

総説特集：「減塩食品の開発とうま味」

経皮電気刺激による味覚変容手法

安藤 英由樹¹⁾・青山 一真²⁾

(大阪大学 大学院情報科学研究科¹⁾・東京大学 バーチャルリアリティ教育研究センター²⁾)

Galvanic Tongue Stimulation (GTS) has two effects for modulating taste sensation. When the anode was attached near the tongue, the electric or metallic taste were induced (Anodal-GTS). On the other hands, cathode was attached near the tongue, the taste induced by electrolyte water solution were inhibited (Cathodal-GTS). In addition, the taste sensation is enhanced when the Cathodal-GTS were stopped. It is generally said that Japanese intakes too much salt. Therefore, the purpose our study is to regulate the amount of intaking salt using the GTS by enhancing the taste sensation.

ヒトは生命活動を維持していくために食事をす。食事の役割には生命維持や活動に必要な栄養素を体外から摂取することに加えて、精神的充足を得ることがある。しかしながら、精神的充足を得ようと濃い味付けや特定の物質を過剰摂取することは本来の生命活動の維持という目的をはずれ、生活習慣病などの健康被害を招く原因となる。栄養素の摂取および精神的充足の獲得という食事がもつ2つの役割を十分に果たせることが最も望ましいが、これらはいわゆるトレードオフの関係にあり、両者を同時に満たすことは困難である。

近年社会問題の一つとして取り上げられている、生活習慣病は高血圧が一つの大きな要因となって引き起こされる。この高血圧の原因として塩分などの過剰摂取が挙げられている。身体は血液中のナトリウムと水分の量を調整する働きをしており、塩分摂取によって高まった濃度の調整のために血液量が増し、結果として血圧が上がる。これに対して、カリウムなど代替物を使って味を補填することで両者を満足させようとする手法が考えられている。しかしながら、代替物として用いた物質が他の健康被害を招く可能性も考えられる。さらに、塩味以外の味質

についても代替物となる物質が必ずしもあるわけではない。そこで、代替物や食品添加物を使用する方法よりも、化学物質の量自体を減らす、もしくは使わずに味だけを付加・再現できるような方法がより好ましいと考えられる。本来そこにはないモノをあるかのように人工的に感じさせる技術や方法論としてバーチャルリアリティがある。いままでにもバーチャルリアリティ分野における味覚再現手法が検討されてきたが主にあらかじめ混合した味物質を舌へ滴下する方法[1、2]で、この方法自体は本来の化学物質による味覚受容と変わらない。

そこで我々は味覚を変容させる経皮電気刺激手法である舌電気刺激(GTS: Galvanic Tongue Stimulation)に着目した。GTSは味覚受容器の密度が高い舌や口腔内への電気刺激を通して味覚に影響を及ぼす電気刺激を指すものである。このGTSを用いて、塩分を惹起する塩味を増強する事で、薄い味付けでも十分に強い味として知覚することが可能となれば、塩分などが控えめの食事であっても、濃い味付けの食事であるかのように美味しく食べられると考えられる。

GTSはその極性によって効果が異なることが知

The method to regulate saltiness using percutaneous electrical stimulation

Hideyuki Ando¹, Kazuma Aoyama²: ¹Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University, ²The University of Tokyo, Virtual Reality Education Research Center: ¹hide@ist.osaka-u.ac.jp, 06-6879-7830, ²aoyama@vr.u-tokyo.ac.jp, 03-5841-6367

安藤 英由樹・青山 一真

られている。舌の近くに陽極を設置した陽極刺激 (Anodal-GTS) においては、金属味や電気味と呼ばれる雑味が非常に小さな電流値で惹起されることが知られており、この現象を利用して、味覚の異常を検査する電気味覚計が開発されている[3]。また、中村ら (2013) はこの電気刺激装置をフォークに応用したものも存在し、フォークの先端に陽極を、もち手に陰極を設置することで、食事中に陽極刺激を行う手法を開発している[4]。しかしながら、これらは陽極刺激を用いて電気味や金属味などの雑味を惹起するだけのものであり、塩分などを控えた食事を濃い味付けの食事のように美味しく食べるという用途に直ちに利用する事は困難である。

これに対して、舌の近くに陰極のみが存在する、陰極刺激 (Cathodal-GTS) に関しては、Hettinger ら (2009) が報告している[5]。この報告においては、コップの底に陰極を設置し、手に陽極を設置した刺激によって、塩化ナトリウム水溶液などの塩の呈する塩味の味覚強度が低減するとされている。さらに、電気刺激の印加を停止したとき、一時的に味覚の強度が本来の濃度の水溶液が呈する味覚の強度よりも高くなることが示されている。

これに対して、従来の我々研究においては、この GTS の味覚変容の効果が引き起こされる機序として、電解質の水溶液に対して刺激電流が形成した電場が作用することによる、イオン泳動に端を発するという事を検証した。この研究においては、甘みを呈する電解質 (グリシン) と非電解質 (ショ糖) の水溶液と、苦味を呈する電解質 (塩化マグネシウム) と非電解質 (カフェイン) の水溶液に対して、ストローの中に陰極を設置し、首の背側に陽極を設置した GTS を適用し、その味覚の抑制効果が発生するかどうかを検証した[6]。その結果、非電解質の物質に対しては味覚変容の効果は見られず、電解質の物質に対しては味覚変容の効果が見られた。この結果は口腔内で味を呈する物質がイオン化するかどうかは GTS の発生機序として非常に重要な要素であることが示唆された。つまり、この結果は GTS の味覚変容の効果はイオン泳動によるものであるということをサポートする結果であると言える。

さらに、同様の電極の配置で、甘味、苦味、酸味、うま味を呈する物質の水溶液をそれぞれ準備し、GTS を適用したところ、全ての物質に対して味覚の

抑制効果が見られた。また、全ての電解質の物質に対して GTS の刺激電流を停止した直後に味覚が強くなって感じる味覚増強効果が見られる事が被験者の自由報告によって明らかになった。この研究を通して、我々は電解質の物質を利用することで、GTS によって食べ物や飲み物の味を濃くしたり薄くしたりすることを可能とした。

続いて、我々が取り組んだのは、従来は持続時間が非常に短かった味覚増強効果を、食べ物を口に含んでから咀嚼して、嚥下するまでの一連の動作時間中に継続して得られる手法の開発である。この増強効果を持続させるために、電流通電の ON-OFF を繰り返す矩形波状の刺激を行う、連続矩形波刺激を開発し、その味覚増強効果の持続時間を検証した[7]。

この連続矩形波刺激を用いた味覚の持続的な増強に関する実験の方法とその結果について、塩水を例にとって詳細を述べる。この実験では、塩味を呈する水溶液に連続矩形波刺激 (図 1) を印加し、刺激中および刺激停止後の被験者が知覚している味覚強度のマグニチュード推定を実時間でスライドバーを調整させることで回答させた。

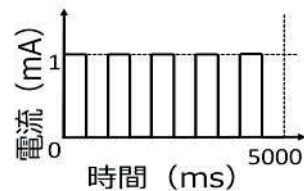


図 1 連続矩形波刺激(周波数 1Hz の場合)

試料には、精製水を用いて作成した 1.0% 塩化ナトリウム (NaCl) 水溶液を用いた。味覚強度を表現するためのスライドバーは、中心部を試料濃度、左端を精製水、右端を 3.0% 塩化ナトリウム水溶液の呈する塩味の味覚強度とし、実験開始時に被験者にそれぞれを飲んで確認するように指示した。実験前に、各被験者には皮膚抵抗を下げた後頸部をウェットティッシュでよく拭くように指示した。電気刺激は、陽極側の電極として、後頸部にゲル電極 (フクダ電子製、NIPRODE II) を使用し、陰極側は、被験者が導線を予め通したストロー (径 6mm、長さ 200mm) で試料を口に含むことで陰極側電極とした。なお、ストローの先端に舌先が触れてしまうと局所的に電流密

経皮電気刺激による味覚変容手法

度が高くなり、舌にびりびりとした触覚が発生することが考えられる。そのため、被験者には舌先がストロー先端から2cm程度離れた場所なるべく動かさないようにした状態で試料を口に含むように指示した。刺激電流は最大値が電流値1.0mAの方形波で、刺激周波数は25、50、100、500、1000、2000、3000、4000、5000(単位:Hz)の9条件で検証した。1人の被験者に対して、各条件での試行を3回ずつランダムに提示し、合計で27試行を行った。なお、刺激時間は5000msで固定した。スライドバーの中心部から0.4cm以上右側にある時間を味覚増強効果が発現している時間として定義した。また、計測したデータはアーチファクト除去のために遮断周波数70Hzのローパスフィルタで処理をした。

被験者は健常な20代男性5名であり、全ての被験者から、大阪大学大学院情報科学研究科倫理審査委員会において承認された規定に基づき、十分にインフォームドコンセントを得た上で参加してもらった。

この実験の結果として、図2に、塩味における刺激周波数に対する停止後増強効果の持続時間の平均値を示す。また、図3には塩味における刺激周波数に対する印加中増強効果の持続時間の平均値を示す。なお、図2、図3において電流印加時間(横軸)は対数目盛である。また、図中の0Hzでの測定値は前章の単発矩形波刺激による5000ms刺激時の味覚増強効果(停止後増強効果)の平均値である。図中の*はKruskal-Wallis ANOVAとScheffeの多重比較法により認められた有意差($p < .05$)を示しており、エラーバーは標準誤差を示している。

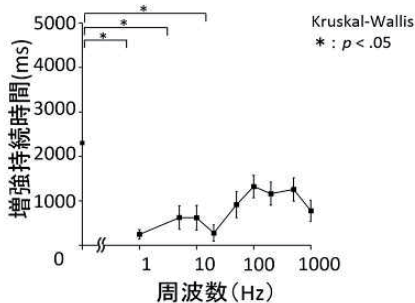


図2 塩味における連続矩形波刺激と停止後増強効果持続時間

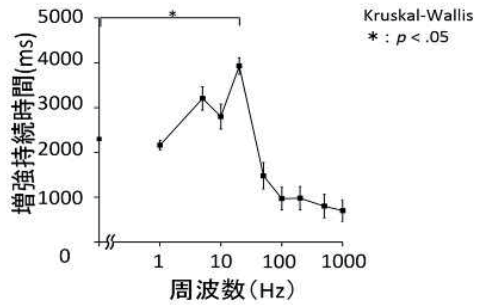


図3 塩味における連続矩形波刺激と印加中増強効果持続時間

図3から、連続矩形波刺激により印加中増強効果が生起していることが分かる。また、図2、図3より条件によっては、停止後増強効果よりも印加中増強効果で得られる増強持続時間の方が長いときと短いとき、両者が存在することが分かる。

図3より、印加中増強効果がみられなかった単発矩形波刺激(0Hz)に比べて、塩味では20Hzの条件で有意に印加中増強効果が示された。そこで、実験の結果得られた連続矩形波刺激の及ぼす印加中増強効果と単発矩形波刺激の及ぼす停止後増強効果の平均持続時間の最大値の比較を図4に示す。

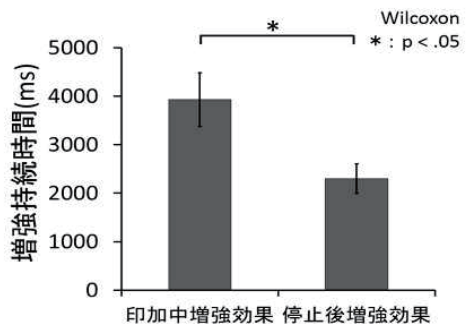


図4 塩味-平均持続時間が最大となった条件での平均持続時間の比較

連続矩形波刺激の印加中増強効果と単発矩形波刺激の停止後増強効果の間には、Wilcoxonの順位和検定により、有意差($p < .05$)が認められ、連続矩形波刺激の印加中増強効果は単発矩形波刺激の停止後増強効果よりも有意に長い時間、塩味の増強効果を得られる事が示された。

本実験で示した連続矩形波刺激の及ぼす印加中増強効果持続時間は、最大で4000ms程度であるが、

安藤 英由樹・青山 一真

連続矩形波刺激の印加中に味覚増強効果が得られるという特性上、印加時間を長くする事で、より長時間にわたる継続的な味覚増強効果を得ることが可能となると考えられる。

この連続矩形波刺激のもたらす味覚増強効果は、1.0%の塩水を約1.8%濃度の塩水と等価な味覚強度として知覚されることも明らかとなり、増強の持続時間は少なくとも60秒以内の刺激であれば刺激の印加中は継続することが明らかとなった。この増強効果についても塩味に限らず様々な電解質の物質を溶かした水溶液の呈する味であれば五味全てにおいて実現可能であることを追加の実験により明らかとした。

これによって基本五味全ての味質に対して味覚抑制効果と味覚増強効果を生起させることが可能となっている。

従来の味覚電気刺激においては、口腔内に電極ないし、電極と接している水溶液が存在する場合にのみ味覚を変容させる電気刺激の印加が可能であった。しかしながら、実際の使用シーンを考えると、口腔外から口腔内に電極を設置するための導線を常に挿し入れておく事や食事中に口腔内に電気刺激装置や電極を設置し続ける事は困難であり、電極に接している水溶液などを口腔内に保持しておくことも難しい。この問題を解決する手法の一つとしてフォークやスプーンなどを電極として利用するという、食器型電気刺激手法が提案されている。しかしながら、この食器型においても、食器あるいは食器と接している食べ物が口腔内にある場合のみ電気刺激が可能である。このため、食べ物を口に含んで咀嚼し、飲み込むまでの一連の食事動作内で電気刺激を適用できる時間は限られている。薄味の食事を濃い味付けの食事として食べ続けるためには、口腔内に食事が存在する間は継続して味覚変容効果が得られる刺激手法が求められていた。

これに対して、我々は口腔外への電極設置での刺激印加による味覚変容手法を構築した[8]。味覚電気刺激において最も重要な要素は、味雷のある舌や口腔内壁と食事（水溶液）との界面の電位差とその極性である。つまり、口腔内に電極またはその代わりになる物質を設置せずとも、舌と食べ物（飲み物）の間に電位差を構築することができればよいということになる。

この舌と食べ物（飲み物）の界面の電位差を口腔外への電気刺激によって実現するために、我々は顎部と頸部背側への電極設置による味覚電気刺激手法を開発した。顎部は口腔に近くいため、印加電流の多くが口腔内に流れこむと考えられる。さらに、顎骨の直上であるため、電極を設置したときに安定性が高いと考えられる。我々は、顎部電気刺激を塩水を口腔内に含んだユーザーに対して適用したときに、ストローを電極として用いた従来の電気味覚手法と比較してどの程度の効果が得られるかを検証した。本稿では味覚増強効果に関する実験の詳細を下記に示す。

図5(左)に示すように、アルコールで拭いた被験者の顎部と後頸部に電極（クリアロード、フクダ電子社製）を設置した。この実験は、顎への電気刺激による味覚抑制効果および味覚増強効果と従来のストロー内に設置した電極からの電気刺激による味覚抑制効果および味覚増強効果を比較するために、次の4つのセッションで構成された。

- (i) ストローが陰極-後頸部が陽極の刺激の電流印加時の味覚強度を記憶
- (ii) ストローが陰極-後頸部が陽極の刺激の電流印加終了時の味覚強度を記憶
- (iii) 顎が陰極-後頸部が陽極の刺激の電流印加時の味覚強度を記憶
- (iv) 顎が陰極-後頸部が陽極の刺激の電流印加終了時の味覚強度を記憶

ストロー内に設置した電極を利用する(i)、(ii)のセッションでは、図5(右)に示すように、コップに1.0%塩化ナトリウム水溶液（比較用試料）を十分に入れ、ストローで口腔内に水溶液を吸い上げ、口腔内で舌が2、3cm程度水溶液に浸っている状態で保持させた。またこの時、舌の先端がストローから2cm程度離れている状態を作るように指示した。顎に設置した電極から電気刺激を行う(iii)、(iv)のセッションにおいては被験者には50mlの1.0%塩化ナトリウム水溶液を口に含んで口を閉じさせた。被験者は椅子に座り、口腔内に水溶液を含んだ状態で目を閉じてもらった。そして、実験者の合図で電流の印加を開始した。刺激電流は最大電流値

経皮電気刺激による味覚変容手法

2.5mA、刺激の持続時間が5000ms、方形波電流とした。各セッションは刺激をそれぞれ4試行行い、計16試行を行った。また、セッション実施の順番は被験者間でカウンターバランスした。各試行の終了後に被験者には記憶した味覚強度と同じ濃度となるように1.0%塩化ナトリウム水溶液と、精製水、塩化ナトリウム単体の3つを自由に混ぜて調整試料を作ってもらった。なお、各試行において電気刺激は一度だけ印加された。

被験者は健康な成人男性7名(23~35才、平均25.7才)であった。実験に参加した被験者は全員、以前ストロー内に設置した電極を用いた電気刺激手法において、電流印加中に塩味を呈する水溶液の味覚抑制と電流印加終了後に味覚の増強を感じる事が確認されている被験者であった。全ての被験者から、大阪大学大学院情報科学研究科倫理審査委員会において承認された規定に基づき、十分にインフォームドコンセントを得た上で参加してもらった。

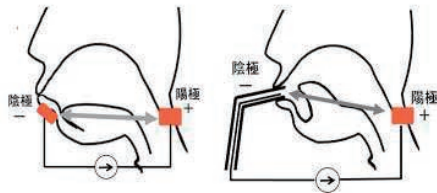


図5 GJS(左)とストローを利用した場合(右)の電極配置

この顎部電気刺激の及ぼす味覚増強効果を検証した実験の結果として、各刺激条件における調整試料の塩化ナトリウム水溶液の濃度を図6に示す。この図におけるエラーバーは標準誤差を示しており、図中の*はKruskal-Wallis ANOVAとScheffeの多重比較検定によって有意差が認められた条件を示している($F(3, 80) = 57.83, p < 0.05$)。また、図中の破線は被験者に提示した試料の濃度である1.0%を示している。さらに、全ての条件においてnon-parametric検定であるSteelの多重比較検定により、1%塩化ナトリウム水溶液の濃度との間にそれぞれ有意差が認められた。

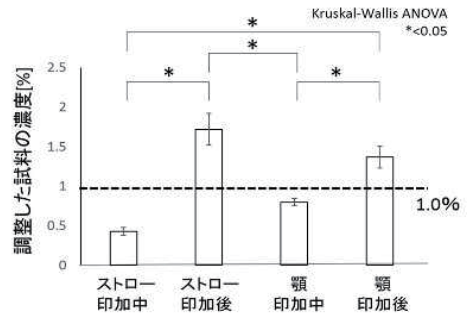


図6 各条件における調整した試料平均濃度

実験結果から、ストロー内に陰極を設置した刺激手法においても、顎に陰極を設置した刺激手法においても、電流印加後に感じた味覚と同じ味覚強度の調整試料の濃度が、電流印加終了後に感じた味覚と同じ味覚強度になるように調整した試料の濃度よりも有意に低かった。また、同様にストロー内に陰極を設置した刺激手法でも顎に陰極を設置した刺激手法でも、電流印加中の味覚強度と等しい味覚強度となるように調整した試料は比較用試料の濃度である1%よりも有意に低く、電流印加後の味覚強度と等しくなるように調整した試料の濃度は比較用試料の濃度である1%よりも有意に高かった。以上より、顎に陰極を設置するGJSはストロー内に陰極を設置する従来の味覚電気刺激手法と同様に、電流印加中の味覚抑制効果と、電流印加終了後の味覚増強効果がある事が示された。

一方で、有意差はないが、GJSによって得られる味覚抑制効果と味覚増強効果はストロー内に設置した電極を利用した場合と比較してどちらも微弱である。これは口腔内の水溶液のイオン泳動を引き起こす電流量が異なるためであると考えられる。GJSにおいて電流の多くは口腔内に流れ込むが、一部は口腔内に流れ込まずに皮膚などを通して陽極から陰極に電流が流れると考えられる。このため、印加電流の全てが水溶液を介して流れる、ストロー内部の電極からの電気刺激と比較して、口腔内の水溶液のイオン泳動を引き起こす有効な電流量が少なくなり、イオンの泳動量に差が生まれたため、味覚の増強と抑制の効果が若干の差が見られたと考えられる。

詳細については省略するが、この研究において我々は、顎部電気刺激が味覚の増強効果だけでなく、味覚の抑制効果と味覚提示効果も併せ持つことを確

安藤 英由樹・青山 一真

認している[8]。

さらに、下顎部への電気刺激を適用すると、ユーザーは喉の奥で味覚を提示することができることを我々が明らかにしている[9]。これは、咽頭などに存在する味覚受容の細胞や神経系に電気刺激が作用することによって引き起こされるものと考えられる。しかしながら以上の一連の研究により、我々は味覚電気刺激によって、(i) 基本五味全ての味覚の抑制と増強、(ii) 口腔外への電気刺激による味覚変容、(iii) 喉への味覚提示の3つを達成した。

これらの研究成果を多くの人に体験して知ってもらうためのアウトリーチ活動の一環として、我々は顎部電気刺激と下顎部電気刺激に対して、連続矩形波刺激を適用することで、口に含んだジュースの味の濃さが変化するデモを SIGGRAPH2018 にて展示した[10]。この展示では、体験者にジュースを口に含んでもらい、顎部-顎部背側間と下顎部-顎部背側間に連続矩形波刺激を印加するものである。この時、電流の強度と刺激周波数は体験者が自ら操作することができるようになってきている。このデモを400名を超える来場者に体験してもらい、多くの体験者にその効果を実感してもらうことができている。

これまでに行った研究成果を今後も多くの人に体験してもらえよう、様々な展示会に出店したいと考えている。一方で、この手法が食事制限に有効であるかどうかなどは今後も詳細な調査をしていく必要があると、我々は考えている。

謝 辞

この研究は JSPS 科研費 若手研究(A)(17H04690) の助成を受けて行われた。

参考文献

- 1) 森谷哲朗, 矢野博明, 岩田洋夫, 食感呈示装置における感覚統合, 電子情報通信学会技術研究報告, MVE, マルチメディア・仮想環境基礎 104 (103), 17-21, (2004)
- 2) Iwata H, Yano H, Uemura T, Moriya T, Food simulator: a haptic interface for biting, Virtual Reality, Proceedings. IEEE, (2004)

- 3) 冨田寛: デシベル単位の電気味覚計, 医学のあゆみ 77: pp.691-696, (1971).
- 4) 中村裕美, 宮下芳明, 一極型電気味覚付加装置の提案と極性変化による味質変化の検討, 情報処理学会論文誌, Vol.54, No.4, pp.1442-1449, (2013).
- 5) Thomas P Hettinger and Marion E Frank. Salt taste inhibition by cathodal current, Brain Res Bul, vol. 80, No.3, pp.107-115, (2009).
- 6) Kazuma Aoyama, Kenta Sakurai, Satoru Sakurai, Makoto Mizukami, Taro Maeda, Hideyuki Ando, "Galvanic Tongue Stimulation Inhibits Five Basic Tastes Induced by Aqueous Electrolyte Solution", Frontiers in Psychology, (2017)
- 7) 櫻井健太, 青山一真, 古川正紘, 前田太郎, 安藤英由樹: 連続矩形波陰極電流刺激による塩味および旨味の持続的増強効果, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.22, No.2, pp.149-156 (2017)
- 8) 青山一真, 櫻井健太, 古川正紘, 前田太郎, 安藤英由樹: 顎部電気刺激による味覚提示・抑制・増強手法, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.22, No.2, pp.137-143 (2017)
- 9) 青山一真, 櫻井健太, 前田太郎, 安藤英由樹: 下顎部電気刺激による咽頭への局所的な味覚提示, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 22, No.2, pp.135-136 (2017)
- 10) Kazuma Aoyama, Kenta Sakurai, Akinobu Morishima, Taro Maeda, Hideyuki Ando, "Taste Controller: Galvanic Chin Stimulation Enhances, Inhibits, and Creates Tastes", In Proceeding of SIGGRAPH '18 ACM SIGGRAPH 2018 Emerging Technologies (2018)

<著者紹介>

安藤 英由樹 (あんど う ひでゆき)

1998年 愛知工業大学大学院工学系研究科修士課程修了

1999年 理化学研究所 BMC JRA 配属

2000年 科学技術振興事業団「協調と制御」領域グループメンバーとして
東京大学情報学環研究員

2004年 論文提出による博士授与 博士(情報理工学) 東京大学

2004年 NTT コミュニケーション科学基礎研究所 RA

2007年 NTT コミュニケーション科学基礎研究所 RS

2008年 大阪大学大学院情報科学研究科 バイオ情報工学専攻 准教授

2018年 大阪芸術大学 アートサイエンス学科 客員教授(兼任)

日本VR学会理事(2013-17)、電子情報通信学会 HCG ヒューマン情報処理研究会委員長(2014,15)
等を務める

Grand Prix du Jury, Trophées Laval Virtual (2007)、平成20年度[第12回]文化庁メディア芸術祭(優秀賞)、ARS Electronica PRiX Honorary Mention (2009, 2011) 等を受賞



1974年岐阜生まれ。1998年愛知工業大学大学院工学系研究科修士課程修了同年同研究科博士課程進学。1999年理化学研究所BMC JRA配属、2000年科学技術振興事業団「協調と制御」領域グループメンバーとして東京大学情報学環研究員、2004年論文提出による博士授与 博士(情報理工学) 東京大学 2004年NTT コミュニケーション科学基礎研究所 RA、2007年同研究所 RS、2008年大阪大学大学院情報科学研究科准教授、現在に至る。ヒトと機械の界面であるインターフェイス研究に従事、特に情報技術を介したヒト-ヒト間のノンバーバル(非言語)的情報のやりとりの手法について心理物理学的知見による感覚-知覚-運動メカニズムを用いたアプローチによって、具体的な実装を行う。主研究は「バーチャル・リアリティ」、「錯覚利用インターフェイスやスキルトレーニングシステム」、近年は「日本の Wellbeing を促進する情報技術」などの研究に従事。これらのインターフェイス開発の研究に加え、芸術表現としての先端的科学技術の社会貢献にも関心を寄せ、自らも作品制作を行なう。

青山 一真 (あおやま かずま)

2012年岡山県立大学情報工学部スポーツシステム工学科卒。2014年大阪大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了。2014年日本学術振興会特別研究員(DC1)。2016年大阪大学大学院情報科学研究科博士後期課程修了。2016年日本学術振興会特別研究員(PD)。2017年明治大学総合数理学部助教。2018年4月より東京大学情報理工学系研究科特任研究員。2018年7月より東京大学バーチャルリアリティ教育研究センター特任助教。神経工学、バーチャルリアリティなどの研究に従事。