



入力波形による筋電気刺激の感覚の違い

The differences in sensations of electrical muscle stimulation due to input waveforms

石丸嵩也¹⁾, 嵯峨智²⁾

Takaya ISHIMARU and Satoshi SAGA

1) 熊本大学大学院 (〒 860-8555 熊本市中央区黒髪 2 丁目 39 番 1 号, ishimaru@saga-lab.org)

2) 熊本大学大学院 (〒 860-8555 熊本市中央区黒髪 2 丁目 39 番 1 号, saga@saga-lab.org)

概要: これまで主にリハビリテーション等の医療の分野で用いられることが多かった筋電気刺激は、触覚フィードバック技術として用いられるようになってきた。しかし、筋電気刺激には特有の電気感や痛みなどの感覚が伴うという特徴がある。我々は筋電気刺激波形を変化させることで、この望ましくない感覚の抑制を狙う。今回はこの筋電気刺激波形の変化による感覚の変化について実験を行い、その結果について詳述する。

キーワード: 筋電気刺激, 電気感, 触覚, 機能的電気刺激

1. 序論

近年、触覚フィードバック技術としても用いられるようになってきた筋電気刺激という技術は、リハビリテーションや痛みの緩和など、元は電気刺激療法という医療の分野で主に使用されていた。電気刺激療法は筋委縮の予防や筋力増強、運動障害の治療、鎮痛などを目的として用いられていた。電気刺激療法ではこれらの目的に応じてパルス波や sin 波、それらを組み合わせたものや高周波数にしたものなど、主に 4 種類に大別できる [1]。一方で、筋電気刺激を触覚フィードバックに用いる場合は低周波数のパルス波が用いられることが多い [2, 3, 4, 5]。パルス波を用いる場合の筋収縮力は周波数、パルス幅、振幅 (電圧または電流の強さ) によって変化する。また、低周波数のパルス波は 20 Hz より周波数が低いと筋電気刺激による筋収縮による力の融合が起きないため、出力が安定しない。そのため、基本的には出力を安定させるために 30 Hz 以上、主に 50 Hz に設定されることが多い。刺激時間については基本的に 1 ms 以下が多く、振幅については実験中に被験者ごとにキャリブレーションされることがほとんどである。一貫して言うことは基本的にパルス波を用いているということである。しかし、電気刺激療法では様々な波形を用いて、不快感を抑えたり、強い筋収縮をおこしたりしていることから、触覚フィードバックにおける筋電気刺激でもその他の波形についても検討する必要があるだろう。

そこで今回我々は、パルス波よりも筋電気刺激による触覚フィードバックに適した波形が存在するのではないかと考え、実験を行って新たな波形の検証をおこなった。また、同時に周波数およびパルス幅についても適切な時間を検討した。本稿では実験の詳細な情報、結果について述べ、考察する。

2. 刺激波形

本節では今回検討を行う刺激波形について説明する。前節で述べたように、今回我々はパルス波以外の新たな刺激波形の検討を行う。また、同時に適した周波数とパルス幅の検討も行う。今回パルス波の他に用いる波形は鋸歯状波と逆鋸歯状波、正弦波である。図 1 に用いる波形をそれぞれ示す。鋸歯状波は 2 種類ずつ用いる。これらの波形を用い

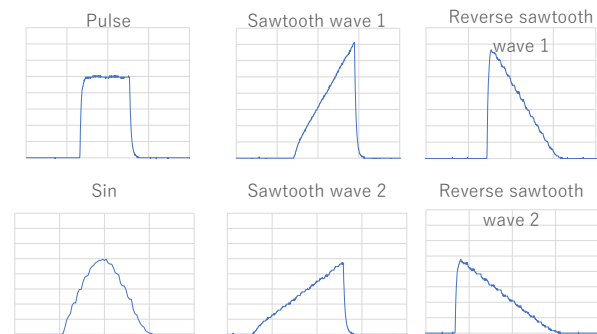


図 1: 検討する刺激波形

た理由は、電圧の変化を緩やかにすることで電気感や不快感の抑制につながるのではないかと考えたからである。鋸歯状波は立ち上がり時の変化を緩やかにし、逆鋸歯状波は立ち下がり時の変化を緩やかにし、正弦波はすべての変化を緩やかにすることを狙っている。また、これらの波形は時間積分した結果がパルス幅 0.6 ms のパルス波と同じになるように設定した。具体的には鋸歯状波は刺激時間 (パルス幅) を 2 倍にしたもの、刺激時間及び最大振幅をそれぞれ $\sqrt{2}$ 倍したものを用意した。逆鋸歯状波についても同じである。正弦波については刺激時間を 2 倍にしたものを用意した。実験ではこれら 5 つの波形に加えてパルス波の周波数

およびパルス幅を変化させたものを用いる。本実験で用いるパルス波は周波数が 20, 35, 50, 65, 80 Hz でパルス幅 0.6 ms のものと、パルス幅 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1 ms で周波数は 50 Hz の合計 9 種類を用いる (それぞれ 5 条件ずつあるように見えるが、周波数 60Hz でパルス幅 0.6 ms が重複している)。これらの周波数およびパルス波は予備実験およびこれまでの研究 [6] から決定した。そのためパルス波 9 種類、鋸歯状波 2 種類、逆鋸歯状波 2 種類、正弦波 1 種類の合計 14 種類の波形を用いて実験を行う。

3. 刺激波形の評価実験

パルス波を用いる場合の適切な周波数とパルス幅の検討、およびパルス波以外の波形の検討のために行った実験について説明する。実験の様子を図 2 に示す。実験参加者は 7 名

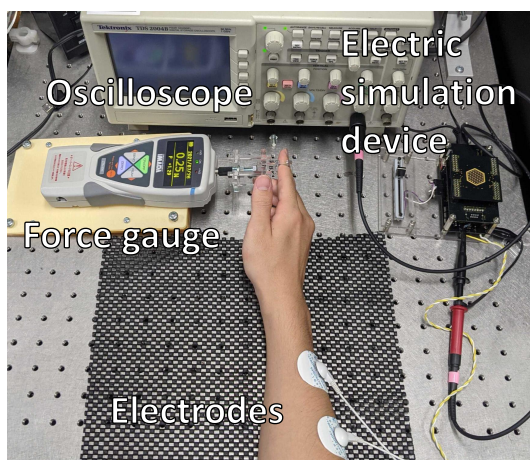


図 2: 実験の様子

で平均年齢 23.1, 標準偏差 0.6 ですべて男性であった。今回用いる波形は前節で述べた全 14 種類であり、波形を変化させて 5 秒間刺激した後、電気感、不快感、痛み の 3 つの感覚について 5 段階のリッカート尺度で評価してもらう。それぞれの感覚について 1 つの波形で 5 秒間刺激し、評価してもらうまでを 1 試行とすると、1 種類の波形ごとに 3 試行実施する。そのため 1 人の参加者ごとに 14 種類 × 3 試行で合計 42 試行を行う。試行中は同時に電圧と提示力を記録する。電極の波形および周波数、刺激波形は前節で述べた通りだが、振幅は参加者ごとに決定する。これは人体組成の個人差により、電気的特性に個人差があるためである。振幅は周波数 50 Hz, パルス幅 0.6 ms のパルス波を用いて示指の伸筋を刺激したときに、提示力が 0.3 N となるように設定する。つまり、参加者間で振幅ではなく提示力を統一する。また、電極は示指の伸筋を刺激できる位置に配置する。

次に今回の実験で用いる機器について説明する。電気刺激装置は梶本らの電気触覚ディスプレイ [7] として開発されたものを使用する。刺激波形は Tektronix の TDS 2004B デジタルオシロスコープを用いて測定し、株式会社イマダの ZTA-50N を使用して指に提示された力を測定する。電極はアズワン株式会社の ECG 電極 Medico MSGLT-04 を

用いた。

3.1 実験結果・考察

実験結果について説明する。初めに感覚の変化について見ていく。パルス波における周波数の変化による感覚の評価結果を図 3 に、パルス幅の変化による感覚の評価結果を図 4 に、パルス波以外の刺激波形の変化による評価結果を図 5 に示す。黄色が不快感、青が痛み、緑が電気感を表し

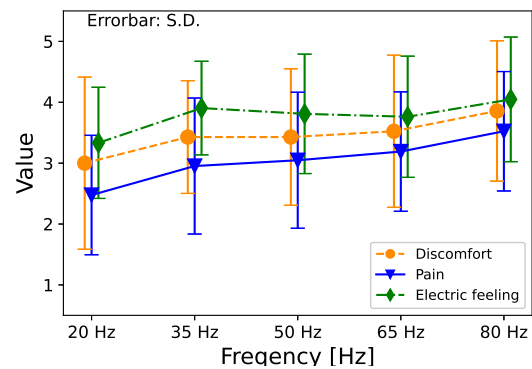


図 3: 周波数による感覚の変化。有意差は確認できなかった

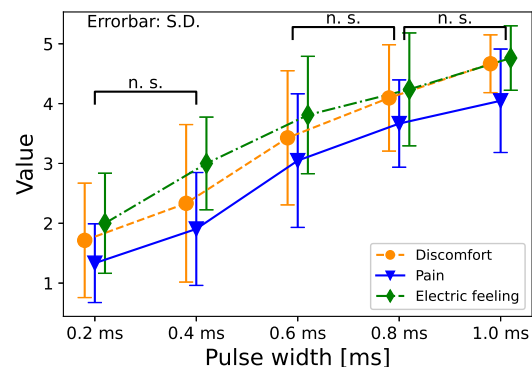


図 4: パルス幅による感覚の変化。n. s. 以外では有意差が確認できた

ている。縦軸は段階の評価結果で、5 に近いほどその感覚が大きいことを表す。横軸は周波数を表す。それぞれの結果は ANOVA によって有意差があることが確認できた場合は Scheffe 法によって検定を行った。

初めに周波数の変化による評価値の変化に注目する。周波数の変化による感覚の違いに有意差は確認できなかったが、周波数が大きくなるほどすべての感覚が大きくなるような傾向が見える。つまり、周波数の変化によって、主観的に不快感や痛み、電気感に大きな影響は与えないが、周波数が大きくなるとそれぞれの感覚が大きくなる可能性がある。

次にパルス幅の変化による感覚の変化を考察する。パルス幅の変化による感覚はほとんどの条件間で有意水準 5% で有意差が見られた。有意差のある組み合わせが多いため、図 4 には有意差がでなかった組を示す。なお、3 つの感覚のうち、痛みについてはパルス幅 0.2 ms と 0.4 ms で有意差が

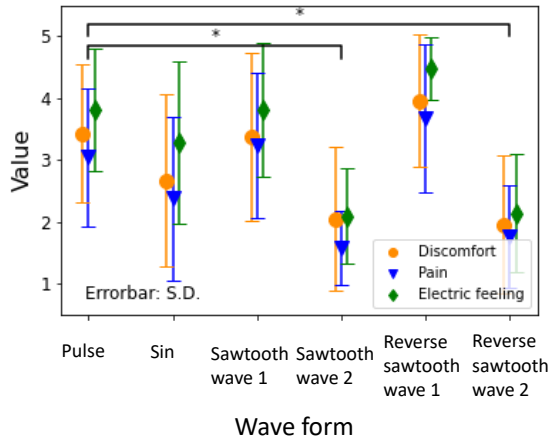


図 5: 刺激波形による感覚の変化。パルス波と有意差がある組み合わせのみを图示している

あった。有意差がない組み合わせはどれもパルス幅の変化量が 0.2 ms のため、0.4 ms 以上になると感覚に有意に差がでることがわかる。また、パルス幅を大きくすると 3 つの感覚が大きくなることわかる。

最後に刺激波形による感覚について見ると、パルス波と有意水準 5% で有意差が確認できたのは鋸歯状波と逆鋸歯状波である。これらは最大振幅はパルス波と同じで、刺激時間を 2 倍にしたものであり、より緩やかに電圧が変化する。そのため、不快感や痛み、電気感が下がったと考えられる。

次にそれぞれの条件ごとに電圧と提示力の計測結果を示す。周波数変化による電圧と提示力を図 6 に、パルス幅の変化による電圧と提示力を図 7 に、刺激波形ごとの電圧と提示力を図 8 に示す。グラフの青が電圧を示し、オレンジ

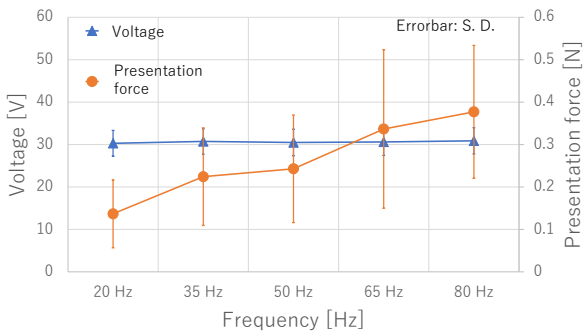


図 6: 周波数ごとの電圧と提示力

が提示力を示している。左の縦軸は電圧を表し、右の縦軸が人差し指への提示力を示し、エラーバーは標準偏差を示す。周波数についてみると、電圧はほとんど一定のため、周波数の変化による電圧の変化はほとんどおきていないことがわかる。力については周波数が高くなると提示力も大きくなることわかる。これは 1 秒間あたりの刺激回数が増えることで、1 秒間あたりに流れる電流量が増えるためだと考えられる。次にパルス幅についてみると、パルス幅が小さいときに電圧が低くなっていることがわかる。これは

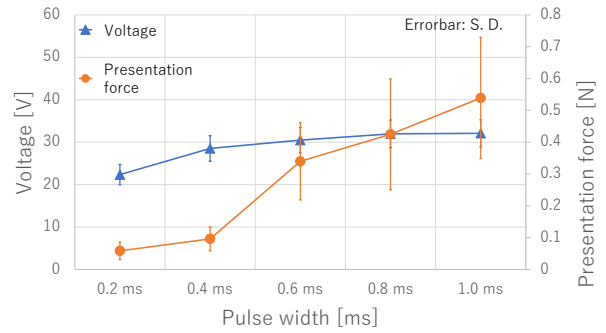


図 7: パルス幅ごとの電圧と提示力

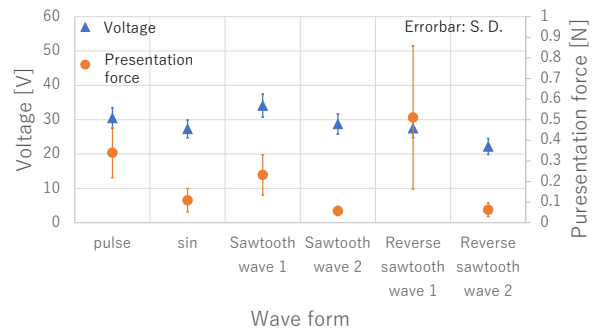


図 8: 刺激波形ごとの電圧と提示力

刺激時間が短すぎると電圧が上がり切らないということを示唆している。提示力はパルス幅が大きくなるにつれて提示力も大きくなる傾向が確認できる。これはパルス幅が大きくなると時間あたりに流れる電流量が増えるためだと考えられる。同様に、パルス幅が小さいと、電圧が低く、時間あたりに流れる電流量も少なくなるため、明らかに提示力が下がっていることも確認できる。

次に、刺激波形ごとの電圧と提示力について考察する。電圧に関しては逆鋸歯状波の、刺激時間を 2 倍にしたものが低くなっている。これは、最初に最大値で刺激したあと、徐々に電圧が下がっていく波形だが、人体に電流を流すとき、電圧は緩やかに変化するという特徴があるため、電圧が上がり切っていないことが考えられる。これは、通常の鋸歯状波では逆鋸歯状波よりも電圧が上がっていることから裏付けられる。また、実際には $\sqrt{2}$ 倍の電圧を提示している鋸歯状波 1 と逆鋸歯状波 2 ではそこまで大きな電圧が提示されているようには見えない。これは鋸歯状波が徐々に電圧をあげていくという特性上、最大電圧に達する時間が最後の一瞬のみであることが理由だと考えられる。逆鋸歯状波についても同様に最大電圧で刺激される時間が最初の一瞬のみであることが理由だと考えられる。次に提示力についてみると逆鋸歯状波 1 のみがパルス波よりも大きな力を提示していることが確認できる。これについては特定の参加者のみで著しく大きな力を計測し、それにより平均値も上がっている。これは標準偏差が大きいことから確認できる。

このようになった原因としては、逆鋸歯状波 1 の不快感や痛み及び電気感が影響を与えている可能性がある。図 5 をみると不快感、痛み、電気感がすべて高くなっており、著しく大きな力を計測した参加者の実験後のコメントから、意図せず指に力が加わっていた可能性が考えられた。つまり、最初に大きな電圧を加えるために、3つの望ましくない感覚が大きくなり、それによって余計な力が入ってしまう参加者も見られた。その他の波形については、すべて提示力が小さくなっており、パルス波のように一定の電圧で刺激し続ける方が力を提示しやすいことが確認できた。ここで、図 5 の 3つの感覚と図 8 の提示力の関係に注目する。図 9 に 3つの感覚の評価点を横軸、提示力を縦軸にとった結果を示す。図から確認できるように、不快感と提示力、痛みと提

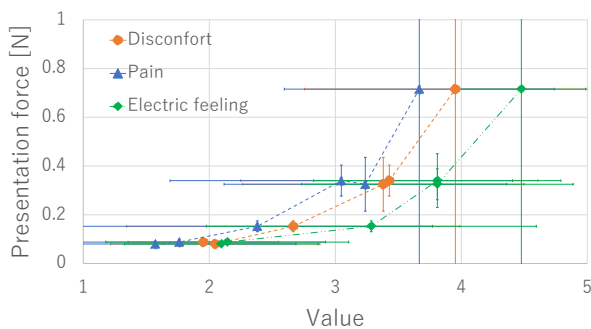


図 9: 3つの感覚と提示力の相関

示力および電気感と提示力、それぞれに相関があるように推測できる。つまり、提示力が大きい場合、3つの望ましくない感覚も大きくなる可能性が高い。この結果から3つの感覚のスコアがそれぞれ3程度となるような提示力 0.2-0.3 N 程度の力を提示するように電気刺激を調節することが望ましいと考えられる。

これらを踏まえて、電気刺激に適した波形について考察する。理想としては不快感、痛み、電気感のどれも与えずに力を提示することである。そのため、これら3つの感覚が低くなっている条件に着目すると、周波数が低く、パルス幅が小さいパルス波が考えられる。しかし、周波数およびパルス幅を小さくすると提示力が下がってしまう。そのためパルス幅は 0.6 ms 程度で、周波数は 50 Hz 以上が適切だと考えられる。パルス波以外の波形に関しては、パルス波より有意に3つの感覚が下がっている鋸歯状波 2 と逆鋸歯状波 2 では明らかに提示力が低くなっており、適切だと言えない。逆鋸歯状波 1 も望ましくない3つの感覚が大きくなっており、提示力に影響を与える可能性が高いため適していない。つまり、今回検討した波形では、パルス幅 0.6 ms、周波数 50-80 Hz のパルス波が筋電気刺激に適している。

4. 結論

本研究では入力波形によって不快感、痛み、電気感の3つの感覚がどのように変化するか調査した。また、同時に電圧と提示力の測定もおこない、これらを合わせて筋電気刺激に適した波形の考察を行った。結果として、パルス波に関してはパルス幅が大きくなると3つの望ましくない感覚が大きくなること、周波数およびパルス幅を小さくすると提示力が小さくなることが分かった。パルス波以外の波形については提示力が小さくなったり、望ましくない感覚が大きくなったりするために適していないと分かった。これらのことから筋電気刺激に適した波形はパルス幅 0.6 ms 程度、周波数 50 - 80 Hz のパルス波が適していると考えられる。パルス波に関しては 80 Hz 以上の検討を行っていないため、さらなる検証が必要である。

参考文献

- [1] 江崎重昭, 川村次郎. 筋力低下・筋萎縮に対する電気刺激療法. 三輪書店, 2000.
- [2] Akifumi Takahashi, Jas Brooks, Hiroyuki Kajimoto, and Pedro Lopes. *Increasing Electrical Muscle Stimulation's Dexterity by Means of Back of the Hand Actuation*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2021.
- [3] Pedro Lopes, Alexandra Ion, and Patrick Baudisch. Impacto: Simulating physical impact by combining tactile stimulation with electrical muscle stimulation. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology, UIST '15*, pp. 11-19, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.
- [4] Emi Tamaki, Takashi Miyaki, and Jun Rekimoto. Possessedhand: techniques for controlling human hands using electrical muscles stimuli. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 543-552. ACM, 2011.
- [5] Takaya Ishimaru and Satoshi Saga. Virtual bumps display based on electrical muscle stimulation. In *2020 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, pp. 96-101. IEEE, 2020.
- [6] 石丸嵩也, 嵯峨智. 筋電気刺激に適した刺激波形の検討. 第 25 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp. 2D3-5.
- [7] 梶本 裕之, 川上 直樹, 前田 太郎, 舘 暲. 皮膚感覚神経を選択的に刺激する電気触覚ディスプレイ. 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. 84, No. 1, pp. 120-128, 2001.