

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 5 月 12 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H04690

研究課題名(和文) 経皮電気刺激による頭部末梢神経系への刺激を利用した多感覚提示インタフェース

研究課題名(英文) Multi-sensory display interface using percutaneous electrical stimulation.

研究代表者

青山 一真 (Aoyama, Kazuma)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・助教

研究者番号：60783686

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、前庭感覚、嗅覚、味覚、視覚などの頭部に存在する感覚器並びに神経を中心とした多感覚を経皮電気刺激によって刺激することで、感覚を提示するディスプレイ技術を開発し、経皮電気刺激による多感覚ヘッドセットの構築を目指すものである。

本研究課題を通じ、味覚電気刺激による基本五味の持続的抑制・増強手法の構築、触力覚提示による空中での触覚提示、前庭電気刺激を利用したVRアプリケーションのアウトリーチ活動、視覚電気刺激による単純な図形描画手法等を開発した。これらの電気刺激による単一の感覚モダリティ提示手法を組み合わせ、フェイスマスク型多感覚提示インタフェースを構築できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では独自で提唱している「電流経路仮説」に沿って電気刺激を設計し、その効果を心理物理実験によって検証するという仮説検証型のサイエンス研究により、工学的に意義のある刺激手法の設計を達成している。よって、この研究には電流経路仮説の妥当性を支持するという科学的意義と、その検証過程において得られた新たな刺激により、軽量・安価・小型な経皮電気刺激手法を用いた感覚ディスプレイ技術の高度化という工学的意義がある。

また、本研究の成果が社会に認知され始め、学会の招待講演や国内外の技術シーズ展示会、ひいては、産業フェーズ展示会においてもPES技術のアウトリーチができたことには、社会的な意義があった。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to develop the multi-sensory display interface using percutaneous electrical stimulation (PES). This study was targeting vestibular, visual, haptic, olfactory, and taste sensation.

Through this study novel PES methods were developed, e.g., (i) taste stimulation which can continuously enhance and suppress taste about five basic taste, (ii) haptic PES system which can replicate the hard and soft object in the midair, (iii) VR application using multi-pole galvanic stimulation, (iv) galvanic sight stimulation which shows simple diagram, and face mask type multi-sensory display interface contains all of technologies developed in this study.

研究分野：神経工学

キーワード：経皮電気刺激 パーチャルリアリティ 前庭電気刺激 味覚電気刺激 嗅覚電気刺激 触力覚電気刺激

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

経皮電気刺激(PES: Percutaneous Electrical Stimulation)は皮膚上に張り付けたゲル状または皿状の電極から微弱な電流を身体に流すことで、様々な感覚の神経を刺激して感覚を引き起こしたり、筋肉の収縮を引き起こすことのできる手法である。

PESは軽量で安価、小型な電気刺激装置のみで、様々な感覚を作り出したり、筋肉を収縮させたりすることができるため、人へ様々な感覚を通して直感的に情報を伝達する感覚提示技術としての応用が期待されている。近年ではPESの中でも感覚器や筋肉などの末梢器官への刺激ではなく、脳を刺激することを目的とした経頭蓋直流電気刺激(tDCS)や経頭蓋交流電気刺激(tACS)などの刺激手法も盛んに研究されている。

バーチャルリアリティやヒューマンインタフェースなどの研究領域では、特に末梢神経系の刺激により、感覚を作り出すことで、人に様々な体験をさせたり、人に情報をわかりやすく伝えたりといった目的でこのPESが利用されるようになってきた。

末梢神経へのPES手法には、刺激対象となる神経系ごとに下記の通り別個の名称で呼ばれる。

- ・前庭電気刺激(GVS: Galvanic Vestibular Stimulation) 前庭感覚の神経を刺激する。
- ・味覚電気刺激(GTS: Galvanic Taste Stimulation) 味覚の神経系を刺激する。
- ・視覚電気刺激(GSS: Galvanic Sight Stimulation) 視覚の神経系を刺激する。
- ・嗅覚電気刺激(GOS: Galvanic Olfactory Stimulation) 嗅覚の神経系を刺激する。
- ・触覚電気刺激(ETS: Electric Tactile Stimulation) 触覚の神経系を刺激する。
- ・筋電気刺激(EMS: Electric Muscle Stimulation) 筋肉を刺激する。

これらの電気刺激の刺激対象となる感覚神経の多くは、頭部に存在する。頭部にPESを適用する場合、電極の陽極と陰極の間にある頭部(身体)に電流が流れる。一方で、頭部は電気的な抵抗の低い皮膚や体液などの組織と、頭蓋骨などの抵抗値の高い組織が層をなしている構造である。この頭蓋骨の中へとこれらの神経系はつながっており、感覚神経ごとに異なる配置ではあるが、多くは頭蓋内あるいは頭蓋骨のくぼみに感覚器が存在する。これらのことを加味すると、頭部表面に電極を張り付けて電流を印加するPESにおいては、電流は頭蓋骨を容易に貫通はできないため、頭蓋骨に開いている孔が形成する抵抗値の低い経路を通して、感覚器またはその神経系が存在する部位に電場を形成することのできる一部の電流のみが神経を刺激することができると本研究では考えている。このPESの刺激電流が頭蓋骨の穴を通して対象となる神経組織上に電場を形成した電流成分のみが神経系を刺激するという仮説を「電流経路仮説」と呼ぶ。



電流経路仮説の概念図

このPESの刺激電流が頭蓋骨の穴を通して対象となる神経組織上に電場を形成した電流成分のみが神経系を刺激するという仮説を「電流経路仮説」と呼ぶ。

この電流経路仮説を実証することができれば、頭部上の孔の位置と電極位置との関係を加味した電流経路を設計することで、頭部または身体にある神経系を効果的に刺激し、様々な感覚を惹起することのできる新たな感覚提示手法を開発することができる考えられる。

また、PESが神経系を刺激するメカニズムは依然として未解明なままである。このメカニズムを解明することで、より安全かつ効果的にこのPESを利用したインタフェースを運用することが可能となると考えられる。

2. 研究の目的

本研究は、頭部を中心とした経皮電気刺激における独自の機序仮説である「電流経路仮説」を実証し、その神経刺激メカニズムを明らかにするとともに、電流経路仮説に基づいた経皮電気刺激の設計による効果的な経皮電気刺激の設計を可能とし、経皮電気刺激によってさまざまな感覚を提示することのできる多感覚ヘッドセットの構築に挑む。

3. 研究の方法

本研究で上述6つの経皮電気刺激を対象に、電流経路仮説に基づく刺激設計によって新たな感覚提示または感覚操作が可能なシステムの構築とその刺激を用いた応用アプリケーションの開発を行った。最後に、構築した各PES技術を利用した多感覚ヘッドセットの構築を行った。

4. 研究成果

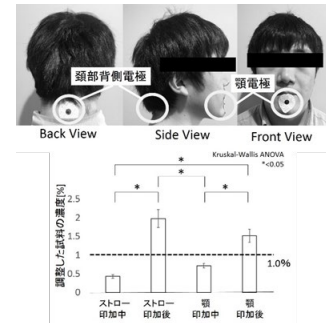
(1) GVSに関する成果

GVSに関しては、既に前後・左右・上下・yaw回転といった多自由度な前庭感覚提示が可能な多極GVSとなっている。この多極GVSは基礎研究をおおよそ終わらせ、応用研究としてGVSを用いた臨場感の高いVRアプリケーションとして、ジェットコースターに乗っているVR映像と同期したGVS提示によって臨場感の高いVR体験を可能とするGVS RIDEを開発した。開発したGVS RIDEシステムはSIGGRAPHやLaval Virtualなどの学会でのデモ展示や、Disruptなどの商品フェーズ技術展示会等で展示を行うなど、学術・産業の両面から研究成果をアウトリ

一チできた。

(2)GTSに関する成果

GTS についての研究は、GTS が可能とする味覚の提示と抑制、増強の3つの効果に関してそれらの効果の生起条件を心理物理実験によって検証した。GTS は味を PES で操作できるため、味を提示する味覚ディスプレイとしての応用が期待されている。GTS は口腔内が陽極の場合は電気味や金属味といった嫌な味が生起することが知られている。また、口腔内に陰極のみを設置した場合、塩水の呈する塩味が抑制される、この口腔内に陰極のみを設置した場合の GTS 刺激を停止した直後には口腔内の塩味が強く感じられる増強効果があることが知られていた。一方で、味覚は塩味だけでなく、苦味、うま味、甘味、酸味で構成される。このため、GTS を利用して味覚を操作するディスプレイ技術を構築するためには、GTS によって基本五味すべてを操作することが求められる。この GTS の機序を電流経路仮説に沿って考えると、電流は口腔内の味を呈する水溶液や食べ物を通して舌表面に流れると考えられる。このことから、口腔内の提味イオンの泳動が GTS における抑制と増強効果を生み出しているという口腔内イオン泳動説が提唱されている。本研究ではこの口腔内イオン泳動説を実証すべく、苦味と甘味を呈する電解質(MgCl₂, グリシン)と非電解質(カフェイン, ショ糖)の味物質に対して GTS を適用し、その効果の検証を行った。その結果、電解質の物質は味覚の抑制効果が見られたのに対し、非電解質の物質は抑制がみられなかった。よって、イオン化する物質のみが GTS によって味の操作が可能であることから、口腔内イオン泳動説の妥当性が実証された。さらに、基本五味それぞれの電解質の物質に対して GTS を適用したところ、それぞれに抑制効果が確認された。よって、電解質であれば基本五味すべてに対して味覚の操作が可能であることを示した。



頸部電気刺激とその効果

また、GTS を味覚ディスプレイとして利用するためには口腔内に電極を設置する既存手法は食事を阻害するために、好ましくない。そこで、同様に電流経路仮説に沿って考察したところ、舌と食品または水溶液の界面での電位が GTS の効果に対して支配的な効果を及ぼすと考えられる。よって、口腔外から味覚を生起させる刺激として顎と首の後ろに電極を設置する顎部電気刺激の設計を行い、その効果を検証した。顎部電気刺激が口腔内に電極を設置した既存 GTS 手法と同様の効果を及ぼすかどうかを検証するために、顎部に陽極を設置した場合と、顎部に陰極を設置して口腔内に塩水を含んだ場合で電気刺激を行った。その結果、顎部に陽極を設置した場合、口腔内に陽極を設置した GTS と同様に口腔内に電気味が生起した。さらに、顎部に陰極を設置した刺激では、口腔内に含んだ塩水の呈する塩味が弱くなった。よって顎部電気刺激は従来の GTS と同様の効果があることが実証された。

さらに、GTS における味覚増強効果は減塩などを補助しうる手法として大いに期待できる。一方でこの増強効果はその効果時間が非常に短く、食事を通しての味覚増強は困難であった。上述の口腔内イオン泳動説に沿って考えると、イオンの移動による味細胞への呈味イオンの接触頻度上昇がこの味覚増強を引き起こしていると考えられる。そこで、本研究では口腔内あるいは顎部に陰極を設置して電流を 10-20Hz 程度で印加・停止を繰り返す連続矩形波刺激を設計し電解質の基本五味を呈する味物質に対して適用した。その結果、刺激印加中(1 分間まで確認)は味が増強された状態を維持することが可能であることが実証された。

以上より、GTS に関しては基本五味を呈する電解質の味強度を操作と口腔外からの GTS 適用が可能な刺激の設計、継続的な味覚増強効果の適用が可能で設計が達成された。

(3) GSSに関する成果

GSS ではこれまでの研究成果によって、閃光の生起位置の操作までが可能であった。本研究の成果によって、通常視野外への視覚提示と簡単な図形描画の二つが可能となった。まず、通常視野外への視覚提示に関しては、従来の研究において刺激電極のすぐそばで視覚の生起が確認されていた。この電極位置を眼球から遠ざけた場合視野のどこまで閃光の生起が確認されるかを検証すべく、電極を設置したヘッドマウンテッドディスプレイを持って、電気刺激後に光が生起した方向を向くように被験者に指示したところ、最大の被験者で 150° 程度の位置に閃光が見えたと報告した。これは、人の通常の水平視野が 110-120 度程度であるのと比較して非常に大きい。つまり、刺激電極の位置によって GSS は通常視野外へ視覚を呈示あるいは錯覚させることができるということである。

さらに、GSS の研究ではこの GSS を用いた VR アプリケーションを作成した。このアプリケーションでは、GSS による視野外への閃光惹起と上記の GVS による急激な加速度感覚の生起を組み合わせて、VR 格闘ゲームにおけるダメージエフェクトをヘッドマウンテッドディスプレイ上に設置した電極のみで付加している。この VR アプリケーションのデモを Entertainment Computing にて発表し、学術領域においてアウトリーチができた。

GSS によって生起される閃光の形状はこれまで操作することができなかった。本研究では GSS を視覚の情報提示ディスプレイとして利用すべく、その形状の操作に挑んだが、先行領域の形状操作は非常に困難であった。一方で、眼球周辺に交流電流を印加した場合、二つの電極位置にそれぞれ閃光が生じるが、その間にはかならず黒色領域が残存することが観察によって判

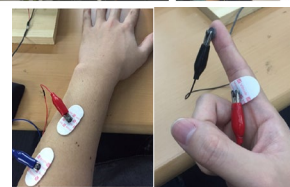
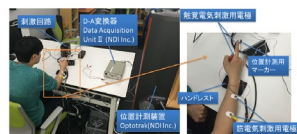
明した。そこで、この刺激電極の位置を切り替え、残存する黒色領域を角度を左右の目でそれぞれ異なる角度になるように設計し、その両眼融像によって二つの線で形成される図形であれば描画することに成功した。

(4)GOS に関する成果

GOS では電気刺激によって刺激臭を惹起する刺激を設計した。この刺激においては、電流の時間パターンを操作することで、その臭いの質をある程度操作することができたが、被験者間の差が大きいことや、刺激時間パターンのどの要素が臭いの質に寄与するのかわからないままであった。

(5)ETS, EMS に関する成果

ETS と EMS では人差し指で空中にバーチャルな硬さを持った物体と接触する感覚を再現するシステムを構築した。このシステムでは、指腹と人差し指の伸筋に電極を設置し、それぞれが ETS と EMS を適用できるようになっている。この ETS と EMS の刺激タイミングが指のタップと同期しており、EMS を ETS よりも 12ms 程度早く印加することによって、堅い物体との接触感覚を生起することが可能となった。また、この二つの刺激の強度と刺激時間、刺激タイミングのずれの 3 つの要素を様々に変化させることによって、鍵盤を押し込んだ感覚や、硬薄膜を破壊する感覚など様々な感覚表現可能であることが分かった。



ETS-EMS システム

(5)MRI 計測

本研究では GVS と GOS に関して fMRI による刺激時の脳活動計測を行った。脳活動計測の成果としては、GVS 時の脳活動を計測でき、多自由度な GVS においてもある程度従来の前庭電気刺激と同様の脳活動が見られることが分かった。GOS に関しては予備実験程度のデータであるため明確なことはまだ言えないが、脳活動領域としていくらか特定の領域での活動が見られた。

(6)多感覚ヘッドセット

本研究の最終フェーズとして、これまでの知見を統合した多感覚ヘッドセットを設計した。このヘッドセットでは、前庭感覚、味覚、視覚、嗅覚を惹起可能である。また薄型のフェースマスク型で設計したため既存のヘッドマウントディスプレイとの併用も可能である。

この多感覚ヘッドセットを用いた VR アプリケーションを今後設計していき、本研究で得られた知見を広くアウトリーチする予定である。



多感覚ヘッドセット

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 原彰良, 安藤英由樹, 櫻井健太, 前田太郎, 青山一真	4. 巻 24
2. 論文標題 続矩形波電流刺激による五味の継続的増強	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 13-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.18974/tvrsj.24.1_13	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 青山一真, 櫻井健太, 古川正紘, 前田太郎, 安藤英由樹	4. 巻 Vol.22, No.2
2. 論文標題 顎部電気刺激による味覚提示・抑制・増強手法	5. 発行年 2017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 137-143
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Kazuma Aoyama, Kenta Sakurai, Satoru Sakurai, Makoto Mizukami, Taro Maeda, Hideyuki Ando,	4. 巻 なし
2. 論文標題 Galvanic Tongue Stimulation Inhibits Five Basic Tastes Induced by Aqueous Electrolyte Solutions	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Frontiers in Psychology	6. 最初と最後の頁 なし
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi: 10.3389/fpsyg.2017.02112	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 -

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 5件／うち国際学会 9件）

1. 発表者名 Kazuma Aoyama, Nobuhiro Hagura, Ferre, Elisa Raffaella, Taro Maeda, Yuji Ikegaya, Hideyuki Ando
2. 発表標題 Galvanic vestibular stimulation revisited: A current path account
3. 学会等名 Neuroscience 2018 (SfN) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yosuke Nakayama, Kazuma Aoyama, Takashi Kitao, Taro Maeda, Hideyuki Ando
2. 発表標題 How to use Galvanic Vestibular Stimulation in Virtual Reality
3. 学会等名 20th Laval Virtual (ReVolution) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuma Aoyama, Kenta Sakurai, Akinobu Morishima, Taro Maeda, Hideyuki Ando
2. 発表標題 Taste Controller: Galvanic Chin Stimulation Enhances, Inhibits, and Creates Tastes
3. 学会等名 SIGGRAPH 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Naoshi Ooba, Kazuma Aoyama, Hiromi Nakamura, Homei Miyashita
2. 発表標題 Unlimited Electric Gum: A Piezo-based Electric Taste Apparatus Activated by Chewing
3. 学会等名 31st ACM User Interface Software and Technology Symposium (UIST 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 青山一真
2. 発表標題 経皮電気刺激による感覚提示手法
3. 学会等名 第62回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI '18) (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takashi Kitao, Hideyuki Ando, Kazuma Aoyama
2. 発表標題 GVS RIDED
3. 学会等名 ISRUP T SF 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 青山一真, 安藤英由樹, 羽倉信宏
2. 発表標題 前庭電気刺激の感覚惹起メカニズムの解明
3. 学会等名 第12回モータコントロール研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中山洋輔, 青山一真, 北尾太嗣, 齊藤真里, 長田浩二, 安藤英由樹
2. 発表標題 前庭電気刺激がVR酔いに与える効果の検討
3. 学会等名 日本バーチャルリアリティ学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuma Aoyama, Daiki Higuchi, Kenta Sakurai, Taro Maeda, Hideyuki Ando
2. 発表標題 GVS RIDE: Giving the novel experience using Head Mounted Display and Four-pole Galvanic Vestibular Stimulation
3. 学会等名 SIGGRAPH 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hayato Akiyama, Kazuma Aoyama, Taro Maeda, Hideyuki Ando
2. 発表標題 Electrical Stimulation Method Capable of Presenting Visual Information Outside the Viewing Angle
3. 学会等名 International Conference on Artificial Reality and Telexistence & Eurographics Symposium on Virtual Environments 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 青山一真, 寺島章宥, 秋山隼人, 安藤英由樹
2. 発表標題 前庭電気刺激と視覚電気刺激を利用したバーチャルキャラクタから殴打される体験
3. 学会等名 Entertainment Computing 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 安藤英由樹, 青山一真
2. 発表標題 バーチャルな加速度感覚を付加する超臨場感ヘッドセット
3. 学会等名 DC EXPO 2017 (Innovative Technology + 2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 青山一真, 中山洋輔, 植村魁斗, 北尾太嗣, 安藤英由樹
2. 発表標題 バーチャルな加速度を付加する超臨場感ヘッドセット
3. 学会等名 横浜ガジェット祭り2017 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 青山一真, 北尾太嗣
2. 発表標題 バーチャルな加速感覚を付加する高臨場感VRヘッドセット
3. 学会等名 平成29年度コンテンツ産業新展開強化事業マッチングセミナー「コンテンツとテクノロジーとビジネスの創発」(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kazuma Aoyama
2. 発表標題 Novel Display Technology using Percutaneous Electrical Stimulation for Virtual Reality
3. 学会等名 Human Computer Interaction International (HCI) 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuma Aoyama
2. 発表標題 Percutaneous Electrical Stimulation for Virtual Reality
3. 学会等名 Solid State Device and Material (SSDM) 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 青山一真, 河野通就, 中村裕美, 高橋哲史, 玉城絵美, 北尾太嗣, 安藤英由樹, 廣瀬通孝
2. 発表標題 神経刺激インタフェースの最先端
3. 学会等名 日本バーチャルリアリティ学会(OS展示)
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
--	---------------------------	-----------------------	----