



筋電気刺激に適した刺激波形の検討

Examination of waveform suitable for electrical muscle stimulation

石丸嵩也¹⁾, 嵯峨智²⁾

Takaya ISHIMARU, and Satoshi SAGA

1) 熊本大学 (〒 860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪 2-39-1, ishimaru@saga-lab.org)

2) 熊本大学 (〒 860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪 2-39-1, saga@saga-lab.org)

概要: 我々は筋電気刺激を触覚 AR 技術へ応用することを提案してきた。しかし筋電気刺激には特有の電気感を伴うという望ましくない点も存在する。これまでの研究から周波数やパルス幅によって電気感の強弱や主観的な感覚に影響を与える可能性があることがわかった。そこで今回我々は筋電気刺激における周波数とパルス幅が電気感にどのような影響を与えるのかを調査した。本稿ではその結果について詳述し、考察していく。

キーワード: 筋電気刺激, 刺激波形, 力覚, 触覚

1. はじめに

近年様々な方法で触覚フィードバックを行うデバイスの開発が行われている。触覚フィードバックはユーザの体験を向上させたり、操作性を向上させるために重要な要因である。一般的に触覚フィードバックとして普及しているのはコントローラやスマートフォンに内蔵される振動子のみといえる。しかし、振動子以外のデバイスによって触覚フィードバックを行う研究は多く行われている。1994年にPHANTOM [1]というペン型のデバイスによってユーザに力覚を提示する装置が提案されて以来、触覚提示技術は広く知られるようになり、現在では振動を用いた触覚提示デバイスは商用製品にも利用されつつある。独自の提示方式としては、超音波を用いて触覚を提示する研究 [2] や放射熱を用いるもの [3], さらに、筋電気刺激を触覚フィードバックに用いる研究 [4, 5, 6] もみられるようになってきた。

我々はこのような筋電気刺激の特徴である力覚を提示できる点と刺激位置と力の提示位置が異なる点を生かして触覚 AR 技術への応用を提案してきた [7]。しかし筋電気刺激には特有の電気感が生じてしまう。これまでの研究から刺激波形がこの電気感に影響を与える可能性があることがわかった。本稿では刺激波形のパルス幅と周波数を変化させることで電気感がどのように変化するか、またその時の提示力がどのように変化するかを調査した結果について詳述する。

2. 筋電気刺激

筋電気刺激は脳からの信号の代わりに外部からの電気刺激によって筋収縮を起こすことで力を提示するという技術である。筋電気刺激は筋収縮によって力を提示するため力覚を提示でき、刺激位置と力の提示位置が異なるという特徴がある。また、筋電気刺激は外部からの電気刺激を利用するため特有の電気感を伴ってしまう。今回はこの電気感が電

気刺激の周波数及びパルス幅によってどのように変化するかを調査する。また同時に提示力も測定し、周波数とパルス幅が提示力に与える影響についても調査する。刺激波形は梶本らの電気触覚ディスプレイ [8] として開発された電気刺激装置を使用して変化させる。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、RS PROのForce Gauge, 5000 g を使用して提示力を測定する。

3. 実験

電気刺激の周波数とパルス幅が電気感と提示力に与える影響を調査するために行った実験について説明する。実験の様子を図1に示す。実験参加者は22, 23歳の右利きの健

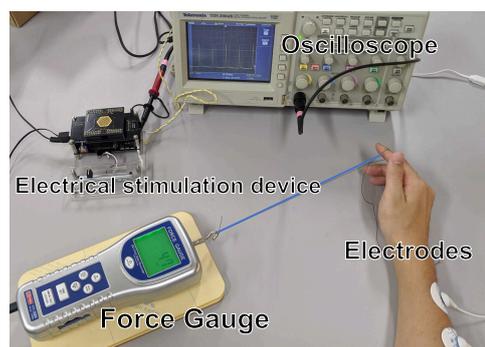


図 1: 実験の様子

康な男性3名である。筋電気刺激のための電極は右手の人差し指の伸筋を収縮させる場所に配置する。電気刺激の強さは周波数 50 Hz, パルス幅 0.6 ms の波形で 30 gf の力を提示できる強さに固定し、実験中は変化させない。つまり電気刺激の強さは参加者ごとに異なるが提示力は同じになるように設定する。

次に実験中に変化させる条件について説明する。実験中は周波数とパルス幅を変化させる。具体的には周波数は20, 35, 50, 65, 80 Hz でパルス幅 0.6 ms の電気刺激と、パルス幅 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1 ms で周波数は 50 Hz の電気刺激を提示する。その後周波数とパルス幅ごとに提示力、電極にかかる電圧を測定し、電気刺激に関するアンケートに答えてもらう。アンケートはそれぞれの周波数、パルス幅ごとに3回ずつ、全部で30回答えてもらう。アンケートは電気刺激の快さ、痛さ、電気感という3つの項目で5段階のリッカート尺度で評価してもらう。

3.1 実験結果及び考察

図2に周波数ごとのアンケートの回答結果を、図3にパルス幅ごとの結果を示す。また、周波数ごとの電極にかかっている電圧と提示力を図4にパルス幅ごとの電圧と提示力を図5に示す。アンケート結果は数字が大きくなるごとに

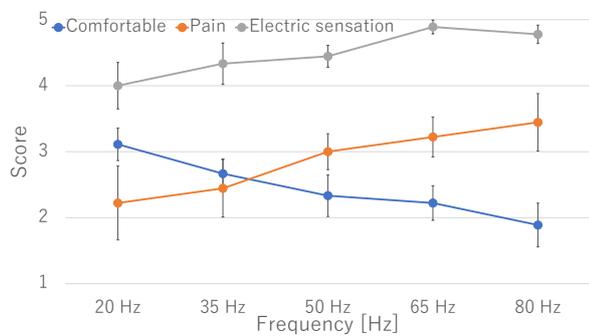


図2: 周波数ごとのアンケート結果

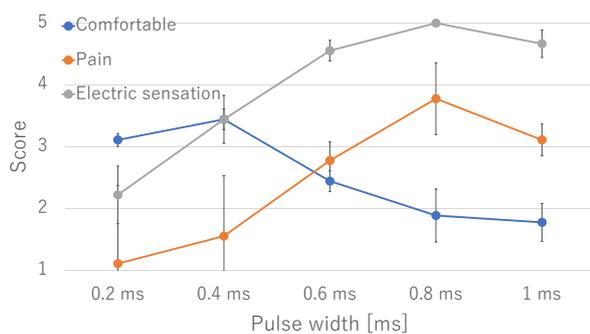


図3: パルス幅ごとのアンケート結果

その項目の感覚が大きいのことを表している。図2, 3より周波数が大きくなると痛さが増加し、電気感も大きくなるのがわかる。同時に快さのスコアは下がることも読み取れる。電気感に関しては周波数を変化させても大きく下がることはないため20 Hz から80 Hz の間で周波数を変化させても電気感をなくすことはできないことがわかる。次に、図3よりパルス幅が大きくなると痛さが増加し、電気感も大きくなり、快さは下がるのがわかる。パルス幅が0.2 ms の場合、電気感3以下となりこれはユーザがほとんど電気感を感じていないということである。しかし、図5

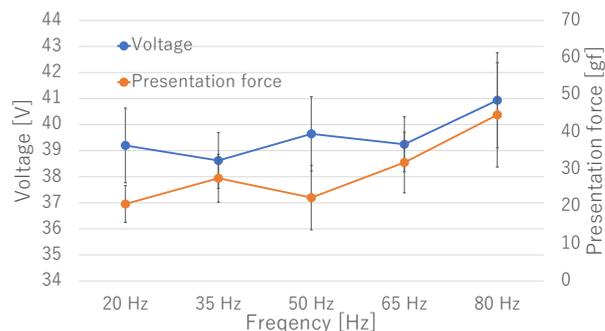


図4: 周波数ごとの電圧と提示力

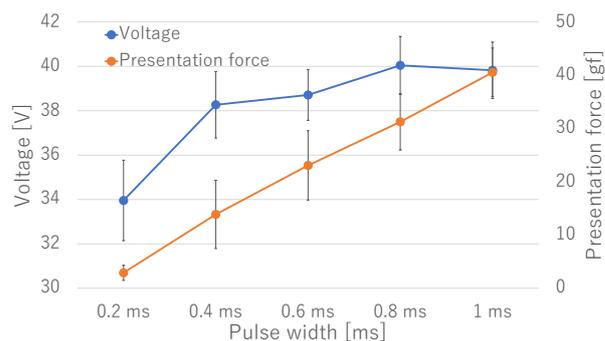


図5: パルス幅ごとの電圧と提示力

を見るとパルス幅が0.2 ms の場合ほとんど力を提示できておらず電極にかかる電圧も低くなっている。これらよりパルス幅が短いとユーザは電気感を感じないが十分にユーザに力を提示できないということがわかる。また、図4, 5より周波数またはパルス幅が大きくなると提示力は増加する傾向にあり電極にかかる電圧も高くなるのがわかる。今回の結果から周波数35 Hz から50 Hz, パルス幅0.4 ms から0.6 ms の刺激波形を用いると大きな痛みや不快感を与えることなく力を提示できると考えられる。

次に刺激強度を固定しているにも関わらず電極間の電圧が変化している要因について考察する。パルス幅が短いと電圧が低くなる要因としては過渡現象が起きている可能性が考えられる。図6に電気刺激装置からの出力波形を、図7に実際に電極に出力できている波形を示す。元の波形はパ

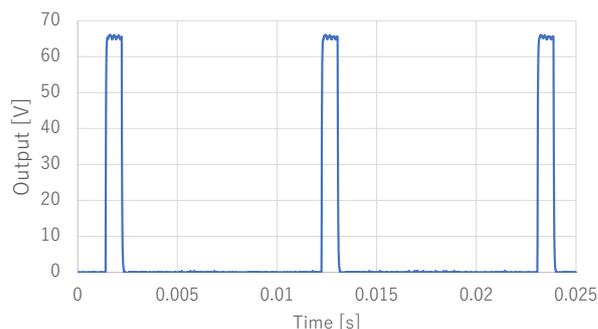


図6: 電気刺激装置からの出力波形

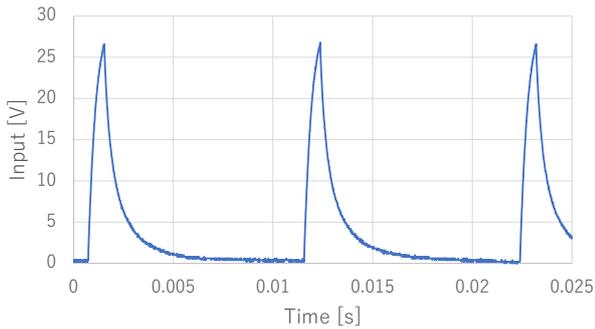


図 7: 実際の電極への入力波形

ルス波だが実際の入力波形は立ち上がりと減衰に時間がかかっているのがわかる。これは人体がコンデンサのように電荷を充電して放電していることを示唆している。つまり人体は皮膚が絶縁体で皮膚内部の細胞や組織が誘電体のコンデンサのように見なせる可能性がある。そのためパルス幅が短い場合は充電時間が短いために電位が上がり切らずに電圧が下がると考えられる。また、周波数による電圧の変化は大きくなく、測定する際の誤差である可能性が高い。しかし、人体がコンデンサのような電気的特性を示すため、周波数が高くなると電圧の変化についていけなくなり、電圧が下がる可能性がある。今回の結果では充電に 1 ms かかっているため周波数が 1 kHz 以上になると電圧が大きく下がる可能性がある。

4. むすび

本研究を通して筋電気刺激における周波数とパルス幅が電気感と提示力に与える影響を調査することができた。周波数及びパルス幅が大きくなると痛みが増し、電気感も大きくなり、快さは下がるということがわかった。今回の結果から周波数 35 Hz から 50 Hz、パルス幅 0.4 ms から 0.6 ms の刺激波形を用いると大きな痛みや不快感を与えることなく力を提示できることがわかった。また、電気感を与えずに力を提示するためには周波数とパルス幅の制御だけでは難しいとわかった。

参考文献

- [1] Thomas H Massie, J Kenneth Salisbury, et al. The phantom haptic interface: A device for probing virtual objects. In *Proceedings of the ASME winter annual meeting, symposium on haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems*, Vol. 55, pp. 295–300. Chicago, IL, 1994.
- [2] Benjamin Long, Sue Ann Seah, Tom Carter, and Sriram Subramanian. Rendering volumetric haptic shapes in mid-air using ultrasound. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 33, No. 6, November 2014.
- [3] Satoshi Saga. Calibration method of thermal-radiation-based haptic display. In *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pp. 470–478. Springer, 2016.
- [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] Farzam Farbiz, Zhou Hao Yu, Corey Manders, and Waqas Ahmad. An electrical muscle stimulation haptic feedback for mixed reality tennis game. In *ACM SIGGRAPH 2007 Posters*, SIGGRAPH '07, p. 140–es, New York, NY, USA, 2007. Association for Computing Machinery.
- [6] Pedro Lopes, Sijing You, Lung-Pan Cheng, Sebastian Marwecki, and Patrick Baudisch. Providing haptics to walls & heavy objects in virtual reality by means of electrical muscle stimulation. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1471–1482. ACM, 2017.
- [7] Takaya Ishimaru and Satoshi Saga. Virtual bumps display based on electrical muscle stimulation. In *2020 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, pp. 96–101. IEEE, 2020.
- [8] 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.