



接触子の材質が運動錯覚に及ぼす影響

Effects of Contact Material on the Induction of Kinesthetic Illusion

小村 啓¹⁾, 本田功輝²⁾

Hiraku KOMURA, and Koki HONDA

1) 九州工業大学 大学院工学研究院 (〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1, komura@cntl.kyutech.ac.jp)

2) 東京大学 大学院新領域創成科学研究科 (〒277-0882 千葉県柏市柏の葉 5 丁目 1-5, khonda@edu.k.u-tokyo.ac.jp)

概要: 腱や筋肉に皮膚の上から振動刺激を与えると、実際の身体運動を伴わずに固有感覚が生起する、運動錯覚という現象が存在する。これまでの研究では、運動錯覚の生起確率の向上や、強い運動錯覚を生起させる方法として、振動刺激の最適な条件（押付力、加速度、周波数）が検討されてきたが、接触子の材質については検討されてこなかった。そこで本研究では、接触子の素材が運動錯覚に及ぼす影響についての調査を行う。

キーワード: 運動錯覚, Tonic Vibration Reflex, Antagonist vibratory response, 固有感覚, 機械インピーダンス

1. 緒言

経皮的に腱・筋に振動刺激を提示すると、その刺激筋と拮抗筋が関わる下記の 3 種類の現象のいずれか、あるいは同時に生起することが知られている。その現象の一つが、刺激筋が伸長するように身体が動いたように錯覚する運動錯覚である。また、刺激筋が収縮して拮抗筋が弛緩し、運動錯覚 [1] [2] で生起する固有感覚とは反対の方向に関節運動が生起する Tonic Vibration Reflex (以後 TVR と表記) [3] も存在する。また、刺激筋が弛緩して拮抗筋が収縮する方向に身体が動く（すなわち、運動錯覚で生起する固有感覚と同じ方向に身体が動く）Antagonist vibratory response [4] [5] (以後 AVR と表記) も存在する。これまでの調査では、これらの現象を選択的に生起させる刺激条件は明らかにされていない。本研究では、接触子の材質でこれらの現象を、選択的に生起可能か否かを明らかにすることを試みる。

2. 実験方法

本研究の目的は、様々な素材の接触子が運動錯覚, TVR, AVR の生起確率に及ぼす影響を明らかにし、運動錯覚の生起確率を最も高めることができる条件を明らかにすることである。以下に、使用した実験装置、接触子、および実験条件について記述する。

2.1 実験装置

本研究で使用した振動提示装置は、過去の研究で使った装置を改良したものを使用した [6] [7]。刺激対象は右手首の橈側手根屈筋および腱とした。橈側手根屈筋に振動刺激を提示した時には、運動錯覚が生起した場合には手首が

伸展方向に動いたような錯覚が生起する。また、TVR の場合には右手首の屈曲方向に反射が生起する。AVR が生起した場合には右手首が伸展方向に動く。この身体の反応を計測するために、図 1 の装置を使用した。



Fig. 1 運動錯覚, TVR, AVR の提示装置

被験者は基本姿勢として、椅子に座り、両手でバーを握る。その際に、右手で握るバーはフォースゲージを介して固定されており、すなわち屈曲方向や伸展方向に加わる力を計測する。また左手で握るバーは手首下のヒンジを中心にして回転する設計となっており、右手で感じた手首の動きを左手で再現してもらい、その動きをロータリーエンコーダで記録する。この装置で運動錯覚が生起した場合には、実際の右手の動きは伴わないため、フォースゲージで計測される右手の力は 0N である。この時に左手で右手の動きを再現してもらい、ロータリーエンコーダで角度として記録した。TVR や AVR に関しては、右手が実際に屈曲方向、あるいは伸展方向に動く現象であるため、右手のバーに加わった力方向でそれぞれの現象の有無を判定した。本実験では、フォースゲージが計測する力が屈曲方向、あるいは

伸展方向に 0.3N 以上加わった際には TVR, あるいは AVR が生起したと判定し, これらの力が生起せず, かつ左手再現角度が伸展方向に 1 度以上の場合には運動錯覚が生起したと判定した.

2.2 接触子

本研究では, ステンレス製, あるいはシリコン製の接触子を使用した. シリコン製の接触子に使われた素材は, Ecoflex 00-10, Ecoflex 00-20, Ecoflex 00-30, Ecoflex 00-50 の 4 種類であり, それぞれ粘弾性が異なる (表 1). この様々な物性のシリコンゴムの中で, 最も運動錯覚の生起確率を高める素材を調査する. 各 Ecoflex は, 直径φ10mm, 長さ 5mm となるように加工を行い, 振動子の振動部位の先端に両面テープで固定して使用した.

Table 1 Ecoflex の物性

	Ecoflex 00-10	Ecoflex 00-20	Ecoflex 00-30	Ecoflex 00-50
粘度 (Pa sec)	14	3	3	8
硬度: デュロメーター A	00-10A	00-20A	00-30A	00-50A
硬度: デュロメーター E	10E	12E	15E	20E

2.3 実験条件

刺激条件は, 正弦波の周波数が 40[Hz], 加速度振幅が 100[m/s²], 初期押付力が 1[N]である. 被験者 1 名に対して, それぞれの接触子の条件において 5 回ずつ実験を行い, それぞれの接触子に対する運動錯覚, TVR, AVR の生起確率を求めた.

3. 実験結果・考察

調査結果を表 2 に示す. これまで使用してきたステンレス製の接触子の場合には, 運動錯覚の生起確率が 20%であった. シリコン素材の接触子の場合でも, 硬度が高いものは運動錯覚の生起確率が 20%であり, 硬度が低くなるほど生起確率が高くなる傾向が示された. そして, Ecoflex 00-10 を使用した場合には, 運動錯覚の生起確率が 100%となった. この結果は, 運動錯覚の生起確率を高める要素として, 接触子の材質が重要な要素の一つであることを示している. 今後は, この根拠を明らかにするために, ヒトの身体の機械インピーダンスに着目し, 接触子の物性との関係などを明らかにしたい. このために, 被験者を増やして調査を進めていく予定である.

Table 2 それぞれの現象の生起確率

	Ecoflex 00-10	Ecoflex 00-20	Ecoflex 00-30	Ecoflex 00-50	金属
KI	100%	60%	60%	20%	20%
TVR	0%	0%	0%	0%	0%
AVR	0%	0%	0%	0%	0%

4. 結論

腱・筋への振動刺激で運動錯覚や TVR, AVR が生起することが知られており, それぞれの現象を選択的に生起させるための方法が検討されている. 本研究では, 接触子の材質に注目し, 運動錯覚の生起確率を高めることが可能な条件があるのか否かを調査した. 調査の結果, Ecoflex 00-10 というシリコンゴムの条件で運動錯覚の生起確率が高くなることが分かった. 今後は, 被験者を増やし, このような結果となった要因についてさらなる検討を行う予定である.

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP24K17241 の助成を受けたものです.

参考文献

[1] G. M. Goodwin and D. I. McCloskey, "Proprioceptive illusions induced by muscle vibration: contribution by muscle spindles to perception?," *Science*, vol. 175, no. 4028, pp. 1382-1384, 1972.

[2] G. M. Goodwin, D. I. McCloskey and P. B. C. 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.

[3] G. Eklund and K. E. Hagbarth, "Normal variability of tonic vibration reflexes in man," *Experimental neurology*, vol. 16, no. 1, pp. 80-92, 1966.

[4] S. Calvin-Figuière, P. Romaiguère and J. P. Roll, "Relations between the directions of vibration-induced kinesthetic illusions and the pattern of activation of antagonist muscles.," *Brain Research*, vol. 881, pp. 128-138, 2000.

[5] S. Calvin-Figuière, P. Romaiguère, J. C. Gilhodes and J. P. Roll, "Antagonist motor responses correlate with kinesthetic illusions induced by tendon vibration," *Experimental Brain Research*, vol. 124, pp. 342-350, 1999.

[6] M. Honda, H. Karakawa, K. Akahori, T. Miyaoka and M. Ohka, "Effects of Different Vibration Stimulus Conditions on Inducing Kinesthetic Illusion and Perceived Intensity," *Transactions of the Virtual Reality Society of Japan (in Japanese)*, vol. 19, no. 4, pp. 457-466, 2014.

[7] H. Komura, T. Kubo, M. Honda and M. Ohka, "Degree of muscle-and-tendon tonus effects on kinesthetic illusion in wrist joints toward advanced rehabilitation robotics," *Robotica*, vol. 40, no. 4, pp. 1222-1232, 2022.