



爪上振動刺激を用いた指巧緻性向上手法の基礎検討

Basic study on improving finger dexterity via vibration applied to fingernails

唐 勳卿¹⁾, 濱崎 愛¹⁾, 橋本 悠希^{1),2)}

Xuqing TANG, Ai HAMASAKI, Yuki HASHIMOTO

1) 筑波大学 (〒305-8577 茨城県つくば市 天王台 1-1-1, hashimoto@iit.tsukuba.ac.jp)

2) 国立研究開発法人科学技術振興機構 さきがけ (〒332-0002 埼玉県川口市本町 4-1-8)

概要: 指の巧緻性は、繊細な手作業の完成精度に影響を及ぼすとされている。指の巧緻性を向上させる事は、繊細な手作業の精度向上などに活用できると考えられる。本稿は、指の爪上からの微弱振動によって、実用性、汎用性のある指巧緻性向上手法を提案する。その結果、本手法は、粗さ弁別実験において、触覚感度が向上することを確認した。また o' Connor Finger Dexterity Test により、指の巧緻性が改善される傾向がみられた。

キーワード: 触覚 確率共鳴 指巧緻性

1. はじめに

指の巧緻性は、繊細な手作業の完成精度（はんだ付け、手術、楽器の演奏等）に影響を及ぼすとされている。指の巧緻性を向上させる事ができれば、繊細な手作業における精度向上や加齢により感度が下した高齢者の支援に活用できると考えられる。

手作業を行う際、人は指の受容器から触覚フィードバックにより指の動きを調整する。確率共鳴現象により、微弱な振動刺激を与えることで触覚感度を向上させるという報告がされており、この特性を利用した様々な手法が提案されている[1][2][3][4]。例として、手術用鉗子と母指球の接触する箇所に振動子を付け、手術する際に医師の触覚感度を増進させ執刀をサポートする手法や、指先の側面に振動子を取り付けて指腹の感度を向上させる手法などが挙げられている[1][3]。従来の指先に振動子を付ける手法では、指の動きに制限を与えてしまう。また、器具に振動子を付けるという手法は、一つの手作業に限定されるため、複数の手作業を行う際に改めて設計する必要がある。既存の手法による触覚感度を向上させる効果については確認されているが、実際に手作業をサポートする効果についての考察が行われていないという課題も存在する。

以上の課題に対し、我々は爪上に振動刺激を与える際、指腹に振動刺激が感じられる錯覚現象に注目した[5][6]。本錯覚現象では、爪上に振動刺激を与える際、爪からの

振動が指腹に伝搬し、触覚受容器の密度差から指腹に振動を知覚する。爪上に振動子を付ける事は手の動きに支障をきたすことなく、錯覚現象を利用し爪上に微弱な振動刺激を与える際、指腹に確率共鳴現象が発生し、触覚感度を向上させる可能性が考えられる。

本稿では、爪上に振動刺激を与えることによる指巧緻性の向上手法を提案し、指先の感度に対する影響を検証する。また、実際に手作業に効果がみられるかを検証する。

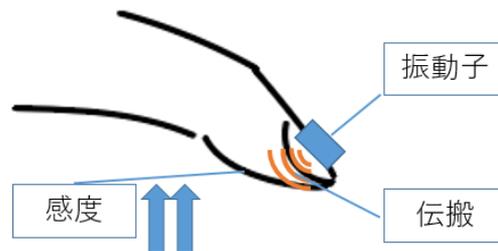


図 1: 提案手法.

2. 実験 1: 爪上振動刺激が触覚感度に対する影響

本手法によって確率共鳴現象が発生し、触覚感度の向上が発生したかを確認するため、本実験を行った。

2.1 実験装置

2.1.1 振動装置

爪上への振動提示にはピエゾ素子 2 個 (7BB-12-9、共振周波数: 9kHz 径: 12 mm)、ハプティックスドライバー 2 個 (Fyber Labs Inc 制 drv2667) を使用した。微弱なホイ

トノイズを与えると確率共鳴現象により触覚の感度を向上させることが知られている[3]。そのため、本実験はホワイトノイズ用いて提案手法の検証を行った。振動音源はPCのProcessingによって生成した。振動強度の調整はボリュームの調整によって行った。

触覚受容器であるマイクサナー小体は0-100 Hzの振動、パチニ小体は100-300 Hzの振動に反応が敏感であるため、PCのフィルターで300 Hz以上の周波数部分をカットした[7]。

振動装置の構成は図2に示す。PCの音源データファイルからホワイトノイズの信号を生成した。さらに、ローパスフィルターを通過し、300 Hz以下の成分だけ残した。最後、PCの音声ボリューム(最大100、最小1、刻み1)を調整する事により振動強度を調整し、ハプティックスライバーで増幅し、振動をかけた。親指と人差し指の振動強度は個別で調整した。

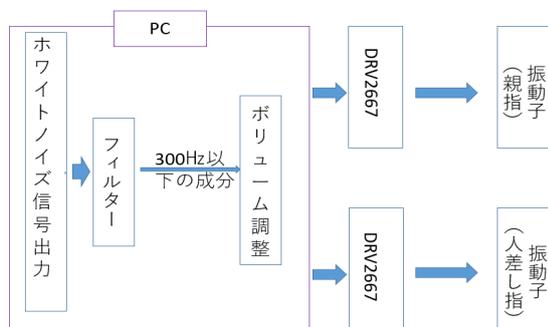


図2: 実験用振動装置の構成。

2.1.2 紙やすり

感度の変化を確認するため、異なる粗さの紙やすりの粗さを弁別するテストを行った。用意した紙やすりの粗さは#40、#60、#80、#100、#120、#150、#180、#240、#320の9種類を使用した。紙やすりは、図3のように弁別用と参照用の二つのグループに分けた。

弁別用: 不透明な箱に入れ、視覚情報を遮断した。

参照用: 番号を付けて粗さ順に並べた。

(1号: 一番粗い 9号: 一番細かい)



図3: 参照用(左)と弁別用紙やすり(右)。

2.2 実験内容

2.2.1 振動強度の決定

確率共鳴現象を利用する際、触覚感度を最も向上させやすい振動強度は、被験者が振動を知覚できる閾値付近であるため、被験者の親指と人差し指の閾値を上昇法と下降法

で測定し、振動強度の閾値を設定した。手順は以下に示す。

(1)被験者は椅子に座り、利き手の人差し指の爪上に振動子をつける。その際、体の他の部分をできるだけリラックスさせる。また、被験者はヘッドホン(ホワイトノイズ提示)とアイマスクを用いて聴覚と視覚の遮断を行う。

(2)PCでホワイトノイズの音源信号を発生させ、親指の爪上に振動刺激を与える。

(3)振動の強度を変え、強度を最小から徐々に高くする。被験者に対して振動が感じるかどうかを質問し、被験者が振動を感じられたと回答した時のボリュームを記録する。これを3回繰り返す。記録したすべてのボリュームの平均値を計算し、A値とする。

(4)パソコンのボリュームとフィルターの調整により、振動の強度を変え、強度を最大から徐々に低くする。被験者に対して振動が感じるかどうかを質問し、被験者が振動を感じられないと回答した時のボリュームを記録し、これを3回繰り返す。記録したすべてのボリュームの平均値を計算し、B値とする。

(5)AとBの平均値を計算し、その値を被験者が振動を感じられる振動強度の閾値を「T」に設定する。

(7)(3)~(5)を三回繰り返す。

(8)PCのボリュームとフィルターを閾値に設定する。

2.2.2 触覚感度変化のテスト

本手法により触覚感度の変化を確認するため、触覚感度を測定できるテストが必要である。今回使用したテストは異なる紙やすりの粗さを弁別するテストである。テストの手順は以下に示す。

(1)被験者の人差し指の爪上に振動子を付ける。実験中では人差し指のみを使い、紙やすりを触る。

(2)ヘッドフォンを用いて、ホワイトノイズ提示し聴覚情報遮断する。

(3)実験が始まる前に、被験者は参照用の紙やすりを各一回ずつ触り、粗さを確認する。

(4)弁別用の紙やすりをランダムに一つを選び、被験者に自由に触らせ、その紙やすりの粗さを確認させる。被験者が粗さを確認した後、実験を開始する。

(5)被験者は弁別用のやすりと参照用のやすりを自由に触る。30秒以内に弁別用やすりと同じ粗さの参照用やすりの番号を判断し、実験者に報告する。

(6)18回(各粗さ2回ずつ、順序がランダムで決める)試行して、正答率を記録する。このとき、9試行毎に休憩を取る。

(7)振動刺激を与え、(4)~(6)を繰り返す、正答率を記録する。



図4: 実験中の様子。

2.3 結果

すべての被験者は 30 秒以内に判断を行った。また、振動有無に関わらず、粗さの 1 号についてはすべての被験者が正答した為、1 号の結果を除外して正答率を計算した。現在 5 名の被験者を取り、正答率を条件分けて図 5 に示す。

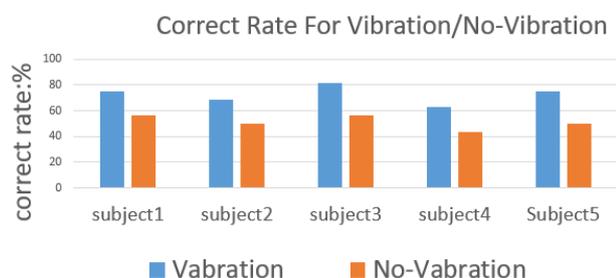


図 5: 被験者の正答率.

また振動と振動なしの条件の被験者の正答率の平均について t 検定を行った。結果は図 6 に示す。 $P=0.000156 < 0.05$ 、有意差が見られた。

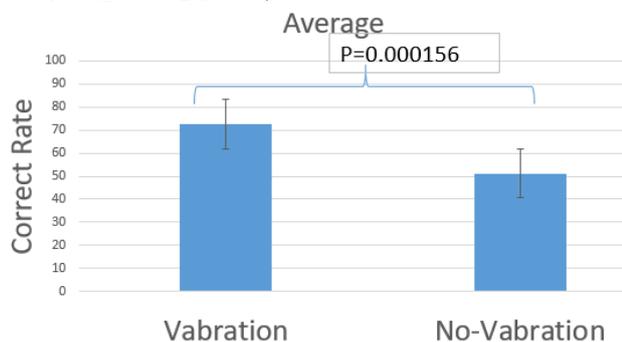


図 6: 被験者の正答率の平均.

2.4 考察

実験結果から、全 4 名の被験者は振動を提示した方の正答率が高くなり、振動有無により正答回数について有意差が見られた。このことから、爪上に振動刺激を与える事で確率共鳴現象が発生し、指先の触覚感度を向上する傾向がみられた。

3. 実験 2: 爪上振動刺激が手作業に対する影響

振動有無により、指の巧緻性の変化を検証する実験を行った。振動子を付ける部位は利き手の親指と人差し指である。実験は被験者 7 名 (男性、20 代)、左利き 3 名、右利き 4 名より行った。

3.1 実験装置

本実験の振動装置は実験 1 と同様である。ただし、今回は人差し指と親指両方に振動子を装着した。

3.2 指巧緻性の測定テスト

指の巧緻性の変化を検証するため、指の巧緻性を検定できるテストが必要である。本実験では、o'Connor Finger Dexterity Test を使用した。このテストは精密機械の作業や腕時計の組立など、繊細な手作業に対して指の巧緻性を検定できるとされている。テストを完了する時間が巧緻性の判定標準になる。

3.2.1 o'Connor Finger Dexterity Test の内容

- (1) o'Connor Finger Dexterity Test のボードを被験者の目の前に置き、被験者は利き手でテストを行う。
- (2) ボードには 10 行 10 列、合計 100 個の穴があり、これとは別に 300 本以上のピンが入った円形の容器が用意されている。
- (3) 被験者は利き手でピンを三本ずつ掴み、ボードの穴に埋めていく。利き手が右手の場合は左から右、上から下に埋める。利き手が左手の場合は右から左、上から下に埋める。
- (4) 穴を 3 本のピンで埋めるまでは次の穴に移らない。ピンを落としてしまった場合は、落としたピンを放置し、再度容器から取り直す。
- (5) 一つ目の穴から最後の穴まで埋める時間を計測する。

3.3 実験手順

以下に実験の手順を示す。

3.3.1 振動強度の決定

実験 1 と同様の方法である。ただし、今回被験者の人差し指と親指両方の振動知覚の閾値を測定し、振動強度に設定した。

3.3.2 指の巧緻性の検定

テスト用のボードは、全部 100 個の穴があるが、重複テストが必要なため、被験者たちの疲労を考慮した上、今回は 1 行目と 4 行目の穴 (計 20 個) だけで実験を行った。

- (1) 振動条件をなし、ホワイトノイズにする。
- (2) 被験者は爪上に振動子をつけて椅子に座り、実験に用いる手 (利き手) をテーブルに置く。実験が始まる前に被験者にはテストの内容に従って 1 回練習させる。
- (3) ヘッドホン (ホワイトノイズ提示) を用いて被験者の聴覚遮断を行う。

(4) テストの振動条件の設定:

一人の被験者のテスト試行回数は 2 組、毎組 4 試行、合計 8 試行で行う。

1 組目の 1 試行目の振動条件をランダムで決定し、その後条件を交互に変換する。すなわち、一試行目の振動条件が振動ありの場合、その組の振動条件が振動あり、振動なし、振動あり、振動なしである。2 組目の振動条件は一組目と交互である。振動条件に従い、被験者は o'Connor Finger Dexterity Test を行い、完成時間を計測した。

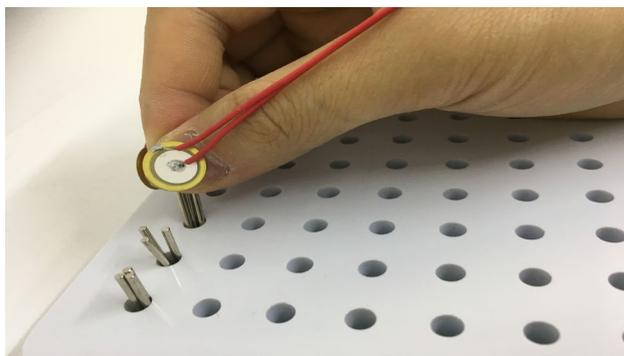


図 6: o'Connor Finger Dexterity Test と実験中の様子

3.4 実験結果

今回の試行回数は振動条件における 4 回であるため、各条件における各被験者の試行完成時間の中央値を比較し、本手法の有効性の傾向を判断した。全被験者 7 名の実験結果を図 7 に示す。被験者 1~6 のタスク完成時間は、振動があった方が短くなった。一方、被験者 7 のタ

スク完成時間は、振動があった方が長くなった。

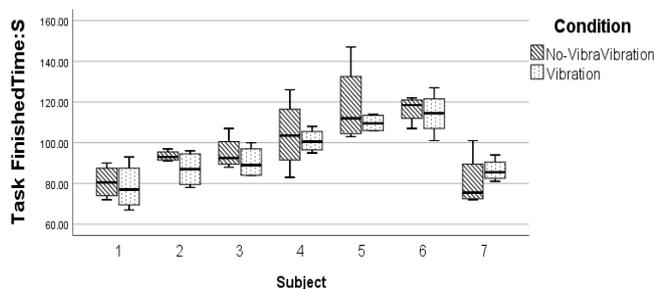


図 7: 各被験者のテスト完成時間の中央値

3.5 考察

実験結果から、7名のうち6名の被験者（被験者1～6）は本手法により指の巧緻性が向上する傾向がみられた。その理由は確率共鳴現象による触覚感度の向上が考えられる。爪上にホワイトノイズの振動刺激を与えることにより、指腹に確率共鳴現象が発生し、指腹の触覚感度を向上させた。手作業を行う際、触覚受容器による触覚フィードバックは手の制御において重要である。触覚感度の強化により指の巧緻性を向上させたと考えられる。一方で、被験者7は本手法の有効性がみられなかった。振動なしの条件において被験者7は、すべての被験者中、完成時間が一番早かった。そのため、本手法は元々指の巧緻性が高い人に対しては有効性が表れないことが考える。ただし、より複雑な課題にすることで、被験者7に対しても効果が出る可能性がある。

4. まとめと展望

本稿では、爪上に振動刺激を与えることにより、指の巧緻性の向上手法の基礎検討を行った。紙やすりを用いて粗さ弁別実験を行い、本手法により確率共鳴現象が発生し、触覚感度が向上する傾向がみられた。また本手法がタスク(o' Connor Finger Dexterity Test)の完成時間に与える影響について実験を行った。実験の結果、7名の被験者の中、6名の被験者に対して、本手法が有効である傾向が見られた。

今回の実験は重複タスクを行ったため、実験を行う前に一回練習を行ったが、運動学習による影響の可能性がある。振動がある条件で運動学習が強化し、より早めに学習した傾向がある被験者が発見した。その被験者の一例の完成時間を試行順番別で図8に示す。

今後は、運動学習の影響についての検討もを行い、実験2のサンプルを増やし、振動条件における統計的な検定を行うことが考えられる。また、o' Connor Finger Dexterity Test 以外の巧緻性検定テストを用いて本手法の有効性の

検証を行う必要がある。

本手法を用いて、指の巧緻性を向上させる効果を確認できれば、指先の触覚感度が低下した高齢者たちの手作業や精度を求めている手作業のサポートに応用できると期待される。

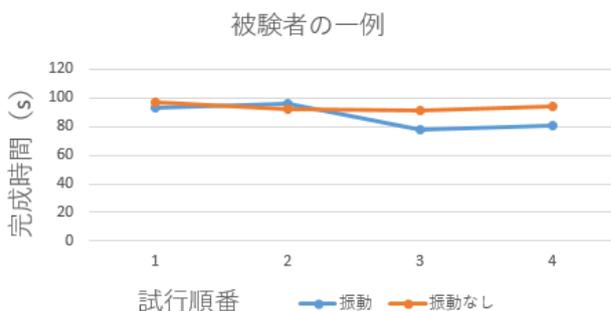


図 8:被験者の完成時間の一例

謝辞

本研究は、JST さきがけ(JPMJPR17J7)、JST AIP-PRISM(JPMJCR18Y2)の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] Yuichi Kurita, Minoru Shinohara, and Jun Ueda, Wearable Sensorimotor Enhancer for Fingertip using Stochastic Resonance Effect, IEEE Transactions on Human-Machine Systems, Vol. 43, Issue 3, pp. 333-337, May 2013
- [2] Megan O. Conrad, Robert A. Scheidt, and Brian D. Schmit “Effects of wrist tendon vibration on arm tracking in people” J Neurophysiol 106: 1480-1488, 2011.
- [3] 末田, 服部, 澤田ら: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, Vol. 32, No. 6, pp. 556-573, 2014
- [4] Remote vibrotactile noise improves light touchsensation in stroke survivors' fingertips viastochastic resonance Leah R Enders1, Pilwon Hur, Michelle J Johnson and Na Jin Seo, Enders et al. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation 2013, 10:105
- [5] 橋本 悠希, 湯村 武士,爪上振動を利用したなぞり動作における触覚伝送 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 2011年 16巻 3号 p. 399-408
- [6] 安藤, 渡邊, 稲見, 杉本, 前田, “Augmented Realityのために爪装着型触覚ディスプレイ の開発, 電子情報通信学会論文誌, J87-D-II (11), 2025-2033(2004)
- [7] 前野: ヒト指腹部と触覚受容器の構造と機能, 日本ロボット学会 誌, Vol. 18, pp.772-775, 2000.