

早稲田大学審査学位論文  
博士（人間科学）  
概要書

腱振動刺激による運動錯覚特性の  
人間工学的評価

Ergonomic Evaluation  
Regarding Property of Kinesthetic Illusion  
by Vibration Stimuli on Human Tendon

2017年1月

早稲田大学大学院 人間科学研究科  
梅沢 侑実  
UMESAWA, Yumi

研究指導教員： 藤本 浩志 教授

ヒトの筋肉の腱に機械的振動を与えると、当該筋が伸張する方向に、関節が動くように錯覚する。例えば、上腕二頭筋の腱に振動提示を行うと、肘関節が伸展したように錯覚する。この腱振動刺激により生起する運動感覚の錯覚(以下、運動錯覚)は、実際の動きはない状態で関節が動く感覚のみを提示でき、錯覚時に、実際の運動実行時と同様の神経活動がみられるという特徴がある。このことから、運動錯覚を工学的に利用し、任意の運動感覚を提示できるインタフェースデバイスが開発できれば、エンターテインメントやリハビリテーションの領域における応用が期待できる。しかし、腱振動刺激を用いた運動錯覚では、錯覚を工学的に利用するための基礎的知見が不十分であった。具体的には、錯覚生起に影響を与える刺激要因と錯覚生起に適したそれらの条件、刺激開始から錯覚生起までの反応時間や最大錯覚角度といった錯覚特性に関する知見は、運動錯覚を工学的に利用する上で必要な知見であるが、詳細には調べられていなかった。また、運動錯覚に関する先行研究では、単関節の伸展、または屈曲運動錯覚に着目した研究が多い。単関節の単純な運動のみではなく、日常生活における実際の運動のように、複数の関節を協調させた複雑な運動錯覚を生起させることが可能であるかについても、運動錯覚の用途やインタフェースデバイスの仕様を決める際に必要となる知見である。

そこで本研究では、特に上肢の関節に着目し、腱振動刺激による運動錯覚について、人間工学的評価を行い、運動錯覚の工学的利用に向けた基礎的知見を取得することとした。そのために、3つの研究課題を設定した。1つ目の研究課題は、運動錯覚生起に影響を与える刺激要因と、錯覚生起に適したそれらの各条件を明らかにすることである。2つ目の研究課題は、刺激提示から錯覚生起に要する反応時間や最大錯覚角度の錯覚特性を、上肢の各関節において明らかにすることである。3つ目の研究課題は、複数関節を協調させるような、複雑な運動錯覚生起の可否について、確認することである。上述した3つの研究課題について明らかにするため、本研究においては、4つの実験を実施した。それぞれ1章に1つの実験を対応させたため、本論文は、序論と結論を含めて、全6章で構成される。

第1章では、本研究の背景と目的、本研究で着目した腱振動刺激による運動錯覚の基礎知識と、本論文の構成について述べた。

第2章では、複数の刺激要因が運動錯覚の生起に与える影響を明らかにする実験を行った(研究課題1)。先行研究では、肘伸展錯覚に着目し、振動周波数が錯覚生起に影響を及ぼすこと、また、肘伸展錯覚の生起に適した振動周波数条件が明らかになっていた。そのため、本実験では、振動周波数に加え、振動振幅、押し込み力が錯覚の生起に及ぼす影響を明らかにするために、各条件を統制可能な実験装置を構成し、実験を実施した。なお、本実験は早稲田大学の「人を対象とする研究に関する倫理審査委員会」の承認を得て実施した(承認番号2012-186(2))。錯覚を生起させる身体部位は、先行研究においても錯覚の生起が確認されている肘関節とし、条件を統制した振動刺激を上腕二頭筋の腱にランダムに提示し、条件ごとの錯覚生起率、明瞭度を比較し

た。その結果、運動錯覚の生起には、振動周波数が錯覚生起に適した範囲であれば、振動振幅、押し込み力の増加に伴い錯覚生起率、明瞭度が増加し、一定以上大きくなると錯覚生起率、明瞭度に変化がみられないことがわかった。さらに、錯覚生起率、明瞭度が高くなった各条件の組み合わせで、肘伸展錯覚の最大錯覚角度を計測すると、約 30 度だった(研究課題 2)。また、振動周波数によって最大錯覚角度が異なることが示唆された。第 2 章の結果から、次章以降では振動振幅と押し込み力を予め錯覚生起に適した範囲に統制し、振動周波数のみを実験因子とすることにした。

第 3 章、第 4 章では、細やかな運動を行う手指関節と、粗大な運動を行う肩関節に着目して、運動錯覚の生起に適した振動周波数条件(研究課題 1)と錯覚特性(研究課題 2)を明らかにした。具体的に、手指関節では総指伸筋の腱、肩関節では広背筋の腱に振動周波数の異なる刺激を提示し、錯覚生起率、明瞭度、反応時間、最大錯覚角度を調べた。なお、本実験は早稲田大学の「人を対象とする研究に関する倫理審査委員会」の承認を得て実施した(承認番号 2014-264, 2014-243)。実験の結果、手指関節では 70~130Hz で錯覚生起率、明瞭度が高まった。反応時間は約 5 秒であり、最大錯覚角度は約 40 度だった。また、肩関節では 70~110Hz の条件で錯覚生起率が 100%に近くなり、明瞭度も高まった。このときの反応時間は約 8 秒であり、最大錯覚角度は約 30 度であった。

第 5 章では、肘・肩の二関節に同時に刺激提示を行い、両者を協調させた運動錯覚生起の評価実験を実施した(研究課題 3)。具体的には、まず、肘・肩の二関節に同時に刺激提示を行うことを可能とする装置を開発した。次に、開発した装置を用いて、肘関節の伸展・屈曲錯覚、肩関節の水平伸展・水平屈曲錯覚を組み合わせ、二次元平面上に正円や正三角形等の図形を描くような錯覚を生起させた。その結果、提示図形によっては、二関節を協調させて図形を描くような錯覚が、約 7 割の確率で生起可能であることを確認した。

第 6 章では、第 2~5 章で得られた研究成果を統括し、本研究によって得られた知見と意義についてまとめるとともに、今後の展望について論じた。

以上述べてきたように、本研究において、腱振動刺激による運動錯覚について人間工学的評価を行い、運動錯覚の工学的利用に寄与する基礎的知見を得ることができた。具体的には、振動周波数、振動振幅、押し込み力が錯覚の生起に与える影響と、錯覚生起に適したそれらの各条件を明らかにした。また、錯覚生起の反応時間や最大錯覚角度の錯覚特性を上肢の各関節で明らかにした。これらの研究成果は、腱振動刺激による運動錯覚を工学的に利用する際に有用な知見となる。さらに、肘・肩の関節に同時に刺激提示可能な装置を独自に開発し、開発した装置を用いて二関節を協調させた運動錯覚の生起を確認し、複数関節を協調させる複雑な運動錯覚も生起できる可能性を示した。本研究で得られた知見が、運動錯覚を工学的に利用する際に活用され、ヒトの運動感覚を利用した、新たなインタフェース開発につながることを期待したい。