

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 28 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03165

研究課題名（和文）立位動作の運動学習に及ぼす筋シナジーの構築機序の解明

研究課題名（英文）Identification of muscle synergy in human standing based on motor learning

研究代表者

神崎 素樹 (Kouzaki, Motoki)

京都大学・人間・環境学研究科・教授

研究者番号：30313167

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,400,000円

研究成果の概要（和文）：視覚系に外乱を与え、立位制御における視覚情報と運動との関係を反映した内部モデルがどのように修正されるのかを検討した。足圧中心位置が実際の足圧中心位置から反時計回りに回転するような回転外乱を用いた。視覚外乱により立位は不安定になり、外乱が消失しても立位は回転とは逆方向に傾いた。これら結果より、視覚運動変換の修正が立位制御に与える学習効果について明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ヒトの二足立位は、前庭系・視覚系・体性感覚系の情報をもとにした制御が必要であり、運動学習による影響を明確にするには複雑な課題である。本研究は、立位制御に与える学習効果を検討した初めての研究でありその学術的意義は大きい。高齢者の立位バランスの低下は視覚情報の減退が要因との指摘がある。本研究の結果、立位バランスの不安定さの主因および立位不安定からの改善が明確になり、高齢者の転倒予防の観点からその社会的意義は極めて大きい。

研究成果の概要（英文）：Using the visuomotor transformation task and visual disturbance due to optical flow, present study investigated how the internal model that reflects the relationship between visual information and motor control in standing posture is modified. The former is a rotational disturbance in which the position of foot center of pressure displayed on the screen rotates counterclockwise around the reference point from the actual position of foot center of pressure, and the latter is a rotation disturbance in which the dots displayed on the head mount display stand. It is designed to rotate counterclockwise according to the position in the front-back direction. The standing position became unstable by rotational disturbance, and even if the rotational disturbance disappeared, the standing position tilted in the opposite direction to the rotation. From these results, it was clarified about the learning effect that the modification of visuomotor transformation has on the standing control.

研究分野：運動制御

キーワード：運動制御 二足立位 視覚運動変換 オプティカルフロー 足圧中心動揺

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

高齢者や神経疾患の患者のように立位動作が不安定である場合、これを改善することが高齢者の転倒予防、さらには QOL 向上に直接的あるいは間接的につながる。これまで、筋力トレーニングなどにより立位不安定性を改善する試みが行われてきたが、立位安定性の機序が不明なことから立位動作が不安定な人に対する処方未解明である。冗長かつ複雑な立位動作が筋シナジーにより効率的に達成されていることから脊髄内の神経システムの再構築が立位不安定性を改善させると考えられる。

ヒトの運動の獲得はいかにして得られるのかについて、長年多くの研究がなされてきた。ヒトが動作を行う際、身体の状態や周囲の環境は時々刻々変化するため、運動目標に対して正しい指令を構築する脳の内部モデルは、運動の結果出力されるエラーのフィードバックに基づいて随時更新される必要があり、このプロセスこそが運動学習である。しかしながら、ヒトの二足立位は、内部モデルの修正だけでなく、動作中の体性感覚・視覚・前庭感覚のフィードバック情報により制御がなされているため、これらの情報をどのように統合して、様々な環境に中枢神経系が立位制御機構を適応させているのかは未だ明らかとなっていない状況である。

運動学習により神経システムが改善することがよく知られていることから、運動学習により立位不安定性が改善され、その機序も明確になると考えられる、しかしながら、運動学習に関する研究はリーチング動作など上肢の運動にのみ限定されてきたが、より複雑な下肢および体幹の運動である立位安定性に及ぼす運動学習の効果は未解明である。

### 2. 研究の目的

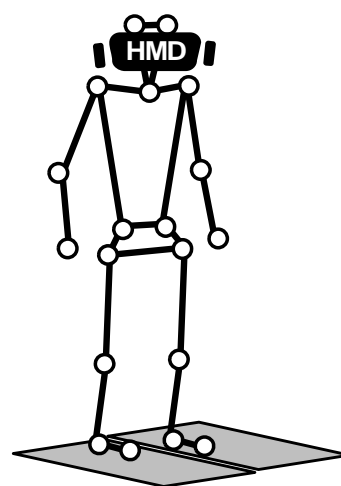
立位安定性に及ぼす運動学習効果を明らかにするために、本研究では、(1) 視覚運動変換課題および(2) オプティカルフローによる視覚外乱を用いた。これら外乱により、立位姿勢制御における視覚情報と運動との関係を反映した内部モデルがどのように修正されるのかを明らかにし、新たな内部モデルの獲得が立位姿勢制御に与える影響について検証することを目的とした。

### 3. 研究の方法

両実験とも、京都大学大学院人間・環境学研究科人間情報・動物実験倫理委員会より承認を得て(承認番号: 20-H-16、20-H-25)実施された。

#### (1) 視覚運動変換課題を用いた立位制御に及ぼす運動学習の効果

被験者はヘッドマウントディスプレイを装着した状態(右図)で床反力計上に立ち、画面に表示された自身の足圧中心位置を移動するターゲットに向かって追従させる視覚追従課題を行った。ターゲットは、前後方向のみの移動とし、周波数 0.25Hz で正弦波状に連続的に移動するものとした。1 周期を 1 試行とし、6 試行を 1 ブロックとした。最初の 10 ブロックは慣れるための試行で、11 ブロックから 19 ブロックまでをベースライン試行とした。20 ブロックから 29 ブロックは、ターゲットについて 1 試行あたり 0.5 度の反時計回りの回転外乱を与え、60 試行かけて基準点周りに 30 度回転させた。30 ブロックから 45 ブロックまでは、全て 30 度の回転外乱を与えた。46 ブロックから 55 ブロックでは、回転外乱を与えないウォッシュアウト試行とした。全ての試行について、足圧中心位置の軌跡とターゲットの軌跡とのなす角度をエラーとして算出した。



#### (2) オプティカルフローを用いた立位制御に及ぼす運動学習の効果

被験者はヘッドマウントディスプレイを装着した状態(右上図)で床反力計上に立ち、被験者の頸椎 7 番と仙骨に反射マーカ貼付し、三次元位置座標を赤外線カメラ 6 台から実時間で計測した。オプティカルフローは、被験者に装着したヘッドマウントディスプレイに表示した。ヘッドマウントディスプレイ上に映し出された仮想環境内で幅 2.4m x 高さ 2.0m のスクリーンを被験者の 0.7m 前方に配置した。スクリーンは黒の背景とし、直径 18mm の 9 種類の色(白、赤、紺、濃い緑、薄緑、ピンク、黄色、紫)の円形ドットを均一な密度でランダムに配置した。スクリーン内の映像は、被験者の足首を回転中心として、前額面上で回転させた。回転速度は、被験者の前方への姿勢動揺の振幅に応じて 0~48 [度/秒] の間で変化させた。プロトコルは、

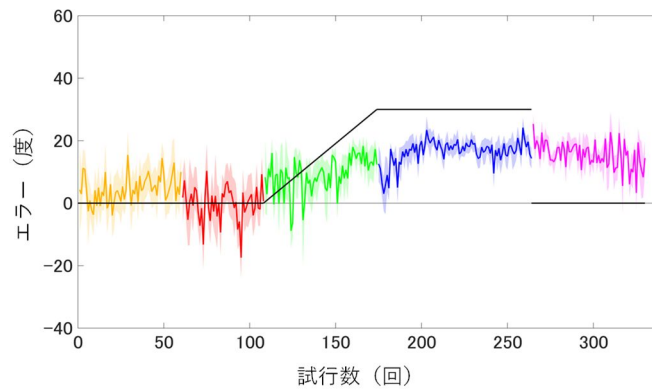
ドットを表示しない条件を 60 秒間（ブロック 1、ベースライン試行）ドットを表示して回転させない条件を 30 秒間（ブロック 2）姿勢動揺に応じて視覚外乱を与える条件を 30 秒間（ブロック 3）ドットを表示しないキャッチトライアルを 8 秒間（ブロック 4）ドットを表示しない条件を 180 秒間（ブロック 5、ウォッシュアウト試行）とした、なお、ブロック 3 とブロック 4 を 1 セットとし、これを 12 セット行った。キャッチトライアル試行（ブロック 4）およびウォッシュアウト試行（ブロック 5）の身体動揺について解析を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 視覚運動変換課題を用いた立位制御に及ぼす運動学習の効果

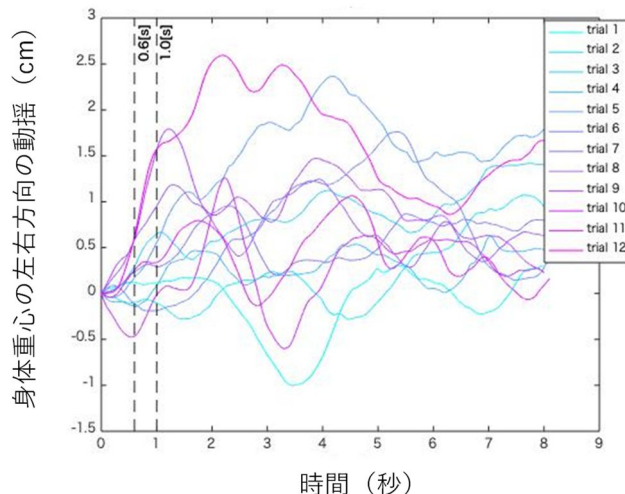
慣れ試行（オレンジ色）、ベースライン試行（赤色）、徐々に回転外乱の角度が大きくなる試行（薄緑色）、全て 30 度の回転外乱を与えた試行（青色）、ウォッシュアウト試行（マゼンダ色）の足圧中心の軌跡とターゲットのなす角度の変化を下図に示した。

ベースライン試行（赤色）では、エラーはほぼ 0 度であり、被験者は課題を正確に遂行することができた。視覚外乱により足圧中心は時計回りに傾き（薄緑色）、30 度の反時計回りの外乱（青色）において、反時計回りに約 20 度身体が傾いた。これは回転外乱により立位動作の適応が起こったことを意味している。また、回転外乱を与えないウォッシュアウト試行（マゼンダ色）では、エラーは 0 度に戻る傾向を示し、これは回転外乱により立位制御の学習効果が存在することを意味している。

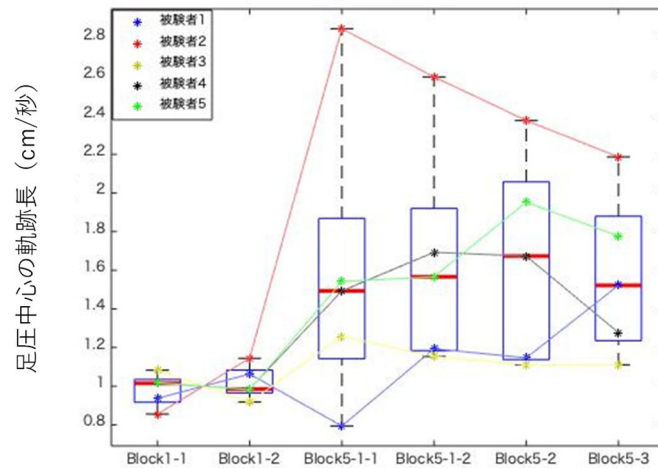


##### (2) オプティカルフローを用いた立位制御に及ぼす運動学習の効果

下図は、キャッチトライアルの 12 試行の左右方向の身体重心動揺を示している。縦軸のマイナスは外乱方向を示し、プラスは外乱方向とは逆の修正方向を示している。試行が進むに連れてオプティカルフローによる視覚外乱とは逆方向へ身体重心が移動する傾向が見られた。さらに、試行を重ねる毎に、修正方向への身体の傾きが大きくなった。これら結果は、オプティカルフローによる視覚外乱により立位動作の適応がおこったことを意味している。



オプティカルフローによる視覚外乱前（ブロック 1）と外乱後（ブロック 5）の足圧中心動揺の二次元平面における単位時間あたりの軌跡長について比較した（下図）。外乱前にくらべ外乱後は足圧中心動揺の軌跡長が長くなり、その程度には個人差が大きかった。ブロック 5 において、時間とともに足圧中心動揺の軌跡長が小さくなり外乱前の値に収束する傾向にあったが、この結果についても個人差が大きかった。修正の早い被験者は元の立位制御に収束する戦略をとること、修正の遅い被験者は新たな立位制御を選択する戦略をとると考えられる。これら結果は、オプティカルフローによる視覚外乱により立位制御機構に適応が起こったこと、さらにこの機構に学習効果が存在することを意味している。



#### 本研究のまとめ

本研究では、立位安定性に及ぼす運動学習効果を明らかにするために、視覚運動変換課題およびオプティカルフローによる視覚外乱を用いた研究を行った。いずれの研究においても、視覚外乱により立位動作の適応が起こった。ヒトの二足立位は、前庭系・視覚系・体性感覚系の情報をもとにしたフィードバック情報により制御がなされているため、極めて複雑な制御である。そのため、運動適応や運動学習に関する研究は、上肢の運動に限定されていた。しかしながら、本研究により二足立位動作においても外乱による適応が起こることが明らかになった。さらに、視覚外乱を停止したところ、外乱時とは逆の適応が起こった。これは、外乱により立位動作の運動学習が行われたことを意味している。これら本研究の結果より、視覚運動変換およびオプティカルフローを用いた視覚外乱により、立位制御における視覚情報と運動出力との関係を反映した内部モデルが修正され、新たな内部モデルの獲得が立位姿勢制御に影響を及ぼすことが明らかになった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 青位茉穂、神崎素樹
2. 発表標題 視覚運動変換課題による立位制御機構の学習メカニズムの解明
3. 学会等名 日本体力医学会第33回近畿地方会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐々木文、神崎素樹
2. 発表標題 外乱に対するライトタッチの姿勢制御への効果
3. 学会等名 日本体力医学会第33回近畿地方会
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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------