



手首を走査する神経束への経皮電気刺激の周波数と 惹起される振動感覚の関係

Perceived Frequency of Vibratory Sensation Induced in the Hand by Transcutaneous Electrical Nerve Stimulation at the Wrist

荻原秀斗¹⁾, 雨宮智浩^{1,2)}, 青山一真^{2,3)}

Shuto OGIHARA, Tomohiro AMEMIYA, and Kazuma AOYAMA

- 1) 東京大学 情報理工学系研究科 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, {ogihara,amemiya}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)
2) 東京大学バーチャルリアリティ教育研究センター (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, aoyama@vr.u-tokyo.ac.jp)
3) 東京大学先端科学技術研究センター (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, aoyama@vr.u-tokyo.ac.jp)

概要: 本研究では手で物体に直接触れながらインタラクションしつつ、手に人工的な触覚を提示するために、触覚を支配する神経への経皮電気刺激を利用する方法を提案する。この手法では触覚の中でも特に振動感覚が強く惹起されることが知られている。本研究では刺激周波数と知覚される振動感覚の周波数の関係を 300Hz までの高周波帯を含めて調査し、100Hz 以下の刺激周波数では知覚周波数との相関が認められたのに対して、高周波条件では低周波な振動感覚が同時に惹起されることを明らかにした。

キーワード: 経皮電気刺激, 振動感覚, 触覚ディスプレイ, 複合現実感

1. はじめに

拡張現実感 (AR) や複合現実感 (MR) の技術的な進歩により、バーチャルな情報が重畳された現実世界を探索する体験が実現可能となった。これらの体験の没入感をより高めるため、視覚情報のみならず触覚情報も合わせて提示する技術が注目されている。AR や MR ではユーザーは仮想物体だけでなく現実の物体とも相互作用を行うことが想定されるため、触覚提示技術のためのデバイスは現実世界との相互作用を妨げないものでなければならない。さらに、触覚情報も視覚情報と同様に、実際の環境からの触覚入力と重ね合わせることができる必要がある。そのため、AR や MR における触覚提示技術は、手を覆わずに触覚提示を行う必要がある。

触覚提示箇所を覆わない触覚提示技術はいくつか提案されており、それらは大きく 2 つの手法に分類できる。一つ目は触覚提示箇所とは離れた位置を機械的に刺激することで触覚を起すものである。Tao らの提案した触覚提示デバイスでは、環状のフレームを用いて指の腹の変形を抑制することで物体の柔らかさの知覚を変化させた [1]。また、安藤らは爪に振動刺激を与えることで凹凸の知覚を変化させることができる SmartFinger を提案した [2]。二つ目は触覚情報を知覚する機械受容器の情報を伝達する神経を刺激することで神経活動を誘発するものであり、電気刺激や超音波刺激を用いたものがある。吉元らは指の第二関節への電気刺激により指先における物体の粗さの知覚を変容させることが可能であることを明らかにした [3]。また、Spelmezan

は手の甲・手の平への超音波刺激を行うことでそれぞれ手の平・手の甲に触覚提示を行う SkinHaptics[4] を提案した。これらの手法では触覚提示箇所を覆わない触覚提示に成功しているものの、触覚の提示箇所が限定的であることや、手にデバイスを取り付ける必要があるため手の運動を阻害してしまうといった課題がある。

そこで我々は手の触覚情報を担う神経がより収束した腕の神経束に対して経皮電気刺激を行うことで、手に触覚を提示する手法 [5, 6, 7, 8] に注目した。この手法は正中神経、尺骨神経、橈骨神経に対して腕の皮膚上から電気刺激刺激を行うことで手に触覚提示を行う手法であり、主に上肢切断患者に対して義手への触覚フィードバックを実現する方法 [9] として用いられてきた。これらの神経束は合わせて手全体を支配領域としており、肘にて正中神経・尺骨神経を選択的に刺激することでそれぞれの神経の支配領域に触覚提示が可能であることが知られている [7]。また、この手法により生じる触覚の質について従来の研究では、振動感覚や連続したタップの感覚と表現されている [5, 6] ことから、振動感覚が特に強く生起されているものと考えられる。以上のことから、神経束への経皮電気刺激は手にデバイスを装着することなく手全体を触覚提示の対象とすることができる振動感覚の提示手法として応用することが可能であると考えられる。

振動感覚は人間の触覚知覚において重要な役割を果たしており、振動感覚を適切に提示することで粗さ・圧力・摩擦感を誘発することができることや、振動感覚を重畳させること

で材質の知覚を変容させることが可能であること [10] などが知られている。これらに例において、所望する周波数の振動感覚を誘発することは極めて重要であるため、神経束への経皮電気刺激による触覚提示についても生起される振動感覚の周波数を制御できる必要がある。荻原ら [8] は 25Hz ~ 100Hz の範囲における周期波形での刺激について生起される振動感覚の周波数を評価しており、この範囲においては刺激波形の周波数と同等の周波数の振動感覚が知覚されることが明らかになっている。しかしながら、特に振動感度が高いとされている 200Hz ~ 300Hz の範囲において同様の傾向が確認できるのかは未解明である。高周波帯の振動感覚は物体表面の細かさの知覚 [11] や物体に触れた瞬間の材質知覚 [10] に重要とされていることから、制御可能であることが望ましい。以上のことから本研究では、神経束への経皮電気刺激による振動感覚提示における、刺激周波数と知覚される振動感覚の周波数の関係を、300Hz までの高周波帯を含めて調査することを目的とする。

2. 知覚周波数の評価実験

2.1 実験概要

本実験では 25Hz, 50Hz, 100Hz, 200Hz, 300Hz の 5 種類の刺激周波数を用いて神経束に対して経皮電気刺激を行い、生起される振動感覚の周波数を評価する心理物理実験を行った。周波数の評価は加振機による機械振動刺激を提示し、経皮電気刺激により惹起される感覚の周波数と比較することにより行われた。なお、刺激は手首の位置で正中神経沿いを対象に行われ (図 1), 刺激波形には正弦波が用いられた。

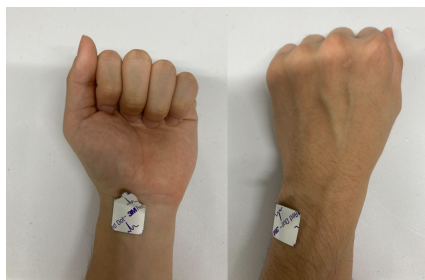


図 1: 刺激位置 (左) 正中神経沿いの電極位置, (右) 触覚神経の走行のない基準電極位置

2.2 実験装置

本実験では電流値制御により皮膚に電流を印加する電気刺激装置と、入力波形に応じて指定した周波数で振動する機械振動生成装置が用いられた (図 2)。電気刺激装置は電圧 - 電流変換回路とカレントミラー回路からなり、PC からのシリアル通信により周波数と電流値強度を指定されることで刺激が実行された。実験で使用された電流値強度は、触覚の生じる閾値を基準に実験参加者毎に決定された。機械振動生成装置は波形出力装置と加振機 (EMIC 511-A) からなり、電気刺激装置同様に PC からのシリアル通信により周波数と変位が指定された。機械振動刺激については、振

動感覚の閾値における変位が周波数に依存するといわれており、閾値における周波数 - 変位 曲線は 250Hz 付近をピークに U 字の形状となることが知られている。振動感覚の主観的な強度を可能な限り周波数に依存させないようにするため、本実験では Bolanowski ら [12] の報告を参考に変位を決定した。

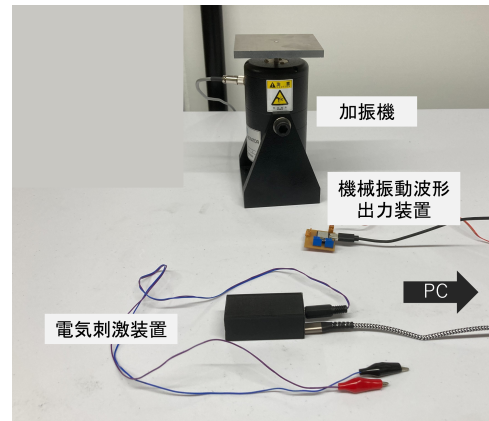


図 2: 実験装置

2.3 実験手順

実験参加者は健康な成人男性 7 名 (24.7 ± 3.3 歳) であり、いずれの参加者からも十分にインフォームドコンセントを得て実験に参加してもらった。なお、本研究は東京大学研究倫理審査専門委員会にて承認された実験プロトコルに従って実施している。まず、刺激位置に電極を貼り付けた後に 1mA の振幅で正弦波刺激を行い、正中神経の支配領域である薬指から親指にかけての範囲に触覚生起が行われていることを確認した。このとき最も振動感覚を感じた指の指先を以降の機械振動刺激の提示位置とした。次に、2 種類の機械振動刺激の周波数を比較する試行を行った。振動感覚の周波数を比較する際、その弁別閾には個人差があるため、実験参加者の周波数弁別能力を知っておく必要がある。本実験では電気刺激の刺激周波数条件として用いる各周波数の前後で 2 種類の周波数の刺激を行い、どちらの刺激の周波数が高いかを評価してもらった。実際に比較で使用した周波数は表 1 の通りであり、対応する電気刺激の周波数条件を中心に、常用対数尺度で 0.1 の差となるように決定された。各比較はランダムな順番でそれぞれ 10 回ずつの合計 50 回行われ、試行中参加者はホワイトノイズにより聴覚情報を遮断された。

続いて、電気刺激の強度を決定した。これは上下法により感覚が生じる電流値閾値を計測し、その 3 倍の値を用いた。このとき、強い振動等の不快感が感じられた場合は、不快感を感じなくなるまで電流値を下げた。

最後に、各刺激周波数条件において電気刺激が惹起する振動感覚の周波数評価を行った。これは各電気刺激条件に対して、機械振動刺激の周波数が等しくなるように調整する PEST 法 (Parameter Estimation by Sequential Testing Method) [13] により行われた。まず、2 秒間の電気刺激を提

表 1: 周波数弁別能力判定に用いた周波数

条件	対応する周波数	比較された周波数
1	25Hz	22Hz と 28Hz
2	50Hz	45Hz と 56Hz
3	100Hz	89Hz と 112Hz
4	200Hz	178Hz と 224Hz
5	300Hz	269Hz と 339Hz

示した後、ランダムな周波数の機械振動刺激を行い、生じた振動覚の周波数の高低を回答してもらった。次に、結果に応じて機械振動刺激の周波数を変更し、再度機械振動刺激を提示するというを特定の条件が満たされるまで繰り返し、最終的な周波数とその一つ前に使用された周波数の平均値を知覚周波数とした。このとき、機械振動刺激の周波数は常用対数の尺度で変化するようにした。変化のステップサイズは初期値が 0.4 であるのに対して反転する毎半減させ、最終的に 0.1 より小さくなった時点で試行を終了とした。測定範囲は 10Hz から 400Hz までとし、範囲を超えた場合に外れ値として処理された。また、実験参加者は確認のため何度でも電気刺激を要請することができた。なお、聴覚情報を遮断するため、試行中常にホワイトノイズの聴覚刺激が行われた。これらの試行は、練習試行として 25Hz と 200Hz の刺激条件で一回ずつ行われた後に、各刺激周波数条件について 4 回ずつの合計 20 回行われた。すべての試行の終了後、各刺激周波数でもう一度電気刺激を行い、生じた感覚についての所感・比較を口頭で回答してもらった。

3. 結果

1 名の実験参加者が 2mA 以下の刺激では手に振動感覚が惹起しなかったため解析対象から外し、以下には 6 名分の実験結果を示す。

3.1 機械振動刺激の周波数比較

はじめに各実験参加者の周波数弁別能力を観察するために行った機械振動刺激の周波数比較の結果、表 1 の条件 2 と条件 5 において 2 名の参加者で正答率が 7 回未満であった。その他の 3 条件についてはどの参加者も 10 試行中 7 回以上は正しく周波数を識別することが可能であった。

3.2 電気刺激周波数と知覚周波数

電気刺激の刺激周波数毎に知覚された周波数の平均値と標準誤差をグラフにしたものが以下の図 3 である。横軸の刺激周波数と縦軸の知覚周波数はどちらも対数軸が用いられており、×印は四分位範囲の 1.5 倍の値よりも外側の測定値を表している。

知覚周波数について Friedman 検定を行った結果、刺激周波数の効果に有意差が認められた ($p < 0.01$, $\chi^2 = 0.16$)。また、刺激周波数について Wilcoxon の順位和検定を行ったところ、25Hz と 50Hz、25Hz と 100Hz の 2 つの刺激周波数条件間で有意差が認められた ($p < 0.01$)。

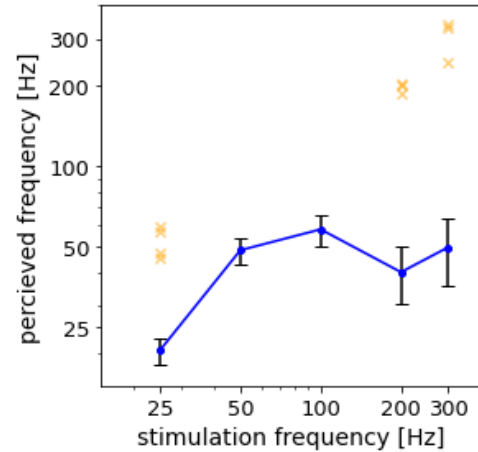


図 3: 刺激周波数と知覚周波数

4. 考察

4.1 機械振動刺激の周波数比較

電気刺激と機械振動刺激による振動感覚の周波数を比較する上で、周波数の比較を著しく苦手とする実験参加者を事前に把握するために、2 種類の機械振動刺激を比較する試行を行った。多くの実験参加者について、常用対数尺度で 0.1 の差があれば振動感覚の周波数を判別することができることがわかった。一部の参加者では特定の条件にて 10 回中 6 回以下の正答率となったが、特定の条件のみであったこと、対象となる参加者では実際に 300Hz 周辺となる測定値が存在しなかったことから、以降の実験結果支障はないと判断した。

4.2 電気刺激周波数と知覚周波数

神経束への経皮電気刺激により惹起される振動感覚の周波数を評価するために、機械振動による振動感覚の周波数と比較させた。その結果、図 3 から、100Hz までの範囲においては先行研究 [8] と同様、刺激周波数の上昇に対して知覚される振動感覚の周波数も上昇していることが確認された。100Hz までの刺激周波数について知覚周波数との相関分析を行ったところ、ピアソンの相関係数は $0.63(p < 0.01)$ となり、正の相関が認められた。

200Hz 以上の刺激では知覚される振動感覚の周波数が明らかに低下しており、全体としての正の相関は確認されなかった。実験後に行った各刺激条件における生起触覚の評価についての自由回答では、200Hz 以上の刺激条件では高周波な振動感覚と同時に低周波な振動感覚が感じられたという回答が複数あった。実験の際はより強く感じた方で比較するよう指示がなされたため、低い周波数として測定されたと考えられる。一方で、図 3 では全体の傾向から大きく外れた高周波な回答が散見されており、これらの測定値に対応する参加者の自由回答では、低周波な感覚について言及はなく、単純に高周波な感覚と評価していた。このことから、ある一定以上の高周波な刺激では高周波な振動感覚とともに低周波な振動感覚も提示されると考えられる。実験後の自由回答にて、一人の実験参加者は 100Hz 条件で低

周波の感覚がすでに少し感じられたと報告していたため、個人差があるものの100Hzの前後で低周波の感覚が生じはじめる周波数が存在するといえる。

高周波な刺激が単純には高周波な振動感覚を惹起しない原因として、神経発火速度の限界の問題があると考えられる。神経束への電気刺激では、神経発火を周期的に誘発することで振動感覚を惹起しているのに対して、実際の振動感覚は皮膚下の振動を検出する機械受容器によりエンコードされる。神経には一度発火した後再度発火するために必要な復帰時間が存在し [14]、高周波での発火には限界があるため、高周波な刺激で想定外の低周波な感覚が生じると考えられる。

5. 結論

本研究では、神経束への経皮電気刺激による振動感覚提示における刺激周波数と知覚される振動感覚の周波数の関係を、300Hzまでの高周波帯を含めて調査することを目的とした。そのために、25Hz, 50Hz, 100Hz, 200Hz, 300Hzの5つの周波数を用いて正弦波刺激を行い、それにより惹起された振動感覚の周波数を機械振動刺激と比較する心理物理実験を行った。その結果、100Hz以下の刺激周波数条件では知覚周波数との相関が認められたのに対して、以降の高周波条件では低周波な振動感覚が同時に惹起されることが判明した。また、100Hz刺激時にすでに低周波な振動感覚も知覚している参加者もいれば300Hz刺激時であっても低周波な振動感覚が知覚されない参加者もいたことから、100Hz前後で低周波の振動感覚が発生し始めることが示唆された。

本研究により、神経束への経皮電気刺激による触覚提示は高周波の振動感覚が重要とされる物体表面の細かさの提示などの応用には適していないということが明らかになった。一方で、高周波な振動感覚自体は惹起されていることから、物体を弾く動作のように高周波感覚の提示が瞬間的である体験には応用できる可能性がある。今後はこれらの制約の中で、実際の触覚体験を変容させるような応用を検討していくことを目標とする。

謝辞本研究はJST さきがけ (JPMJPR19J1) の助成を受けて実施された。

参考文献

- [1] Yujie Tao, Shan-Yuan Teng, and Pedro Lopes. Altering perceived softness of real rigid objects by restricting fingerpad deformation. In *The 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, p. 985–996, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.
- [2] 安藤英由樹, 渡邊淳司, 稲見昌彦, 杉本麻樹, 前田太郎. Augmented realityのための爪装着型触覚ディスプレイの研究. *電子情報通信学会論文誌 D*, Vol. 87, No. 11, pp. 2025–2033, 2004.
- [3] Shunsuke Yoshimoto, Yoshihiro Kuroda, Masataka Imura, and Osamu Oshiro. Material roughness modulation via electrotactile augmentation. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 8, No. 2, pp. 199–208, 2015.
- [4] Daniel Spelmezan, Rafael Morales González, and Sriram Subramanian. Skinhaptics: Ultrasound focused in the hand creates tactile sensations. In *2016 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, pp. 98–105, 2016.
- [5] Henry Shin, Zach Watkins, He Helen Huang, Yong Zhu, and Xiaogang Hu. Evoked haptic sensations in the hand via non-invasive proximal nerve stimulation. *Journal of neural engineering*, Vol. 15, No. 4, p. 046005, 2018.
- [6] Alessia Scarpelli, Andrea Demofonti, Francesca Terracina, Anna Lisa Ciancio, and Loredana Zollo. Evoking apparent moving sensation in the hand via transcutaneous electrical nerve stimulation. *Frontiers in Neuroscience*, Vol. 14, p. 534, 2020.
- [7] Johanna Forst, Derek Blok, Julia Slopsema, John Boss, Lane Heyboer, Carson Tobias, and Katharine Polasek. Surface electrical stimulation to evoke referred sensation. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, Vol. 52, pp. 397–496, 09 2015.
- [8] 荻原秀斗, 青山一真, 雨宮智浩, 葛岡英明, 鳴海拓志. 腕の神経束への電気刺激により生じる手掌の皮膚感覚の周波数特性. *信学技報*, 第121巻, pp. 234–239, 2022.
- [9] Luis Vargas, He Huang, Yong Zhu, and Xiaogang Hu. Object shape and surface topology recognition using tactile feedback evoked through transcutaneous nerve stimulation. *IEEE transactions on haptics*, Vol. 13, No. 1, pp. 152–158, 2020.
- [10] Allison M Okamura, Mark R Cutkosky, and Jack T Dennerlein. Reality-based models for vibration feedback in virtual environments. *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, Vol. 6, No. 3, pp. 245–252, 2001.
- [11] Shogo Okamoto, Hikaru Nagano, and Yoji Yamada. Psychophysical dimensions of tactile perception of textures. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 6, No. 1, pp. 81–93, 2012.
- [12] Stanley J Bolanowski Jr, George A Gescheider, Ronald T Verrillo, and Christin M Checkosky. Four channels mediate the mechanical aspects of touch. *The Journal of the Acoustical society of America*, Vol. 84, No. 5, pp. 1680–1694, 1988.
- [13] 原澤賢充. 適応的心理物理学的測定法による閾値の推定. *Vision*, Vol. 15, No. 3, pp. 189–195, 2003.
- [14] Romain Brette. Philosophy of the spike: rate-based vs. spike-based theories of the brain. *Frontiers in systems neuroscience*, p. 151, 2015.