

末梢神経インタフェースの医工学研究

機械工学専攻
准教授 吉元 俊輔

1. はじめに

神経の電気刺激は、神経細胞の特性理解などの脳神経科学や、神経系疾患の治療、Brain Machine Interface などの先端医療分野を中心に発展してきた。近年では、材料、半導体、計算機などの発展により、バーチャルリアリティ (VR) における触覚体験や遠隔操作ロボットの感覚フィードバック、感覚代行などへの応用も注目され、様々な人の末梢神経を対象とした非侵襲な（経皮的な電気刺激を使用した）末梢神経インタフェースの研究領域が開拓されている。感覚（主に触覚）を提示するためのインタフェースとして考えると、電気刺激は機械的な刺激手法などと比べ、小型軽量、高耐久、高密度、多自由度、高速といった優れた点が多くある。しかし、電流に対する閾値が狭く痛覚やしびれが生じる場合があること、皮膚状態や電極装着の不安定性があること、刺激に対する閾値や感覚の個人差が大きいことなどが課題として残り、その応用は限定的である。

筆者らの研究グループでは、ユニークな神経刺激の設計論を基に新しい末梢神経インタフェースを創成し、医工・産学連携でこれらの深化や応用に関する研究に取り組んでいる。本稿では、これまでの研究と最新の展開を紹介する。

2. ユニークな神経刺激技術（電気触覚重畳）の開発

電気刺激によって生成される感覚は、刺激によって神経活動が誘発された神経軸索の末端に接続する機械受容器の部位に生じる。著者らの研究グループでは、この特性に着目し、手指の中節を刺激部位として電気刺激を与えることで指腹部に感覚が生じることを明らかにした [1]。特に、

触覚の知覚に関わる正中神経の掌側枝は示指の両側に1本ずつ走行しており、指先にかけて枝状に広がることから、中節の側面に陰極電極を、基節の中央部に接地電極を配置し、左右それぞれの神経を独立に刺激することで生成される感覚の位置を調整可能である。この陰極刺激の利用は数理的な理解

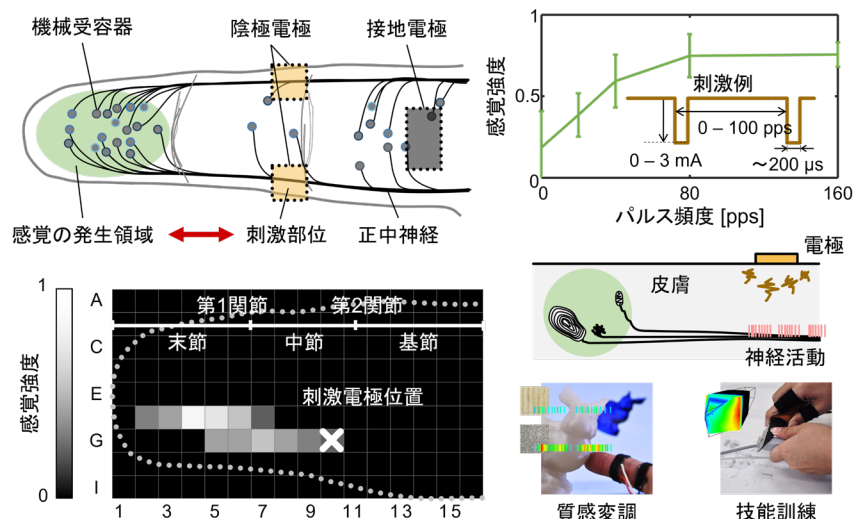


図1 電気触覚重畳の模式図. 刺激部位と異なる領域に感覚が発生する. その応用として触り心地を変化させる質感変調や熟練者の操作を教示する技能訓練を実現した.

に基づいており、皮膚表面と平行に走行する神経を活性化するための条件である。また、生成される感覚の強度は、刺激に用いるパルス波の頻度に伴い変化し、0-100 pps 程度の範囲では頻度に伴い感覚強度が増加する。例えば、物体の表面をなぞった際の神経活動を模擬するような刺激パルスで指の動作に応じて再生することで粗さ感などの質感の再現が可能である。これらの技術によって、装置を装着していない身体の部位に感覚を生じさせる電気触覚重畳という新しい概念が実現され、指で触れた物体の粗さ感覚の変調（ツルツルをザラザラに感じさせるなど）[1]や、歯科技工士の歯型彫刻訓練（熟練者の操作を触覚で教示など）[2]を実証してきた（図1）。

3. 電気触覚重畳による運動教示と医療展開

著者らが開発した新しい末梢神経インタフェースは、道具の把持などの手指の運動を阻害することなく指先に多自由度な感覚を生成可能であり、運動教示において有効な手段である。医療分野では、手指の微細な感覚が重要とされる外科手術の誘導や効率的なトレーニング手法の開発が期待されている。これらの背景を踏まえ、開発した技術の利用展開として、術具の位置決め、組織牽引量の教示、歯型彫刻の角度教示などに関する基礎的な知見を蓄積してきた[3]。その一つとして、大阪大学歯学部附属病院と連携し、歯科技工士の歯型彫刻（小刀でワックス棒を歯の形状に削り出す手技）の訓練を対象に、経験と勘に基づいた熟練者の手技をモデル化し、初学者に触覚フィードバックとして通知するシステムを構築した（図2）。特に、小刀を対象のワックス棒に接触させる際の逃げ角が重要であることに着目し、その誤差を矯正するために小刀を把持する示指と拇指に電気触覚重畳を行い、角度の教示を可能にした。歯科技工士の学生を対象とした実験により、フィードバックの有無による効果を比較し、逃げ角を目標値に近づける事が可能であること、全体として彫刻の失敗率が低下することが示され、電気触覚重畳による教示効果が示唆された[2]。これらの知見も交え、現在は新たな展開として大阪大学大学院医学系研究科産科学婦人科学教室との連携も進めている。

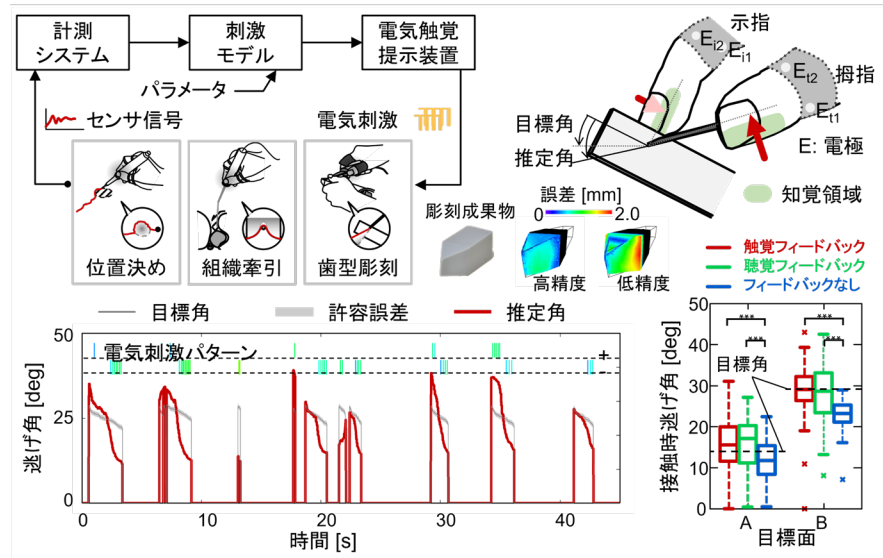


図2 電気触覚重畳による運動教示システム。歯型彫刻において、熟練者の動作から抽出した目標角を用いてリアルタイムに誤差を手指の感覚として提示するシステムを構築し、矯正効果を検証した。

4. 神経刺激シミュレーションからデジタルツインへ

はじめに述べたように、経皮電気刺激は生成される感覚の品質や再現性の向上、個人差の考慮などに課題がある。著者らは神経刺激による感覚生成を予測可能なシミュレーションフレームワークを構築し、これらの課題の解決に向けた設計論を探索している[4]。

シミュレーションでは、電気刺激によって生じる電位分布を計算し、神経軸索のモデルを用いて膜外電位から膜間電位を計算、発火（神経活動）の伝播を解析し、その時空間関係を基に生成される感覚を評価する。前述の指中節への電気刺激による触覚重畳においては、指中節に装着する電極のサイズの影響を調べ、有効

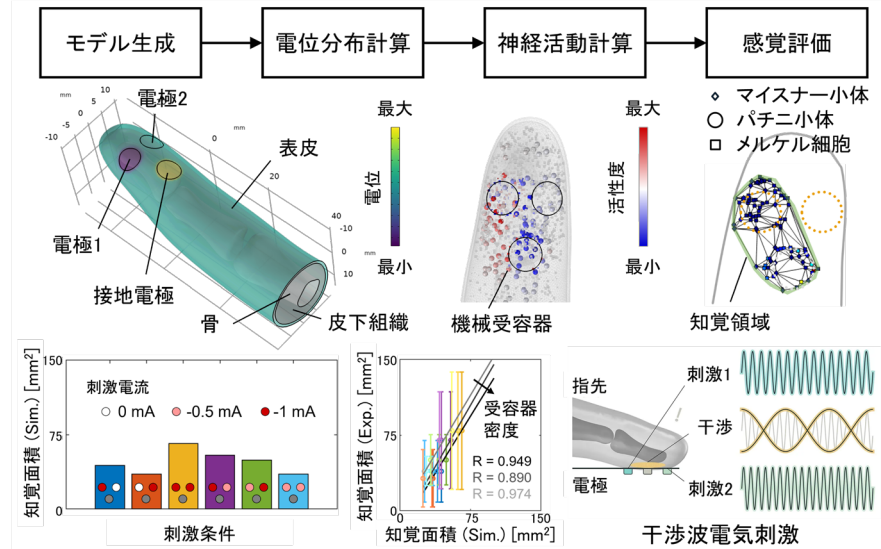


図3 神経刺激シミュレーション(Sim.)の概要. 指先への電気刺激による受容器の活性化評価と実機実験(Exp.)との比較. 干渉波電気刺激の評価への応用.

性の高い条件を明らかにした。また、指先への電気刺激によって感覚が生じる領域を評価し、指の形状や機械受容器の密度などの影響についても明らかにしている。さらに、干渉波電気刺激という近年脳神経系の分野で着目されている神経刺激を触覚の生成に利用することで、電極の再構成や刺激の振幅変調なしに感覚が生じる領域とその強度を調整可能であることなども明らかにした [5]。現在はさらに個々の特性を考慮した神経刺激デジタルツインの構築に向けて手指神経のMRI撮影をNICT CiNetの協力を得て実施し、電気メーカとも連携して革新的な設計論の創出に向けた研究を推進中である。

5. おわりに

以上のように、本稿では電気触覚重畳というユニークな神経刺激インタフェースの研究を起点として、身体運動を触覚フィードバックにより教示して手技の学習を支援する医療応用、イメージング・物理・生理と計算科学の知を集結させて挑む神経刺激デジタルツイン構築に向けた取り組みを紹介した。医工や産学の連携を通して培ってきた研究の土壌を最大限に活かした発展に加え、末梢神経障害の予測と予防に向けた医工学研究、細胞レベルでの検証と脳科学への接続など、今後計画している研究活動を通して末梢神経インタフェースの新たな領域を拓いていきたい。

参考文献

- [1] S. Yoshimoto, Y. Kuroda, M. Imura, O. Oshiro, Material Roughness Modulation via Electrotactile Augmentation. *IEEE Trans. Haptics*, 8(2): 199-208, 2015.
 - [2] S. Yoshimoto, Y. Kuroda, M. Imura, O. Oshiro, K. Nozaki, Y. Taga, H. Machi, H. Tamagawa, Electro-tactile Augmentation for Carving Guidance. *IEEE Trans. Haptics*, 9(1): 43-53, 2016.
 - [3] 吉元俊輔, 電気触覚重畳による手術手技教示, システム/制御/情報, 60(3): 21-26, 2022.
 - [4] S. Yoshimoto, S. Inoue, H. Ohara, Y. Asai, N. Koyama, T. Ota, S. Ino, Evaluation of Tactile Perception by using Simulation of Mechanoreceptor Activity via Transcutaneous Electrical Stimulation. *In Proc. IEEE WHC*, WPI-01: 628-629, 2025.
 - [5] H. Ohara, S. Yoshimoto, Y. Asai, T. Ota, Frequency Shaping of Tactile Perception via Transcutaneous Interferential Electrical Stimulation: A Simulation Study. *Front. Neurosci.*, 20(1802332):1-15, 2026.
- (大阪大学基礎工学部卒 (2009年)、修士 (2010年)、博士 (2012年))