結果，感覚閾値における刺激電流は約 1.5 mA から 14.0 mA まで変動し，個人差が非常に大きいことがわかる．

感覚閾値における刺激電流は，各 pre-pulse における皮膚のコンダクタンスとキャパシタンスに正の相関関係があると見られるが，より正確に刺激電流を推定するため，本研究では非線形回帰分析を行った．図 6.c は機械学習の Random Forest 回帰の評価である．平均絶対誤差(MAE)は 0.519， $R^2 = 0.953$ で，強い相関関係を持つことが分かった．図 6.c によると学習したモデルの精度は高かったと言えるが，実際に応用するには注意が必要である．例えば推定値が 12 mA の際の実際の観測値は約 10 mA から 14 mA であり，観測値より高い推定値の通りに刺激を行うと痛みを生じる可能性がある．また，推定値がほぼ 4 mA の際に，観測値が 6 mA となった場合があり，この場合は刺激を感じない可能性もある．このような誤差を生じるため，最初に電極に触れたときに最も適切な刺激電流になるように推定した閾値の倍数（例えば，推定閾値の 0.9, 1.0, 1.1 倍の電流）をユーザ自身に小さな値から選択させ，その後のインピーダンス変化に対してはこの倍数を継続的に用いることにより安全かつ迅速に閾値調整を行うことが出来ると考えられる．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Keigo Ushiyama, Vibol Yem, and Hiroyuki Kajimoto
2. 発表標題 Dexterous Finger Teleoperation Using Electro-Tactile Display and Multi-DOF Gripper
3. 学会等名 AsiaHaptics 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 ヤヰム ヴィボル
2. 発表標題 指先における触覚と前庭感覚フィードバックによるバーチャル体験
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 ヤヰム ヴィボル
2. 発表標題 皮膚インピーダンスによる触覚電気刺激の感覚閾値のリアルタイム推定
3. 学会等名 第27回日本バチャールリアリティ学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Minoru Unno, Yusuke Kikuchi, Kentaro Yamaoka, Gaku Sueta, Vibol Yem, Yasushi Ikei
2. 発表標題 Action Reproducer: Virtual Reality Rehabilitation System to Reduce Fear of Walking
3. 学会等名 ACM SIGGRAPH (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 ヤエム ヴィボル, 梶本 裕之, 池井 寧
2. 発表標題 皮膚のRとC値による陰極電気刺激の感覚値の推定
3. 学会等名 ハプティクス研究委員会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山口 大成, 梶本 裕之, 福井 隆雄, ヤエム ヴィボル
2. 発表標題 電気刺激と機械刺激の同時付加による指先触知覚の生成：単一刺激との比較
3. 学会等名 ハプティクス研究委員会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Honoka Haramo, Vibol Yem, Yasushi Ikei
2. 発表標題 Transmission of Rubbing Sensation with Wearable Stick-Slip Display and Force Sensor
3. 学会等名 HCI International 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 ヤエム ヴィボル, 梶本 裕之, 池井 寧
2. 発表標題 電気刺激安定化のための皮膚コンデンサ成分に蓄えられるエネルギーの検討
3. 学会等名 第26回 ハプティクス研究委員会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 ヤエムヴィボル, 池井寧, 梶本裕之
2. 発表標題 多指先に粘着感を提示するための電気刺激手法
3. 学会等名 第1回神経刺激インタフェース(NSI)研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 原茂 帆乃夏, YEM VIBOL, 池井 寧
2. 発表標題 ウェアラブル回転円筒型接触子によるなぞり感覚の再現
3. 学会等名 第24回日本バチャールリアリティ学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 原茂帆乃夏, ヤエム ヴィボル, 池井 寧
2. 発表標題 ウェアラブル回転円筒型接触子と力センサによるなぞり感覚の伝送
3. 学会等名 VRと超臨場感 研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Vibol Yem, Hiroyuki Kajimoto, Katsunari Sato and Hidekazu Yoshihara
2. 発表標題 A System of Tactile Transmission on the Fingertips with Electrical-Thermal and Vibration Stimulation
3. 学会等名 HCI International 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Vibol Yem, Yasushi Ikei, Hiroyuki Kajimoto
2. 発表標題 Forward-Flexion Illusionary Force in Thumb-Index and Middle Fingers with Electrical Stimulation for Stickiness Haptic Feedback
3. 学会等名 IEEE World Haptic Conference WIP 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Vibol Yem
2. 発表標題 Wearable Tactile Device for Fingertip Interaction with Virtual World
3. 学会等名 International Display Workshops (IDW) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Honoka Haramo, Vibol Yem, Yasushi Ikei, Makoto Sato
2. 発表標題 Wearable Stick-Slip Display on Fingertip to Reproduce Rubbing Sensation
3. 学会等名 International Display Workshops (IDW) (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
---------	---------