



腱振動刺激による運動錯覚の物体接触による質的制御の検討

Study on Qualitative Control of Vibration-Induced Kinesthetic Illusion by Object Contact

與野航¹⁾, 山崎陽一²⁾, 井村誠孝³⁾

Wataru YONO, Yoichi YAMAZAKI, and Masataka IMURA

- 1) 関西学院大学大学院 理工学研究科 (〒 669-1337 兵庫県三田市学園 2-1, eef06166@kwansei.ac.jp)
- 2) 関西学院大学 感性価値創造インスティテュート (〒 669-1337 兵庫県三田市学園 2-1)
- 3) 関西学院大学 理工学部 (〒 669-1337 兵庫県三田市学園 2-1, m.imura@kwansei.ac.jp)

概要: 本研究の目的は、腱への振動刺激により体が動いたように感じる運動錯覚を利用した力触覚提示技術の確立である。振動刺激提示時に体の一部が物体に接していると運動錯覚と物体接触感覚との複合的な錯覚が生起することに着目し、運動錯覚と他刺激の統合による錯覚の内容と生起条件を明らかにする。左手示指第3関節屈曲運動錯覚と同指末節への物体接触感覚を同時提示する実験の結果、物体接触位置に応じて物体から受ける抵抗感に有意な差が見られた。

キーワード: 腱振動刺激, 運動錯覚, 相互作用, マルチモーダル

1. はじめに

運動錯覚とは、腱への刺激により、実際の運動を伴わない運動感覚が生じる現象である。運動錯覚は神経機能回復の促進を目的とするニューロリハビリテーションの研究にてツールとしての使用や、ハプティックデバイスへの応用が研究されている [1][2]。また、運動錯覚が生起中に外界物体に体が接していると、運動錯覚と外界物体接触感覚との相互作用により、錯覚の変質が生じることが報告されている [3][4]。よって運動錯覚を用いたハプティックデバイスは、他刺激との複合的な感覚提示により、より多様な錯覚を非運動状態のユーザに提示可能なことが期待される。しかし、運動錯覚と他刺激との統合により生じる錯覚の内容とその生起条件は明確でない。本研究では、運動錯覚と物体接触感覚との統合により生じる錯覚の内容とその生起条件を明らかにすることを目的とする。

2. 調査方法

本研究は左手示指第3関節の屈曲運動錯覚と同指への物体接触感覚との統合による錯覚の内容とその提示条件を明らかにすることを目的とする。

運動錯覚を提示するためには、脱力状態にあることや、錯覚提示部位を見ないこと、腱への振動刺激が必要である。運動錯覚の強度に関係すると考えられている要素は、腱の固有振動数や振動数、振幅、接触子の押し込み力などが挙げられる [1]。本研究では、振動数、振幅、押し込み力の3要素に注目し腱振動刺激条件を決定する。製品化されている振動デバイスは振動数と振幅がトレードオフの関係にあり、振動数と振幅を独立に調整することができない。よって、3要素を独立に変更可能な、振動刺激提示デバイスを作成した。

本稿では、生起させる運動錯覚を1種にし、物体接触位置の違いにより生起する錯覚に着目する。まず物体接触位置6か所に対して生起する錯覚の調査を行い、結果に基づいて物体接触箇所を2か所に限定し生起する錯覚のより詳細な評価を行う。

3. 実験環境

実験協力者は腱振動刺激デバイスの振動部が左手示指総指伸筋・示指伸筋の腱上でMP関節の近位側に当たるよう両腕を前方の台座にのせ、高さを調節可能な椅子に楽な姿勢になるように座る(図1)。

腱振動刺激デバイスの構造を図2に示す。腱振動刺激デバイスは回転部と振動部からなり、回転部が振動部を押し込むことにより振動刺激を提示する。回転部はモータ、エンコーダ、偏心カムからなり、偏心カムは振幅の決定と、振動部を押し込む役割を持つ。

回転部のモータ(CN22-06001, キヤノンプレジジョン)は、無負荷回転数が11000 rpmであり、この時の振動数は183 Hzである。運動錯覚が生起しやすい振動数は50 Hzから120 Hzの間であり、必要な振動の提示が可能である。エンコーダはフォトマイクロセンサ(EE-SX670, オムロン)と直径30 mmの円形アクリル板からなる。円形アクリル板は、半分が光を透過し、半分は透過せず、モータの回転角に応じてフォトマイクロセンサの出力を変更する。エンコーダはモータの1回転に対し1周期の矩形波を出力する。エンコーダの出力はRaspberry Pi 3にてモータの回転周波数の計算に用いられる。

振動部のロードセル(LMA-A-5N, 共和電業)は接触子の押し込み力の計測に用いる。ロードセルから得られた信号は計

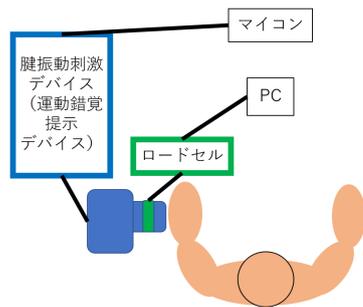


図 1: 実験環境

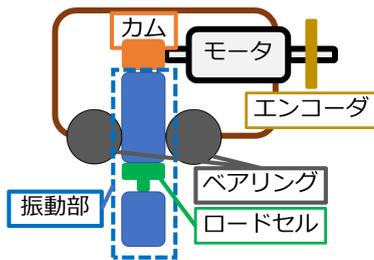


図 2: デバイス構造

装アンプ (LT1167, LINEAR TECHNOLOGY) を用いて増幅し, I/O Terminal (AIO-160802AY-USB, CONTEC) を通して付属のソフトウェアにて記録した。

4. 相互作用錯覚調査

本調査の目的は, 左手示指第 3 関節屈曲運動錯覚と同指への物体接触感覚との同時提示によって生じる錯覚の調査である。

4.1 方法

示指に物体を接触させた状態で運動錯覚を提示し, 生じた錯覚の内容をインタビュー形式で記録した。接触させる物体はアクリル製の直径 25 mm の円柱である。物体接触位置は左手示指の手背 (dorsal), 手掌 (palm) 側の各末節 (distal), 中節 (middle), 基節 (proximal) の計 6 か所である (図 3)。提示箇所 6 か所に対して 1 か所ずつ物体を接触させた状態で運動錯覚を生起させた。提示した腱振動刺激条件は, モータにかかる電圧を 10 V, 全振幅を 2 mm, 押し込み力を 1 N とした。

4.2 結果

実験協力者が自由に表現した錯覚をまとめた結果を表 1 に示す。実験の結果, 物体接触位置が手背側の場合に物体

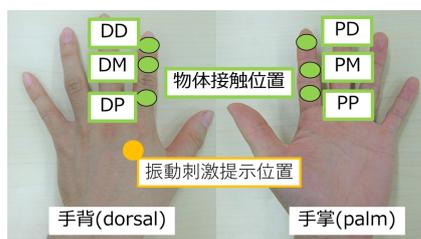


図 3: 物体接触箇所

表 1: 相互作用錯覚調査結果

錯覚内容	DD	DM	DP	PD	PM	PP
物体に押されている	5	5	2	0	0	0
物体を押している	0	0	0	4	4	3
比較的高速で曲がる	2	1	1	0	0	0
比較的低速で曲がる	1	0	0	1	1	1
爪付近に力を感じる	0	1	0	0	0	0
物体が柔らかくなる	0	0	0	0	1	1

に押されている感覚, 手掌側の場合物体を押す感覚が主に生じた。また, 生じた錯覚内容は, 押す押されるなどの力覚系, 物体を接触させない場合と比較して高速, 低速で曲がるといった速さ系, 物体が柔らかくなるなどの触覚系の錯覚が存在した。

4.3 考察

物体接触位置が第 3 関節に近い DP, PP において, 物体を押す, 物体に押される感覚が生じた実験協力者数が少ないことが見て取れる。この理由として, 提示した運動錯覚の動きを第 3 関節を中心とした回転運動と考え, 接触物体から受ける力を一定とすると, 第 3 関節に生じるモーメントは物体接触位置と関節との距離に比例すると考えられる。DP, PP への物体接触ではモーメントが小さくなり, その結果物体を押す, 物体に押される感覚が生じにくいのではないかと考えられる。

5. 相互作用錯覚評価

本実験の目的は 4.2 節で得られた錯覚を基に作成した質問紙による定量的評価である。

5.1 アンケート項目

相互作用調査で得られた錯覚をもとに作成した質問紙の内容を表 2 に示す。実験協力者は質問 1 について「遅い」, 「変わらない」, 「速い」の 3 択, 質問 2 について「手の平側により曲がった」, 「変わらない」, 「手の甲側により曲がった」の 3 択, 他の全質問について「なかった」, 「少しあった」, 「まあまああった」, 「かなりあった」の 4 択より選択した。質問 1, 2 は物体接触なしの運動錯覚と比較して回答した。

5.2 実験手順

提示する運動錯覚は左手示指第 3 関節屈曲運動錯覚であり, 物体接触位置は同指末節の手背側, 手掌側の 2 か所である。実験協力者は右利きの男性 9 名であり, 各実験協力者から 2 組の回答を得た。

実験協力者は両腕を前方の台座に乗せた状態で高さを調整可能な椅子に座った。振動刺激提示個所に腱振動刺激デバイスの振動部を接触させ, 左肘の角度を 110 度に調整した。振動刺激提示個所と振動部との間の押し込み力を 1 N に調整した。実験協力者に閉眼と常に脱力するよう指示し, 物体を接触させない状態で振動刺激を 5 回提示した。その後, 物体を示指の末節に接触させ, 同振動刺激を提示した。提示した振動刺激は, 振動数 50 Hz, 全振幅 2 mm である。

表 2: 相互作用調査質問紙

- 1 基準と比較して指が曲がる速さはどのようでしたか。
- 2 基準と比較して指の曲がった最大角度はどのようでしたか。
- 3 物体に引っ張られるような感覚はありましたか。
- 4 物体が指を迫従するような感覚はありましたか。
- 5 物体に押されるような感覚はありましたか。
- 6 物体を押すような感覚はありましたか。
- 7 物体を引っ張るような感覚はありましたか。
- 8 物体から受ける抵抗感はありましたか。
- 9 物体に引っ張られるような感覚はありましたか。
- 10 物体を押しているが動かない感覚はありましたか。
- 11 物体に押されているが動かない感覚はありましたか。
- 12 爪付近に、指が引っ張られるような力を感じましたか。

表 3: 回答結果平均値

	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
手掌	0.89	1.1	0.44	0.11	1.0	1.6
手背	1.2	0.67	1.0	1.0	1.8	0.78
	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12
手掌	0.11	2.0	0.22	1.3	0.56	0.44
手背	0.22	1.0	0.56	0.67	0.22	1.0

5.3 結果

手掌側、手背側の各質問への回答の平均値を表 3 に、平均値と分散を図 4 に示す。図 4 のエラーバーは分散を示す。各回答の点数は、質問 1 について、「遅い」「変わらない」「速い」に対して 0 から 2 点、質問 2 について「手のひら側に曲がった」「変わらない」「手の甲側により曲がった」に対して 0 から 2 点、他の質問について、「なかった」から「かなりあった」まで 0 から 3 点である。

手掌側、手背側でそれぞれ質問 6、質問 5 で比較の高い値が得られ前節と同様に手掌側では物体を押す感覚、手背側では物体に押される感覚が生起する傾向が見られた。また、質問 7 では手掌側と手背側の平均値の差が小さかった。手掌側、手背側に物体が接している場合の両方で物体を押

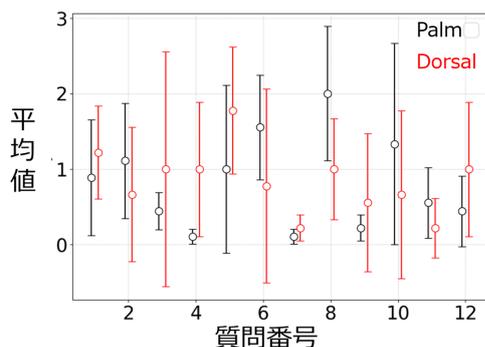


図 4: 実験結果

す感覚、物体に押される感覚の両方が生起している実験協力者が、手掌側で 9 人中 5 人、手背側で 9 人中 3 人確認された。

各質問について、手掌側と手背側の点数の t 検定を行った結果、質問 4 と 8 にて有意な差が見られた ($p < 0.05$)。

5.4 考察

表 1 において、物体を押す感覚、物体に押される感覚が多く見られたが、これは手掌側の質問 5、手背側の質問 6 が対応し、物体接触により生起しやすい錯覚であると考えられる。

また、相互作用錯覚調査では物体を押す感覚と物体に押される感覚が同時に生起した場合は存在しなかったが、質問 5、6 について同時に「なかった」以外を実験協力者が回答している場合がある。実験協力者から、「物体を押すときに物体に押されていて区別されにくい」という意見があったため、生じる感覚に関して物体と人のどちらが主体で感覚が生じているのかを明確に問えていないことが原因であると考えられる。またこのことから、手掌、手背側で物体と示指の位置関係に変化が無い状態の下、生起した錯覚は物体主体で感覚的な動作が生起しているのか人主体で生起しているのか区別して知覚されていることがわかる。

6. おわりに

本稿では、左手示指第 3 関節の屈曲運動錯覚と同指への物体接触感覚との統合による錯覚について調査と、同運動錯覚と同指末節への物体接触感覚との統合による錯覚の評価を行った。錯覚調査の結果、物体の接触箇所が手掌、手背側でそれぞれ、物体を押す感覚、物体に押される感覚が主に生起し、錯覚評価の結果、手掌側と手背側で「物体が指を迫従するような感覚」「物体から受ける抵抗感」について、有意な差が見られた。

参考文献

- [1] 本多正計, 唐川裕之, 赤堀晃一, 宮岡徹, 大岡昌博: 卓上型運動錯覚誘発・評価装置の開発, 日本機械学会論文集, Vol. 80, No. 820, 2014.
- [2] 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.
- [3] 内藤栄一: 身体運動像の獲得に体性感覚入力果たす役割-ニューロイメージング研究から-, バイオメカニズム学会誌, Vol. 31, No. 4, pp. 178-186, 2007.
- [4] Ely Rabin, Andrew M. Gordon: Prior experience and current goals affect muscle-spindle and tactile integration, Experimental Brain Research, Vol. 169, pp. 407-416, 2006.