



小指または薬指への爪上刺激が 示指および母指の触覚感度に及ぼす影響について

Effects of Fingernail Stimulation of the Little or Ring Finger on Index and Thumb Finger Tactile Sensitivity

久木田輝瑠¹⁾, 橋本悠希¹⁾

Hikaru KUKITA, and Yuki HASHIMOTO

1) 筑波大学 システム情報工学研究群 (〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1, h_kukita@vrlab.esys.tsukuba.ac.jp, hashimoto@iit.tsukuba.ac.jp)

概要: 我々は、刺激部位の対象となる神経から別の神経に波及する感覚神経活動電位を利用し、振動未提示の部位に確率共鳴現象を起こすことで触覚感度を向上させる手法を提案している。これまでは、小指または薬指の爪上に対する微弱振動刺激で、振動未提示の中指感度が向上すると報告していた。本研究では、同手法で未検証だった示指と母指の感度変化を検証した。その結果、小指爪上の微弱振動が示指感度を向上させる可能性が示唆された。

キーワード: 触覚、確率共鳴、感覚神経活動電位

1. 序論

1.1 研究背景

日常生活では多くの場面で手指を使用した作業が存在するが、加齢や疾病で手指の巧緻性が低下するとそれらの作業は困難になる。特に脳卒中やパーキンソン病の患者は巧緻性が低下しやすく問題である[1,2]。この巧緻性の低下は、手術手技や芸術における作業効率や完成精度、食事などの日常生活動作に悪影響を及ぼし問題である[3,4,5]。

手指の巧緻性は触覚受容器によって物体の形状や面歪、滑りなどの情報を取得し、これらの情報を用いて把持力や動作を調整することにより実現される[6]。このような調整作用を高めるには、触覚受容器の密集する指腹部の触覚感度が特に重要となる[7]。そのため、指腹部の触覚感度を向上させることで手指の巧緻性を維持・向上する手法が求められている。

1.2 関連研究

触覚感度を向上させる手法として確率共鳴現象が広く研究されている[8,9,10,11,12]。確率共鳴現象とは、閾値を越えない信号に対し適切な強度のホワイトノイズを重畳させることで、信号が閾値を越える確率を上がり信号に対する感度が高まるといった現象である。図1に、確率共鳴現象の概略図を示した。広範囲の周波数成分で同じ強度になるというホワイトノイズの性質によって、様々な周波数特性の信号に対して感度向上効果を適用できるのが確率共鳴現象の利点である。そして、これは触覚信号に対し

でも適用可能である。

手作業の支援を目的とした確率共鳴現象の応用手法として、手首[13]や爪上[14]に振動刺激する手法が存在する。爪上刺激手法では、感度向上させたい目標部位の近傍を振動刺激することで各指個別に最適な強度の振動を提示することができ、触覚感度向上効果の最大化を図ることができると考えられている。この手法に対して手首刺激手法では、目標部位から離れた部位を振動刺激した際に発生する皮膚伝播振動により複数部位の触覚感度を向上させることができると考えられている。しかし、爪上刺激手法は振動子が把持動作などを阻害する可能性がある。また、手首刺激手法は大きい振動子を必要とするという問題がある。

これらの問題を解決するために、我々は感覚神経活動電位の波及に焦点を当てた研究を行っている。感覚神経活動電位の波及とは、ある神経が刺激を受けた際に、その信号が他の神経に伝播する現象であり、手指の神経においてこの波及現象が起こることが報告されている[15,16,17]。

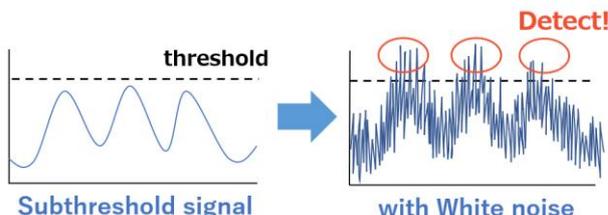


図1 確率共鳴現象の概略

Yokoyama らは図 2 のように、薬指または小指の爪上に振動刺激を与えた際に振動を提示していない中指指腹の触覚感度が向上すると報告しており、この結果には感覚神経活動電位の波及が寄与していると考えしている[18]。この実験では、最も小さい振動強度で手指の神経を刺激できる部位として指爪上が選択されていた。また、手作業で主に使用される中指・示指・母指以外の部位として小指・薬指が選択されていた。この手法により中指・示指・母指全ての感度が向上するとすれば、振動子が手作業を阻害しない触覚感度向上デバイスへの応用が期待できる。

しかしこの波及現象を利用した触覚感度向上手法は、中指における感度向上効果しか検証されておらず、他の指については未検証である。

1.3 研究目的

本研究では先行研究で未検証だった示指と母指について、小指または薬指の爪上に対する振動刺激で触覚感度が向上するかを検証することを目的とする。

2. 振動提示装置

本実験では、確率共鳴現象により触覚感度を向上させるために身体部位へと振動を提示する必要がある。そのため振動提示装置は、先行研究と同様の構成を用いて実装した[12,21]。具体的には、 piezo素子(7BB-12-9, 径 12mm)へと電圧を加えることで振動を発生させた。また図 3 に示すように、指爪用シールにより手指の爪上に貼り付けた。提示する振動波形はホワイトノイズで、Processing によって生成した。また 300Hz より高い成分を除去するため、生成したホワイトノイズにはローパスフィルタを適用した。これは、触覚受容器であるマイスナー小体が 0-100Hz、パチニ小体が 100-300Hz の振動に敏感[23]であることから、300Hz 以上の周波数の振動が感覚の変化に影響を与えないようにするためである。振動強度は、Processing を用いて PC から制御した。そして、オーディオコライザー(Equalizer APO) と piezoハプティクスドライバー

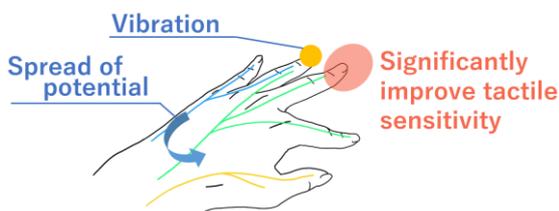


図 2 感覚神経活動電位の波及現象



図 3 使用した振動子

(drv2667, Texas Instruments) を用いて信号を増幅し、それを piezo素子に送り振動提示した。

3. 実験

3.1 実験目的

本実験では、小指または薬指の爪上に対する振動刺激が示指と母指の触覚感度に与える影響について、試験片検出テストという評価手法を用いて検証した。図 3 には本実験の検証部位の概略図を示した。

3.2 実験方法

試験片検出テストでは図 4 に示すように、縦 50×横 70×高さ 5mm のフェルトを用意し、フェルトの下に配置した試験片の有無を解答させた。試験片は直径 20mm、厚さ 0.048~0.224mm まで 0.016mm ずつ変化させたものを 12 種類用意し、参加者ごとに使用する試験片の厚さを決定した。1 つの振動条件に対して、試験片を配置したとき 25 試行と配置しなかったとき 25 試行の合計 50 試行をランダムに提示し、正答率を算出した。各実験参加者は使用する試験片の厚さを決定するため事前にテストを行い、正答率が 46%~54%となる一番厚い試験片を使用するものとした。これは試験片の厚さを、振動なし条件において検出できるかできないかの境目の厚さに統制するためである。

提示する振動の強度は実験参加者ごとに測定した知覚閾値を基準 1T として、知覚閾値の 0 倍 (No-Vib)、0.5 倍 (0.5T)、0.75 倍 (0.75T)、1.0 倍 (1.0T)、1.25 倍 (1.25T) の 5 条件とした。知覚閾値は上昇法と下降法[11,12]をそれぞれ 3 回ずつ行い全 6 回で得られる値を平均することで算出した。

3.3 実験手順

試験片検出テストの具体的な実験手順を以下に示す。

1. ヘッドホンからホワイトノイズの振動波形を提示し



図 5 検証部位の概略図



図 4 試験片検出テストの様子

- て聴覚情報を遮断する。
2. 実験参加者の利き手の爪上に振動子を付ける。取り付け位置は、爪中央に振動子中央が来るように目視で貼り付ける。
 3. 知覚閾値 1T となる振動強度を決定する。
 4. 実験参加者はなぞり速度を 120bpm、なぞり力を 50g となるように練習する。
 5. 実験実施者は試験片を配置する。
 6. 実験参加者はフェルト表面を非利き手側から利き手側に一方向で 2 回なぞり、試験片の有無を回答する。
 7. (5)-(6)を合計 10 回繰り返す。

上記を 1 ブロックとして定義した。

試験片検出テストで実施するのは 1 つの振動条件当たり 5 ブロックを 5 セットの合計 25 ブロックである。1 ブロックで 10 試行あるため、全部で 250 試行を行った。また、1 ブロック実施する度に振動条件を変化させ、5 ブロック実施する度 3 分の休憩を挟んだ。振動条件の順番は実験参加者ごとにランダムに決定した。

事前に行う試験片の厚さ決定テストでは、1 つの試験片の厚さごとに 5 ブロック行った。

3.4 実験参加者

示指の感度検証実験の参加者は、整形外科的・神経学的疾患の既往のない健康な 8 名(23.2 ± 0.8 歳, 女性 2 名)であった。一方で母指の感度検証実験の参加者は 4 名(22.5 ± 0.6 歳, 女性 1 名)であった。

3.5 実験結果

図 4 に小指または薬指を振動刺激した際の、示指および母指における試験片検出テストの結果を示す。振動提示部

位 2 通りと感度検証部位 2 通りの組み合わせで全 4 通りの結果を図 4 の(A)-(D) にそれぞれ示している。正答率が高いほど、なぞり動作を行った指の触覚感度は高いと考えられる。振動なし条件の正答率に対して、振動あり条件の正答率がどれくらい変化したかの比較を容易にするため、振動なし条件の中央値の位置に赤い基準線を示している。

それぞれの検証部位について分散分析を行ったが有意差は得られなかった。

3.6 考察

本実験では、小指または薬指の爪上に対する振動刺激が示指および母指の触覚感度を向上させるという仮説を立てていた。そのため試験片検出テストの正答率が、振動なし条件と振動あり条件でどう変化するかにについて検証したが、分散分析を行ったところ有意差は得られなかった。

しかし各条件の中央値について見ると、小指を振動刺激した際の示指における正答率は、振動条件なしの 51% に対して、振動条件 0.75T で正答率 59% に向上しており、割合としては 15.7% 増加している。また、もっとも正答率の中央値が高い 0.75T をピークとして凸形の結果が得られており、これは他の確率共鳴現象を利用した研究の結果と同様のパターンとなっている。ゆえに、小指を振動刺激した際、示指の指腹上で確率共鳴現象が発生し、触覚感度が向上した可能性が示唆される。

同手法で中指の感度を検証した先行研究[18]では、薬指への振動刺激で中指の感度が有意に向上することを報告していた。具体的には振動なしの正答率の中央値に対して、0.75T の振動提示により正答率が 8.3% 向上することが報告されている。この先行研究の結果と比較すると今回の実験の結果は、小指への振動刺激で示指実験の正答率が 15.7%

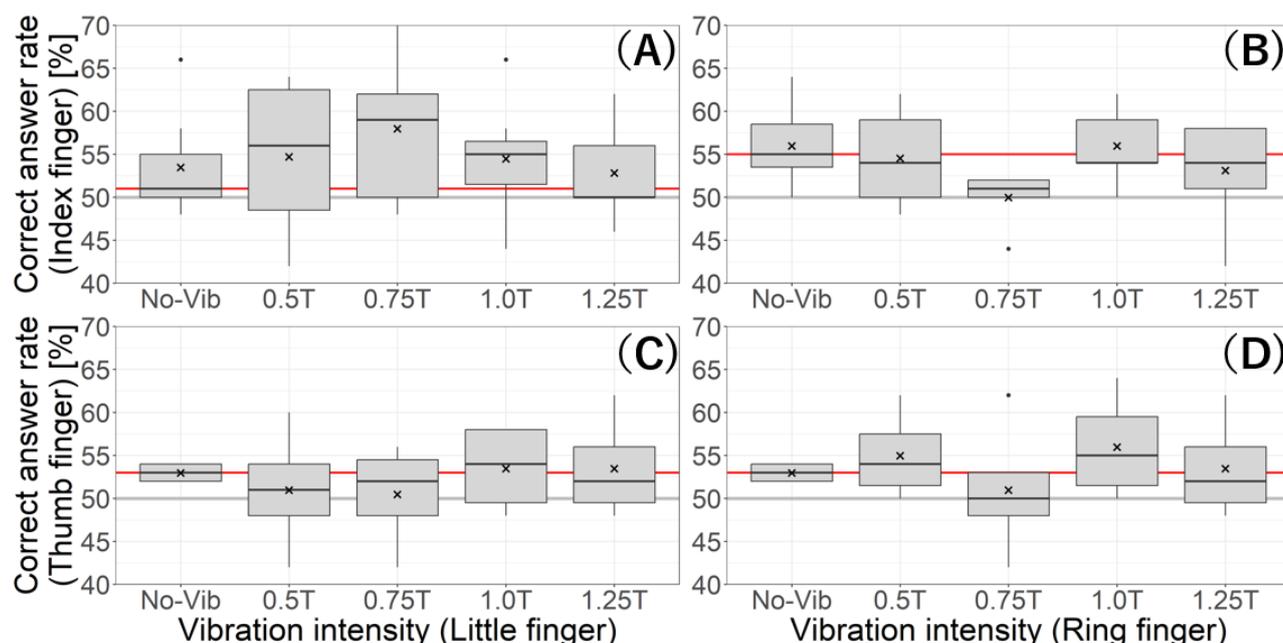


図 6 試験片検出テストの結果

- (A) 小指刺激時の示指実験の正答率 (B) 薬指刺激時の示指実験の正答率
(C) 小指刺激時の母指実験の正答率 (D) 薬指刺激時の母指実験の正答率

向上しており、なんらかの影響が示唆される。

それ以外の検証部位では、小指刺激時の示指実験ほど正答率に変化は見られなかった。振動部位から離れた位置で確率共鳴現象が起こるメカニズムについて詳細なことは明らかになっていないため、本実験のような結果になった理由については考察の余地が多い。考えられる要因としては、皮膚などの身体表面から伝播する物理的振動の影響、骨などの身体内部から伝播する物理的振動の影響、異なる神経同士の信号の混線による影響などが挙げられる。しかしそれぞれについて詳細な検証は行えていないため今後の課題である。

また、示指感度の検証実験は8名、母指感度の検証実験は4名とサンプル数が少なかったことが結果に影響した可能性があるため今後被験者を増やし再検証を行う予定である。

4. 結論

本研究では、小指または薬指への刺激が示指および母指の触覚感度を向上させると考え、試験片検出テストによる触覚感度の評価実験を行った。結果、小指爪上に微弱振動を印加することで示指の感度が向上する可能性が示唆された。今後は、実験参加者を増やし傾向を見ていきたい。

5. 謝辞

本研究の一部は、科研費(21H04909)の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] 江藤 文夫, 原澤 道美, 平井 俊策: 手指巧緻動作における加齢の影響. 日本老年医学会雑誌, 20(5), 405-409 (1983).
- [2] Seo, N.J., Kosmopoulos, M.L., Enders, L.R., Hur, P.: Effect of remote sensory noise on hand function post stroke. *Frontiers in human neuroscience*, 8, 934 (2014).
- [3] C., Choo, K. K. Spatial Acuity of the Body Surface over the Life Span. *Somatosens. Mot. Res.* 13, 153-166 (1996).
- [4] Michimata A, Kondo T, Suzukamo Y, Chiba M, Izumi S. The manual function test. norms for 20- to 90- year- olds and effects of age, gender, and hand dominance on dexterity. *The Tohoku journal of experimental medicine.* 214, 257-67 (2008).
- [5] 坪井 章雄, 門間 正彦, 河野 豊: 健常者における手指巧緻動作と認知機能の関連. 厚生 の 指 標. 60, 10-16 (2013).
- [6] 田中 由浩, 佐野 明人: 触覚メカニズムと指・皮膚構造. *バイオメカニズム学会誌.* 38(1), 47-52 (2014).
- [7] Roland S. Johansson, Åke B. Vallbo. Tactile sensory coding in the glabrous skin of the human hand. *Trends in Neurosciences*, Volume 6, Pages 27-32 (1983)
- [8] Benzi, R., Sutura, A., Vulpiani, A.: The mechanism of stochastic resonance. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 14.11, 453-457 (1981).
- [9] Benzi, R., Parisi, G., Sutura, A., Vulpiani, A.: Stochastic resonance in climatic change. *Tellus* 34.1, 10-16 (1982).
- [10] McNamara, B. and Wiesenfeld, K.: Theory of stochastic resonance. *Physical review A* 39(9), 4854-4869 (1989).
- [11] Kurita, Y., Shinohara, M., Ueda, J.: Wearable Sensorimotor Enhancer for Fingertip using Stochastic Resonance Effect. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 43(3), 333-337 (2013).
- [12] 末田 大和, 服部 稔, 澤田 紘幸, 惠木 浩之, 大段 秀樹, 上田 淳, 辻 敏夫, 栗田 雄一: 確率共鳴を利用した触覚感向上効果を有する低侵襲手術用把持鉗子. *日本ロボット学会誌.* 32(6), 566-573 (2014).
- [13] Enders, L. R., P. Hur, M. J. Johnson, and N. J. Seo.: Remote vibrotactile noise improves light touch sensation in stroke survivors' fingertips via stochastic resonance. *J. Neuroeng Rehabil* 10:105(2013).
- [14] 濱崎 愛, 唐 昴卿, 横山 哲大, 橋本 悠希: 爪上振動刺激が触覚感度及び巧緻性に与える影響, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol.25 No.4 p.326-333. (2020)
- [15] Cioni R, Passero S, Paradiso C, Giannini F, Battistini N, Rushworth G. Diagnostic specificity of sensory and motor nerve conduction variables in early detection of carpal tunnel syndrome. *J Neurol.* 236:208-213. (1984)
- [16] 木村 彰男: 上肢知覚神経伝導検査の基本的問題に関する臨床的研究. *リハビリ医学*, 21: 85-93 (1984)
- [17] Melvin JL, Schuchmann JA, Lanese RR Diagnostic specificity of motor and sensory nerve conduction variables in carpal tunnel syndrome. *Arch Phys Med Rehabil* 54 : 69-74. (1973)
- [18] 横山 哲太, 橋本 悠希: 感覚神経活動電位の波及が手指触覚感度と与える影響. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, 27 巻, 3 号, p. 173-200 (2022)