



腱振動刺激による運動錯覚を用いた 動かないハプティックインタフェースの予備的検討

A Preliminary Investigation of Motionless Haptic Interface using Kinesthetic Illusion Induced by Tendon Vibration

田中叡¹⁾, 牛山奎悟²⁾, 高橋哲史¹⁾, 梶本裕之¹⁾

Satoshi TANAKA, Keigo USHIYAMA, Akifumi TAKAHASHI and Hiroyuki KAJIMOTO

1) 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, {tanaka, a.takahashi, kajimoto}@kaji-lab.jp)

2) 電気通信大学 情報理工学域 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, ushiyama@kaji-lab.jp)

概要：モーションキャプチャ等の全身運動を伴うインタフェースには、広い空間の必要性や怪我の危険といった問題が存在する。この問題を解決するために、腱に振動刺激を与えた際に生じる運動錯覚を利用し、実際には動いていないにも関わらず体を動かした感覚を得られるインタフェースを提案する。本稿ではその可能性を調査するため、前腕の運動のみに限定した予備的な検討を行う。

キーワード：腱振動刺激, 運動錯覚, 自己受容感覚

1. はじめに

バーチャルリアリティ (VR) において、手足をはじめとした身体の動きによってアバタを操作するシステムが広く利用されている。しかし、このようなシステムではユーザが実際に身体を動作させる必要があるため、障害物のない広い空間が要求される、怪我のリスクがあるといった問題が存在する。

一方で、身体が運動していないにもかかわらず運動しているような感覚が生じる現象 (運動錯覚) が存在する。中でも代表的な例として、腱に対して振動を与えることで運動錯覚が生じることが知られている[1]。

そこで本研究では、この腱振動刺激による運動錯覚を応用することで、実際に身体を動かさずともアバタを操作でき、さらに運動しているかのような感覚を得られるインタフェースを提案する。本稿では予備的な検討として、前腕の運動のみを対象とした最小構成の装置について述べる。

2. 関連研究

2.1 腱振動刺激による運動錯覚とその応用

腱振動刺激による運動錯覚は、筋の長さを感じ取る受容器である筋紡錘が振動により発火し、それが筋の伸長と解釈されることで生じると考えられている[1]。この現象に関しては様々な研究が行われており、神経生理学的研究としては、ある程度の周波数までは筋紡錘の神経発火頻度が振動周波数と一致することが報告されている[2][3]。また

心理実験による研究としては、Schofield ら[4]によって振動の振幅や周波数、刺激時の姿勢が感覚に与える影響が調査されている。

さらに、振動を制御して複雑な運動感覚を提示する研究も行われている。たとえば Thyron ら[5]は運動から筋紡錘の発火を予測するモデルを用いて、3 次元的な運動錯覚を生起させている。

腱振動刺激をインタフェースや VR に応用する研究も行われている。たとえば Barsotti ら[6]は、運動イメージを用いた brain-computer interface に、腱振動刺激によるフィードバックを付加したシステムを提案している。本研究と同じく VR における身体運動の削減という目的においては、Hagimori ら[7]が視覚刺激と腱振動刺激を組み合わせることで、VR 内で実際よりも大きな運動を知覚できるという研究を行っている。

2.2 その他の運動錯覚現象

実際の運動を伴わない運動感覚は、腱振動刺激以外の方法によっても生じる。視覚による例として、Lecuyer ら[8]は動かない入力デバイスに加わった力に応じて映像を提示することで、バーチャルなバネの硬さを知覚し、さらにデバイスが動いた感覚が生じたことを報告している。触覚による例として、Okabe ら[9]は指先の剪断力に応じて触覚的流れ場を提示することで、指が移動する錯覚を提示している。また梶本[10]は、本研究と同じく動作の不要な VR を実現するため、腱電気刺激による運動錯覚発生手法を提案して

いる。

3. 提案手法

提案するシステムの概念図を図 1 に示す。本システムはロードセルと計測回路、振動子とアンプ、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) および PC から構成される。ここでは Roll らの実験[11]にならい、横向きに置いた前腕の伸展・屈曲を対象としたが、他の部位および運動に対しても同様の手法が適用できると考える。

ロードセルは固定された台とユーザの手首の間に設置され、前腕を固定すると同時に発揮された力を計測する。その出力は計測回路を介して PC に入力される。

PC では、ロードセルに加わった力に応じてバーチャルな前腕 (以下バーチャル腕と呼称) の動作を計算し、その結果に応じて運動錯覚を生起させるための振動波形を出力する。また、HMD を用いてバーチャル腕の映像 (図 2) を提示する。

振動子は上腕二頭筋および上腕三頭筋の腱付近に各 1 個、計 2 個が装着される。振動子の駆動はアンプを用いて行う。

4. 実装

4.1 装置構成

予備的検討のため、図 3 に示す装置を製作した。振動子 (Acouve Laboratory, Vp210) はサポータを用いて右肘付近に固定した。アンプにはステレオオーディオアンプ (S.M.S.L, SA-60) を用いた。

バーチャル腕の動作計算、HMD (HTC, Vive) を用いた映像提示および全体の制御は、ゲームエンジン Unity を使

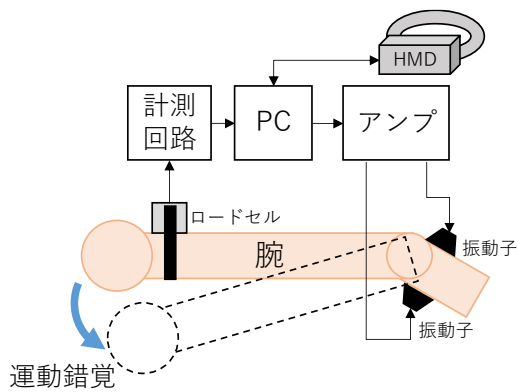


図 1: システムの概念図

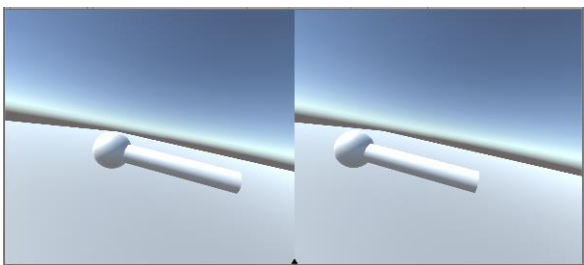


図 2: 提示される映像の例

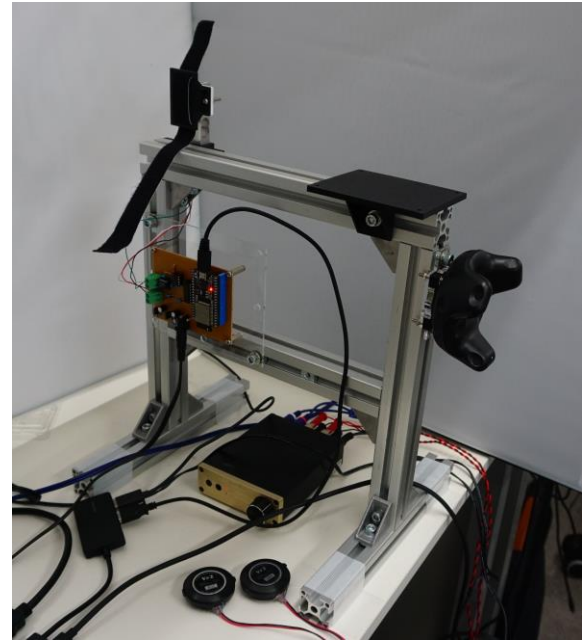


図 3: 製作した装置

用して実装した。波形生成には Pure Data を使用し、Unity からの指令を受ける構成とした。また装置の台座部分にトラッカ (HTC, Vive Tracker) を装着することで、システム起動時に装置の位置を計測し、バーチャル腕の初期位置を現実の腕に一致させた。

計測回路は増幅回路、A/D コンバータ (Microchip, MCP3208) およびマイクロコントローラ (Espressif Systems, ESP32) からなる。計測値を物理的な力に変換する際は、ロードセルの仕様および回路構成から求めた理論式を使用した。

4.2 バーチャル腕の動作

バーチャル腕は、肘関節の角速度がロードセルの計測値に比例するように動作させた。すなわち、ロードセルに加わった力を $F[\text{N}]$ とするとき、肘関節の角速度指令値 $\omega_{command}[\text{deg/s}]$ は

$$\omega_{command} = \alpha(F - F_0) \quad (1)$$

となる。ただし F_0 はロードセルのオフセット (ユーザが力を加えていないときの計測値であり、基本的にシステム起動時の計測値を用いる)、 α は比例定数である。肘関節の角度 $\theta[\text{deg}]$ はこれを積分した値であるが、範囲は $-45^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ に制限した。なお、角度および角速度は伸展方向を正と定義する。

4.3 振動提示

振動波形はバーチャル腕の肘関節における角速度 $\omega[\text{deg/s}]$ から計算される。これは角速度指令値 $\omega_{command}$ とは異なり、角度 θ を改めて微分した値である。したがって、角度が制限範囲に達してバーチャル腕が停止した場合、角速度は 0 となる。

腱振動刺激の波形には、角速度 ω に応じて周波数の変化する正弦波を用いる。これは振動周波数に対応した神経発火が生じるという知見[2][3]や、記録された神経発火

パターンを腱振動刺激で再現する研究[12]にならったものである。ただし本手法では、周波数と角速度の関係は非線形である。具体的には、上腕二頭筋の腱に対する振動周波数 f_{BB} [Hz]は

$$f_{BB} = \begin{cases} 0 & (\beta\omega < 0) \\ f_{max} \sqrt{\frac{\beta\omega}{f_{max}}} & (0 < \beta\omega < f_{max}) \\ f_{max} & (\beta\omega > f_{max}) \end{cases} \quad (2)$$

となる。同様に上腕三頭筋の腱に対する振動周波数は

$$f_{TB} = \begin{cases} 0 & (-\beta\omega < 0) \\ f_{max} \sqrt{\frac{-\beta\omega}{f_{max}}} & (0 < -\beta\omega < f_{max}) \\ f_{max} & (-\beta\omega > f_{max}) \end{cases} \quad (3)$$

である。ただし f_{max} は使用する最大周波数、 β は比例定数である。

5. 予備実験

5.1 方法

簡易的な予備実験として、2名の被験者（研究室のメンバー、23歳から24歳の男性、全員右利き）にシステムを試用してもらった（図4）。その際、前述の式における比例定数は $\alpha = 50, \beta = 4$ とし、振動の最大周波数は先行研究[5]になら $f_{max} = 100$ Hzとした。また、アンプの音量（振動の振幅）はあらかじめ筆者自身で装着して十分な錯覚が生起するように設定した。実験はロードセルに力をかけバーチャル腕を自由に動かしてもらい形で行い、腕が動いている感覚があったか、およびその他の感想を聞いた。

5.2 結果

被験者の1人は屈曲方向に動いている感覚があったが、逆方向はあまり感じなかったと回答した。もう1人は両方向に腕が動いている感覚があったと答えた。

その他、代表的な感想としては、複数回動かしていると感じる時と感じない時があるという回答や、振動が止まった瞬間に位置のずれを感じるという回答があった。また、腕の位置が高い、手首を縛られていることに違和感があるという回答があったため、実験セットアップの改善も必要と考えられる。興味深い感想として腕が痺れそうだという回答や、「動かしたゆえの疲れ」に似た腕の疲れを感じるという回答もあった。

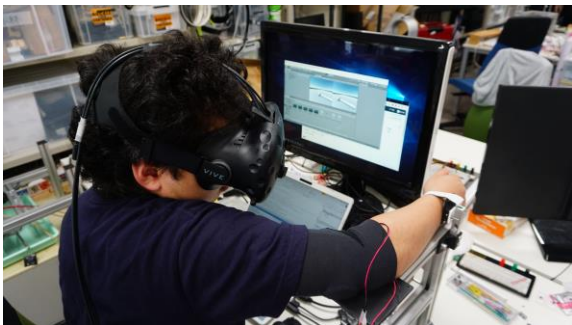


図4: 予備実験の様子

以上より、本システムは運動錯覚の生起が可能であったことが示唆されるが、錯覚の安定性や実験セットアップに関して改良が必要であるといえる。

6. おわりに

本稿では、実際に体を動かすことなくVRを操作し、運動感覚を得られるインタフェースを実現するべく、ロードセルで検出した力に応じてバーチャルな腕を運動させ、それに合わせた腱振動刺激を行う手法を提案した。さらに、製作した装置の詳細や簡易的な予備実験について述べた。

しかしながら現時点では、本手法により運動不要のインタフェースを実現できる可能性を検証するには至らなかった。したがって今後は、提案手法の有用性を確認するための詳細な実験が求められる。さらに、今後は前腕の屈曲・伸展のみならず、より多様な運動に対応できるようにシステムを改良する必要がある。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP18H04110 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] G. M. Goodwin, D. I. McCloskey, and P. B. Matthews, "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, no. 4, pp. 705–748, 1972.
- [2] D. Burke, K. E. Hagbarth, L. Löfstedt, and B. G. Wallin, "The responses of human muscle spindle endings to vibration of non-contracting muscles.," *J. Physiol.*, vol. 261, no. 3, pp. 673–693, Oct. 1976.
- [3] J. P. Roll, J. P. Vedel, and E. Ribot, "Alteration of proprioceptive messages induced by tendon vibration in man: a microneurographic study," *Exp. Brain Res.*, vol. 76, no. 1, pp. 213–222, Jun. 1989.
- [4] J. S. Schofield, M. R. Dawson, J. P. Carey, and J. S. Hebert, "Characterizing the effects of amplitude, frequency and limb position on vibration induced movement illusions: Implications in sensory-motor rehabilitation," *Technol. Heal. Care*, vol. 23, no. 2, pp. 129–141, 2015.
- [5] C. Thyron and J.-P. Roll, "Predicting Any Arm Movement Feedback to Induce Three-Dimensional Illusory Movements in Humans," *J. Neurophysiol.*, vol. 104, no. 2, pp. 949–959, Aug. 2010.
- [6] M. Barsotti, D. Leonardi, N. Vanello, M. Bergamasco, and A. Frisoli, "Effects of Continuous Kinaesthetic Feedback Based on Tendon Vibration on Motor Imagery BCI Performance," *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 26, no. 1, pp. 105–114, Jan. 2018.
- [7] D. Hagimori, S. Yoshimoto, N. Sakata, and K.

- Kiyokawa, "Tendon Vibration Increases Vision-induced Kinesthetic Illusions in a Virtual Environment," in *The 26th IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (Poster)*, 2019.
- [8] A. Lecuyer, S. Coquillart, A. Kheddar, P. Richard, and P. Coiffet, "Pseudo-haptic feedback: can isometric input devices simulate force feedback?," in *Proceedings IEEE Virtual Reality 2000 (Cat. No.00CB37048)*, 2000, pp. 83–90.
- [9] H. Okabe, S. Fukushima, M. Sato, and H. Kajimoto, "Fingertip Slip Illusion with an Electrocutaneous Display," in *International conference on Artificial Reality and Telexistence*, 2011, pp. 10–14.
- [10] 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," 日本バーチャルリアリティ学会第17回大会論文集, 2012, pp. 401–404.
- [11] J. P. Roll and J. P. Vedel, "Kinaesthetic role of muscle afferents in man, studied by tendon vibration and microneurography," *Exp. Brain Res.*, vol. 47, no. 2, pp. 177–190, Jul. 1982.
- [12] F. Albert, M. Bergenheim, E. Ribot-Ciscar, and J. P. Roll, "The Ia afferent feedback of a given movement evokes the illusion of the same movement when returned to the subject via muscle tendon vibration," *Exp. Brain Res.*, vol. 172, no. 2, pp. 163–174, Jun. 2006.