

腱電気刺激を用いたハプティックインタフェース

Haptic Interface Using Tendon Electrical Stimulation

梶本裕之¹⁾²⁾

Hiroyuki KAJIMOTO

1)電気通信大学

(〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, kajimoto@kaji-lab.jp)

2) JST さきがけ

Abstract: Haptic interface that present kinesthetic sensation is indispensable for telexistence and virtual reality, in the sense that it provides reality and intuitiveness. Most haptic interface for kinesthetic sensation requires user's motion, which is sometimes undesirable, due to limited workspace, user's physical capability and fatigue. Therefore, presentation of kinesthetic sense without real motion is required. Kinesthetic illusion is a well-known phenomenon caused by vibratory stimulation to tendon. However, it requires strong mechanical vibration, which hinders its practical use. I propose to use electrical stimulation to tendon to generate the illusion. The experimental result revealed that the kinesthetic illusion can be generated by tendon electrical stimulation, suggesting possible contribution of Golgi tendon organ to the illusion.

Key Words: Golgi Tendon Organ, Haptic Display, Muscle Spindle, Tendon Electrical Stimulation, Virtual Reality

1.はじめに

力、運動ないし姿勢に関する感覚(自己受容感覚)を提示するハプティックインタフェースは、テレグジスタンスにおける現実感の提示やテレオペレーションにおける操作性の向上などに寄与すると考えられ、これまで数多く提案されてきた。しかし人に自己受容感覚を提示するためには多くの場合大掛かりな機械的装置を必要とし、またユーザは実際に動かさなければならないという、金銭的、空間的コストおよび疲労の問題があった。

これらの問題を解決する手法として、近年では皮膚感覚や視覚を用いた擬似的な自己受容感覚の提示が数多く提案されている[1][2][3][4]。これらは大掛かりな装置を必要としない現実的な手法であるが、提示される感覚の量はかなり微小であると言わざるをえない。

他の感覚を振り返ると、ほとんどの感覚ディスプレイが「感覚受容器への刺激」という観点を持っている。例えば視覚ディスプレイで用いられる三原色の原理は、網膜上に存在する光感受性細胞の特性に基づき、スペクトルそのものを再現せずにすべての色の再現を可能としている。ヒトは受容器という窓を通してしか現実世界を認識できないから、受容器活動の再現はヒトにとって必要十分な、言い換えればVRの原理に忠実な手法といえる。

ひるがえって自己受容感覚の提示手法は極めて特殊である。モータで反力を返す、触る形状を再現するなど、受容器活動の再現ではなく「現実世界そのものの再現」を目指しているように見える。自己受容感覚は他の感覚と異なり、受容器が露出せず外部から刺激を与えにくい。このことが、現実そのものを用意するという高コストな手法をとらせる原因であると考えられる。

逆にもし自己受容感覚に関する受容器を非侵襲的な手段で刺激できるなら、動きを伴わないハプティックインタフェースを実現できると考えられる(図1)。

友田らは動作を要しない自己受容感覚提示という観点から、腱への振動刺激によって生じる運動錯覚を用いる手法を提案している[5]。本研究は同様の手法を腱電気刺激によって行なう提案である。



図1 動きを伴わないハプティックインタフェース

2.従来研究

2.1.電気刺激インタフェース

電気刺激はこれまで小型軽量な感覚提示手法として数多く用いられてきた。皮膚感覚提示はその代表的な例である[6][7][8]。皮膚表面への電気刺激により皮膚下の触覚受容器に接続された神経を活動させる。電流の極性や電極サイズ等により受容器選択的な刺激がある程度可能であり、さらに刺激周波数や空間パターン等により多彩な触覚情報を提示することができる。また電気刺激を用いた前庭感覚の提示も提案されている[9]。両耳近傍の皮膚から直流の電流を流すと前庭器官の神経活動に変化を生じ、体験者自身の傾きとして知覚される。

一方で自己受容感覚の提示手段としては、これまで筋への電気刺激が多く提案されてきた[10][11][12]。リハビリテーション等に多く用いられる機能的電気刺激(FES)の技術を用い、アクチュエータの代わりに筋肉を用いるというものである。この方式は確かに小型化が可能であるが、感

覚器への直接の刺激ではなく、現実世界そのものの再現を目指している点で（言い換えればユーザが実際に動く必要があるという点で）従来手法と同等であるとみることもできる。

2.2. 腱振動刺激による運動錯覚とインタフェース応用

1972年 Goodwin らは、腱に 100Hz 程度の振動を与えることで運動錯覚(kinesthetic illusion)を生じることを見出した[13]。同時期の運動錯覚に関する多数の研究報告については Jones の総説が詳しい[14]。

運動感覚を司る感覚器には二種類の筋紡錘（筋の長さに対応）、Golgi 腱器官（筋張力に対応）および皮膚感覚が挙げられるが、本運動錯覚については筋紡錘の活動によるものとする研究が大半である。腱への振動刺激が筋中の筋紡錘に伝わり、筋紡錘が担当する位置・速度知覚に変化が生じるというものである[15][16][17]（各受容器の位置関係については図 2を参照）。

運動錯覚のインタフェースとしての活用もこれまで幾つか提案されている。すでにのべた友田らの研究ではインタフェース応用を念頭に姿勢誤差量を定量評価している[5]。加藤は腕関節に対して電気刺激、機械刺激の最中に腕を動かし物体の長さを判別する実験を行なっている[18]。Roll らは下肢の腱に複数方向から振動刺激を与え、前後左右方向への運動を提示している[19]。Leonardis らは VR への応用を念頭に、腱刺激と視覚刺激との相互作用を検証している[20]。Yaguchi らは運動錯覚の量を増加させるために同一の筋の両端の腱から刺激を与える手法を提案している[21]。

しかし運動錯覚を生じるには通常大型の振動提示装置が必要であり、必然的に生じる騒音や触覚の問題は解決されないままであった。

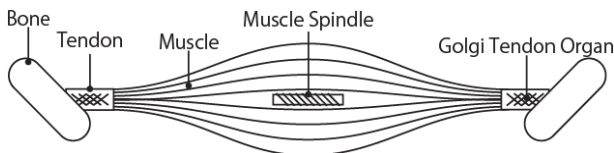


図 2 各受容器の位置関係

3. 腱電気刺激による運動錯覚の検討

現在のところ腱刺激による運動錯覚はほとんどすべて機械的な振動刺激によって行われている。もしこの運動錯覚を電気刺激で生じさせることが出来れば、機械的な振動刺激に比べて小型、低消費電力、無騒音となり、現実的な自己受容感覚の提示手法となりうると考えられる。さらに刺激方法の工夫によっては、多数の電極による姿勢変化に適応した制御や、余計な皮膚感覚を極力生じない選択刺激が可能となる可能性がある。

しかし本錯覚が2.2節で述べたように「腱からの振動によって筋紡錘を刺激する」という機序に基づいているなら、電気刺激の適用は難しい。なぜなら筋紡錘を電気刺激するためには筋の直上に電極を配置せざるを得ず、必然的に筋を駆動する運動神経を刺激してしまうためである。2.1節に述べたように筋刺激を用いたインタフェースは提案されているが、我々の目指す「動く必要のない自己受容感覚提示」は達成されない。

一方で以下に述べるように、筋紡錘のみならず Golgi 腱器官も本錯覚に関与している可能性を示唆すると思われる知見が複数存在する。

Gandevia らは手首部尺骨神経への電気刺激によって運

動錯覚を生じることを見出している[22]。彼らは筋紡錘への刺激によって生じているのではないかと述べているが、刺激部位から考えて他の感覚受容器の活動を否定するものではない。Macefield らは筋紡錘、関節受容器、Golgi 腱器官、皮膚受容器の単一神経を刺激し、筋紡錘の単一神経の活動では運動錯覚をほとんど生じないこと、関節受容器および Golgi 腱器官の活動では生じることを観察している（ただしサンプル数は少ない）[23]。また 1980 年代から 90 年代にかけて行われた研究では筋紡錘の神経活動閾値が Golgi 腱器官等と比べて低いとしているが（例えば[24]）、Fallon らはこれらの中にほとんど差がないことを見出している[25]。

以上の知見に基づき、次の 2 つの仮説を立てた。

- H1: 運動錯覚の原因の一つに Golgi 腱器官の活動がある。
- H2: H1 が正しければ、腱電気刺激によって運動錯覚を生成できる。

実用的には H2 のみ示せばよく、もし H2 を示すことが出来れば、H1 は間接的に示されると考えられる。

なお Golgi 腱器官の電気刺激自体は、Golgi 腱反射の機序解明のために数多く行われており、Golgi 腱器官を経皮電気刺激によって刺激すること自体は可能である[26][27][28]。よって以下の実験では、腱部位への経皮電気刺激によって運動錯覚を生じるかどうか検討する。

4. 実験

腱電気刺激を行い、運動錯覚を生じるかどうか予備的な検討を行った。

4.1. 腕の腱電気刺激

腕の腱電気刺激の様子を図 3に示す。上腕二頭筋および三頭筋の肘側の腱に電極（日本光電製ビトロード F-150S）を貼り付けた。腱の位置は関節部から約 3cm 上側とした。電極の大きさは 18mm×36mm であり、短辺を腕の長軸方向に一致させた。

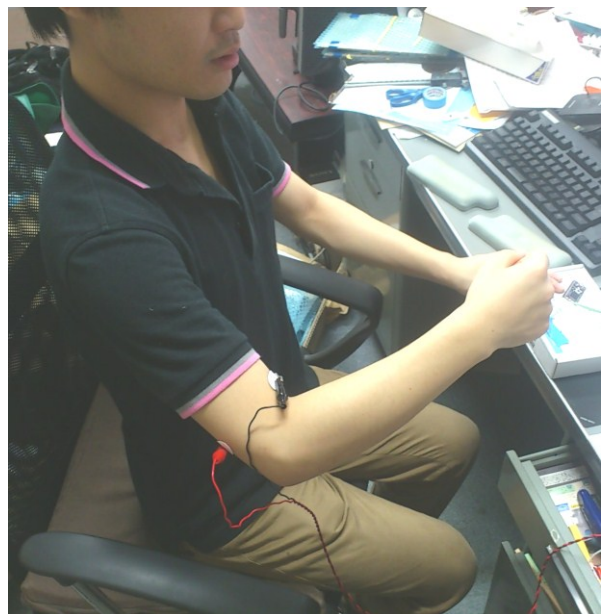


図 3 腕の腱電気刺激。上腕二頭筋および三頭筋の肘側の腱に電極を貼付

電気刺激には電流制御された矩形波パルスを用いた。パルス幅は 200 μ s、パルス高さは 0 から 20mA で被験者自身が調整した（刺激側とは反対側の手で調整した）。パルス周波数は 100Hz とした。

実験は筆者自身を含む 4 名で行った。被験者には運動する錯覚が生じることのみ伝え、運動方向については伝えなかった。被験者は閉眼状態でパルス高さを調整し、感じられた腕の動きの方向を口頭で回答した。

4.1.1. 実験結果及び考察

全ての被験者で、二頭筋（腕内側）の腱を陰極とした場合には腕の外側への曲げを知覚し、三頭筋（腕外側）の腱を陰極とした場合には腕の内側への曲げを知覚した。また 2 名の被験者は、肘の曲げというよりは上腕を含めた腕全体が移動していくように感じられたとコメントした。ほぼすべての被験者が、感じられる腕の動きに驚きの声を上げた。

一般的な電気刺激では陰極が刺激電極となる。このため今回の実験結果は、「刺激側とは「反対方向」への運動錯覚を生じた、とまとめることができる。この運動方向は腱振動の場合に生じる運動錯覚と一致しており、今回生じた錯覚が既知の運動錯覚と同じものであることを強く示唆している。なおこの方向は、筋自体を刺激した場合とは逆である。例えば二頭筋を刺激した場合には腕は内側に屈曲する。つまり今回の錯覚は筋刺激による実際の運動によって生じたものではない。

また電気刺激部位が肘関節近傍であったことも重要である。この場合、筋を駆動する神経や筋紡錘につながる神経はすべて電極よりも上側にあることになるから、今回生じた感覚が筋紡錘に由来するとは考えにくい。ただし完全に関節直上に電極を貼った場合には感覚を生じなかったため、電極と筋・腱との位置関係については今後精査する必要がある。

以上をまとめると本結果は、腱電気刺激により運動錯覚を生じることを明らかにし（H2）、さらにその刺激対象が Golgi 腱器官である可能性(H1)を示唆するものであると思われる。

4.2. 指および足の腱電気刺激

指および足に関しても同様の腱電気刺激を試みた。本実験については著者を含めた 2 名のみによる予備的検討を行った。

指の腱電気刺激の様子を図 4 に示す。人差指基節の内側および外側に電極を貼りつけた。使用した電極及び刺激パラメータはすべて腕での刺激実験と同じである。

足の腱電気刺激の様子を図 5 に示す。腕の場合と同様、大腿四頭筋および二頭筋の膝側の腱に電極を貼付けた。使用した電極及び刺激パラメータのほとんどは腕での刺激実験と同じであるが、刺激パルス幅のみ 500 μ s に変更した。これは足が腕に比べて太いため皮膚表面から神経への距離が長いと考えたためである。

指の腱電気刺激では筆者は指背側を陰極とした際に屈曲側の錯覚を微小に生じ、もう一名に関しては腹側を陰極とした際に伸展側の錯覚を微小に生じた。ただし現在の電極配置では当然ながら皮膚感覚神経を刺激してしまうため、皮膚感覚によって生じた錯覚なのか通常の運動錯覚なのか判別は難しかった。

足の腱電気刺激では筆者は大腿四頭筋側を陰極として刺激した場合に屈曲、大腿二頭筋側を陰極として刺激した場合に伸展の錯覚を生じた。この運動方向は腕の場合と同様、腱振動の場合に生じる運動錯覚と一致している。もう一名に関しては運動錯覚を生じなかった。足は腕と比べて

非常に太いため、表裏に貼りつけた電極によって適切な刺激量を実現することが難しく、おそらくは同側に 2 つの電極を貼付すべきであったと思われる。



図 4 指の腱電気刺激。人差指基節の内側および外側に電極を貼付



図 5 足の腱電気刺激。大腿四頭筋および二頭筋の膝側の腱に電極を貼付

5. おわりに

本報告では腱電気刺激によって運動錯覚を生じるかどうかを予備的に検討した。腕、指、足の腱部位に経皮電気刺激し、特に腕に関しては 4 名の被験者によって明瞭な運動錯覚が観察され、その運動方向は過去の機械的振動によって生じる運動錯覚と同じであった。

本実験結果から運動錯覚に関与する受容器を特定するのは早計であるが、刺激の部位から考えて少なくとも Golgi 腱器官が関与している可能性は否定されなかった。

今回の実験結果によって、経皮電気刺激によって運動錯覚を生じることが明らかとなった。今後はこの運動錯覚

を定量的に評価し、さらに「動かないハプティックインタフェース」の実現に向け、体の他の部位への適用、皮膚感覚や視覚とのクロスモーダル呈示を進めていく。

参考文献

- [1] Minamizawa, K., Prattichizzo, D., and Tachi, S. 2010. Simplified design of haptic display by extending one-point kinesthetic feedback to multipoint tactile feedback. In *Proc. Haptics Symposium*, pp.257-260 (2010)
- [2] Kuniyasu, Y., Fukushima, S., Furukawa, M., and Kajimoto, H. 2011. Weight illusion by tangential deformation of forearm skin. In *Proc. Augmented Human International Conference* (2011).
- [3] Okamoto, S., Konyo, M., Tadokoro, S.: Vibrotactile Stimuli Applied to Finger Pads as Biases for Perceived Inertial and Viscous Loads, *IEEE Trans. Haptics*, **4**, pp.307-315 (2011)
- [4] Lécuyer, A.: Simulating Haptic Feedback using Vision: A Survey of Research and Applications of Pseudo-haptic Feedback. *Presence*, **18**, pp.39-53 (2009)
- [5] 友田, 上杉, 三輪: 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, **14**, pp.361-369, (2009)
- [6] Bach-y-Rita, P., Kaczmarek, K. A., Tyler M. E., Garcia-Lara, J.: Form perception with a 49-point electro-tactile stimulus array on the tongue, *J. Rehabilitation Res. Development*, **35**, pp.427-430 (1998)
- [7] Tachi, S., Tanie, K., Komiyama, K., Abe, M.: Electrocutaneous Communication in a Guide Dog Robot (MELDOG), *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, **32**, pp.461-469 (1985)
- [8] Kajimoto, H.: Electro-tactile Display with Real-time Impedance Feedback using Pulse Width Modulation, *IEEE Trans. Haptics* (to appear)
- [9] Maeda, T., Ando, H., Sugimoto, M.: Virtual acceleration with Galvanic Vestibular Stimulation in a virtual reality environment, In *Proc. IEEE VR*, pp.289-290 (2005)
- [10] 稲見, 川上: 仮想体感装置, 特開平7-20978
- [11] 藤田: 電気刺激による筋収縮を利用した力覚提示法の検討, 第11回ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, pp.329-334 (1995)
- [12] Tamaki, E., Miyaki, T., Rekimoto, J.: Possessed Hand: Techniques for controlling human hands using electrical muscles stimuli, In *Proceedings of the 2011 annual conference on Human factors in computing systems*, pp.543-552 (2011)
- [13] Goodwin, G. M., McCloskey, D. I., Matthews, P. B. C.: The contribution of muscle afferents to kinesthesia shown by vibration induced illusions of movement and by the effects of paralyzing joint afferents, *Brain*, **95**, pp.705-748 (1972)
- [14] Jones, L. A.: Motor illusions: What do they reveal about proprioception?, *Psychological Bulletin*, **103**, pp.72-86 (1988)
- [15] Burke, D., Lofstedt, L., Wallin, G.: The responses of human muscle spindle endings to vibration of noncontracting muscles, *J. Physiol (Lond)*, **261**, pp.673-693 (1976)
- [16] Naito, E: Sensing Limb Movements in the Motor Cortex: How Humans Sense Limb Movement, *The Neuroscientist*, **10**, pp.73-82 (2004)
- [17] Lederman, S. J., Jones, L. A.: Tactile and Haptic Illusions, *IEEE Trans. Haptics*, **4**, pp.273-294 (2011)
- [18] 加藤: 腱振動による長さ認識性能の変化, 岐阜大学卒業論文 (2008)
- [19] Roll, J. P., Albert, F., Thyriou, C., Ribot-Ciscar, E., Bergenheim, M., Mattei, B.: Inducing Any Virtual Two-Dimensional Movement in Humans by Applying Muscle Tendon Vibration, *J. Neurophysiol.*, **101**, pp.816-823 (2009)
- [20] Leonardis, D., Frisoli, A., Solazzi, M., Bergamasco, M.: Illusory Perception of Arm Movement Induced by Visuo-Proprioceptive Sensory Stimulation and Controlled by Motor Imagery, In *Proceedings of Haptics Symposium*, pp.421-424 (2012)
- [21] Yaguchi, H., Fukayama, O., Suzuki, T., Mabuchi, K.: Effect of simultaneous vibrations to two tendons on velocity of the induced illusory movement, In *Proc. IEEE Int. Conf. Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, pp.5851-5853 (2010)
- [22] Gandevia, S. C.: Illusory movements produced by electrical stimulation of low-threshold muscle afferents from the hand, *Brain*, **108**, pp.965-981 (1985)
- [23] Macefield, G., Gandevia, S. C., Burke, D.: Perceptual responses to microstimulation of single afferents innervating joints, muscles and skin of the human hand, *J. Physiol.*, **429**, pp.113-129 (1990)
- [24] Roll, J. P., Vedel, J. P., Ribot, E.: Alteration of proprioceptive messages induced by tendon vibration in man: a microneurographic study, *Exp. Brain Res.*, **76**, pp.213-222 (1989)
- [25] Fallon, J. B., Macefield, V. G., Vibration sensitivity of human muscle spindles and golgi tendon organs, *Muscle & Nerve*, **36**, pp.21-29 (2007)
- [26] Burne, J. A., Lippold O. C. J., Reflex inhibition following electrical stimulation over muscle tendons in man, *Brain*, **119**, pp.1107-1114 (1996)
- [27] Priori, A., Berardelli, A., Inghilleri, M., Pedace, F., Giovannelli, M., Manfredi, M., Electrical stimulation over muscle tendons in humans. Evidence favouring presynaptic inhibition of Ia fibres due to the activation of group III tendon afferents, *Brain*, **121**, pp.373-380 (1998)
- [28] Khan, S. I., Burne, J. A.: Inhibitory mechanisms following electrical stimulation of tendon and cutaneous afferents in the lower limb, *Brain Research*, **1308**, pp.47-57 (2010)
- [29] Calvin-Figuère, S., Romaguère, P., Gilhodes, J. C., Roll, J. P.: Antagonist motor responses correlate with kinesthetic illusions induced by tendon vibration, *Experimental Brain Research*, **124**, pp.342-350 (1999)