

# 触覚提示のための複数パルス波形を用いた 電気刺激方式とその評価

平井 亨武<sup>1</sup> 中山 雅哉<sup>2</sup> 小川 剛史<sup>2</sup>

概要：本稿では、電気刺激による触覚提示の表現力の拡張を目的としたパルス波形の構成手法として、パルス波形組み合わせ方式を提案した。パルス波形組み合わせ方式として、複数のパルス振幅を組み合わせる振幅方式、複数のパルス幅を組み合わせる幅方式、複数のパルス間隔を組み合わせる間隔方式の3種類について検討した。パルスの振幅・幅・間隔がすべて同一の単純パルスから波形をどの程度乖離させるかの指標として、乖離度という量を導入した。その上で、各組み合わせ方式ごとに乖離度に対して提示される感覚を、実験により評価した。その結果、3種類どの方式においても乖離度によって振動感の粗さを操作できること、および間隔方式は振動感の粗さとは別の次元において、振幅、幅方式とは異なった種類の感覚を提示することが示された。

## A proposal and evaluation of electrotactile stimulation method using multiple pulse waveforms

AKIMU HIRAI<sup>1</sup> MASAYA NAKAYAMA<sup>2</sup> TAKEFUMI OGAWA<sup>2</sup>

### 1. はじめに

視覚、聴覚の次を担う刺激・情報提示手段として、触覚提示に関する研究が盛んに行われている。触覚提示の方法としては、ピンアレイや振動子を用いた機械的振動による方法、静電摩擦を用いた方法、超音波の放射圧による方法、電気刺激による方法などが挙げられる。電気刺激による触覚提示では、皮膚表面の電極から電流を印加し、皮膚下の神経軸索を駆動することで触覚の提示が可能のため、機械的な触覚提示装置に比べ、薄型軽量、低消費電力、機械的な可動部が無いなどの応用上の利点を持つ [1]。本研究では、これらの利点に着目し、電気刺激による触覚提示を対象としている。

触覚提示に関する研究の多くは、多種多様な触覚を提示することを目標としている。電気刺激を用いた研究においても例外ではなく、多種多様な触覚を提示するために近年は電気刺激と機械的刺激を組み合わせる方法 [2], [3] や、電気刺激と静電摩擦を組み合わせる方法 [4] が提案されている。しかしながら、これらの研究における電気刺激には単一の振幅、幅、間隔を持つパルス波形が用いられており、電気刺激単体で提示可能な振動感

は限定されたものとなる。電気刺激を用いて多様な触覚を提示するためには、他の触覚提示手段と組み合わせるだけではなく、電気刺激それ自体の表現力の拡張が必要であると筆者らは考えた。

本研究では、パルス波形の振幅、幅、間隔といった量に着目し、これらを複数種類用いることで多様な振動感覚を与える触覚提示方式の実現を目的として検討を進めている。本稿ではその初期検討として、2種類の振幅、幅、間隔を組み合わせたパルス波形の構成方法について検討した。これらのパルス波形によって提示される振動感覚について、心理的尺度による評価と、感覚類似度評価による低次元マッピングを行った。

以下、2章で電気刺激を用いて触覚を提示する関連研究について述べ、3章では、複数のパルス波形を組み合わせた電気刺激の生成方法について述べる。4章は、提案するパルス波形によって提示される触覚に関する評価実験の方法を、5章では、得られた結果について述べ、6章で、

<sup>1</sup> 東京大学大学院工学系研究科

<sup>2</sup> 東京大学情報基盤センター

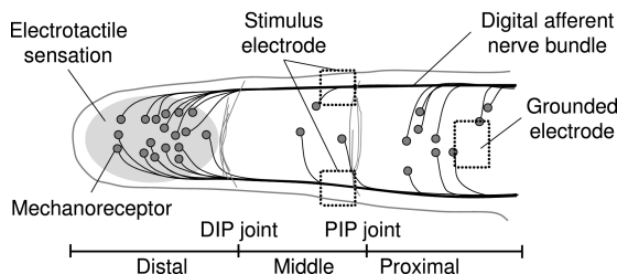


図 1 電極装着位置と刺激受容位置との関係. [7] の Fig.1 より引用  
**Fig. 1** The location of electrodes and perceived area. Obtained from Fig.1 of [7]

本稿のまとめと今後の課題について述べる.

## 2. 関連研究

電気刺激を用いて触感覚を提示する研究の多くでは, 指先に電極を接触させ数 mA の電流を流すことで, 仮想的な振動感や圧力感を提示する [5], [6]. しかし, これらの手法では, 常に指先にデバイスの装着感がある上に, 電極の装着中は現実物体の触感覚を同時に与えることが困難である. この問題を解決する方法として, Yoshimoto らは, 図 1 に示すように指先と指の付け根の間に電極を装着することで, 電極を装着していない指先に振動感や圧力感を提示する方式の研究を行っている [7]. この方式では, 指先がデバイスによって拘束されず, 自由に使える. したがって, 電極装着中でも指先で現実物体に直接触れることが可能であり, AR アプリケーションなど, 現実物体による触感に電気刺激による触感を重畳させる用途にも利用できる. よって, 本研究ではこの刺激方式を前提として検討を進めている.

Yoshimoto らの方式では, 指先の感覚受容器から手首の方向に伸びる神経に対して, 指先と指の付け根の間から電流を印加することで, 指先に対して振動感の提示を行う. 図 1[7] は, 電極の装着位置と振動感が提示される部位, ならびに, 刺激される神経の位置関係を示している. GND 電極を第二, 第三関節間, 刺激電極を第一, 第二関節間に装着すると, 第一関節から指先側に振動感が提示される. 指先における感覚が提示される位置は, 電極の装着位置によって決定される [8]. 具体的には, 指先と指の根元を結んだ線に対して垂直方向に電極の装着位置を動かした場合, 概ねその方向に刺激提示部位も移動する. すなわち, 電極の装着位置を指の側面側に寄せれば, 刺激が提示される位置も指の側面側となる. この性質を活用して, 実物体の触感と電気刺激による触感を重畳する提示手法が提案されている [7]. 電極は指の両側面に 1 組ずつ (陰極と GND) 装着され, 刺激は指先の側面 2 箇所提示される. すると, 指先で物体に触れた時, 指先中央部で物体の触感を, 側面で電気刺激による触感を受けることになり, 触感の重畳が達成される. この重畳触感について, 周波数が統制された

機械的振動と重畳させたときの知覚周波数の変化ならびに, 現実物体の触感と重畳させたときの粗さ知覚の変化が調べられている. なお, 刺激に用いられているパルス波形は, 単一の振幅, 幅, 間隔を持つものである.

電気刺激により提示できる感覚を定量的に議論することは容易ではなく, 定性的な議論や心理的尺度による評価, および刺激間の弁別実験による評価がなされるにとどまっている. 指先における触覚は Okamoto らの分類 [9] により Hardness, Friction, Fine roughness, Macro roughness, Warmness の 5 次元から構成されると言われている. このうち, 電気刺激においては陰極刺激を用いることで Hardness を, 陽極刺激を用いることで Macro roughness を提示できるという説が一般的である. 電気刺激による触覚提示において一般的な, 単一周期のパルスを用いた触覚提示では, パルス波形の周波数と電流がそれぞれ知覚における周波数と強度に対応することが知られている. Van Doren ら [10] は, 知覚における周波数と強度はパルス波形の周波数と振幅に強く関連していること, およびパルス波形の周波数が増加すると知覚強度がゆるやかに大きくなり, パルス波形の振幅は知覚周波数に殆ど影響を与えないことを示した. Kaczmarek ら [11] は, 4 つの周波数と 4 つのパルス振幅を組み合わせた 16 種類の単一周期パルス波形について, 各パルス波形による感覚の類似度評価を行った. そこで得られた感覚の距離行列から多次元尺度構成法 (MDS) を用いて感覚の 2 次元マッピングを行った結果, パルス周波数による感覚軸とパルス振幅による感覚軸が観察された.

単一周期の単純パルス以外のパルス波形を用いた電気刺激に関する研究は, 以下の報告がある. Kaczmarek ら [12] は, バースト波形 (狭い間隔で並ぶ数本の矩形パルスがグループを形成する波形) を二次元配列電極を用いて刺激に用いた場合に提示される感覚についての分析を行っている. ここでパルス波形は, バースト周波数 (F), バーストあたりパルス数 (NPB), パルス繰り返しレート (PRR) の 3 つの変数で記述されている. PRR は, バースト内の狭いパルス間隔を周波数の形で記述したものである. この研究で検討された波形は, 2 種類のパルス間隔を持つパルス波形に該当する. 研究では, 周波数, バーストあたりパルス数, パルス間隔といった変数を操作すると, 形状認識の正確さや感覚の明瞭さなどに影響が出ることが報告されている.

なお実際には, このパルス波形を一意に記述するにはパルス振幅とパルス幅を変数として追加する必要がある. 文献 [12] においてこの点が議論されていないのは, これらが感覚の知覚強度を決める変数であり, 感覚の知覚強度は評価の対象にしていないからである. 電気刺激による感覚の知覚強度は, 印加されたエネルギーによって決定されることが知られており [13], パルス振幅とパルス幅は電気刺激によるエネルギーを決定する変数である.

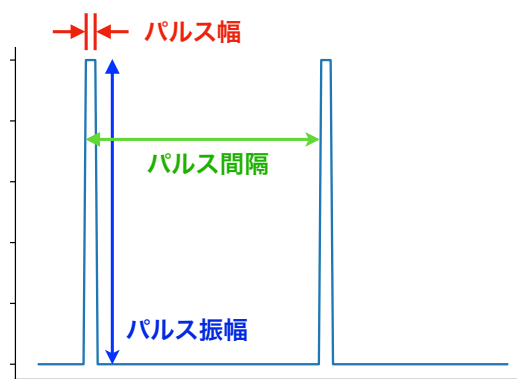


図 2 単一周期のパルス波形はパルス振幅・パルス幅・パルス間隔の 3 変数で記述される

**Fig. 2** A single period pulse waveform is explained with 3 variables, width, amplitude and interval.

Yoshimoto ら [14] は、電気刺激によって物体表面の凹凸を表現するにあたり、物体表面の自己相似性という量を表現対象として刺激パルスの頻度を変調する手法を提案した。この手法では、物体の自己相似性と感覚の順応（皮膚と物体が静的に接触したときに、時間の経過に従って感覚量が低下すること）を考慮したパルス頻度の変調を行っている。提示される感覚については、感覚の大きさと粗さについて評価が行われており、パルス頻度の変調によってこれらの制御が可能であることが示されている。

これらの研究では、パルス間隔を変化させた時の感覚に関する検討のみがされており、他のパラメータ（振幅・幅）の影響については言及していないため、それらを総合的に評価することが必要であると考える。

### 3. パルス波形組み合わせ方式

単一の周期を持つパルス波形は、図 2 のように、パルス振幅・パルス幅・パルス間隔の 3 つの変数によって記述することができる。

このことから着想を得て、複数のパルス振幅・パルス幅・パルス間隔を組み合わせることで感覚表現の拡張を目指すこととした。本稿ではその初期的検討として、2 種類の振幅・幅・間隔を用いることとする。2 種類の振幅・幅・間隔を持つパルス波形を構成する手段として、図 3 (a)~(c) にある 3 つの方式を検討する。いずれの方式でも、パルス  $N$  本から成るグループ（バースト）を単位として、波形を構成する。

1 つ目は、図 3(a) のように、バースト中 1 本が大きい振幅を持ち、残り  $N-1$  本は小さい振幅を持つ方式である。これを振幅方式とよぶ。

2 つ目は、図 3(b) のように、バースト中 1 本が太い幅を持ち、残り  $N-1$  本は細い幅を持つ方式である。これを幅方式とよぶ。

3 つ目は、図 3(c) のように、バースト中 1 本が広い間隔

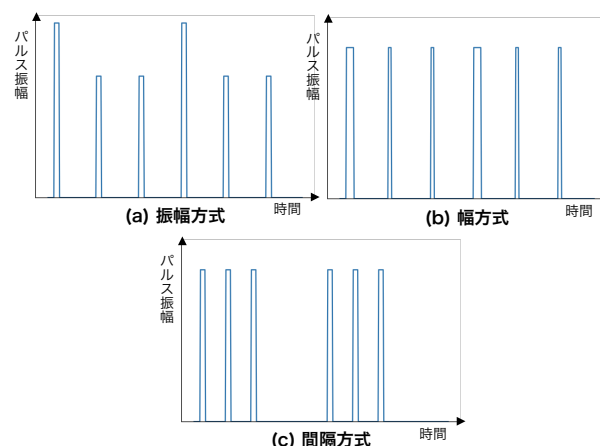


図 3 本稿で検討するパルス波形組み合わせ方式

**Fig. 3** Pulse waveforms considered in this article

を持ち、残り  $N-1$  本は狭い間隔を持つ方式である。これを間隔方式とよぶ。

本稿で検討される 3 方式のパルス波形を記述するパラメータとして、以下の 4 つを定義する。

**平均パルス幅  $W$**  各パルスの幅の平均値。平均知覚強度を規定するパラメータである。

**バースト周期  $T$**  バースト（ $N$  本のパルスから成るグループ）の周期。

**バーストあたりパルス数  $N$**  1 つのバースト中に含まれるパルスの数。

**乖離度  $p$**  波形を単一周期パルスからどの程度乖離させるかの指標。

ここで乖離度  $p$  は、 $p = 0$  で周期がバースト周期と一致する単一周期パルスと等価、 $p = \infty$  で周期が  $T/N$  と一致する単一周期パルスと等価となるように定義する。例えば、 $T = 50\text{ms}$ 、 $N = 5$  とした場合、乖離度  $p = 0$  のときは周期  $T = 50\text{ms}$  の単一周期パルス、 $p = \infty$  のときは周期  $T/N = 10\text{ms}$  の単一周期パルスとなるように定義する。

振幅方式においては、平均パルス幅はそのまま各パルスの幅になる。乖離度  $p = 0$  の状態ではすべてのパルスの振幅が同一、増加するに従って大パルスと小パルスの振幅の差が大きくなり、 $p = \infty$  で小パルスの振幅が 0 となり周期がバースト周期と一致する単一周期パルス波形と等価になる。

幅方式においては、パルスごとに幅が異なるため、平均パルス幅は各パルスの幅の平均になる。乖離度  $p = 0$  の状態ではすべてのパルスの幅が同一、増加するに従って太いパルスと細いパルスの幅の差が大きくなり、 $p = \infty$  で細パルスの幅が 0 となり周期がバースト周期と一致する単一周期パルス波形と等価になる。

間隔方式においては、平均パルス幅はそのまま各パルスの幅になる。乖離度  $p = 0$  の状態ではすべてのパルスが等間隔に並び、増加するに従ってパルスがバースト内で偏り、

$p = \infty$  でバースト内の全てのパルスが一箇所に集まる。

以上のことを考慮し、各方式ごとにパルス波形を、時間  $t$  および乖離度  $p$  の関数として以下のように設定する。ここで、最大出力可能電流値を  $I$  とする。

矩形関数  $u(t, w)$  を次のように定義する。

$$u(t, w) = \begin{cases} 1 & (0 \leq t \leq w) \\ 0 & (t < 0, w < t) \end{cases}$$

このとき、振幅方式のパルス波形  $x_a(t, p)$  は、

$$x_a(t, p) = \sum_{k=0}^{\infty} \left[ \frac{p+1}{p+N} I u(t - kT, W) + \sum_{l=1}^{N-1} \frac{1}{p+N} I u\left(t - kT - \frac{lT}{N}, W\right) \right]$$

で定義する。この波形は、振幅  $\frac{p+1}{p+N} I$  の矩形パルス 1 本と、振幅  $\frac{1}{p+N} I$  の矩形パルス  $N-1$  本の足し合わせになっている。

幅方式のパルス波形  $x_w(t, p)$  は、

$$x_w(t, p) = \frac{I}{N} \sum_{k=0}^{\infty} \left[ u\left(t - kT, \frac{N(p+1)}{N+p} W\right) + \sum_{l=1}^{N-1} u\left(t - kT - \frac{lT}{N}, \frac{N}{N+p} W\right) \right]$$

で定義する。この波形は、幅  $\frac{N(p+1)}{N+p} W$  の矩形パルス 1 本と、幅  $\frac{N}{N+p} W$  の矩形パルス  $N-1$  本の足し合わせになっている。太いパルスと細いパルスとの幅の比は  $p+1:1$  となる。

間隔方式のパルス波形  $x_i(t, p)$  は、

$$x_i(t, p) = \frac{I}{N} \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{N-1} u\left(t - kT - \frac{lT}{(1+p)N}, W\right)$$

で定義する。この波形では、バースト内の  $N$  本のパルスが  $\frac{T}{(1+p)N}$  の間隔で並ぶ。

これらの波形定義は、1 バーストあたりの波形の積分値が方式、乖離度に関わらず一定値となるように設計されたものである。すなわち、

$$\int_0^T x_a(t, p) dt = \int_0^T x_w(t, p) dt = \int_0^T x_i(t, p) dt = \text{Const.}$$

が成立する。

#### 4. パルス波形組み合わせ方式に対する感覚評価実験

パルス波形は各方式ごとに 4 つのパラメータで記述されるが、本稿では各方式および乖離度による受容感覚の違いを評価の対象とする。平均パルス幅は予め設定された所与のものを用い、バースト周期  $T = 50\text{ms}$ 、バーストあたり

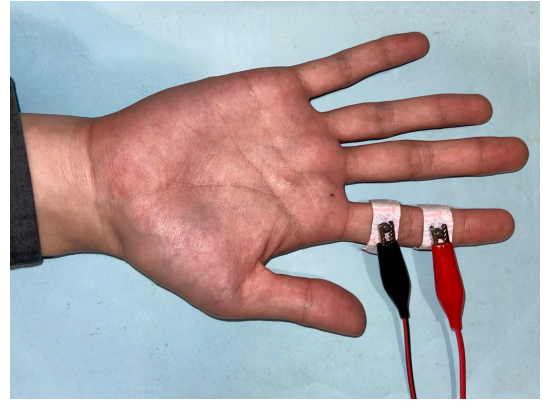


図 4 指に電極を貼り付けた様子

Fig. 4 Electrodes attached to the finger

パルス数  $N = 3$  として評価を行う。この設定は、電気刺激において人間はせいぜい  $100\text{Hz}$  を上限とする周波数範囲内ではしか振動感を識別できない [15] (筆者が行った予備実験では、安定して識別できる周波数の範囲は  $80\text{Hz}$  までであった。) ことを加味して設定したものである。  $T$  および  $N$  を変化させたときの感覚の評価は今後の課題である。

#### 4.1 実験装置

電気刺激を与えるために、電気刺激装置として日本光電アイソレータ SS-203J を、その電源装置として YA Lab PSI-1521 を用いた。この装置では、電源装置に対して同軸ケーブルで電圧信号を与えると、その信号と駆動電源をアイソレータに出力し、アイソレータはそれを電流波形として出力する。出力信号データは Raspberry Pi Model 3 B+ 上で駆動されるプログラムで生成し、DIGILENT 社 Analog Discovery 2 によって電圧信号に変換され、同軸ケーブルによってアイソレータ電源装置に伝送される。被験者は、アイソレータに設けられた出力調整つまみを用いて、最大出力電流を設定することができる。

指に貼る電極には、日本光電社製ディスプレイ電極 ビトロード F-150S を用いた。電極を指に貼りやすくするため、粘着ゲル部の両端をハサミで切り落とし、粘着ゲル部の幅を小さくした。被験者は、図 4 のように、利き手の人差し指の第一、第二関節間および第二、第三関節間に一つずつ電極を貼り、電気刺激を受けた。Yoshimoto ら [7] は 2 組の電極を用いているが、本実験は感覚の重量ではなく電気刺激による感覚そのものの評価を目的としているため、指先の中央部一箇所に刺激を提示するために一組の電極を用いている。指先側の電極を陽極とし、手首側の電極は GND とした。印加する電流は陽極電流 (指先側電極から手首側電極に向けて正の電流が流れる。) とした。この構成で電気刺激を与えたところ、被験者全員が指先に明瞭な振動感を感じることを確認した。

## 4.2 実験方法

本実験における被験者は 22 歳～24 歳の男性 10 名であり、機縁法により募った。1 名が左利きで、残りの被験者は全て右利きである。被験者は、タブレット画面上に表示されたインタフェースを用いて振動感の評価を行う。指の汚れが電気刺激による感覚に影響することを防ぐために、被験者は電極装着前に手を洗った。被験者に対して、実験中は常に人差し指を伸ばすように指示した。これは、人差し指を曲げると同じ電流で感じられる振動感が弱くなるためである。また、連続して電気刺激を受ける時間は 3 分までとし、3 分経過した後は少なくとも 15 秒以上、指先の感覚が十分に回復するまで小休止を取るよう被験者に指示をした。これは、長い時間連続して電気刺激を受けると電気刺激に対する感覚閾値が上昇し、振動感を適切に評価することが難しくなる [16] ためである。3 分経過を待たずとも指先の感覚に不全を感じたら自由に小休止を取るよう被験者に指示をした。実際、複数名の被験者は 3 分の経過を待たずに頻繁に小休止を取り、感覚の回復に努めた。本稿における実験は、東京大学倫理審査専門委員会による承認を経て実施した。

## 4.3 予備実験

官能評価実験では、3 種類の方式と 5 種類の乖離度の波形について評価を行う。そこで、刺激  $i$  に用いる波形の乖離度  $p_i$  と平均パルス幅  $w_i$  の決定を予備実験として行った。パラメータの決定はある被験者一名が実験的に行った。この被験者は、後述の官能評価および類似度評価実験には参加していない。

乖離度  $p$  は、単純 60Hz パルス（パルス間隔が 1/60 秒の単一周期パルス）で感じられる粗さと単純 20Hz パルス（パルス間隔が 1/20 秒の単一周期パルス）で感じられる粗さを概ね等分するように、各方式ごとに 5 つの値を決定した。平均パルス幅  $w_i$  は、与えられた乖離度下で単純 60Hz パルスの強度と各パルスの知覚強度ができるだけ一致するように調整を行った。これは、本稿の実験は感覚の大きさを評価対象としておらず、評価対象の各波形は知覚強度が揃っていることが望ましいためである。

表 1 は、予備実験により決定された乖離度を示したものである。5 種類の乖離度にはそれぞれ波形番号が付与されており、乖離度は波形番号の順に従って大きくなるよう並べられている。表 2 は、60 を分母とした分数の形で各条件における平均パルス幅  $w_i$  を示している。表 1 と表 2 の波形番号は、方式ごとにそれぞれ対応している。

単純 20Hz パルスおよび単純 60Hz パルスのパルス幅はそれぞれ 1.36ms および 1ms であり、振幅はともに  $I/N$  である。以降、単純 20Hz パルス、単純 60Hz パルスのパルス幅および振幅はこの値とする。

表 1 波形ごとの乖離度

Table 1  $p$  for waveforms

波形番号	振幅方式	幅方式	間隔方式
1	0.0476	0.125	0.250
2	0.0968	0.250	0.500
3	0.148	0.375	0.750
4	0.200	0.500	1.000
5	0.429	1.000	2.000

表 2 波形ごとの平均パルス幅（単位 ms）

Table 2 Average pulse width for waveforms (ms)

波形番号	振幅方式	幅方式	間隔方式
1	60/60	60/60	60/60
2	62/60	59/60	57/60
3	62/60	55/60	56/60
4	59/60	51/60	54/60
5	52/60	41/60	52/60

## 4.4 電気刺激による感覚の官能評価

乖離度および波形組み合わせ方式に応じた振動感覚の官能評価を行った。はじめに、被験者は電流出力アイソレータの出力調整つまみを操作して最大電流出力の調整を行った。調整には単純 60Hz パルス刺激を用い、痛くない範囲でできるだけ大きな出力を設定するように指示をした。被験者はこの調整作業後も必要に応じてアイソレータの出力調整つまみを自ら調整できることとした。

つづいて、表 2 に挙げた 15 種類の刺激条件（3 種類の波形組み合わせ方式と 5 種類の乖離度）に単純 20Hz パルス、単純 60Hz パルスを加えた計 17 種類の波形による刺激について、被験者は以下の項目を評価した。

- 単純 20Hz パルスとの類似度（同じ⇔異なる）
- 単純 60Hz パルスとの類似度（同じ⇔異なる）
- 振動感の粗さ（粗い⇔細かい）
- 振動感の明瞭さ（明確⇔もやもや）
- 単純 60Hz パルスとの知覚強度差

知覚強度差については、単純 60Hz パルスと比較して当該刺激の知覚強度を「かなり大きい」「少し大きい」「同じくらい」「少し小さい」「かなり小さい」で表す +2～-2 の 5 段階評価とした。それ以外の評価項目については、1 から 10 の 10 段階評価とした。振動感の評価のために単純 20Hz パルスおよび単純 60Hz パルスと当該刺激を比較することから、被験者は自由に 3 種類の刺激を切り替えられるようにした。

## 4.5 電気刺激による感覚の類似度評価

乖離度および波形組み合わせ方式の違いによる振動知覚への影響の大きさを評価するために、刺激条件間の感覚類似度評価を行った。はじめに、官能評価と同様に、単純 60Hz パルス刺激を用いて電流出力の調整を行った。つづ



いて、3種類の波形組み合わせ方式と4種類の乖離度（波形番号1, 2, 4, 5）の計12種類の刺激条件に単純20Hzパルス、単純60Hzパルスを加えた計14種類の波形による刺激について、 ${}_{14}C_2 = 91$ 通りのペアの振動感の類似度評価を行った。刺激ペアは、はじめに1つめの刺激が1秒間提示され、1秒休止したのちに2つめの刺激が1秒間提示される形で提示された。操作インタフェースには再生ボタンが配置され、被験者は何回でも刺激ペアの提示を受けることができた。類似度評価はスライダインタフェースを用いて100段階で行った。スライダが100段階であることは被験者には伏せられており、被験者にはスライダは連続的にスライドするように見えている。類似度評価は信頼性を高めるために、文献[11]にならって4回反復して行った。被験者の疲労を防ぐため評価は2回ずつに分けて行われ、間は少なくとも30分以上あけられた。

## 5. 結果

### 5.1 感覚の官能評価

図5は、3種類のパルス波形組み合わせ方式ごとの、各5種類の乖離度に対する感覚の主観評価結果を図示したものである。振幅方式、幅方式、間隔方式の3種類の方式それぞれについて、各評価項目結果を縦に並べてある。各グラフの横軸は波形番号、縦軸は心理評価値を表し、点は10名の被験者による評価値の平均値、エラーバーは標準誤差を表す。各方式ごとに、波形番号の大小は乖離度の大小に対応していることに注意されたい。比較のために単純60Hzパルスおよび単純20Hzパルスにおける心理評価値もプロットされており、それぞれグラフ中の波形番号<60>、<20>の値である。これらはそれぞれ乖離度0、および $\infty$ に対応する。

単純20Hzパルスとの類似度は、どのパルス波形組み合わせ方式においても右下がりのトレンド、すなわち、乖離度が大きくなると評価値が下がる傾向にある。一方、単純60Hzパルスとの類似度は、どのパルス波形組み合わせ方式においても乖離度が大きくなると評価値が上がる傾向にある。単純60Hzパルスは乖離度0、単純20Hzパルスは乖離度 $\infty$ に対応することから、乖離度を小さくすると単純60Hzパルスの感覚に、乖離度を大きくすると単純20Hzパルスの感覚に近づいていくことがわかる。

粗さと明瞭さについては、両者ともほぼ同じように乖離度に対して減少する傾向がある。この傾向は、乖離度を大きくすると単純20Hzパルスの感覚に近づいていく先述の傾向とも合致する。

4.3節で述べたとおり、本稿の実験は知覚強度以外の感覚要素の評価を目的としているため、各パルス波形に対して単純60Hzパルスの知覚強度とできるだけ一致するように平均パルス幅の調整を行っている。この条件下において、

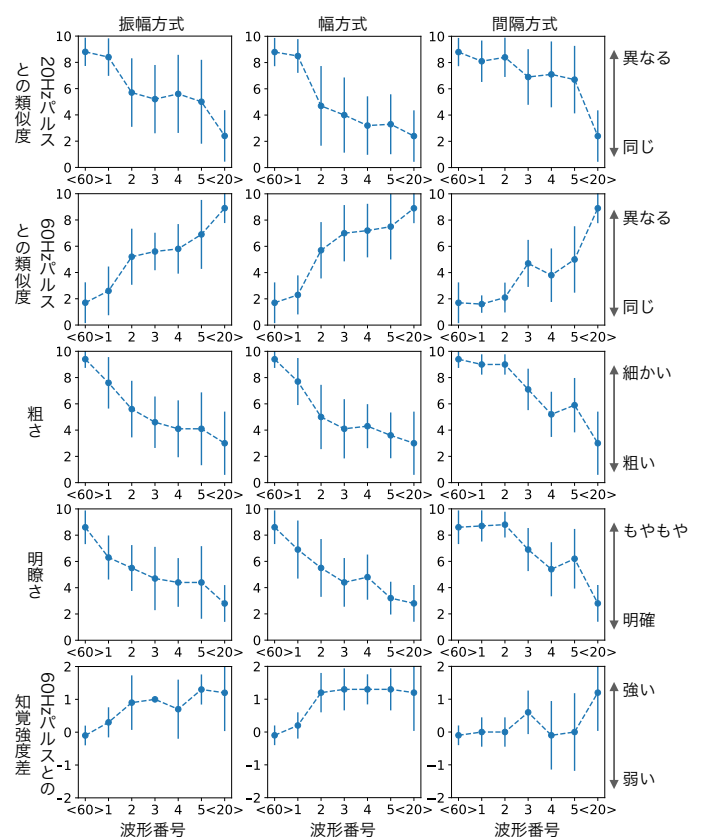


図5 各パルス波形により提示された感覚の官能評価結果

Fig. 5 Sensation ratings of the pulse waveforms

被験者が実際に感じた知覚強度差は図5の一番下の段の通りである。大半のパルス波形において、設定された平均パルス幅のもとでは単純60Hzパルスよりも知覚強度が大きいという回答が大半であった。ただし、波形によっては知覚強度の評価にばらつきが生じており、間隔方式の波形番号4, 5では評価のエラーバーが-1（少し弱い）から+1（少し強い）にまで広がっている。

### 5.2 感覚の類似度評価による感覚の低次元マッピング

12種類の刺激条件（3種類の変調と4種類の乖離度）に単純20Hzパルス、単純60Hzパルスを加えた計14種類の波形による刺激に対する類似度の評価値を用いて、各波形によって得られる感覚の低次元マッピングを行った。低次元マッピングには、多次元尺度構成法（MDS）を用いた。MDSは、評価対象オブジェクトの距離行列を用いて、オブジェクトの関係を低次元空間における点の位置で表現する統計的手法である。類似度評価実験によって得られた感覚類似度行列は、感覚の距離行列として解釈することができる。完全に同じ感覚の場合は感覚距離0、全く異なった感覚の場合は感覚距離100として取り扱い、感覚類似度評価値は線形にマッピングされた。感覚類似度行列の値は、文献[11]にならって、10名の被験者による計40試行の評価値を平均して求めた。

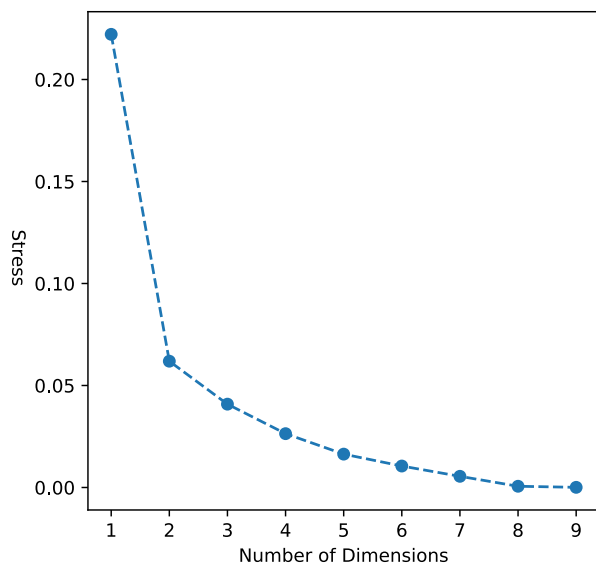


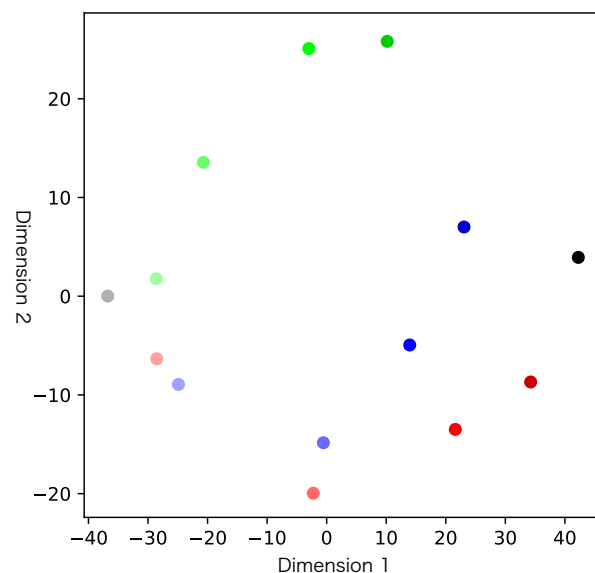
図 6 MDS の次元数とストレス値との関係

Fig. 6 Stress values for the dimensions of MDS

被験者実験によって得られた類似度は、尺度の間隔の等間隔性が保証されておらず、間隔尺度として扱うことができない。したがって、Kruskal の非計量多次元尺度構成法 [17] を用いることとし、実装には R 言語の isoMDS() 関数を用いることとした。Kruskal の非計量多次元尺度構成法では、与えられた距離行列の値の上下関係を基準として低次元へのマッピングを行う。構成されたマッピングのもとでのオブジェクト間の距離と、与えられた距離行列との差を表す stress という値が用いられ、計算アルゴリズムはこの stress を最小化するようにオブジェクトのマッピングを行う。

図 6 は、MDS に用いた各次元数に対して得られた stress 値を表したものである。次元数を増やすほど、モデルの表現力が上がるため stress 値は減少する。フィッティングの適応度の目安である stress 値は、0.05 で当てはまりが「good」であるとされている [17]。図 6 では次元数  $k=2$  でおよそこの値を達成しているため、感覚のマッピングは 2 次元で行うこととする。

図 7 は、感覚距離行列を用いた MDS による 2 次元マッピング結果である。各パルス波形組み合わせ方式について、振幅方式は青、幅方式は赤、間隔方式は緑系の色の点で各振動感覚の位置を表現している。2 次元プロットの横軸を Dimension 1、縦軸を Dimension 2 とする。この図から、以下のことが読み取れる。第一に、パルス波形組み合わせ方式にかかわらず、Dimension 1 の値が小さいほど乖離度が小さく、大きいほど乖離度が大きい傾向が見られる。官能評価の結果では、乖離度の大小が振動感の粗さに対応することが示されていたことから、Dimension 1 は振動感の粗さを表す軸であると推測できる。Dimension 1 の値が小さいと細かく、大きいと粗い振動感を表すと考えられる。



	波形番号	振幅方式	幅方式	間隔方式
乖離度小 ↑	1	●	●	●
	2	●	●	●
	4	●	●	●
乖離度大 ↓	5	●	●	●

● 単純60Hzパルス    ● 単純20Hzパルス

図 7 MDS による感覚の 2 次元マッピング

Fig. 7 2-dimensional sensation mapping by MDS

間隔方式については他の 2 方式と比較して、Dimension 1 の値が小さい領域にプロットが偏っている。これは官能評価結果において間隔方式の粗さの評価値が他の方式に比べて「細かい」に偏っていることと対応している。

第二に、Dimension 2 に着目すると、振幅方式と幅方式は Dimension 2 が負の領域に分布するが、間隔方式だけは正の領域に分布する傾向が見られる。単純 20、60Hz パルスとの類似度および粗さが Dimension 1 で既に表現されていることを考慮すれば、Dimension 2 の分布の偏りは、同じ粗さを持つ振動でも振幅、幅方式と間隔方式で異なった振動感が提示されている可能性を示唆している。実際、間隔方式による振動感は振幅方式および幅方式による振動感と異なった「震え方」をしていることが、予備実験を行った際に被験者によって報告された。

Dimension 1 と Dimension 2 の値の振れ幅に着目すると、Dimension 1 の振れ幅はおよそ -37 から +42 であったのに対して、Dimension 2 の振れ幅はおよそ -20 から +26 と、Dimension 1 の 58% ほどの振れ幅であった。ここから、感覚の知覚に対する Dimension 1 で説明される感覚要素（官能評価による結果と照らし合わせれば粗さ）の影響が、Dimension 2 で説明される感覚要素よりも顕著であると考えられる。

## 6. まとめ

本稿では、電気刺激による触覚提示の表現力の拡張を目

的としたパルス波形の構成手法として、パルス波形組み合わせ方式を提案した。パルス波形組み合わせ方式として、複数のパルス振幅を組み合わせる振幅方式、複数のパルス幅を組み合わせる幅方式、複数のパルス間隔を組み合わせる間隔方式の3種類について検討した。パルスの振幅・幅・間隔がすべて同一の単純パルスから波形をどの程度乖離させるかの指標として、乖離度という量を導入した。その上で、各組み合わせ方式ごとに乖離度に対して提示される感覚を、官能評価により評価した。その結果、3種類どの方式においても乖離度によって振動感の粗さを操作できることが示された。

また、パルス波形組み合わせ方式の種類および乖離度と提示される感覚との関係性を調べるために、提示される感覚の類似度評価を行い、非計量 MDS 法を用いて 2 次元平面へのマッピングを行った。その結果、振動感の粗さとは別の次元において、間隔方式は振幅、幅方式とは異なった種類の感覚を提示することが示唆された。

本稿では、1 つのバースト周期およびバーストあたりパルス数を用いて感覚の評価実験を行った。今後は、これらの変数がパルス波形組み合わせ方式による感覚に与える影響について評価する予定である。また、本手法を実物体のテクスチャ感の再現に応用する手法についても検討する予定である。

## 謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 19H04150 の助成によるものである。

## 参考文献

- [1] 下条 誠, 前野隆司, 篠田裕之, 佐野明人: 触覚認識メカニズムと応用技術: 触覚センサ・触覚ディスプレイ, S&T 出版 (2014).
- [2] Yem, V. and Kajimoto, H.: Wearable tactile device using mechanical and electrical stimulation for fingertip interaction with virtual world, *Proc. 2017 IEEE Virtual Reality (VR)*, pp. 99–104 (online), DOI: 10.1109/VR.2017.7892236 (2017).
- [3] Germani, M., Mengoni, M. and Peruzzini, M.: Electrotactile device for material texture simulation, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 68, No. 9, pp. 2185–2203 (online), DOI: 10.1007/s00170-013-4832-1 (2013).
- [4] Kato, K., Ishizuka, H., Kajimoto, H. and Miyashita, H.: Double-sided Printed Tactile Display with Electro Stimuli and Electrostatic Forces and Its Assessment, *Proc. 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, ACM, pp. 450:1–450:12 (online), DOI: 10.1145/3173574.3174024 (2018).
- [5] Kajimoto, H., Kawakami, N., Tachi, S. and Inami, M.: SmartTouch: electric skin to touch the untouchable, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 24, No. 1, pp. 36–43 (online), DOI: 10.1109/MCG.2004.1255807 (2004).
- [6] Kajimoto, H.: Skeletouch: Transparent Electro-Tactile Display for Mobile Surfaces, *Proc. SIGGRAPH Asia 2012 Emerging Technologies*, Association for Computing Machinery, p. 1–3 (online), DOI: 10.1145/2407707.2407728 (2012).
- [7] Yoshimoto, S., Kuroda, Y., Imura, M. and Oshiro, O.: Material Roughness Modulation via Electrotactile Augmentation, *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 8, No. 2, pp. 199–208 (online), DOI: 10.1109/TOH.2015.2412942 (2015).
- [8] Yoshimoto, S., Kuroda, Y., Imura, M. and Oshiro, O.: Development of a spatially transparent electrotactile display and its performance in grip force control, *Proc. 2011 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, pp. 3463–3466 (online), DOI: 10.1109/IEMBS.2011.6090936 (2011).
- [9] Okamoto, S., Nagano, H. and Yamada, Y.: Psychophysical Dimensions of Tactile Perception of Textures, *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 6, No. 1, pp. 81–93 (online), DOI: 10.1109/TOH.2012.32 (2013).
- [10] Van Doren, C. L.: Contours of equal perceived amplitude and equal perceived frequency for electrocutaneous stimuli, *Perception & Psychophysics*, Vol. 59, No. 4, pp. 613–622 (online), DOI: 10.3758/BF03211869 (1997).
- [11] Kaczmarek, K. A., Tyler, M. E., Okpara, U. O. and Haase, S. J.: Interaction of Perceived Frequency and Intensity in Fingertip Electrotactile Stimulation: Dissimilarity Ratings and Multidimensional Scaling, *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, Vol. 25, No. 11, pp. 2067–2074 (online), DOI: 10.1109/TNSRE.2017.2702628 (2017).
- [12] Kaczmarek, K. A. and Haase, S. J.: Pattern identification and perceived stimulus quality as a function of stimulation waveform on a fingertip-scanned electrotactile display, *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, Vol. 11, No. 1, pp. 9–16 (online), DOI: 10.1109/TNSRE.2003.810421 (2003).
- [13] Aiello, G. L.: Multidimensional electrocutaneous stimulation, *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, Vol. 6, No. 1, pp. 95–101 (online), DOI: 10.1109/86.662625 (1998).
- [14] 吉元俊輔, 黒田嘉宏, 井村誠孝, 大城 理: 物体表面の自己相似性を伝える電気触覚パルス頻度変調, 日本バーチャリアリティ学会論文誌, Vol. 16, No. 3, pp. 307–315 (2011).
- [15] 梶本裕之, 舘暲: 経皮電気刺激における振動知覚の電極サイズ依存性, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. 88, No. 12, pp. 2380–2387 (2005).
- [16] Kaczmarek, K. A.: Electrotactile adaptation on the abdomen: preliminary results, *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, Vol. 8, No. 4, pp. 499–505 (online), DOI: 10.1109/86.895953 (2000).
- [17] Kruskal, J. B.: Multidimensional scaling by optimizing goodness of fit to a nonmetric hypothesis, *Psychometrika*, Vol. 29, No. 1, pp. 1–27 (1964).