

# 指先への電気刺激と機械振動を用いた切れ感の提示

○譚 雨祺（電通大）、小野田 響（電通大）、  
溝口 泉（電通大）、梶本 裕之（電通大）

## Presenting Sensation of Being Cut on the Fingertip Using Electrical Stimulation and Mechanical Vibration

○Amaki Tan (UEC), Hibiki Onoda (UEC), Izumi MIZOGUCHI (UEC),  
and Hiroyuki KAJIMOTO (UEC)

**Abstract:** Electrical stimulation and vibration have complementary advantages, and their combination can produce more realistic haptic feedback. Using electrical stimulation for motion and vibration for tactile sensation, we investigated the combination that maximizes the sensation of being cut. Results showed that the strongest sensation occurs with white-noise vibration, electrical stimulation at 3.3 cm/s, 200 Hz sound, and stimulus intensity peaking at the center, indicating that cutting sensation strongly depends on stimulus pattern and intensity.

### 1 はじめに

近年、VR 環境におけるハンドヘルド型コントローラーは広く普及しており[1][2][3]、効果音と組み合わせた振動提示による触覚表現[4][5]が数多く導入されてきた。振動提示は構造が比較的単純であり低コストで実装可能であるうえ、スマートフォンやゲームコントローラなど多様な商業製品に既に実装実績があるという利点がある。しかし、振動子は素子サイズを小型化することは難しく、コントローラーを通して手のひら全体に同じ刺激が与えられてしまうため、位置の違いや動きを伴う現象を表現することは難しい。特に、切断や擦過のように、局所的かつ時間的に変化する触覚現象を表現するには不十分である。

こうした課題に対して、近年注目されているのが電気触覚ディスプレイである。電気触覚は電極からの電流によって直接神経を刺激することで触覚を提示する手法であり、刺激電極を細かく配置することで高い空間分解能を実現できる。過去の研究においても、電気刺激を用いて皮膚上の特定の位置や方向を提示する試み[6][7]が報告されている。ただし電気刺激は触覚の質としては記号的であるという課題を持つ。

我々はこれらの知見を踏まえ、電気刺激と振動刺激を組み合わせることで触覚表現の幅を広げる手法を提案する。具体的には動きや形状といった時空間的な情報を電気刺激に任せ、テクスチャ感等の質感的な情報を振動提示に任せるという組み合わせである。

特に本稿では、紙や刃物で皮膚を切られた際に生じる「切れ感」に着目する。切れ感とは切られているところが動いている感覚と鋭い摩擦の感覚を伴う複雑な触覚現象であり、単一の刺激手法では十分に再現することが難しい。本研究では、機械振動と電気

刺激を同時に行うことで、納得感の高い触覚感覚を実現することを目的とする。

### 2 実験環境及び装置

今回用いるデバイスの全体図を Figure 1 に示す。本デバイスは振動子（フルレンジオーディオスピーカ、直径 50 mm、25 W）の振動板上に電気刺激装置が両面テープで接着されており、ユーザーはこの上に指を置くことで電気刺激と振動の両方を同時に感じられるようになる。

振動の強度についてはあらかじめ指を載せない状態の振動板に加速度センサ(BMX055、Bosch)を貼付して計測することで校正した。

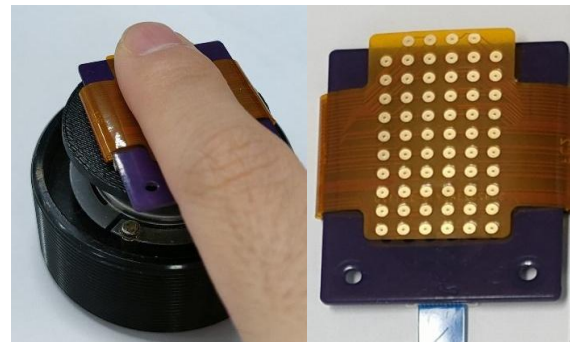


Figure 1 Experimental Setup

実験に用いる電気刺激装置は、PC に接続して電気刺激を制御するマイクロコントローラ（Seed Studio 製 ESP32-S3）や D/A 変換器（Analog Devices 製 AD5452）、A/D 変換器（Analog Devices 製 AD7476）などで構成されるメイン基板と高電圧スイッチ（Microchip 製 HV513）群で構成されるスイッチング基板がフレキシブルコネクタ（FFC）で接続され、スイッチング基板には 64 点の電極（直径 1.1 mm、

中心間の距離 2.54 mm) からなるフレキシブル基板 (28.0 mm×17.0 mm) が接続されている。

### 3 実験

本稿では三つの実験を行った。実験 1 では、電気刺激と振動刺激の時間ずれの許容値を調べ、その後の実験に支障が無いことを確認した。実験 2 では「切られ感」の再現を目標に、振動波形や電気刺激の速度、効果音などの最適化を行った。実験 3 では電気刺激の強度が時間変化することによる切られ感のさらなる最適化を行った。

#### 3.1 実験 1: 電気刺激と振動のタイミングずれの影響調査

今回使用する実験装置は、刺激装置への通信のリアルタイム性が厳密でないことから、電気刺激と振動の提示に最大 20 ms のずれが生じる可能性がある。本実験では、この時間差を被験者が知覚可能か調べることで以降の実験結果に影響するかどうか評価した。

まず、実験説明書を用いて手順・目的を説明し、痛覚を生じた場合は直ちに申告するよう指示した。被験者には消毒用アルコールで指先を乾燥させた後、利き手の人差し指を、爪が電極上端、指腹が電極中央となる位置に置かせた。

振動の大きさは最大 1 G になるようにした。電気刺激の強さは、振動を与えた状態で最小閾値 (電気刺激を感じ始める強さ) と最大閾値 (不快感を生じ始める直前の強さ) を測定し、その平均値を用いた。パルス幅は 50  $\mu$ s で固定した。

キャリブレーション後、被験者には 1 秒間の電気刺激と振動を提示した。振動提示は電気刺激に対して同時または  $\pm 50$  ms /  $\pm 100$  ms のタイミングで開始した (この時間指定には前述のように最大 20ms のずれが生じうるが、50 ms 刻みの実験設定のため許容範囲として進めた)。被験者は電気刺激が振動刺激に比べて先に提示されたかどうかを「はい／いいえ」の二件法で回答した。この条件を各 10 回、計 50 試行、ランダム順で各試行間に 30 秒以上の休憩を設けながら実施した。終了後、自由記述によるコメントを求めた。振動子から出る音による影響を遮断するため、被験者にはイヤマフを装着して聴覚手掛かりをマスクした。被験者は男性 5 人、女性 3 人の計 8 人 (21~23 歳) であった。

#### 3.2 実験 2: 振動波形、電気刺激の速度、効果音の変化による「切られ感」の検証

実験 2 では、振動波形、電気刺激の移動速度、効果音の複数候補を組み合わせ、最も「切られ感」を得やすい組み合わせを発見することを目的とした。

基本セットアップは実験 1 と同様であるが、電気刺激は Figure 2 のように電極 2 点が縦に合計で 25.4 mm 移動した。速度条件は 3.3 cm/s、10 cm/s、30 cm/s とした。これは予備的検討において切られ感を最も感じた際の速度が 10 cm/s 程度であったことからその 1/3 倍と 3 倍の値を設定したものである。

電気刺激の強度は最小閾値と最大閾値の平均値を用いた。

振動波形は、振動なし、ホワイトノイズ、60 Hz 正弦波、200 Hz 正弦波の 4 条件を用い、振動の大きさは最大 1 G になるようにした。ホワイトノイズは紙の質感を出すことを狙い、60 Hz の正弦波は人の振動知覚を担う受容器であるマイスナー小体とパチニ小体の両方に作用させるため、200 Hz の正弦波はパチニ小体のみに作用させるために使用した [8]。

効果音は無音、ホワイトノイズ、200 Hz 正弦波の 3 条件を用いた。ホワイトノイズを用いた理由は紙とこすれた音を狙ったものであり、200 Hz の正弦波を用いた理由は効果音の周波数と振動の周波数の違いが触覚提示に影響を与えるか調べるためである。聴覚刺激はノイズキャンセリングヘッドホンによって提示することで振動の音になるべく聞こえないようにした。

以上により組み合わせ条件数は  $3 \times 4 \times 3 = 36$  通りとなった。

被験者には、指を置く前に消毒用アルコールで指先を乾燥させた後、全 36 種類の刺激パターンを 10 秒間の休憩を挟みながら体験させることで評価基準が偏らないようにした。その後、上記の各条件を組み合わせた 36 条件をランダム順で 1 回ずつ、各試行間で 30 秒間の休憩を設けながら提示し、条件ごとに切られ感、なぞられ感・移動感、電気刺激と振動のタイミング一致感、電気刺激と振動の融合感、提示強度・鋭さの 5 項目について 7 段階リッカート尺度で評価させた。

切られ感・なぞられ感と提示強度、電気刺激と振動のタイミングと融合感に比例して強く感じると考えたため、切られ感にはこういった要素が影響するのかを調べるために他の項目を追加した。評価終了後には自由記述によるコメントを求めた。被験者は男性 8 人、女性 5 人の計 13 人 (21~23 歳、左利き 1 人) であった。

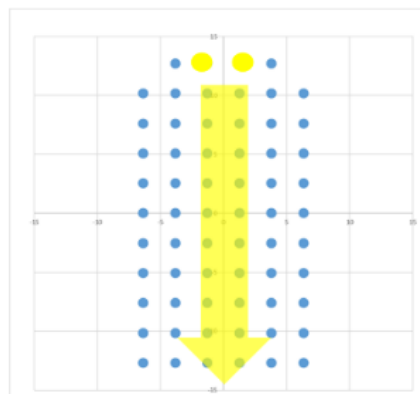


Figure 2 Electrode placement

#### 3.3 実験 3: 電気刺激の強度変化による「切られ感」の検証

実験 2 では、電気刺激・振動・効果音を一定の強度で提示した。一方で、実験 2 の結果から、「切られ感」は電気刺激の速度が遅い場合に感じやすく、明瞭な感覚が残ることが重要と考えられた。このことから、電気刺激の印象をより強めるために、電気刺激の強度が時間変化する刺激を与えればよいと考えた。

そこで実験 3 では、電気刺激・振動・効果音の強度の時間的変化が切れ感に与える影響を評価した。

実験 2 で得られた、切れ感を最も強く感じる電気刺激の速度、振動波形、効果音の最適条件において電気刺激および振動、効果音の強度を以下の 4 パターンで提示した。基本セットアップは実験 2 と同様である。

1. (Decreasing) 電気刺激は最大閾値から最小閾値まで徐々に弱くする。効果音は 0 に向かって、振動は 1 G から 0 G にかけて徐々に小さくする。
2. (Increasing) 電気刺激は最小閾値から最大閾値まで徐々に強くする。効果音は 0 から、振動は 0 G から 1 G にかけて徐々に大きくする。
3. (Peak at Middle) 電気刺激は最小閾値から最大閾値まで、中間地点に達するまでの間強くした後、徐々に弱くする。効果音は 0 から振動は 0 G から 1 G にかけて徐々に大きくし、電気刺激の位置が中間地点を過ぎた後に 0 に向かって徐々に小さくする。
4. (Constant) 電気刺激は最小閾値と最大閾値の平均値を使う。効果音・振動は常に一定にする。

電気刺激と振動、効果音を個別に増減させることも考えられるが組み合わせが膨大となるため今回は 3 種類の刺激の増減を統一した。

全刺激パターンを 10 秒間の休憩を挟みながら体験させた後、各条件をランダム順で 5 回ずつ、計 20 回 30 秒間の休憩を挟みながら提示した。評価項目は実験 2 と同様とし、終了後に自由記述によるコメントを求めた。被験者は男性 8 人、女性 3 人の計 11 人 (21~23 歳、左利き 1 人) であった。

## 4 実験結果

### 4.1 実験 1

実験 1 の結果を Figure 3 に示す。各参加者が「電気刺激のほうが早い」と回答した割合を点で示し、正規累積分布関数に基づくフィット曲線を重ねたところ、回答割合が 75 % 以上となったのは時間差が 56.7 ms 以上のときであり、25%以下となったのは時間差が -103.4 ms 以下のときであった。

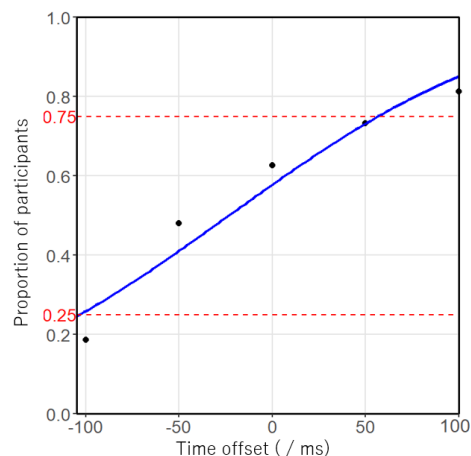


Figure 3 Proportion of participants reporting electrical stimulation first as a function of time offset

### 4.2 実験 2

切れ感に関する結果を Figure 4 に示す。Figure 4 より、最も中央値が高く四分位範囲が小さいのは「振動がホワイトノイズ、電気刺激の移動速度が 3.3 cm/s、効果音が 200 Hz の正弦波」の時であることが分かる。

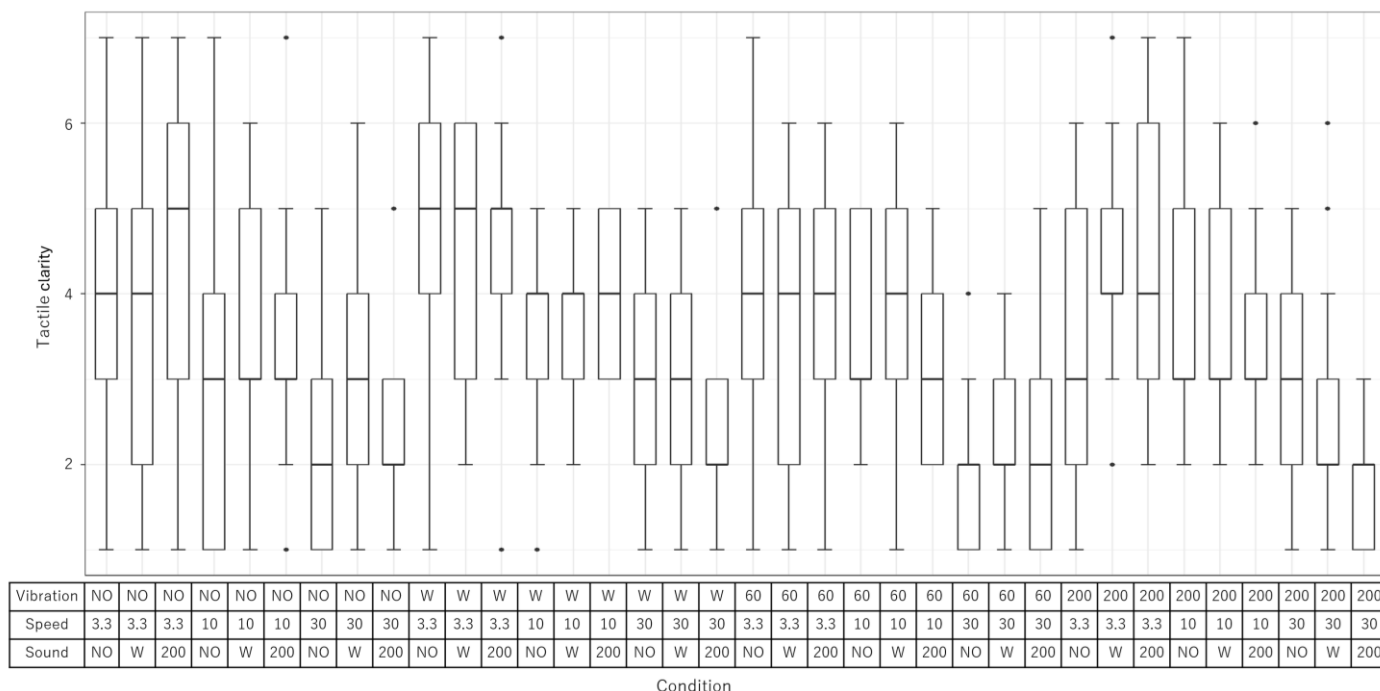


Figure 4 Results for the perceived cutting sensation in Experiment 2



切られ感、なぞられ感、電気刺激と振動の融合感、電気刺激と振動のタイミング一致感、鋭さに対して ART-ANOVA 検定を行い、有意な要因・交互作用が確認された要素に対して Holm 法を適用したペアワイズ比較を行った結果を Table 1 に示す。

Evaluation Item	Factors with Significant Effects	Highest-rated Condition (emmean)	Pairwise significance (p.value)
Cutting Sensation	Speed ( $p < 2.22\text{e-}16$ )	3.3 cm/s (295)	3.3 cm/s - 10 cm/s ( $\approx 0.0019$ )
		10 cm/s (250)	3.3 cm/s - 30 cm/s ( $< 0.0001$ )
		30 cm/s (159)	10 cm/s - 30 cm/s ( $< 0.0001$ )
	Vibration ( $p = 8.99\text{e-}3$ )	White Noise (268)	No - White Noise ( $\approx 0.0338$ )
		200 Hz Sine Wave (235)	
		No (221)	White Noise - 60 Hz Sine Wave ( $\approx 0.0102$ )
Tracing Sensation	Speed ( $p < 2\text{e-}16$ )	60 Hz Sine Wave (214)	
		3.3 cm/s (315)	3.3 cm/s - 10 cm/s ( $< 0.0001$ )
		10 cm/s (256)	3.3 cm/s - 30 cm/s ( $< 0.0001$ )
		30 cm/s (133)	10 cm/s - 30 cm/s ( $< 0.0001$ )
Timing	Speed ( $p = 1.62\text{e-}2$ )	3.3 cm/s (197)	
		10 cm/s (174)	3.3 cm/s - 30 cm/s ( $\approx 0.0128$ )
		30 cm/s (157)	
Integration of electrical stimulation and vibration	Speed ( $p = 3.18\text{e-}3$ )	3.3 cm/s (195)	
		10 cm/s (176)	3.3 cm/s - 30 cm/s ( $\approx 0.0079$ )
		30 cm/s (157)	
	Vibration ( $p = 1.08\text{e-}2$ )	200 Hz Sine Wave (190)	White Noise - 60 Hz Sine Wave ( $\approx 0.0103$ )
		White Noise (187)	
		60 Hz Sine Wave (151)	200 Hz Sine Wave - 60 Hz Sine Wave ( $\approx 0.0065$ )
Sharpness	Speed ( $p < 2.22\text{e-}16$ )	3.3 cm/s (317)	3.3 cm/s - 10 cm/s ( $< 0.0001$ )
		10 cm/s (244)	3.3 cm/s - 30 cm/s ( $< 0.0001$ )
		30 cm/s (142)	10 cm/s - 30 cm/s ( $< 0.0001$ )
	Vibration ( $p = 1.42\text{e-}06$ )	White Noise (271)	White Noise - No ( $< 0.0001$ )
		200 Hz Sine Wave (254)	
		60 Hz Sine Wave (229)	200 Hz Sine Wave - No ( $\approx 0.0002$ )
		No (184)	60 Hz Sine Wave - No ( $\approx 0.0268$ )
			White Noise - 60 Hz Sine Wave ( $\approx 0.0382$ )

Table 1 Results of ART-ANOVA and Holm-adjusted Pairwise Comparisons for Each Evaluation Item in Experiment 2

切られ感に関して、振動の有無が与える影響を調べるために振動がある時とない時の 2 つのグループに分けて Wilcoxon の符号順位検定を行った結果、この 2 つに有意差 ( $p = 0.221$ ) はなかった。また、効果音の有無によってグループ分けしたものに Wilcoxon の符号順位検定を行った結果、有意差 ( $p = 0.432$ ) は見られなかった。振動と効果音の波形の違いによる切られ感への影響も調べた。振動が 60 Hz 正弦波で効果音が 200 Hz 正弦波の時と振動が 200 Hz 正弦波で効果音が 200 Hz 正弦波の時に対して Wilcoxon 検定を行ったところ、有意差 ( $p = 0.953$ ) はなかった。振動と効果音が同じ波形の時とそれ以外に対して Wilcoxon 検定を行ったところ、有意差 ( $p = 0.701$ ) はなかった。

切られ感に関して、切られ感以外の質問項目によって重回帰分析を行った結果、鋭さ ( $p < 2\text{e-}16$ ) に有意差がみられ、なぞられ感 ( $p = 0.1385$ )、タイミング一致感 ( $p = 0.7982$ )、融合感 ( $p = 0.0587$ ) に有意差は見られなかった。

#### 4.3 実験3

Figure 5 に切られ感に関する結果を示す。Figure 5 より、最も中央値が高いのは電気刺激と振動の強さ、効果音の大きさが刺激の中間地点に向かって徐々に大きくなり、そこを過ぎたら徐々に小さくなる条件であることが分かる。

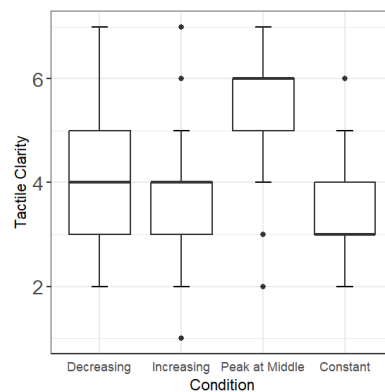


Figure 5 Results for the perceived cutting sensation in Experiment 3

切られ感、なぞられ感、電気刺激と振動の融合感、電気刺激と振動のタイミング一致感、鋭さに対して ART-ANOVA 検定を行い、有意な要因・交互作用が確認された要素に対して Holm 法を適用したペアワイズ比較を行った結果を Table 2 に示す。

Evaluation Item	Significant Difference	Highest-rated Condition (emmean)	Pairwise significance (p.value)
Cutting Sensation	$p < 2.22\text{e-}16$	Peak at Middle (164.8)	Peak at Middle - Decreasing ( $< 0.0001$ )
		Decreasing (112.6)	Peak at Middle - Increasing ( $< 0.0001$ )
		Increasing (84.4)	Peak at Middle - Constant ( $< 0.0001$ )
		Constant (80.2)	Decreasing - Increasing ( $\approx 0.0019$ )
			Decreasing - Constant ( $\approx 0.0005$ )
Tracing Sensation	$p = 9.23\text{e-}5$	Increasing (130.1)	Increasing - Constant ( $\approx 0.0015$ )
		Peak at Middle (121.9)	Increasing - Decreasing ( $\approx 0.0015$ )
		Constant (95.1)	Peak at Middle - Constant ( $\approx 0.0185$ )
		Decreasing (94.9)	Peak at Middle - Decreasing ( $\approx 0.0185$ )
Timing	$p = 1.21\text{e-}5$	Peak at Middle (136.2)	Peak at Middle - Increasing ( $\approx 0.0003$ )
		Increasing (103.5)	Peak at Middle - Decreasing ( $\approx 0.0002$ )
		Decreasing (102.5)	Peak at Middle - Constant ( $\approx 0.0001$ )
		Constant (99.8)	
Integration of electrical stimulation and vibration	$p = 4.07\text{e-}4$	Peak at Middle (131.5)	Peak at Middle - Decreasing ( $\approx 0.0235$ )
		Increasing (109.6)	
		Decreasing (106.6)	Peak at Middle - Constant ( $\approx 0.0002$ )
		Constant (94.3)	
Sharpness	$p = 2.22\text{e-}16$	Peak at Middle (163.2)	Peak at Middle - Decreasing ( $< 0.0001$ )
		Decreasing (102.3)	Peak at Middle - Increasing ( $< 0.0001$ )
		Increasing (100.3)	Peak at Middle - Constant ( $< 0.0001$ )
		Constant (76.2)	Decreasing - Constant ( $\approx 0.0020$ )
			Increasing - Constant ( $\approx 0.0032$ )

Table 2 Results of ART-ANOVA and Holm-adjusted Pairwise Comparisons for Each Evaluation Item in Experiment 3

切られ感に関して他の項目による重回帰分析を行った結果、鋭さ ( $p < 2\text{e-}16$ )、融合感 ( $p = 0.0421$ )、なぞられ感 ( $p = 0.0152$ ) に有意差がみられ、タイミング一致感 ( $p = 0.1710$ ) に有意差は見られなかった。

## 5 考察

### 5.1 実験1

電気刺激と振動がずれていると人が感じ始めるのは 50 ms 以上ずれている時であるため、今回の実験において振動と電気刺激が 20 ms 程度ずれてしまうのは問題ないことが分かった。

また、本実験で電気刺激と振動が同じタイミング

で来たとしても電気刺激のほうが早いと感じた参加者が多かった。これは、電気刺激は刺激の瞬間に神経活動を生じるが、振動は皮膚変形によって機械受容器に変形を生じ、神経にイオンが流入するというプロセスに時間がかかることから生じたと考えられる。先行研究でも電気刺激と振動提示の時間ずれを評価したものが[9]、これは直接の脳刺激と振動刺激を比較しており、今回の現象が完全に説明されるわけではない点に注意を要する。

## 5.2 実験 2

電気刺激の速度が遅いほど、切られ感、なぞられ感、融合感、鋭さを強く感じたのは、刺激がゆっくりであるために電気刺激の強さをより明瞭に知覚できるようになるためと考えられる。電気刺激が強いと、刺激が鋭く感じられ、なぞられた位置も明確に認識できる。実際、実験中のコメントでも「電気刺激が強いと鋭さを感じた」と答えた参加者がいた。また、刺激がゆっくりだと電気刺激に慣れる時間が生まれ、その結果、より融合感を感じやすくなった可能性がある。

切られ感に関しては、振動条件で最も有意差が大きかったのはホワイトノイズであった。これは、ホワイトノイズが紙をこする際の振動に似ているため、切られ感を強く感じたと考えられる。また、200 Hz 正弦波と 60 Hz 正弦波の違いに有意差が生じなかったことから、この範囲では周波数の影響は大きくなかったと考えられる。また、振動なし条件が 60 Hz 正弦波より影響を与えた理由として、参加者から「指を切られる感覚は瞬間的なので、振動はあまり感じないのではないか」という意見があった。振動の有無、効果音の有無が結果に影響を与えないことから、振動や効果音の有無自体は必ずしも切られ感を増強するわけではなく、むしろ不適切な条件では逆効果になると考えられる。効果音と振動の波形の違いは切られ感に大きな影響を与えなかった。これは、切られ感の知覚においては波形の一致・不一致よりも提示タイミングの一致が支配的であるためと考えられる。実際に、波形よりも時間的要因が感覚統合に強く影響することを指摘する研究も存在する[10]。

今回の評価項目で切られ感に影響を与えたのは鋭さだけだった。当初は「なぞられ感」も切られ感に影響を与えると予想していた。しかし参加者のコメントによれば、「なぞられ感は広い面積で刺激されたときに生じるものであり、鋭い切られ感とは異なる。むしろ鋭さのない切られ感がなぞられ感として捉えられる」とのことである。そのため、なぞられ感と切られ感が比例して感じられなかったと考えられる。

融合感については、切られ感の時と違い 200 Hz 正弦波の方がホワイトノイズよりも強く感じられた。参加者からは「ホワイトノイズの振動は正弦波よりも感じにくい」とのコメントがあり、切られ感には振動が感じにくいホワイトノイズの方が効果的であったが、切られ感以外の感覚として融合感を感じやすかったため、200 Hz 正弦波のほうが融合感が高いと考えられる。

鋭さに関しては、振動なし条件が最も鋭さを感じにくかった。これは、全体的に受ける刺激のエネルギー量が減少したためと考えられる。

タイミング一致感については、切られ感に関する

重回帰分析で有意差は確認されなかったことから、今回の振動と電気刺激の提示タイミングのずれは大きな影響を与えなかったと考えられる。実際、実験後のコメントでも、参加者の誰もタイミングがずれていると感じていなかった。

本実験では振動の音を遮断するためにノイズキャンセリングヘッドホンを使用した。完全に振動音を消すことはできなかった。しかし、実際の使用場面でも振動のノイズを完全に消すことは現実的ではないため、この影響は避けたいと考えられる。

## 5.3 実験 3

中間地点で強くなる刺激が最も切られ感を引き起こした理由は、刺激の変化幅が大きく、結果として電気刺激が強く知覚されるためであると考えられる。実際、電気刺激の知覚強度に影響を受けやすい「鋭さ」の評価項目においても、変化幅が大きい刺激ほど鋭さを強く感じられており、重回帰分析の結果、鋭さが切られ感に与える影響は最も大きかったことから、切られ感の主因は電気刺激の知覚強度であるといえる。

また、徐々に弱くなる条件における切られ感が高い理由は、指が切られる感覚は急な刺激によって生じるため、最初に強い刺激が与えられると切られ感に近い感覚が得られるからだと考えられる。反対に、徐々に強くなる条件では刺激の増加が予測可能であるため、切られ感は低下したと考えられる。

なぞられ感に関しては、徐々に強くなる刺激では指が変化を追いやすく、なぞられているという感覚が最も強くなった。逆に、徐々に弱くなる条件では、初めに急に電気刺激が与えられるため追従が困難であり、値は低かった。また、一定刺激では変化がなく注意喚起が少ないため感覚が飽和し、値は低くなった。一方、中間地点で最も強くなる条件では刺激が常に変化し、開始が徐々に強くなるため動きを追いやすく、なぞられ感も比較的高く評価された。

融合感についても、電気刺激の変化幅が大きい条件ほど高い値を示した。被験者のコメントからは「振動をあまり感じなかったため、電気刺激の強さが融合感に影響した」との意見が多く、振動が弱く感じられた結果、電気刺激の強さに引っ張られる形で融合感が高く評価されたと考えられる。

タイミング一致感については、切られ感に関する重回帰分析で有意差は確認されなかったことから、今回の振動と電気刺激の提示タイミングのずれは大きな影響を与えなかったと考えられる。実際、実験後のコメントでも参加者はタイミングのずれを感じていなかった。

## 6 まとめ

本研究では、最も切られ感を引き起こす電気刺激、振動、効果音の組み合わせを明らかにすることを目的とした実験を行った。さらに、デバイスの精度が結果に与える影響を事前に評価するため、予備実験も実施した。予備実験の結果、電気刺激と振動の提示タイミングに多少のずれが生じて、切られ感に大きな影響を与えないことが確認された。また、本実験の結果最も切られ感を感じる条件は、振動がホワイト

ノイズであり、電気刺激の移動速度が 3.3 cm/s、効果音が 200 Hz であり、刺激の提示強度の変化は中央で最も強くなるように変化するパターンであることが分かった。これらの結果から、切られ感は刺激パターンや強度変化に強く依存することが示された。

今後の課題としては、デバイスや提示方法のさらなる精度向上により、より微細な刺激条件が切られ感に与える影響を詳細に評価することや異なる感覚特性に対してどのような条件が最適であるかを検討することが挙げられる。

Oct. 2009.

#### 参考文献

- [1] Choi, H. Ofek, M. Benko, M. Sinclair, and C. Holz, "CLAW: A multifunctional handheld haptic controller for grasping, touching, and triggering in virtual reality," in Proc. 2018 CHI Conf. Human Factors in Computing Systems, 2018, Paper 654, pp. 1-13.
- [2] H. Benko, C. Holz, M. Sinclair, and E. Ofek, "NormalTouch and TextureTouch: High-fidelity 3D haptic shape rendering on handheld virtual reality controllers," in Proc. 29th Annu. Symp. User Interface Software and Technology, 2016, pp. 717-728.
- [3] E. Whitmire, H. Benko, C. Holz, E. Ofek, and M. Sinclair, "Haptic Revolver: Touch, shear, texture, and shape rendering on a reconfigurable virtual reality controller," in Proc. 2018 CHI Conf. Human Factors in Computing Systems, 2018, Paper 86, pp. 1-12.
- [4] R. F. Friesen and Y. Vardar, "Perceived realism of virtual textures rendered by a vibrotactile wearable ring display," IEEE Trans. Haptics, vol. 17, no. 2, pp. 216-226, 2024.
- [5] S. Asano, S. Okamoto, and Y. Yamada, "Vibrotactile stimulation to increase and decrease texture roughness," IEEE Trans. Human-Machine Syst., vol. 45, no. 3, pp. 393-398, 2015.
- [6] L. R. Bobich, J. P. Warren, J. D. Sweeney, S. I. Helms Tillery, and M. Santello, "Spatial localization of electrotactile stimuli on the fingertip in humans," Somatosens. Motor Res., pp. 179-188, 2007.
- [7] W. Lin, D. Zhang, W. W. Lee, X. Li, Y. Hong, Q. Pan, R. Zhang, G. Peng, H. Z. Tan, Z. Zhang, L. Wei, and Z. Yang, "Super-resolution wearable electrotactile rendering system," Sci. Adv., vol. 8, no. 36, 2022.
- [8] D. A. Mahns, N. M. Perkins, V. Sahai, L. Robinson, and M. J. Rowe, "Vibrotactile frequency discrimination in human hairy skin," J. Neurophysiol., vol. 95, no. 3, pp. 1442-1445, Mar. 2006.
- [9] B. Christie, et al., "Perceived timing of cutaneous vibration and intracortical microstimulation," J. Neurophysiol., vol. 128, no. 4, pp. 1103-1113, 2022.
- [10] E. C. Wilson, C. M. Reed, and L. D. Braid, "Integration of auditory and vibrotactile stimuli: Effects of phase and stimulus-onset asynchrony," J. Acoust. Soc. Am., vol. 126, no. 4, pp. 1960-1974,