

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：82670

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K20105

研究課題名（和文）空間加重が腱振動刺激による運動錯覚に与える影響の解明

研究課題名（英文）Influence of spatial summation on the illusory movement induced by tendon vibrations

研究代表者

大島 浩幸 (Ohshima, Hiroyuki)

地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター・事業化支援本部地域技術支援部墨田支所・副主任研究員

研究者番号：20751126

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：腱への機械的な振動刺激は、人間の四肢にあたかも自身が関節運動を実施しているような錯覚をもたらす。この現象は、主観的な運動感覚の生成に対する様々な問題を解決する可能性を有しているが、振動刺激と知覚特性との関係が不明確であったため、その手法は確立していない。本研究は、刺激提示部の接触面積と肢位に着目し、振動刺激と知覚特性を体系化することを目的とした。参加者は、錯覚の鮮明さと伸展角度の大きさに関する主観評価を実施した結果、接触面積と肘関節角度の増加に伴い両パラメータが増加することが確認された。以上から、刺激提示部の接触面積と肢位は、運動錯覚の知覚特性に相乗的な影響を及ぼすことが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

卓越した身体技能の習得は、スポーツや身体表現の分野だけでなく、スキルを要求されるあらゆる分野で避けては通れない。本研究の成果により、運動主体の運動感覚の伝達という運動学習における本質的な課題を解決する突破口となる可能性がある。従来の学習者の試行錯誤に依存する学習手法を脱して、スポーツ、リハビリ、技能伝承などあらゆる運動学習領域に対して新たな方法論の確立に向けた基礎的なデータを取得することができた。また、本研究で得られたデバイスは、バーチャルリアリティやハプティクス等の異分野での運動感覚提示デバイスとして広く波及することも期待される。

研究成果の概要（英文）：Tendon vibration causes illusory movement in human limbs, which is a kinesthetic sensation experienced in the absence of any actual joint movement. This phenomenon can be effectively used to generate kinesthetic sensation, which can solve various problems. However, because of the previously unknown relationship between the stimulus and perceptual characteristics, its implementation is limited. This study investigated the synergetic effect of the contact surface area and the joint angle. Participants were asked to take two subjective evaluations of the vividness and range of extension of their elbow-joint angle. During the illusory motion, both parameters increased with the contact surface area and the flexion angle of the elbow joint. Thus, the contact surface area and joint angle had a synergistic effect on the perceptual characteristics of the illusory movement.

研究分野：身体運動科学

キーワード：知覚運動協応 感覚運動変換 深部感覚 感覚入力 知覚運動学習 機械的腱振動刺激 リハビリテーション バーチャルリアリティ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

人間は現実には運動しなくても、腱に機械的な振動刺激を与えることで一人称的に運動した感覚を知覚することが知られている。この現象を運動学習に利用すると、目標とする運動を実施した場合の運動感覚が得られるため、運動学習における道しるべとすることが可能となり、従来の試行錯誤的な運動学習から脱却できる可能性がある。しかしながら現状では、腱への機械的な振動刺激に対する運動錯覚現象の詳細な知覚特性が十分に解明されていないため、提示される運動感覚を自在に制御することが難しく、実用的な運動感覚提示手法の確立に至っていない。そこで本研究は、運動錯覚現象の知覚特性を詳細に検討し、運動錯覚現象の定量的な制御を可能にする振動刺激条件を体系化することを目指して開始された。

2. 研究の目的

本研究の目的は、腱振動刺激により生じる運動錯覚の自在な制御を可能にするために振動刺激と運動錯覚の関係を体系化することである。現状では腱振動刺激に対する運動錯覚の知覚特性が十分に解明されていないため、実用的な運動感覚提示手法の確立に至っていない。本研究では腱に加振機の機械的振動刺激を伝達する接触子の大きさに着目し、振動刺激と運動錯覚の関係を詳細に検討する。

体系化により、運動主体の一人称的な運動感覚の伝達という運動学習における本質的な課題を解決する突破口となり、一人称的な運動錯覚による新規運動学習手法の確立に向けた重要な一歩となる。

3. 研究の方法

本研究は、3つのテーマを各1年の計3年を掛けて順に解決することで研究目的を達成することを目指した。テーマ1は、接触子の大きさの違いが運動錯覚に与える影響を解明するための既存実験系の改良であり、先行研究で開発した刺激量定量化装置に対して本研究遂行に適した改良を行い、同装置が運動錯覚誘発装置として有効であることを確認した。続いて、テーマ2では、接触子の大きさが運動錯覚の質と量に与える影響を解明するための心理物理実験を実施した。最後に、テーマ3では、接触子の大きさと刺激提示部の肢位の組み合わせが運動錯覚の質と量に与える影響を解明するための心理物理実験を実施した。

4. 研究成果

(1) 既存実験系の改良

我々の先行研究では、小型振動装置の接触子の先端に直接に加速度計を取り付けることで腱への機械的な振動を定量化した。この方法では、刺激提示部の接触面積を変更することが困難であった。そこで、本研究では3Dプリンタで造形した接触子の内部に加速度計を搭載し、運動錯覚時の腱の振動を定量化する新たな手法の確立を目指した。本手法の妥当性を検証するため、接触子の内側と外側に加速度計を取り付け、2つの加速度の二乗平均平方根(RMS)値の比を算出した。この比率がほぼ1であれば、従来の接触子の先端に加速度計を取り付ける手法の代わりとなると考えた。

実験参加者

男性2名(28歳, 36歳), 女性3名(42歳, 42歳, 46歳)が参加した。実験参加者には実験参加の前に書面でインフォームドコンセントを行った。本研究は所属機関の倫理審査を経て実施された。

装置と実験設定

手のひらサイズの小型振動装置(WaveMaker-Mobile, 旭製作所社製)を先行研究で開発した刺激量定量化装置に固定した。図1左に示すとおり、実験参加者は他の感覚刺激を軽減するため、アイマスクとイヤーマフを装着した。腕は水平なアームレストの上に置き、肩は90°屈曲、肘は0°屈曲で手のひらを上に向けた解剖学的肢位とした。振動子は、右肘の上腕二頭筋腱上に配置された。

図2に示すとおり、接触子の中央には1軸加速度計(710-D, EMIC社製)を固定するための穴が開いており、上端は振動装置にねじで固定されている。この接触子は、市販の3Dプリンタ(Objet500 Connex3, Stratasys社製)を用いて造形した。図1右は、2つの同型の加速度計の位置を示しており、1つは接触子の内部にねじで固定され、もう1つは接触子の先端に取り付けられている。加速度計は、振動計(UV-16, Rion社製)および多機能入出力装置(USB-6000, National Instruments社製)を介して、PC(VJ27M/C-M, NEC社製)に接続された。両加速度計の出力の記録には、Lab-VIEW 2014(National Instruments社製)を用いた。

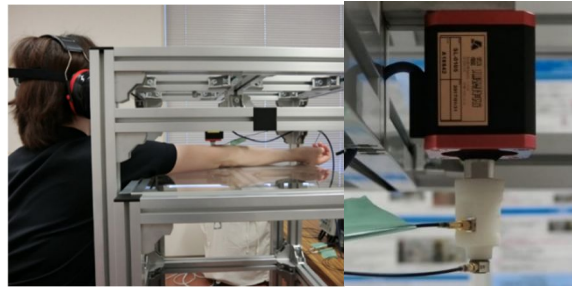


図 1 実験設定（左：肢位，右：接触子と加速度計）

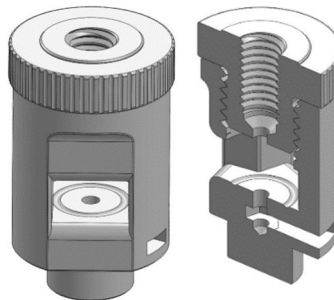


図 2 接触子の 3D モデル

実験刺激

実験参加者の利き腕（右腕）の上腕二頭筋腱に 100 Hz で 30 秒間の振動刺激を提示した。

実験手順

- A) 実験に先立ち，インフォームドコンセントを実施
- B) 実験参加者に，実際に運動することなく肘関節の伸展を知覚することを伝達
- C) 予備実験を実施し，運動錯覚が生じる適切な加速度と部位を確認
- D) 刺激提示後，実験参加者は錯覚の有無を回答

結果および結論

5 名全員が一貫した運動の感覚があったと述べた。表 1 は，接触子の内部と外部で計測した加速度の実効値の比の結果である。この比率が 1.00 であれば，2 つの計測値が完全に一致したことになる。結果は，運動錯覚を経験したすべての参加者で 0.97-1.02 の範囲にあり，3% 以内の近い一致を示した。

実験の結果，提案手法により運動錯覚時の腱への機械的な振動を， $\pm 3\%$ 以内で定量化できることが明らかになった。

表 1 接触子の内外の加速度および RMS 値の比

実験参加者番号	内部の加速度 (m/s ²)	外部の加速度 (m/s ²)	RMS 値の比
#1	99.3	95.9	0.97
#2	104.5	103.7	0.99
#3	100.5	98.9	0.98
#4	119.1	121.5	1.02
#5	142.3	144.0	1.01

(2) 接触子の大きさが運動錯覚の質と量に与える影響の解明

接触面積は振動触覚の閾値に影響を与え，変位の勾配や曲率よりも重要な刺激パラメータであることが知られている。これは空間荷重と呼ばれる。そこで，接触面積の大きさが腱の機械的な振動により引き起こされる運動錯覚の強さなどの知覚パラメータに影響を与えるかどうかを心理物理実験により検討した。

実験参加者

男性 2 名 (29 歳, 37 歳), 女性 3 名 (43 歳, 43 歳, 47 歳) が参加した。実験参加者には実験参加の前に書面でインフォームドコンセントを行った。本研究は所属機関の倫理審査を経て実施された。

装置と実験設定

振動装置および計測装置および肢位は, (1) 既存実験系の改良と同様であった。図 3 に示すように, 加速度計は接触子の内部に搭載した。図 4 に示すように, 接触子は $\phi 5$, $\phi 10$, $\phi 15$, $\phi 20$ mm の 4 種を用いた。

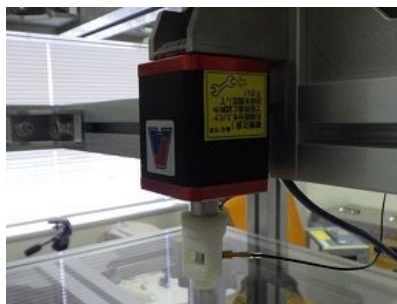


図 3 振動装置, 接触子および加速度計の設定



図 4 実験に用いた 4 種の半径の異なる接触子 (左から, $\phi 5$, $\phi 10$, $\phi 15$, $\phi 20$ mm)

実験刺激

実験参加者の利き腕 (右腕) の上腕二頭筋腱に 100 Hz, 120 m/s^2 で 30 秒間の振動刺激を提示した。接触子は, まず上腕二頭筋腱の大きさに近い $\phi 10$ mm を用い, 次に痛みを感じない最小径の $\phi 5$ mm とした。その後, $\phi 15$ mm と $\phi 20$ mm を順次用いた。

実験手順

- A) ~ C) は, (1) と同様
- D) 刺激提示後, 実験参加者は 2 点の主観評価を回答
 1. 鮮明さ (1: ささやか, 5: はっきり)
 2. 伸展角度の大きさ (1: かすか, 5: 顕著)

結果および結論

表 2 は, 各実験参加者の主観評価の結果である。全実験参加者で, 接触子の大きさが増すほど, 両パラメータの評価が増すことが確認された。

実験の結果, 接触面の大きさが錯覚運動の知覚特性に影響を及ぼすことが明らかになった。

表 2 接触子の大きさと錯覚の鮮明さおよび伸展角度の大きさの関係

実験参加者番号	鮮明さ				伸展角度の大きさ			
	$\phi 10$	$\phi 5$	$\phi 15$	$\phi 20$	$\phi 10$	$\phi 5$	$\phi 15$	$\phi 20$
#1	3	2	4	5	3	2	4	5
#2	3	3	4	5	3	3	4	5
#3	3	1	4	5	3	1	4	5
#4	3	2	4	5	3	2	4	5
#5	3	2	4	5	2	2	4	5

(3) 接触子の大きさと刺激提示部の肢位の組み合わせが運動錯覚の質と量に与える影響の解明

我々の先行研究において, 重力トルクは肢位に依存することに着目し, 刺激提示部の肢位が運

動錯覚の強さなどの知覚パラメータに影響を与えるかどうかを心理物理実験により検討し、肢位の違いが腱への機械的な振動刺激による運動錯覚に影響することを明らかにした。そこで、運動錯覚に対する接触面積と刺激提示部の肢位の相乗効果を心理物理実験により検討した。

実験参加者

男性1名(30歳)、女性3名(44歳、44歳、48歳)が参加した。実験参加者には実験参加の前に書面でインフォームドコンセントを行った。本研究は所属機関の倫理審査を経て実施された。

装置と実験設定

振動装置および加速度計を含む計測装置は、(1)および(2)と同様であった。図5に示すように、肢位は手のひらを上に向けて水平なアームレストに置き、肩は90°、肘は30°の矢状面の屈曲で静止させた。図6に示すように、接触子はφ10、φ15、φ20 mmの3種を用いた。



図5 実験肢位(肘関節30°屈曲)



図6 実験に用いた3種の半径の異なる接触子(左から、φ10、φ15、φ20 mm)

実験刺激

実験参加者の利き腕(右腕)の上腕二頭筋腱に100 Hz、120 m/s²で30秒間の振動刺激を提示した。接触子は、まず上腕二頭筋腱の大きさに近いφ10 mmを用い、続いてφ15 mm、φ20 mmを順次用いた。

実験手順

- A) 実験に先立ち、インフォームドコンセントを実施
- B) 実験参加者に、実際に運動することなく肘関節の伸展を知覚することを伝達
- C) 予備実験を実施し、運動錯覚が生じる適切な部位を確認
- D) 刺激提示後、実験参加者は2点の主観評価を、3つの接触子を相対的に比較し回答
 1. 鮮明さ
 2. 伸展角度の大きさ

結果および結論

表3は、各実験参加者の主観評価の結果である。全実験参加者で、接触子の大きさが増すほど、両パラメータの評価が増すことが確認された。

先行研究の結果と本実験の結果を総合すると、接触面積と刺激提示部の肢位は運動錯覚に対する相乗効果を有することが明らかになった。

表3 接触子の大きさと錯覚の鮮明さおよび伸展角度の大きさの関係

実験参加者番号	鮮明さ	伸展角度の大きさ
#1	A < B < C	A < B < C
#2	A < B < C	A < B < C
#3	A < B < C	A < B < C
#4	A < B < C	A < B < C

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Hiroyuki Ohshima, Shigenobu Shimada	4. 巻 1581
2. 論文標題 Synergetic Effect of Contact Surface Area and Elbow Joint Angle on Tendon Vibration-Induced Illusory Movement	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Communications in Computer and Information Science	6. 最初と最後の頁 63～70
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-3-031-06388-6_9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Hiroyuki Ohshima, Shigenobu Shimada	4. 巻 1499
2. 論文標題 Influence of the Contact Surface Size on the Illusory Movement Induced by Tendon Vibrations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Communications in Computer and Information Science	6. 最初と最後の頁 558～563
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-3-030-90179-0_72	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Hiroyuki Ohshima, Hitoshi Ishido, Yusuke Iwata, Shigenobu, Shimada	4. 巻 1225
2. 論文標題 Development of a Quantification Method for Tendon Vibration Inducing Motion Illusion	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Communications in Computer and Information Science	6. 最初と最後の頁 212～216
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-3-030-50729-9_30	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Hiroyuki Ohshima, Shigenobu Shimada
2. 発表標題 Synergetic Effect of Contact Surface Area and Elbow Joint Angle on Tendon Vibration-Induced Illusory Movement
3. 学会等名 24th International Conference on Human-Computer Interaction (HCI International 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroyuki Ohshima, Shigenobu Shimada
2. 発表標題 Influence of the Contact Surface Size on the Illusory Movement Induced by Tendon Vibrations
3. 学会等名 23rd International Conference on Human-Computer Interaction (HCI International 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroyuki Ohshima, Hitoshi Ishido, Yusuke Iwata, Shigenobu, Shimada
2. 発表標題 Development of a Quantification Method for Tendon Vibration Inducing Motion Illusion
3. 学会等名 22nd International Conference on Human-Computer Interaction (HCI International 2021) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroyuki Ohshima, Shigenobu Shimada
2. 発表標題 The Effects of the Angle of an Elbow Joint on the Latency and Duration when Tendon Vibration Evoke the Motion Illusion
3. 学会等名 The 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大島浩幸, 島田茂伸
2. 発表標題 腱振動刺激による運動錯覚に刺激提示部の姿勢が与える影響の基礎的検討
3. 学会等名 Brain and Rehabilitation 2019 (第26回脳機能とリハビリテーション研究会学術集会・産業技術総合研究所ニューロリハビリテーションシンポジウム2019)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	島田 茂伸 (Shimada Shigenobu)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------