

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：12612

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K20627

研究課題名（和文）身体性の再構築を前提とした異部位触力覚提示の応用展開

研究課題名（英文）Development and application of haptic transfer method based on body reconstruction

研究代表者

梶本 裕之（KAJIMOTO, Hiroyuki）

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：80361541

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 19,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は指先への触覚提示が本質的に抱える課題であるサイズ上の課題に対して、指先で触れて感じる触力覚を、指先以外の身体部位に提示する異部位提示（触覚転移）によって解決を図った。デバイス開発においては指先に感じるべき触覚を額や前腕に提示する手法を高品位化するとともに、従来知られていなかった電気刺激による額への温度感覚提示等の手法を新たに開発した。また皮膚感覚提示によって力覚を生じる新たな現象を電気触覚ディスプレイにおいて見出した。さらにVR環境および遠隔環境を用いた評価実験により、本来指先に感じるべき触覚を額や背中へ提示した場合に操作主体感が損なわれないことを検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は従来の触覚提示研究が暗黙の了解としてきた「手による操作の触覚フィードバックは手に行われる」という前提を見直し、現在の頭部搭載型ディスプレイに無理なく組み込める形で触覚提示を行った際に、少なくとも主観的な操作感が損なわれないことを示した点で、今後のバーチャルリアリティにおける触覚の扱い方を問い直すという社会的意義がある。また新たに発見された複数の触覚提示手法、例えば電気刺激によって額に冷覚を生じるといった知見や振動提示によって圧覚を生じるといった知見は、今後学術的により深く探求すべき課題を見出したものと言える。

研究成果の概要（英文）：This research attempted to solve the problem of size, which is an intrinsic issue of tactile presentation to the fingertips, by presenting the tactile sensation felt by touching the fingertips to body parts other than the fingertips, called "tactile transfer". In the development of the devices, we improved the method of presenting tactile sensation to the forehead and forearms, and also developed a new method of presenting temperature sensation to the forehead by electrical stimulation, which had not been known before. We also discovered a new phenomenon in which force sensation is generated by skin sensation presentation in an electrotactile display. Furthermore, through evaluation experiments using VR and teleoperation environments, we verified that subjective operability that should originally be felt at the fingertips are not impaired when presented on the forehead or back.

研究分野：バーチャルリアリティ

キーワード：触覚 皮膚感覚 バーチャルリアリティ ヒューマンインタフェース

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

多くの分野で視聴覚を中心とした VR 技術が普及しつつある一方で、触覚提示については決定的な普及に至っていない。触力覚が真価を發揮する場面は「複数指で物体を操る」状況であり、そのためには各指に多自由度の力と、指皮膚の圧力分布を提示する必要がある。しかし指先用の多自由度力覚提示は、各指に一自由度の力を提示するのみか、指一本に重厚な装置を装着する結果となっており、各指で自在に物体を操る状況を実現できておらず、また指皮膚に対する分布型の提示も視覚障害者用の点字装置の転用にとどまり、高度な人の技能をサポートするレベルではなかった。これは(1)そもそも多指に多自由度の力覚を提示し、かつ指の動きを阻害しない小型アクチュエータが存在せず、(2)指先の触覚解像度(1mm 程度)で配置でき、かつ皮膚という粘弾性体を駆動する超小型アクチュエータも存在しない、という根本的な問題によるものであった。

本研究は二つの着眼点でこの課題に取り組むものであった。第一は、「指先で触れる際の触力覚は、指先に提示される必要はないのではないか」というものである。指先を提示対象としなければ、例えば前腕や背中の大面積に提示装置を配置でき、アクチュエータに課せられる制約は劇的に軽減される。こうした異部位提示は、感覚義手の分野で喪失部位の感覚を残存部位に提示するという形で数多く提案されてきたが、振動を記号的に伝えるに過ぎなかった。また他の手指や足裏に提示する提案もあるものの、認識や作業にとってもっとも重要な多自由度の力提示は行われていなかった。

本研究の第二の着眼点は、「当初は不自然でも、必要十分な情報を提示することによって、一定の訓練で後天的に(あたかも義手使用者が義手を自身の手と感じるがごとく)「自然」と思える触力覚提示となるのではないか」というものである。指先の感覚を指先以外に提示するのだから、当初の感覚は「自然」とは言い難いだろう。しかし各指の力方向情報まで含めて提示しているから、多くの認識や作業にとって十分な情報量を提示しているはずであり、道具として使いうる「納得感」までは実現できると考える。ここでさらに訓練によって、「自然」な感覚すなわち自己身体感につながるなら、現実的な手法によって迫真性を持ったディスプレイが実現したといえる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、人の触知覚を本来その人が持つ能力を超えたレベルに引き上げるための触力覚提示の基盤構築である。そのために、「指先で触れて感じる触力覚を、指先以外の身体部位に提示する」、異部位提示手法を用いる。萌芽研究で確認された手法を發展させ、バーチャルリアリティ (VR) 遠隔操縦等の応用シナリオでの実証を行う。

3. 研究の方法

本研究は次の3つの段階を経て行った。第一に異部位触力覚提示の要素技術の確立である。第二に異なる部位に提示された触覚と力覚の融合方法の検討である。第三に VR 環境内タスク評価による有効性の検証である。



図 1 (左)指 顔面触覚変換、(中)指 腕力覚変換、(右)電気刺激による額多点刺激

第一の異部位触力覚提示の要素技術の確立に関しては、本研究が基とした萌芽研究の成果を元として発展させる形で行った。萌芽研究では前腕への力覚提示と顔面への触覚分布提示装置のプロトタイプを開発し、VR 空間での指先操作に対応した触覚提示が主観的に違和感のないものとなることを確認した (図 4(左)(中))。本研究項目ではどの身体部位に提示することが高い触力覚提示能力と直感性を担保するか再検討するとともに、現在のプロトタイプで比較的大型となっている力覚提示の大幅な小型化を試みる。このために我々が持っている基盤技術の一つである空気圧による触力覚提示手法を援用する。さらに我々がこれまで指先用に開発してきた電気刺激による触覚提示を顔面等身体各所に適用し、薄型軽量の触覚分布提示を実現する。

第二の触覚と力覚の融合方法の検討に関しては、これまでの試作では、力の方向を含めた力覚提示と触覚分布提示をそれぞれ独立に行ってきた。しかし手掌部による物体の操りの際には、この力覚と触覚は常に同時に発生し相補的な役割を担っていると考えられる。このため、異部位への触覚と力覚の同時提示について検討する必要がある。より実現性の高い、同じ部位(例えば前腕)に対する触覚と力覚の同時提示を行うと共に、触覚と力覚がそれぞれ異なる部位に提示された際に 2 つの情報を融合して利用できるかどうかを検討する。難しい場合、例えば触覚分布提示に力覚情報を加える(例えば前者を振動、後者を圧迫によって表現)する等の手法も検討する。

第三の VR 環境内タスク評価による有効性の検証に関しては、他の研究項目遂行時に常に並行して行い、研究が正しい方向に進んでいることを確認する役割を持つ。主観的な没入感等に関する評価を行うとともに、実際の触力覚を用いるタスクに置いても提案手法が有用であることを示す。触力覚を必要とするタスクとして一般的な Peg-in-Hall タスク(円筒形の物体を把持し、指定された穴にはめ込む、産業用ロボットのベンチマークに多く用いられるタスク)を VR 環境中に構築し、指先触覚提示や力覚提示との比較によって有効性を示す。

4. 研究成果

第一の異部位触力覚提示の要素技術の確立に関しては、まず指先の触覚を背中に提示するシステムに関して、従来は背中に振動子を配置する構成をとっていたが、振動提示では空間的に正確な知覚を実現することが困難であることが判明した。このため背中に圧覚を提示するシステムを新たに構築し、評価を行った(図 2 左)。また指先の触覚を顔、特に頭部搭載型ディスプレイによって覆われる頬部分に提示する手法に関しては、空気圧駆動の方式と末端部の設計を見直し、より低い圧力変化で十分な圧覚を生じる条件を探った。特に設計最適化のために FEM シミュレーションを行い、空気穴の個数やサイズに関する最適化を行った。

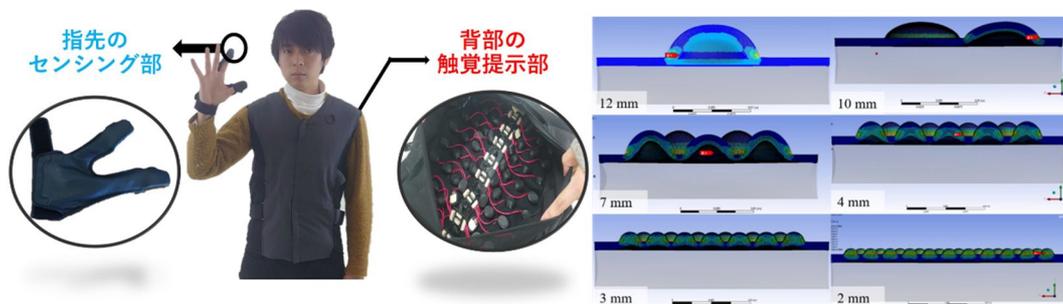


図 2 (左)指先触覚情報の背部転移、(右)空気圧吸引による触覚提示の FEM シミュレーション

また触覚提示素子そのものの開発も行った。まず身体への振動提示においては、従来偏心錘型、

あるいは共振型の振動子が用いられるが、これらは質量を皮膚上で加振することで反作用としての振動を皮膚に作用させるという原理では共通している。これに対して、筐体と振動体の双方を皮膚に貼付することで効率のよい触覚提示ができること、特に低周波での駆動に適していることを示した(図 3 左)。この手法の高効率な振動提示機構の改良を進め、振動提示性能が従来型の振動子を凌駕することを確認し、テクスチャ感の再現実験によって高い実用性を確認した。



図 3 (左)皮膚に貼付する高效率振動子

並行して、額部への触覚提示に関して新たな手法を二つ見出した。まず高解像度な触覚提示を実現できる電気刺激による触覚提示において、額で振動感覚や圧覚以外に温冷感覚を生起すること、部位を明示的に選択することによりその感覚が安定的に提示できることを見出した(図 4 左)。また額部には高周波を受容する機械受容器が存在しないという生理学的事実に基づいて、200Hz 付近に共振周波数をもつ小型直動アクチュエータを用い、搬送波として直動共振アクチュエータの共振周波数である 200Hz の正弦波を用い、原信号として数 Hz の信号を用いるという手法を見出した(図 4 右)。ここ時額には高周波を知覚する受容器が存在しないことから原信号の低い振動が明瞭に感じられる。

これらの手法は、手指の触覚を額部、すなわち頭部搭載型ディスプレイ装着部に提示するという異部位触覚提示において豊かな触感を提示しうること示したものとなる。

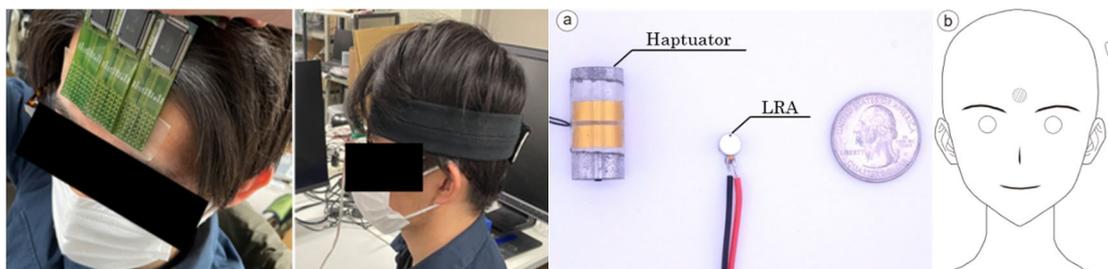


図 4 (左)電気刺激による額への冷覚提示 (右) 直動共振型振動子による額への低周波振動提示

第二の触覚と力覚の融合方法の検討に関しては、皮膚感覚提示によって力感覚の手がかりを提示する手法として電気刺激による時空間パターンの提示を試み、提示した指に対して垂直および水平方向に力感覚を生じることを確認し、定量評価した。また空気圧吸引を用いる場合、圧覚の提示は容易に行えるものの振動感覚の提示が難しく、また分布的な提示も難しいという課題があった。この課題を、電気触覚提示と組み合わせることにより解決を図った。その結果、例えば把持作業を指先で行う際に生じる微小滑り等を電気刺激で表現しつつ、空気圧による圧覚によって把持力そのものを提示するという組み合わせが有効であることを確認した。

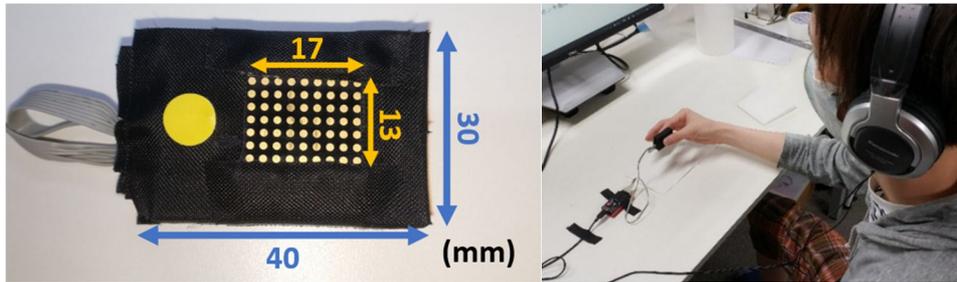


図 5 電気刺激による時空間パターンへの提示による力覚提示

第三の VR 環境内タスク評価による有効性の検証に関しては、まず指先の触覚を前腕に提示するシステムに関して、VR 空間中で手先で物体を持ち上げるというタスクを課し、指先が感じるべき感覚を実際に指先に振動により提示する手法と腕に提示する提案手法を比較する実験を行った。その結果、腕への感覚提示は主観的な体験としては遜色のないものになることが明らかとなった。さらに身体のどの部位で提示を行うことが有効であるかを検討するため左右の前腕と左右の足で比較実験を行い、指先の触覚は同じ手の腕に提示する際に最も高い臨場感を得られることが明らかとなった。

顔面部への触覚提示による異部位触覚提示に関しては、VR 環境での評価システムを作成し、指先の触覚を顔面部(頭部搭載型ディスプレイに内蔵)への触覚にマッピングした際の臨場感や作業性について評価した。その結果、臨場感に関して指先に触覚提示をする場合と変わらない高いスコアを得た。またこれまで 1 指に対する提示であったものを 5 指に対する提示に改めた実験においても同様の結果を得た。さらに VR 環境内での指先作業中に顔面に触覚提示されるといった状況における身体所有感と VR 体験の質全般を評価し、指先に直接触覚提示する場合と比肩する効果が得られることを明らかにした(図 6)。



図 6 VR 空間における 2 本指 (左) および 5 本指 (右) による作業の様子。実際の実験では指先への提示と HMD 内蔵素子による提示を比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Takayuki Kameoka, Hiroyuki Kajimoto	4. 巻 3
2. 論文標題 Design of Suction-Type Tactile Presentation Mechanism to Be Embedded in HMD	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers In Virtual Reality	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/frvir.2022.894873	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Masahiro Miyakami, Akifumi Takahashi, Hiroyuki Kajimoto	4. 巻 3
2. 論文標題 Head rotation and illusory force sensation by lateral skin stretch on the face	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers In Virtual Reality	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/frvir.2022.930848	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Shota Nakayama, Mitsuki Manabe, Keigo Ushiyama, Masahiro Miyakami, Akifumi Takahashi & Hiroyuki Kajimoto	4. 巻 13235
2. 論文標題 Pilot Study on Presenting Pulling Sensation by Electro-Tactile Stimulation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 66-74
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-3-031-06249-0_8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Taha Moriyama, Hiroyuki Kajimoto	4. 巻 15(1)
2. 論文標題 Wearable Haptic Device Presenting Sensations of Fingertips to the Forearm	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Haptics	6. 最初と最後の頁 91-96
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TOH.2022.3143663	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Takayuki Kameoka, Hiroyuki Kajimoto	4. 巻 1
2. 論文標題 Tactile Transfer of Finger Information through Suction Tactile Sensation in HMDs	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 2021 IEEE World Haptics Conference (WHC)	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/WHC49131.2021.9517176	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 Mitsuki Manabe, Keigo Ushiyama, Akifumi Takahashi, Hiroyuki Kajimoto	4. 巻 1
2. 論文標題 ibrotactile Presentation using a Motor within a Housing and Rotor Fixed to the Skin	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 2021 IEEE World Haptics Conference (WHC)	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/WHC49131.2021.9517228	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 Taha Moriyama, Hiroyuki Kajimoto	4. 巻 11
2. 論文標題 HARVEST: High-Resolution Haptic Vest and Fingertip Sensing Glove That Transfers Tactile Sensation of Fingers to the Back	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 1298
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app11031298	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 真鍋 光希、牛山 奎悟、高橋 哲史、梶本 裕之	4. 巻 28
2. 論文標題 反発する磁石の漏れ磁束を利用したウェアラブル触覚提示素子	5. 発行年 2023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 361 ~ 370
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18974/tvrsj.28.4_361	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takami Taiki, Saito Taiga, Kameoka Takayuki, Kajimoto Hiroyuki	4. 巻 Article No.: 10
2. 論文標題 LivEdge: Haptic Live Stream Interaction on a Smartphone by Electro-Tactile Sensation Through the Edges	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 SIGGRAPH '23: ACM SIGGRAPH 2023 Emerging Technologies	6. 最初と最後の頁 1-2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3588037.3595386	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 Takami Taiki, Saito Taiga, Kameoka Takayuki, Kajimoto Hiroyuki	4. 巻 Article No.: 7
2. 論文標題 ExtEdge: Haptic Augmentation of Visual Experiences of a Smartphone by Electro-Tactile Sensation Through the Edges	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 SUI '23: Proceedings of the 2023 ACM Symposium on Spatial User Interaction	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3607822.3614543	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20件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 M. Manabe, K. Ushiyama, A. Takahashi and H. Kajimoto
2. 発表標題 Energy Efficient Wearable Vibrotactile Transducer Utilizing The Leakage Magnetic Flux of Repelling Magnets
3. 学会等名 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shota Nakayama, Mitsuki Manabe, Keigo Ushiyama, Masahiro Miyakami, Akifumi Takahashi & Hiroyuki Kajimoto
2. 発表標題 resenting Sliding Sensation by Electro-tactile Stimulation
3. 学会等名 EuroHaptics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中山翔太, 真鍋光希, 牛山奎悟, 宮上昌大, 高橋哲史, 梶本裕之
2. 発表標題 指先側面への電気刺激による疑似力覚提示の検討
3. 学会等名 第27回 日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高見太基, 齋藤大雅, 亀岡高幸, 梶本裕之
2. 発表標題 スマートフォンの側面で皮膚電気刺激をするユーザインタフェースの検討
3. 学会等名 第27回 日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 亀岡高幸, 梶本裕之
2. 発表標題 顔面への皮膚吸引刺激における吸引孔形状の違いによる感覚変化
3. 学会等名 日本機械学会ロボット・メカトロニクス講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 亀岡高幸, 梶本裕之
2. 発表標題 顔面での皮膚吸引触覚刺激における有限要素解析
3. 学会等名 第26回 日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 真鍋光希, 牛山奎悟, 高橋哲史, 梶本裕之
2. 発表標題 筐体および回転軸を皮膚に固定したDCモータを用いた振動提示(第3報)
3. 学会等名 第26回 日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 真鍋光希, 牛山奎悟, 高橋哲史, 梶本裕之
2. 発表標題 皮膚に固定した磁石とコイルによる触覚提示の検討
3. 学会等名 第26回 日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 真鍋光希, 牛山奎悟, 高橋哲史, 梶本裕之
2. 発表標題 反発する磁石と電磁石同士を組み合わせた小型触覚提示素子の検討
3. 学会等名 第22回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 亀岡高幸, 梶本裕之
2. 発表標題 Haptopus: HMDへの吸引触覚提示機構の内蔵 気圧変調による硬軟感提示
3. 学会等名 日本機械学会ロボット・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 真鍋光希, 牛山奎悟, 高橋哲史, 梶本裕之
2. 発表標題 筐体および回転軸を皮膚に固定したDCモータを用いた振動提示
3. 学会等名 日本バーチャルリアリティ学会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 真鍋光希, 牛山奎悟, 高橋哲史, 梶本裕之
2. 発表標題 筐体および回転軸を皮膚に固定したDCモータを用いた振動提示(第2報)
3. 学会等名 第21回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 齋藤大雅, 張建堯, 亀岡高幸, 梶本裕之
2. 発表標題 額電気刺激による温度感覚提示の予備的検討
3. 学会等名 日本バーチャルリアリティ学会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 齋藤大雅, 張建堯, 亀岡高幸, 梶本裕之
2. 発表標題 額電気刺激による温度感覚提示の検討
3. 学会等名 第21回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yan Xue Teo, Taiga Saito, Takayuki Kameoka, Izumi Mizoguchi, Hiroyuki Kajimoto
2. 発表標題 Presentation of Slip Sensation Using Suction Pressure and Electrotactile Stimulation
3. 学会等名 EuroHaptics2024
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Takayuki Kameoka, Taku Hachisu, Hiroyuki Kajimoto
2. 発表標題 Virtual Hand Illusion Induced by Suction Pressure Stimulation to the Face
3. 学会等名 EuroHaptics2024
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Teo Yan Xue, Taiga Saito, Takayuki Kameoka, Izumi Mizoguchi, and Hiroyuki Kajimoto
2. 発表標題 Tactile Presentation with Air Suction and Electrical Stimulation
3. 学会等名 IEEE World Haptics Conference 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Taiki Takami, Taiga Saito, Takayuki Kameoka, Izumi Mizoguchi, and Hiroyuki Kajimoto
2. 発表標題 Pilot Study of Softness Presentation by Electro-Tactile Stimulation at the Edge of the Smartphone
3. 学会等名 IEEE World Haptics Conference 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高見太基, 齋藤大雅, 亀岡高幸, 溝口泉, 梶本裕之
2. 発表標題 スマートフォン側面部電気刺激インタフェースを用いた柔らかさ感を提示できるグリッパ入力手法の検討
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中山翔太, 牛山奎悟, 梶本裕之
2. 発表標題 指先側面への電気刺激による疑似力覚提示の検討(第二報)
3. 学会等名 日本バーチャルリアリティ学会
4. 発表年 2023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