



# 腱電気刺激を用いたハプティックインタフェースの応用： マルチモーダル提示の検討

高橋哲史, 田辺健太, 梶本裕之

電気通信大学 情報理工学研究所 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1)

{a.takahashi, k.tanabe, kajimoto}@kaji-lab.jp

**概要:** 我々はこれまで腱電気刺激によって力覚が提示可能であること, および電流パラメータの調整によって感覚量を制御可能であることを示してきた. 今回この腱電気刺激による力覚提示に合わせて, 振動子による触覚提示と視覚ディスプレイを用いた視覚提示を行うマルチモーダル提示システムを構築した. 本稿ではこのシステムを用いて, クロスモーダル提示による生起力覚の変容可能性と力覚生起に関与する感覚モダリティの 2 つの事項の調査のため予備的な実験を行った.

**キーワード:** 腱電気刺激, マルチモーダル, 運動錯覚

## 1. はじめに

我々は前報において腱電気刺激によって力覚が生起すること, またその力覚量が電流パラメータによって制御可能であることを示してきた[1]. さらにこの力覚提示が腱近傍の深部に存在する自己受容器に関連する可能性が高いことを示唆した.

ところで力覚とは複数のモダリティの感覚が統合された感覚であることが知られており, 特に皮膚感覚と自己受容感覚の二つが重要で, さらに視覚の役割も大きいとされている[2]. この観点から, 腱電気刺激による力覚生起には, 次に述べる 2 つの疑問が存在する.

第一の疑問は, 複数のモダリティを組み合わせることによって力覚が増大するか, というものである. これまでの我々の実験は視覚的な情報は全く与えておらず, また皮膚感覚を生起しにくい手首の背側で電気刺激を行ってきた. 触力覚と視覚提示のマルチモーダルに関する研究はこれまでに多く行われており, Shitara ら[3]は触覚刺激を効果的に用いて, 他者に動かされていることが自然だと思える状況をつくることで, 視覚的な疑似力覚を強めている. また Mizuno ら[4]は タブレットコンピュータの裏に振動子と左右に動く重りを設置したマルチモーダル感覚提示装置を開発し, ディスプレイに表示されたオブジェクトが重さを持っているとユーザに感じさせることが可能であることを示している.

第二の疑問は, 第一の疑問とは相反するものであるが, 腱電気刺激における力覚生起の主要因が, はたして深部感覚によるものか, 皮膚感覚によるものか, という疑問である. 我々は前報において腱電気刺激が先述の通り深部感覚,

すなわち自己受容感覚を刺激している可能性が高いことを示した. 具体的には電極の配置を間隔の広いものと狭いものの二種類用意し, 狭い(すなわち深部まで刺激が到達しない)条件では広い条件よりも力覚が低減し, 皮膚感覚は変わらないという結果から, 生起している力覚が深部への刺激によって生じたものであると結論づけた. しかしこの実験では, 深部への刺激が力覚に貢献していることは示しているものの, 皮膚感覚が力覚に貢献して「いない」ことは示していない. 実際皮膚感覚による力覚の生起現象は多数知られており, 例えば偏加速度振動による力覚[5][6]や, 皮膚せん断変形による力覚[7][8][9][10]などが知られている.

以上の 2 つの疑問への回答を得るため, 本稿では電気刺激に加えて, 振動子による振動刺激と視覚ディスプレイを用いた視覚刺激を連動して提示できるマルチモーダルなシステムを構築し, 予備的な検討を行った.

## 2. 腱電気刺激による力覚提示とその方向

我々のこれまでの実験では主に手首の手の甲側の腱直上の皮膚表面に電極を貼り付け電気刺激を行った. 電気刺激は周波数 80Hz, パルス幅 200  $\mu$ s, パルス高さはおよそ 10mA 程度, 最大 25mA の電流制御であった. この刺激によって被験者は電極を貼り付けた側とは反対方向への力覚を感じた.

この力覚生成の機序としては次の二つが考えられる. 一つは単純に電気刺激によって皮膚感覚を生じたことに由来するものである. すなわち皮膚が押される向きに力を感じたと解釈できる. もう一つはこの部分の刺激によって深

部受容器が反応したことに由来するものである。深部受容器の活動は例えば Golgi 腱器官であれば筋の発揮力を意味するので、筋が力を発揮しているのかかわらず手の姿勢が変わらないという状況から、逆向きの拮抗する外力を錯覚したと解釈できる。

もし、この力覚生起が皮膚感覚によるものであるならば、電気刺激によって生じる触覚と同様の刺激を機械刺激によっても提示可能であると考えられる。またもし、力覚生起が Golgi 腱器官に由来するものならば、力がかかっている最も自然な場所としては手の甲が考えられる。したがって手の甲に触覚提示を行うことでより自然な力覚提示が可能であると考えられる。

### 3. マルチモーダルな感覚提示システム

本システムは電気刺激装置[13]、振動子(アクーヴラボ、パイプロトランデューサ Vp2 シリーズ Vp210)、視覚ディスプレイモニターによって3種類の感覚提示を行う(図1)。これらのモジュールはPCによって統合される。PCは電気刺激装置とシリアル通信で同期を行う。振動子はマイクロコントローラ(NXP, mbed LPC1768)による制御と、任意の波形生成が可能なソフトウェア Max とオーディオインターフェースを用いた制御が可能である。前者は遅延が数 $\mu$ s とほぼ遅延を気にすることなく扱える。後者は振動子への入力信号をできるだけ歪みなく作り出すことが必要な場合に用いる。

## 4. 実験

### 4.1 3種類の刺激の同時提示

本システムを用いて EuroHaptics2016 および自身の所属する研究室のオープンラボを利用してデモンストレーションと並行して予備的な実験を行った。参加者のほとんどが腱電気刺激の体験および知識は無かった。実験の様子を図2に示す。電極を右手手首の外側に設置し、振動子は右手手の甲に設置した。これは前述したように、電気刺激によって生じる感覚が力覚であると仮定し、その場合に自然な触覚提示部位として選定したものである。ディスプレイ上には右手のモデルが表示されており、任意のタイミングで画面右側からオブジェクトが出現し、左へ等加速度運動をする。オブジェクトが手のモデルに衝突すると同時に振動刺激と電気刺激が提示される。画面内で手は物体と衝突した後には押しされ、物体による外力に対して抗って静止させた。電気刺激のパラメータは周波数が 100Hz、パルス幅が 200 $\mu$ s、パルス高さはおよそ 10mA 程度、最大 25mA で参加者自身に調整させた。振動子の波形は衝突の表現に多く用いられる減衰正弦波を採用し[11][12]、0.5s 程度の短い振動を一度だけ提示した。減衰正弦波の周波数は 100Hz であり、振幅は参加者に調整させた。電気刺激は手と物体と力が接触している間継続的に提示した。これによって短い振動によって衝突の衝撃を、電気刺激によってその後の持続的な力を表現した。体験中参加者に力覚の有無と力の方

向を確かめ、視覚情報や振動刺激がない場合と比較した力覚の差異について質問した。

### 4.2 手首への機械的振動刺激による力覚生起の確認

手首への電気刺激によって生起する力覚に対する皮膚感覚の関与を調べるため、振動子による機械刺激を与える予備的な実験を行った。振動子の設置箇所は図3に示す通り電極を設置する位置と同じ部分である。振動子の制御は Max とオーディオインターフェースによって行った。実験参加者は筆者を含めて3人であった。参加者は全員、実験4.1と同様のパラメータの腱電気刺激によって力覚が生起することを確認している。振動子への入力信号は電気刺激のパルスパラメータとできるだけ似るように、デューティ比が 0.9 であるような矩形波を用いた。周波数は 200Hz、100Hz、50Hz を用いた。パルス幅はそれぞれ 500 $\mu$ s、1ms、2ms となる。これによって手首の内側方向に対して偏加速度を与える様な振動を与えた。振幅は自身で調節させ、力覚が生じるか質問した。また生じた場合腱電気刺激による力覚と比較して感覚が似ているか質問した。

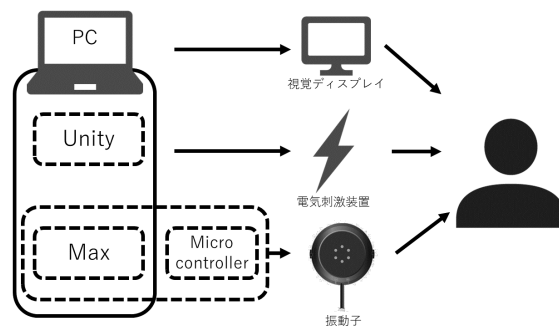


図1 システム図

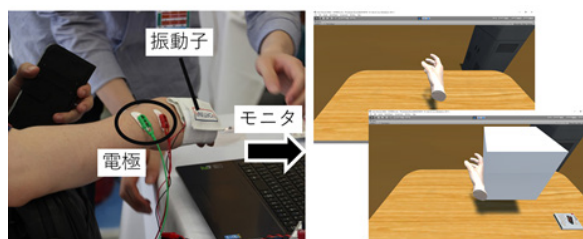


図2 デモの様子



図3 手首への振動提示

## 5. 結果

### 5.1 3つの感覚モダリティの同時提示の結果

7割程度の参加者で力覚生起を確認した。またはじめは力覚が生起しなかった参加者でも電極の位置を5mm程度ずらすことで力覚が生起する例もあった。参加者の内まず視覚情報を無視して体験した後に視覚情報を得て体験をした人のほとんどが、視覚情報があることでより感覚が分かりやすくなったと答えた。以上の観察から、今回の装置が視覚提示なしでも力覚が生起し、さらに視覚情報が組み合わせられることで、より感覚が鮮明になることが示唆された。

参加者の1割程度が機械刺激と電気刺激が同時に提示されているのにもかかわらず、機械刺激が終わってから電気刺激を感じ始めたと回答した。彼らに振動子を外して再度体験させたところ、確かに画面内の衝突と電気刺激の開始が同時であると回答した。したがって電気刺激の知覚が遅れたのではなく、機械的な振動刺激によって電気刺激の感覚がマスクされた可能性が考えられる。

また興味深いことに視覚情報と同じような手の動きをしてしまう参加者が多くみられた。これは機械刺激が与えられない場合でも見られた。電気刺激によって筋は刺激されておらず、されたとしてもその場合の運動は今回の運動とは全く異なった向きである。内観報告としてある種の反射のように感じたとする参加者が数名見られた。

振動感覚を付与することで明確な感覚の差が生まれたという報告はあまり見られなかったが、感じられる力の向きに多少の変化が観察された。電気刺激のみを用いていた場合は腕全体が電極の反対側へ動かされるような向きと知覚する体験者が多かったのに対し、今回の被験者の内数名が手首を曲げられるような力の向きを感じていた。

### 5.2 手首への機械的振動刺激の結果

3人全員が200Hz、100Hzでは力覚をほぼ感じられなかった。しかし、50Hzの際には振動子の反対側への力覚が感じられた。力覚の質に関しては、2人が電気刺激の場合に似ていると答えた。またうち一人に時間をおいて再度50Hzの振動を与えたところ、力覚は生じなかったが姿勢の錯誤が生じたと回答した。さらに追加で別の2人に協力いただき、50Hzの振動のみを提示したところ、1人は力覚が生じたが、もう1人は生じず、姿勢の錯誤が生じたと回答した。

電気刺激では100Hzの正負パルスを用いており、1周期の間に2点の電極に1度ずつパルスが生じるので、触覚としては局所的には100Hz、大域的には200Hzの振動と等価であると考えられる。これに対して今回、100Hz、200Hzの振動を与えても力覚を生じなかったことから、電気刺激による力覚に関与しているのは少なくとも100,200Hzで応答する皮膚の振動覚の受容器（パチニ小体）ではないと考えられる。

50Hzの振動によって力覚を生じた原因は複数考えられ

る。第一に、50Hzにおいて偏加速度振動が生じやすかった可能性が考えられる。実際、同じ振動子を用いて手掌部に擬似力覚を生じさせる研究[6]は150Hzの振動を用いて擬似力覚を生じさせている。波形は正弦波の一部、二周期の内半周期分を正負反転したものをを用いており、波形の繰り返し周波数は半分の75Hzとなる。今回力覚を感じる際に圧覚も生じたとの報告もあり、偏加速度振動によって皮膚を押す側に圧覚を生じたことが擬似力覚につながった可能性がある。今後は極性を変えた振動や正弦波振動を与えることでこの可能性を検討していく。

第二に深部への振動伝搬により深部受容器が活動した可能性が考えられる。実際、運動錯覚として知られる錯覚現象は、典型的には70~100Hz程度の振動を関節に入力し、姿勢の錯誤を生じるというものである[14][15][16]。この場合、振動は筋紡錘に伝搬し、筋紡錘が主に担当する姿勢の錯誤を生じるとされている。実際今回は2人の参加者が50Hzの刺激で姿勢の錯誤が生じた。50Hzの振動を体験した5人の内4人で力覚が生じたが、うち時間をおいて両錯覚を体験した1人は2つの錯覚は異なるものと感じたと回答した。実際、力として感じた参加者は力の向きに腕を動かすなどして確かめていたが、姿勢錯誤が生じた者たちは腕を全く動かさないうっかりと感じていた。したがって刺激部位の微妙な違いなどによって刺激する受容器が異なることが考えられ、今後さらに検討する必要がある。

## 6. おわりに

我々は腱電気刺激による力覚生起という現象に関して、皮膚感覚提示や視覚提示によって生起する力覚が増強されるか、またそもそも腱電気刺激による力覚生起に皮膚感覚は関与しているかどうか、を検討するために、電気刺激装置と振動子、視覚ディスプレイを用いたマルチモーダルな感覚提示システムを構築した。

現段階では予備的な検討にとどまっているが、腱電気刺激による力覚は視覚、触覚を加えることでより自然な感覚として感じられることが示唆された。さらに、力覚生起に寄与する受容器に関しては少なくとも高周波の振動感覚ではないことが示唆された。

今後は心理実験を行い主観的な力覚量や力覚の向きがクロスモーダル提示によって実際に変化するかどうか統計的に調査する。また、振動刺激によって生じる力覚と姿勢の錯誤について、異なるパラメータ振動刺激でも同様の感覚が生じるか検討する。

## 謝辞

本研究はJSPS 科研費 25700020 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] 高橋哲史, 田辺健太, 梶本裕之: 腱電気刺激を用いたハプティックインタフェースにおける刺激パラメー

- タと生起力覚量の関係, 第 17 回力触覚の提示と計算研究会, 2016
- [2] 黒田嘉宏, 仲谷正史, 長谷川晶一, 藤田欣也: 物理的刺激に基づく疑似力覚の提示と計算に関する研究動向, TVRSJ, Vol. 16, No. 3, pp.379-390, 2011.
- [3] Shitara, T., Nakai, Y., Uematsu, H. Yem, V., Kajimoto, H. and Saga, S.: Reconsideration of Ouija Board Motion in Terms of Haptics Illusions. In Proc. Of Euro Haptics Conference 2016, 2016.
- [4] Mizuno, T., Maeda, J. and Kume, Y.: Weight Sensation Affected by Vibrotactile Stimulation with a Handheld Vision-Tactile-Force Display Device, ECTI-CON 2013, CD-ROM Control in Mechatronics and Power Electronics, No.1683, 2013, Thailand
- [5] Amemiya, T. and Gomi, H.: Distinct pseudo-attraction force sensation by a thumb-sized vibrator that oscillates asymmetrically, In Proc. of Eurohaptics, 2014.
- [6] Tanabe, T., Yano, H. and Iwata, H.: Properties of Proprioceptive Sensation with a Vibration Speaker-type Non-grounded Haptic Interface, Haptics Symposium '16, pp.21-26, April 2016
- [7] 佐藤未知, 中村拓人, 梶本裕之:ハンガー反射における皮膚せん断変S形による触錯覚と運動誘発, 第5回レイグジスタンス研究会 (2014)
- [8] Edin, B.B. and Johansson, N.: Skin strain patterns provide kinaesthetic information to the human central nervous system. *J. Physiol.* 487(1), pp.243–251, 1995.
- [9] Shikata, K., Makino, Y. and Shinoda, H.: Inducing Elbow Joint Flexion by Shear Deformation of Arm Skin, in Proc. of World Haptics Conference 2015, WIP30, 2015.
- [10] Kuniyasu, Y., Sato, M., Fukushima, S. and Kajimoto, H.: Transmission of Forearm Motion by Tangential Deformation of the Skin, 3rd Augmented Human International Conference, 2012
- [11] Kajimoto, H.: Electro-tactile Display with Real-time Impedance Feedback using Pulse Width Modulation, *Trans. on Haptics*, vol. 5, no. 2, pp.184-188 June 2012.
- [12] Okamura, A. M., Cutkosky, M. R. and Dennerlein, J. T.: Reality-Based Models for Vibration Feedback in Virtual Environments, *Trans. on Mechatronics*, vol. 6, no. 3, September 2001.
- [13] Wellman, P. and Howe, R. D.: Towards realistic vibrotactile display in virtual environments, *Proc. of the ASME Dynamics Systems and Control Division of the ASME, DSC-Vol. 57-2*, pp. 713-718 1995.
- [14] Goodwin, G. M., McCloskey, D. I. and Matthews, P. B. C.: The Contribution of Muscle Afferents to Kinaesthesia Shown by Vibration Induced Illusions of Movement and by the Effects of Paralysing Joint Afferents, *Brain*, vol. 95, pp.705-748, 1972.
- [15] 友田達也, 上杉繁, 三輪敬之: 上腕への腱振動刺激と他動運動による 過伸展錯覚の特性, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.14, No.3, pp.361-369, 2009.
- [16] 赤堀晃一, 本多正計, 宮岡徹, 大岡昌博: 振動刺激による運動錯覚における右手手関節の伸展速度の制御, 第 20 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集 pp.14-15, 2015.