

研究終了報告書

「経皮電気刺激による感覚編集インタフェースの構築」

研究期間：2019年10月～2023年3月

研究者：青山一真

1. 研究のねらい

本研究は、末梢神経系への経皮電気刺激を利用して、様々な感覚を提示・増強・減衰させることのできる「感覚編集インタフェース」を構築し、従来の Human-Computer Interaction(HCI)やバーチャルリアリティ(VR)等の分野で研究開発が実施されてきた、感覚ディスプレイ技術よりも高い自由度で精緻に感覚を設計することのできる次世代感覚インタフェースを実現する事である。ここで、感覚の提示とは我々が日常的に受容しうる感覚を再現する事と定義し、減衰とは環境が惹起する様々な感覚を弱めるまたは遮断する事と定義している。増強は、環境が惹起する様々な感覚を強める事と、日常的に我々が感じることのできない感覚を惹起する事という二つの定義を持つ。

本研究では、電流密度分布を数値解析である有限要素法によって電位分布や電流密度分布をシミュレーションし、そのシミュレーションに基づく刺激設計により、多様な感覚を提示、増強、減衰する事の出来る刺激手法の開発し、それらをVR等をはじめとする分野に応用するといった、基礎研究から応用研究までの横断的研究を実施する。

本研究で構築を目指す「感覚編集インタフェース」は、VR分野においては、現実世界の環境がもたらす感覚を減衰させ、純粋なVR技術によって惹起された感覚を精緻に提示することのできる、インタフェースになりうるだけでなく、現実世界の環境がもたらす感覚を増強したり、重畳して提示する等の利用も期待できる。これは、現実環境やサイバーな環境と人間との間のインタラクションの高度化に資する研究である。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、嗅覚や前庭感覚、味覚、固有感覚、触覚等の様々な感覚に対して感覚編集が可能なインタフェースを構築し、VRやHCI分野への応用可能性を示した。本研究では、感覚の提示、増強、減衰が可能な手法について、感覚ごとに研究を実施した。

本概要では、各感覚についての成果を個別に述べ、詳細において提示・増強・減衰のそれぞれに分けて述べるものとする。

嗅覚(鼻腔内化学感覚)に関する経皮電気刺激では、有限要素法による刺激設計によって、アンモニア臭に近い鼻腔内化学感覚を惹起する経皮電気刺激の実現に成功した。前庭電気刺激では、ノイズ様の閾値下前庭電気刺激によってVR空間での自己運動を視覚に依存させることに成功した。味覚に関しては、口腔内で味覚の生起位置を静的に変容させる手法とそれを動的に変容させうる手法の構築を行ったと共に、塩味と辛味を増強する手法を構築した。固有感覚に関しては、足の前後左右それぞれに位置している腱への電気刺激によって、床面を前後左右に傾斜して感じさせ、それぞれの方向への身体動揺を誘発する手法を構築した。触

覚に関しては、手に電極を設置することなく、手のひらと手の甲に触覚を提示する手法を構築し、さらにその時に惹起される振動覚の周波数特性と刺激周波数との関係を検証した。本研究で構築した多くの電気刺激手法は、有限要素法によって電位分布または電流密度分布をシミュレーションすることで刺激を設計したものである。本研究を通して、有限要素法を用いたシミュレーションを通じた刺激設計の有効性を示すこともできた。

本研究の学術的な成果としては、原著論文 6 報、国際会議発表 10 件、国内の学会ならびに研究会報告 11 件、特許 2 件、受賞 6 件であった。

(2) 詳細

研究テーマ A: 感覚編集インタフェースにおける感覚「提示」手法の研究

本テーマでは、有限要素法によるシミュレーションと経皮電気刺激による心理物理実験によって、感覚を「提示」する新たな手法に関する成果を記述する。

感覚提示手法として、本研究では嗅覚の惹起、電極と離れた位置への触覚の惹起、腱による固有感覚の惹起による地面の傾斜感覚の変容に関する手法の 3 つについて重点的に取り組んだ。

A-1. 嗅覚(鼻腔内化学感覚)電気刺激: 経皮電気刺激によって嗅覚を惹起する手法は今まで存在しなかった。しかしながら、本研究において鼻腔内の三叉神経系を含む組織上に十分な強度の電流密度分布を形成する電極配置として、鼻梁と首の後ろに電極を設置する配置を有限要素法によるシミュレーションを通して設計した。この配置による経皮電気刺激が少なくとも刺激臭に近い鼻腔内化学感覚を惹起する事を心理物理実験によって示した。

A-2. 触覚電気刺激: 触覚を惹起する電気刺激においては、刺激電極の真下に触角が惹起される。一方で、環境とのインタラクションで最も多用される手に対して電極を設置すると、触覚を惹起することはできても、その電極が環境とのインタラクションを阻害する。これを解決するために、触覚を中枢神経系に伝送する尺骨神経や橈骨神経、正中神経などの神経束に対して電気刺激をすることで、手に直接電極を設置せずとも手のひらや手の甲に触覚を惹起する方法が医学分野にて義手使用者向けに利用されてきた。しかしながら、この手法は前腕や上腕などにも触覚が惹起され、触覚を空間的に制御することも難しかった。

これに対して、本研究ではこれらの神経直上に陰極電極を設置して電気刺激を行う際の、神経束上に形成される電流密度分布をシミュレーションによって同定し、それに基づいて各神経束を様々な電流密度分布で持って刺激することで、手のひらから手の甲までの様々な位置や、指の様々な位置に、電極を設置することなく触覚を惹起する手法を構築した。

また、これらの触覚の質は主として振動覚に近い感覚であるものの、その刺激波形と惹起される感覚との関係は明らかでなかった。そこで、心理物理実験によって刺激周波数がもたらす振動覚の周波数を調査したところ、100Hz 程度までの低周波領域であれば刺激周波数と振動覚の周波数には線形の関係があり、それ以上の周波数だとその対応関係は崩れ、高周波の感覚は必ずしも惹起されない事が示唆される結果となった。

A-3. 腱電気刺激: 腱は骨と骨格筋を接合する組織であると共に、筋肉ひいては腱の張力を計測するという機能を持つ組織である。この腱に対して経皮電気刺激を与えると、腱の張力つまり、固有感覚が惹起(変容)され、それに伴う拮抗筋の収縮が誘発される。本研究では足

首周りの 4 つの腱に対してそれぞれを独立性の高い状態で刺激できる電極配置を有限要素法によるシミュレーションによって設計し、その電極配置によってもたらされる身体傾斜量と主観的な身体傾斜感覚を計測する心理物理実験を実施した。その結果、足の前の腱への電気刺激では身体は後ろに、後ろの腱への刺激では身体は前に、左の腱への刺激では右に、右の腱への刺激は左に身体動揺が誘発され、身体傾斜感覚も同様に惹起されることが分かった。さらに、この結果を利用し、視覚的な VR 空間の傾斜と足元の傾斜の等価点を検証する実験を実施したところ、おおむね身体傾斜と同様の方向への傾斜をユーザが感じていることが示された。

研究テーマ B: 感覚編集インタフェースにおける感覚「増強」手法の研究

本テーマでは人が感じている感覚を強めたり、人が通常では感じることでできない感覚を惹起する、感覚増強手法に関して、味覚を中心に研究に取り組んだ。

B-1. 陽極電気刺激による塩味と辛味の増強手法

塩味と辛味は両者とも世界中で頻繁に感じられている感覚であり、これを惹起する物質は好んで摂取されているものの、それらによって高血圧等の生活習慣病と逆流性食道炎といった症状が引き起こされている。これらの摂取量を低減しつつも、好みの味の強度に感じさせる感覚増強手法として、味覚電気刺激を利用する研究を本研究では実施した。塩味の増強に関しては、持続的な塩味の増強を顎部に設置した電極から実施する手法が実現されていたものの、この手法の効果量は低いという問題があった。本研究では顎に陽極を設置することで、1%の塩水が 3%程度に感じられる高効果量な刺激手法を構築し、心理物理実験によってその効果を実証した。辛味に関しては、受容されるチャンネルの種類によって、唐辛子の辛味(Hot)、ワサビの辛味(Spicy)、ミントの辛味(Minty)の 3 つに分類し、それぞれの辛味を惹起する物質を口に含んでもらったユーザに口腔内への陽極電気刺激を適用した際の辛味の主観的強度を計測した。その結果、電気刺激によって Hot と Spicy の辛味は増強されることが示されたが、Minty に関しては示されなかった。

B-2. 口腔内での味覚の空間制御

味覚は通常空間性を意識しない感覚である。一方で、意識はしないものの喉ごし等の表現として、味には空間性があることが前提となっている味の表現が存在する。また、味を感じるための神経系は舌表面から口腔内全体に広く分布している。つまり、味覚は口腔内の様々な位置で受容されうるという事である。そこで、本研究では口腔外からの電気刺激によって口腔内に形成される電位分布並びに電流密度の分布を制御することで口腔内にて電気刺激によって惹起される味覚(電気味覚)の生起位置を制御する新たな手法を有限要素法によるシミュレーションによって構築し、心理物理実験によって口腔内での味覚生起位置の静的な移動を実現した。さらに、この味覚の動的な移動を実現するため、口腔外に設置した複数の電極を様々な時間幅で切り替えていくことで、口腔内で味覚位置がシームレスに移動している感覚を惹起する手法と電子回路を設計した。

B-3. 唾液腺電気刺激: 唾液は口腔衛生を維持するという機能的な効果だけでなく、唾液によって味や食品の湿度の感覚を変容させうると考えられる。唾液腺への電気刺激は口腔衛生の分野にて構築されてきたものであるが、その効果量は低いものであった。そこで、本研

究では有限要素法によって唾液分泌に強く寄与する大唾液腺を効果的に刺激することのできる電極配置を設計し、その効果を生体計測によって検証した。その結果、従来の手法と比較して非常に効果の高い刺激手法の構築に成功した。

研究テーマ C: 感覚編集インタフェースにおける感覚「減衰」手法の研究

本研究テーマでは、通常受容される感覚を弱める効果を持った感覚減衰手法の開発について、前庭電気刺激に関して取り組んだ。

C-1. ノイズ前庭電気刺激: ノイズ前庭電気刺激(noisy-GVS)は左右の前庭感覚器に対して閾値下のホワイトノイズ様の刺激を与えることで、前庭機能の感覚統合に影響を与えうるものである。前庭感覚は頭部に暴露された加速度や角速度を検知している感覚器である。このため、VR空間内で人がどのように動いたのかに関する知覚にも寄与している。VRヘッドセットを被った状態で現実空間で同じところぐるぐると回っているが、VR空間ではまっすぐ進んでいる映像を見せることで、本当にまっすぐ進んでいるかのように錯覚させる手法をリダイレクテッドウォーキング(RDW)とよぶ。RDWにおいては、視覚的にはまっすぐ進んでいるため、前庭感覚をはじめとする体性感覚によって現実世界でぐるぐると同じところを回っていることに気づくことになる。本研究ではnoisy-GVSによって同じところを回っていることに気づかせない手法を構築し、その効果をVRヘッドセットと前庭電気刺激を利用したユーザスタディによって検証し、その手法の構築に成功した。これはまさに、感覚統合における前庭感覚を減衰させる手法であると言える。

これらを統合的に利用できる応用的なハードウェアとして、本研究ではVRヘッドセットと併用できる多感覚電気刺激マスク並びにリストバンド、フィンガーリングの一式を制作した。これらを利用してVRやHCI分野で活用されるデモシステムの構築を目指していく予定である。

以上より、本研究では有限要素法を利用した刺激設計によって感覚の提示・増強・減衰を達成する様々な刺激手法を構築する事ができ、それらの一部はVRやHCI分野への応用が可能である事を示した。

3. 今後の展開

本研究の成果は個別の要素技術は短期的に社会実装に繋がらうものもある。一方で、統一した理論並びに感覚編集インタフェースという大きな概念としての社会実装にはまだ課題が残っているものと考えられる。

要素技術の中でも、味覚電気刺激による塩味の増強手法に関しては、その感覚増強効果の強度も高いため、摂食制限を支援するための基礎技術として社会実装が期待されており、取得した特許に関連していくつかの企業から問い合わせを受けている。また、嗅覚の電気刺激についても学外の医学部と共同研究の打ち合わせを始めている。これらは、感覚増強並びに感覚提示の基礎技術であり、社会実装シナリオもある程度わかりやすいものであり、社会受容性の程度と受益者のペインによっては十分に広がりうるものとなると考えられる。

一方で、大きな概念としての感覚編集インタフェースそのものが社会に実装されるには、な

によりも経皮電気刺激に対する社会受容性の高まりが必要である。現状徐々に経皮電気刺激を利用した商品も登場していることから社会受容性の高まりは感じるものの、あらゆる経皮電気刺激が社会実装されるには10年単位での時間と電気刺激個別の課題が存在するものと考えている。

4. 自己評価

本研究では、科学的にも工学的にも世界にさきがけた様々な成果を挙げることができたと考えている。社会や経済のイノベーションをもたらさうるポテンシャルを持った新技術シーズはいくつか構築できたものの、それを事業化するには現状では様々な課題も存在することは否めない。

また、科学的な研究という観点から本研究を見たときに、本研究で設定している仮説の検証を丁寧に実施した、サイエンス系学術論文誌に掲載されるような成果もあげていくべきであったと考えている。

研究と社会実装の範囲をどこまでと捉えるかにもよるものの、経済へ直接的に波及させる成果はまだ上がっていない。

5. 主な研究成果リスト

1. Hiromi Nakamura, Makoto Mizukami, Kazuma Aoyama, "Method of Modifying Spatial Taste Location Through Multielectrode Galvanic Taste Stimulation," IEEE Access, vol. 9, pp. 47603-47614, (2021) doi: 10.1109/ACCESS.2021.3068263.
2. Kazuma Aoyama, Nobuhisa Miyamoto, Satoru Sakurai, Hiroyuki Iizuka, Makoto Mizukami, Masahiro Furukawa, Taro Maeda, Hidyuki Ando, "Electrical Generation of Intranasal Irritating Chemosensation", IEEE Access, vol. 9, pp. 106714-106724 (2021) doi: 10.1109/ACCESS.2021.3100851
3. Nozomi Takahashi, Tomohiro Amemiya, Takuji Narumi, Hideaki Kuzuoka, Michitaka Hirose, Kazuma Aoyama, "Sensation of Anteroposterior and Lateral Body Tilt Induced by Electrical Stimulation of Ankle Tendons", Frontiers in Virtual Reality, 3: 800884, April 2022. doi:10.3389/frvir.2022.800884

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数:6件

1. Hiromi Nakamura, Makoto Mizukami, Kazuma Aoyama, "Method of Modifying Spatial Taste Location Through Multielectrode Galvanic Taste Stimulation," IEEE Access, vol. 9, pp. 47603-47614, (2021) doi: 10.1109/ACCESS.2021.3068263.

本論文では、口腔外に複数の電極を配置し、陰極と陽極の位置を変化させたときに舌上に形成される電場分布を有限要素法によってシミュレーションした。さらに、心理物理実験によって陽極位置に応じて口腔内に惹起される味覚の空間的な位置を検証した。これらの研

| |
|--|
| <p>究を通して、口腔内で味覚の位置を変化させる経皮電気刺激の手法を実現した。</p> |
| <p>2. Kazuma Aoyama, Nobuhisa Miyamoto, Satoru Sakurai, Hiroyuki Iizuka, Makoto Mizukami, Masahiro Furukawa, Taro Maeda, Hidyuki Ando, "Electrical Generation of Intranasal Irritating Chemosensation", IEEE Access, vol. 9, pp. 106714-106724 (2021) doi: 10.1109/ACCESS.2021.3100851</p> |
| <p>本論文は、鼻腔外に設置した電極からの経皮電気刺激によって鼻腔内化学感覚を惹起する手法を構築したものである。本研究では有限要素法によって鼻腔に十分な強度の電流密度分布を形成する電極配置を設計した。さらに、その電極配置が高確率で鼻腔内化学感覚が惹起されることを明らかにし、その鼻腔内化学感覚の質はアンモニア臭に近い感覚である事を同定した。</p> |
| <p>3. Hiromi Nakamura, Tomohiro Amemiya, Jun Rekimoto, Hideyuki Ando, and Kazuma Aoyama, "Anodal Galvanic Taste Stimulation to the Chin Enhances Salty Taste of NaCl Water Solution", Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 33, No.5, pp.1128-1134, (2021)</p> |
| <p>本論文は塩水の呈する塩味を持続的かつ高倍率で増強する口腔外からの経皮電気刺激手法を構築したものである。顎部に電極を設置した味覚電気刺激は口腔内に含んだ電解質の溶液の呈する味を増強することのできる手法は従来より開発されてきた。これに対して、本論文では、顎部に陽極を設置することで 1%の塩水を 3%程度として持続的に知覚させることのできる手法を構築した。</p> |
| <p>4. 高橋希実, 中村裕美, 雨宮智浩, 鳴海拓志, 葛岡英明, 廣瀬通孝, 青山一真:”経皮電気刺激による効果的な唾液分泌促進手法の構築”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.27, No.2, pp. 130-140 (2022)</p> |
| <p>本論文は唾液分泌に強く寄与する耳下腺, 顎下腺, 舌下腺の 3 つの大唾液腺とその支配神経を刺激することで効果的に唾液分泌量を増加させる手法に関するものである。従来より口腔衛生の分野にて耳下腺を刺激することで唾液分泌を増加させる手法が構築されてきたものの, その増強効果は大きいものではなかった。本研究では有限要素法によって複数の唾液腺並びにその支配神経を効果的に刺激することのできる電極配置を設計し, その効果を示した。</p> |
| <p>5. Nozomi Takahashi, Tomohiro Amemiya, Takuji Narumi, Hideaki Kuzuoka, Michitaka Hirose, Kazuma Aoyama, "Sensation of Anteroposterior and Lateral Body Tilt Induced by Electrical Stimulation of Ankle Tendons", Frontiers in Virtual Reality, 3: 800884, April 2022. doi:10.3389/frvir.2022.800884</p> |
| <p>本論文は、立位時の床面の傾斜感覚を変容させるための手法の開発を目指し、足首の前後左右に位置する腱を独立に刺激できる電極配置を有限要素法によって設計し、その効果を示したものである。腱は筋肉と骨を接続する組織であると共に、腱の張力を検知する機能を持つ。この腱に対して電気刺激を適用することで、拮抗筋の収縮とそれに伴う運動並びに感覚を惹起する事ができる。本研究ではそれを足首に適用し、立位時の床面の傾斜感覚を変容させるための基礎的技術を構築した。</p> |
| <p>6.Masaki Ohno, Kazuma Aoyama, Tomohiro Amemiya, Hideaki Kuzuoka, Keigo Matsumoto, Daisuke Mine, Takuji Narumi, "Anodal Electrical Stimulation Enhances the Perceived</p> |

Piquancy Induced by Chili Peppers and Wasabi", IEEE Access, Dec 2022.
doi:10.1109/ACCESS.2022.3231729

本論文は辛味を呈する食品に対して電気刺激を適用することでその辛味を増強する手法を構築するものである。本研究では辛味をその受容チャネルから Hot, Spicy, Minty の 3 つに分け、それぞれの物質を口に含んだユーザーに対して電気刺激を適用した時に、Hot と Spicy の辛味を増強できる事を示した。この研究は、多量の辛味物質を摂取することなくバーチャルに辛味のみを増強させることができるものである。

(2) 特許出願

研究期間全出願件数: 2 件 (特許公開前のもも含む)

| | | |
|---|-------|-------------------------------------|
| 1 | 発明者 | 青山一真, 荻原秀斗, 雨宮智浩, 鳴海拓志, 葛岡英明 |
| | 発明の名称 | 触覚電気刺激装置及び触覚電気刺激方法 |
| | 出願人 | 東京大学 |
| | 出願日 | 2022年09月08日 |
| | 出願番号 | 特願 2022-142820 |
| | 概要 | 手のひらに電極を貼らずとも手に触覚を惹起するための手法に関する特許 |
| 2 | 発明者 | 青山一真, 中村裕美, 雨宮智浩, 暦本純一 |
| | 発明の名称 | 味覚電気刺激装置及び味覚電気刺激方法 |
| | 出願人 | 東京大学 |
| | 出願日 | 2022年08月03日 |
| | 出願番号 | 特願 2022-1224101 |
| | 概要 | 電解質食品の味を口腔外からの電気刺激で持続的に増強する手法に関する特許 |

(3) その他の成果 (主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

- 第 7 回ヤマト科学賞, ニューロ・コンピュータインタフェースの先駆的研究
- Best Paper Award, 2020/7/22, Kazuma Aoyama, "Galvanic Taste Stimulation Method for Virtual Reality and Augmented Reality", Human Computer Interaction International 2020, Online Conference
- Best Paper Award, 2021/7/27, Nozomi Takahashi, Tomohiro Amemiya, Takuji Narumi, Hideaki Kuzuoka, Michitaka Hirose, Kazuma Aoyama, "Perception of Illusory Body Tilt Induced by Electrical Tendon Stimulation", Human Computer Interaction International 2021, Online Conference, (July-2020)
- Best Conference Paper Award, 2021/10/07, Keigo Matsumoto, Kazuma Aoyama, Takuji Narumi, Hideaki Kuzuoka, "Redirected Walking Using Noisy Galvanic Vestibular Stimulation", In Proceedings of IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR) 2021 (October-2021), Online.
- Best IEEE ISMAR 2022 Poster Award, So Tanaka, Takuji Narumi, Hiromi Nakamura, Tomohiro Amemiya, Hideaki Kuzuoka, Kazuma Aoyama, "Dynamically Controlling Spatial Taste Location by External Galvanic Taste Stimulation", ISMAR 2022,

(October-2022), Singapore