



芽生え、私と揺れるもの

Something Grows in Me, and Sways with Me

小谷新太¹⁾, 山広健司¹⁾, 若井齊²⁾, 森下雄二郎²⁾, 若林弘樹³⁾

Arata KOTANI, Kenji YAMAHIRO, Hitoshi WAKAI, Yujiro Morishita, Hiroki WAKABAYASHI

1) 東京大学 前期教養学部理科一類 (〒153-8902 東京都目黒区駒場3-8-1, katanaarata@g.ecc.u-tokyo.ac.jp)

2) 横浜国立大学理工学部 (〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

3) 東京理科大学先進工学部機能デザイン工学科 (〒125-8585 東京都葛飾区新宿6-3-1)

4) UT-virtual (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, contact@utvirtual.tech)

概要: 電気刺激による感覚提示を通じて、その独特な特性から内面から湧き上がるような新しい触覚体験を創出する。グローブ型デバイスで指に電気触覚を与え、GVSによる加速度提示と組み合わせる。私たちはこれらを視聴覚と同期することで、小規模で軽量の装備ながらも、感覚の統合により内面に脈打つ感覚や環境との一体感を得れる体験を提案する。

キーワード: 電気刺激, GVS, 装着感

1. はじめに

本体験は電気刺激を用いたコンテンツ制作を通じて感じた、電気触覚の深部的かつ神経的な特性を生かした没入体験の創出を目指したものである。電気刺激は皮膚内部の受容器を直接刺激するものである。その触覚体験は皮膚表面の上下変位を生み出さないため、深部的な感覚を生み出す。また、受容器を選択的に制御することが難しい以上、その刺激する受容器の組み合わせによっては日常的な触覚とは異なる神経的な独特さを持ち合わせる。さらに、電気刺激を実現するデバイスは軽量かつ省電力であることから、没入体験を設計する上でも、装着性やシステム構成において有利な要素となる[1]。

従来の多くのVR体験では、反力提示や振動提示といった物理的なインタラクション手法が用いられてきた。これらの機械的刺激は、日常的で限定された触覚パターンの組み合わせに依存せざるを得なかった。さらに、深部感覚を喚起する体験を代表とする多くの機械刺激体験では、振動子、空気圧装置、モーターなどを用いる必要がある。装置の大型化や複雑な機構の導入が不可避であった。このような状況下において、電気刺激は触覚表現の幅の拡大や没入感向上において非常に有効な手法である。しかし電気刺激は、深部的かつ神経レベルでの感覚提示故にその刺激がしばしば不快感や痛覚に近接する感覚を伴うため、体験としてのデザインには高い慎重さが求められ、VRコンテンツに応用されることは限定的であった。

私たちの目的は、電気刺激の持つ神経的な触覚特性と軽量・省電力という技術的利点を活用することで、従来の物理的制約に縛られない、より自由度の高いVR体験の構築可能性を示すことである。本体験では、従来避けられがちであった電気刺激の繊細さと向き合いながら、それを積極的な感覚デザイン要素として取り入れることで、これまででない深い没入感と身体拡張感覚を実現することを試みた。

2. 体験概要

本体験では親指を除く左右の4本の指への電気刺激と前庭電気刺激 (GVS) を統合した電気刺激システムを装着し

、HMDを用いたVRコンテンツと組み合わせることで、視聴覚と触覚が融合した没入型の体験展示を実現する。体験コンテンツは、後述する「STEM」の成長過程に合わせ大きく3部構成となる。図1にその体験の様子、図2にコンテンツの様子を示す。

2.1 体験開始:STEMの芽生え

体験者はまず仰向けに横たわり、HMDによって自身の手がVR空間上に再現されるのを確認する。しばらくすると、左右の指先（親指を除く4本）から、白くぼんやりと光るひも状の生物「STEM」がゆっくりと芽生え、伸び始める。この芽生えのプロセスにあわせて、指先には高周波の連続的な電気刺激（約2mA, 80Hz三角波）が与えられ、指の中を通過して先端へと押し出されるような圧迫感を体験者に認知させる。これにより、まるで自身の内部からSTEMが成長していくかのような感覚が生まれる。

STEMは、1つの手につき最大2本が同時に伸び、完全に伸びきるまでに30秒を要する。この時間設定は、装着感の希薄化（＝身体に装着された装置の存在感を徐々に忘れさせること）なくするために最適な長さとして設計されている。

2.2 体験中盤:STEMの蠢動

STEMが完全に伸びきると、まるで自身の神経が拡張されたかのように、STEMの上部約2割が可動部として動くよ



図1: 体験の様子

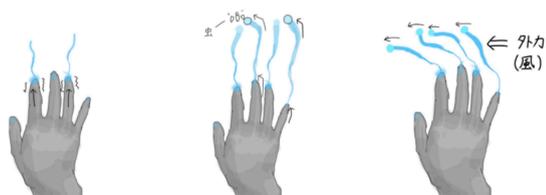


図2：コンテンツの様子

(左から、初期、虫との接触、風による外力)

うになる。この可動部の動きは、根幹にあたる指の曲げや方向に連動し、まるでSTEMが自身の意思の延長として動いているかのような感覚を引き起こす。これは身体拡張と仮想空間内のオブジェクトとの一体感の実現を目的としている。すでに第三・四の腕の実現などが先行研究として存在しており、これをふまえてVR空間上に延伸した自己として操作させる[2]。

可動中、指には強度高めめの断続的な電気刺激(ピーク約4mA, 50ms断続矩形波)が加えられ、指の奥で微細に脈打つような感覚が再現される。この設計は、事前実験で得られた触覚に関する知見を基に構築されている。ただし、電気触覚には周波数に加え波形など複数の要因が関与するため、自然で繊細な触覚フィードバックを実現するには、さらなる検証が求められる。電気刺激を与える指の数は、両手それぞれにつき最大2本までに制限している。これは、事前実験において刺激されている指を明確に識別したうえで体験を設計する際、2本を上限とすることが最も適していると判断したためである。

加えて、仮想空間内では以下のようなインタラクティブイベントが展開される：

- ・STEMの周囲には小さな虫が飛び回っており、STEMがそれらに触れると、虫はエフェクトとともに消滅する。この接触の瞬間には、電気刺激による繊細な振動感が接触と消滅のフィードバックとして与えられる。
- ・不定期に風が吹き、STEM全体がゆっくりと揺れ動く。これに合わせてGVS(前庭電気刺激)によって加速度感が提示されることで、STEMと自身が風に煽られて揺れているかのような一体感のある感覚が生まれる。

これらのイベントは、より没入感を高めるために設計するものであり、30秒程度で展開される。

2.3 体験の終了:STEMの崩解

やがてSTEMはその役目を終え、手元からディゾルブ表現とともに静かに消失する。その瞬間、体験者には短い振動型の電気刺激が与えられ、STEMとの“接続”が断たれる感覚を強調する。この瞬間の刺激は、電気刺激の得意とする触覚であり、体験の終わりを強く印象づけるものとなっている。

本企画は、電気刺激による触覚を中心に視覚・聴覚のデザインをすることで、身体性の拡張と新たな没入感を提供し、体験者に“自分の身体ではないはずの何か”が自分の中から生まれるような内面的感覚を操作する。

3. システム概要

図3・表1に簡単なシステム図を示す。

体験者は仰向けで体験を行い、HMDのハンドトラッキングによって得られた手指のスケルトン情報と頭部の動きはUnityに送信され、処理後の映像と音響が提示される。電気刺激やGVSによる触覚・加速度提示は、PCからの信号をシリアル通信でマイコンに送り電流として出力される。これらの電流は、比較的取り扱いが容易で痛みを生じにくいゲルシートを用いた電極を介して体験者に提示される[3]。

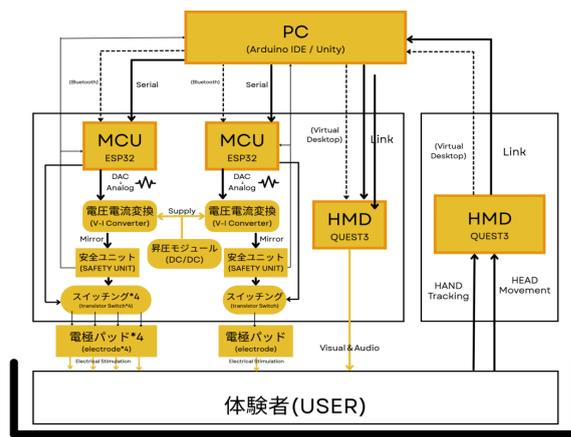


図3：システム概要図

表1：システム装置概要

装置名	役割
視覚聴覚提示装置(HMD)	STEMが芽生えている状態を視覚・聴覚での提示
グローブ型電気刺激装置	STEMの芽生えや揺れに応じた手への電気触覚の提示
加速度提示装置	STEMに加わる外力のGVSによる提示
ハンドトラッキング(HMD)	手の動きを把握し、STEMの動きを操作可能にする
没入支援装置	姿勢を支え、現実世界の視覚の影響を減らす

3.1 グローブ型電気刺激装置・加速度提示装置

本装置は、電気触覚およびGVSの双方において類似の回路構成と制御方式を採用しており、定電流回路に基づいて設計されている。触覚刺激は掌の正中神経付近を対象に、受容体の周波数に対する特性と事前実験を参考に最大4mA・200Hzの電流により感覚を喚起する[4]。刺激制御はUnityから行き、MCUがシリアル通信経路で受信した情報に基づきDAC出力を行う。波形はV-I変換を経て安定した定電流として出力され、フォトリレーを用いたスイッチングで指ごとの刺激制御が可能となっている。GVSも同様に0.5~2mAの電流を耳後部電極から与えることで平衡感覚を制御し、台形波を用いて安全に提示する[5]。

3.2 HMDコンテンツ

2章において、本企画のHMDコンテンツが陶酔感のあるシナリオと特徴的な電気触感の組み合わせによって、没入感を目指すことに触れた。本節では、2章でふれなかった装着感の希薄化について説明する。

没入体験における大きな障壁の一つは、現実世界の刺激が、VR空間で表現された世界観を妨げることである。とりわけ装着物の存在は、体験の開始時に現実との接点を強く意識させ、没入状態に入ることを困難にする要因となる。本体験では薄型軽量のデバイスを強みとするため、摩擦などによる装着感を取り除く試みも同程度に重要視する必要がある。

先行研究ではHMDを用いた現実環境から仮想現実環境への移行において、実環境のデジタルレプリカを中間ステップとして活用する手法が有効であることが示されている[6]。本企画ではこの知見を踏まえ、体験開始時にグローブ型デバイスを仮想空間内で視覚的に提示し、その後STEMの伸長に伴って透明度の変化やパーツの段階的な非表示処理を行う。これにより、デバイスの視覚的な存在感を徐々に薄れさせ、没入感の促進を図る。

3.3 没入支援装置

没入支援装置は、コンテンツ内でのSTEMの発生・成長の舞台となる「土壌」としての役割を担う。体験者の没入感を高めるため、視覚・聴覚など現実の刺激を極力排除し、閉鎖的な環境を構成する。また、仰向け姿勢での体

験時に不要な身体的刺激を避けるため内部は全面を柔らかな素材で覆う構造としている。HMD装着時でも頭部が自由に動かせるよう、頭部には穴あきクッション等を配置することを想定している。

3.4 システムの無線化

没入感を追及する以上、デバイスの無線化は大事な要素を占める。プロトタイプでは、MCUをアクセスポイントとしてWifi通信によってPCとの連携をとれるようにした。また、電気刺激は他のアクチュエーター等を利用する設計に比べ非常に省電力である。そのため、バッテリー駆動が可能でありその結果完全な無線化が可能となった。無線化によって、前述の没入感の向上に加え、PCとデバイス間の電氣的分離が可能となることで、電気刺激用の高電圧回路がPCに悪影響を与えるリスクも回避できる。一方で、無線通信にはデメリットも存在する。たとえば、展示会などの通信環境が混雑した場所では、Wi-Fi接続が不安定となり制御不能に陥る可能性がある。このような通信障害は、安全性の面でも重大な懸念となり得るため、後述する安全性について十分配慮する必要があった。以上の理由から、本体験では、有線・無線の両方に対応可能なデバイス設計とした。

4. 安全性

電気刺激は、感覚閾値と痛覚閾値が近接しているため、その強度制御は非常に繊細である。また、神経に直接作用する手法であることから、誤って大量の電流が流れた場合、深刻な障害を引き起こす可能性がある。特にGVSは中枢神経系に影響を与えるため、より高い危険性を伴う。さらに、長時間の使用によっては電極の接触部位に熱傷を生じる恐れもある。以上の点から、電気刺激を取り扱う際には、安全性に対する最大限の配慮が不可欠である。本体験では、以下の6点の安全対策を講じている。

- ・刺激に用いる電流の回路にダイオードを挿入し、過剰な電流の流入を防止する。
 - ・オペアンプによるボルテージフォロワーやカレントミラー回路により、個々の部品に過度な負荷がかからないようにする。
 - ・体験前にアルコールシートなどで皮膚表面を清拭し、皮膚インピーダンスの不均一性を低下・安定化させ、さらに電極の接着面を均一にすることで、痛覚につながることを防ぐ。
 - ・電流モニタを刺激に用いる回路に設計し、異常な電流値が検出された場合にはMCUにより即座に動作が停止されるようにする。
 - ・体験者が自ら物理的に回路を断線できる手段を備え、異常や不快感が生じた場合にすぐに体験を中断できるようにしている。
 - ・GVSに関しては、従来の「最大3.0mA、5秒以内、1日60秒以内」といった使用基準を参考にしつつ、最新の知見に基づく基準の調査を継続し、適切な範囲内での刺激設計を行う[7]。
- 今後も最新の安全ガイドラインを精査し、適切な制御パラメータのもとで、安全かつ効果的な体験設計を行っていく予定である。

5. 事前実験

電気刺激の特性を把握し、それに基づいた触覚提示コンテンツを設計するため事前実験を実施した。実験では3名の被験者に対し、手のひらおよび各指の第2関節中腹に電極を配置し、部位ごとの電気刺激によって生じる触覚の違いを検証した。使用した実験装置を図4に示す。



図4：事前実験装置

その結果、各手につき2本の指への電気刺激が弁別性に優れ、提示に適していることが示唆された。また、「芽生え」「内側から広がる感覚」「軋み」といったSTEMの世界観と親和性の高い触覚表現を実現するための、周波数および波形設計の指針を得ることができた。ただし、本実験はごく少数の被験者を対象とした予備的な検証に過ぎず、主観的評価にも依存しているため、体験の構築と並行して、さらなる定量的・質的検証が必要である。

6. むすび

本体験は、電気刺激という神経レベルに作用する手法を用い、その特有の触覚表現を積極的にデザインに取り入れることで、従来の物理的制約にとらわれない新たな没入体験の可能性を提示するものである。安全性や装着感の希薄化に細心の注意を払いながら、電気刺激とGVSの統合を実現した暁には、実応用に向けた重要な知見を提供するものになるはずである。今後は、検証を通してさらなる触覚体験の充実を図るとともに、安全性に最大限配慮しながら、体験コンテンツの開発を継続していく。

参考文献

- [1] 梶本裕之, 川上直樹, 前田太郎, 館暉: 皮膚感覚神経を選択的に刺激する電気触覚ディスプレイ, 電子情報通信学会論文誌D-II, Vol. J84-D-II, No. 1, pp. 120-128, 2001.
- [2] 佐々木智也: 身体拡張 多腕人間方式, 基礎心理学研究, Vol. 40, No. 1, pp. 18-22, 2021.
- [3] 梶本裕之, 菅野米藏, 館暉: 日常的装具としての電気触覚ディスプレイ, 計測自動制御学会論文集, Vol. 47, No. 7, pp. 601-607, 2006.
- [4] 林宏樹, 高畑実: 触覚通信実現を目指した触感の客観的評価, NTTDOCOMOテクニカル・ジャーナル, Vol. 13, No. 3, pp. 40-45, 2006.
- [5] 安藤英由樹, 渡邊淳司, 前田太郎: 前庭電気刺激を利用した平衡感覚インタフェース, 電子情報通信学会論文誌D, Vol. J92-D, No. 6, pp. 837-846, 2009.
- [6] From Real to Virtual: Exploring Replica-Enhanced Environment Transitions in Virtual Reality, Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 1-14, 2024.
- [7] 青山真一, 安藤英由樹, 飯塚博幸, 前田太郎: 前庭電気刺激における逆方向不感電流を用いた加速度感覚の増強, 日本バーチャルリアリティ学会論文集, Vol. 19, No. 3, pp. 315-318, 2014.