

令和 6 年 6 月 26 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03343

研究課題名（和文）不安定な動作からの転倒回避の学習過程における冗長性制御戦略の解明

研究課題名（英文）Redundant strategy in motor learning process for preventing a fall from unstable movement

研究代表者

神崎 素樹 (Motoki, Kouzaki)

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） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：立位姿勢から歩行動作への移行期の不安定な動作からの転倒回避に関する運動制御則を明らかにするために、1) 静止立位中に様々な方向へのステップ動作、2) 高さの異なる跨ぎ動作の下肢筋の適応過程を検討した。1) ステップ動作において方向により筋シナジーの重みが異なった。前方向に関してつま先の座標に視覚回転外乱を与えたところ、筋シナジーの活動を調節することで下肢の動作の適応が観察された。2) 筋シナジーの活動度によりまたぎ動作の高さを制御していることが観察された。本研究により、立位動作から歩行動作への移行期の動作は、筋シナジーにより簡略化され、動作の適応に筋シナジーが関与していることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高齢者の生活の質を損なう転倒は、歩行中のつまずきが原因とされている。歩行中のつまずきには、定常状態ではなく、歩行動作の相転移時の不安定動作に関連していると考えられるが、不安定動作時に関する歩行動作の研究は皆無であった。本研究は、立位から歩行への移行、歩行から障害物回避作への移行という不安定な歩行動作に着目した。これら本研究の検討により、不安定な歩行時の筋の協調構造およびその適応過程を明確になり、運動制御、神経生理学、ロボット工学の分野の研究が飛躍的に向上するという学術的意義がある。さらに、その知見を基に高齢者の転倒防止に関する提言を行うことが可能になるという大きな社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：In order to clarify the motor control related to fall avoidance from unstable movements during the transition from standing to walking, 1) stepping movements in various directions while standing still, and 2) adaptation process of lower limb muscles for crossing over an obstacle at different height were investigated. 1) The weighting of muscle synergy differed depending on the direction in step motion. When a visual rotational disturbance was applied to the toe position in the forward direction, adaptation of lower limb motion was observed by adjusting muscle synergy activity. 2) It was observed that the obstacle clearance movement was controlled by the muscle synergy activation coefficient. These results suggest that the fall avoidance from unstable movements is simplified by muscle synergy, and that muscle synergy is involved in the adaptation process of movements.

研究分野：運動制御

キーワード：運動制御 運動適応 筋シナジー 相転移

1. 研究開始当初の背景

我々が何気なく行っている身体運動は、実は極めて複雑な運動制御の結果達成されている。単純な動作でさえ、さまざまな関節運動の無数の組み合わせの結果であり、さらに1つの関節運動でさえその関節を跨ぐ複数の筋の活動の仕方に依存する。すなわち、一見単純に見える動作でさえ、中枢神経系は無数の筋活動の組み合わせの中から最適な1つの解を決定していることになる。しかし、生体には解剖学および生理学的特性の異なる筋が無数に存在するために、中枢神経系がどの筋をどの程度どのタイミングで活動させるかという指令を個々の筋に逐一送っていると、処理すべき情報量が膨大となる。これは「筋の冗長性問題(ベルンシュタイン問題)」と言われており、運動制御研究の長年の疑問である。この問題に対し、中枢神経系は情報量を簡略化する戦略をとっていると考えられている。その戦略として、機能的に類似した筋をまとめて支配する神経制御機構である「筋シナジー」という概念が提唱されてきた。筋シナジーの存在により、複雑な身体活動を我々は無意識下で達成可能と考えられる。しかしながら、筋シナジーは未だに概念に過ぎず、筋シナジーがどのようにして構築されていくのか、どのような基準で構築するのか、という機序については未解明である。

人間の運動の獲得はどのよう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いる。我々が動作を行う際、身体の状態や周囲の環境は時々刻々と変化するために、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誤差のフィードバック情報に基づいて随時更新する必要がある、このプロセスこそが運動学習である。運動学習に関する研究は、脳内の内部モデルの再構築に関する生理学および数理科学的研究が主である。運動学習のプロセスにおいても、我々の複雑かつ冗長な身体活動を簡略化するシステムである筋シナジーの存在が関連していることが予想されるが、筋シナジーの観点から運動学習プロセスを検討した研究は皆無であり、運動学習における筋シナジーの関与は未解明である。

高齢者は、立位動作や歩行動作が不安定であるため、高齢者の転倒を予防することが社会的要請である。これまで、筋力トレーニングなどにより、立位動作や歩行動作の主働筋の筋力や筋量を向上させる試みが行われてきたが、高齢者の立位や歩行の安定性は筋の量的要素よりも筋の使い方といった質的要素が重要であることが指摘されるようになってきた。さらに、冗長かつ複雑な立位や歩行動作が筋シナジーにより効率的に達成されていることが実験的に明らかになってきているため、脊髄内の神経システムの再構築が高齢者の立位および歩行動作の安定性を向上させると考えられる。しかしながら、運動学習により筋シナジーの構築過程が不明であることから、高齢者の立位動作や歩行動作の安定性が筋シナジーを介した運動学習の効果は未解明である。

2. 研究の目的

平均寿命の増加により高齢者の健康が社会問題となっている。高齢者の転倒は、直接的および骨折を介して間接的に高齢者のQOLに關与する。高齢者の転倒には、立位バランスの低下および歩行中のつまずきが主因であるため、高齢者の立位と歩行の不安定性を改善するための対策は社会的要請である。特に、動作の移行期は、神経システムが不安定になることから、立位から歩行動作への移行期の安定性に注目した。

本研究は、高齢者の転倒予防および転倒回避を念頭に置き、立位姿勢から歩行動作への移行期の不安定な動作からの転倒回避に関する運動制御則を明らかにするために、(1) 静止立位中に様々な方向に一步踏み出す動作(ステップ動作)、(2) 高さの異なる跨ぎ動作時の下肢筋のシナジーおよびその適応過程を検討することを目的とした。これら目的を達成するために、本研究では、運動適応に及ぼす筋シナジーの貢献について着目した。

3. 研究の方法

(1) 被験者は、床反力計上で静止立位を約5秒間維持した。その状態(両足をつけた状態)から被験者の目の前に設置したディスプレイに水平面の8方向(前、左前、左、左後、後、右後、右、右前)への移動を指示する動画に従い、素早く右足あるいは左足を踏み出すステップ動作を行った。前方向と後方向は、右足を踏み出すステップ動作と左足を踏み出すステップ動作を行った。右前・右・右後方向は右足を踏み出すステップ動作、左前・左・左後方向は左足を踏み出すステップ動作とした。このステップ動作を各方向につき5試行(5試行×8方向+10試行[前と後]=50試行)行った。

前方向のステップ動作のみ、利き足のつま先の座標を目標値に一致させる目的指向型運動を行った。課題は、ディスプレイ上に被験者の利き足先端および目標値を呈示し、利き足先端を素早く目標値に一致させる試行とした。これを100回行い、その後、利き足先端に15度の視覚回転外乱を与えた外乱試行を150回行った。その後、視覚回転外乱を無くしたウォッシュアウト試行を100回行った。

(2) 被験者は、床反力計上で静止立位維持状態から高さの異なるまたぎ動作を行った。被験者は、静止立位中、障害物を目視し、障害物までの距離と高さを認識した。その後は、障害物を見ないように二歩目で障害物を跨ぐように指示された。障害物の高さは、被験者の外果から大転子までの高さを基準(100%)として、10%、20%、30%の3つとした。それぞれの高さのまたぎ動作は5試行とし、計15試行(5試行×3高さ=15試行)とした。

運動課題中、両側のヒラメ筋、腓腹筋内側頭、腓腹筋外側頭、前脛骨筋、外側広筋、大腿直筋、大腿二頭筋長頭、中殿筋から表面筋電図を導出し、非負値行列因子分解により筋シナジーとその活動度を1試行毎に算出した。上前腸骨棘、後前腸骨棘、大転子、大腿骨外側上顆、大腿骨内側上顆、外果、内果、踵骨、第3中足骨、側頭部、肩峰、上腕骨外側上顆、上腕骨内側上顆、橈骨茎状突起、尺骨茎状突起、剣状突起、肋骨下部、腸骨稜、肩甲骨に貼付した反射マーカ―を赤外線カメラによりトラッキングし、各関節の三次元座標を算出した。三次元座標を基に下肢の各関節角度を求めた。またぎ動作の実験課題では、両脚のつま先末端部剛体マーカ―を貼付し、つま先末端部の座標を算出した。

4. 研究成果

(1) ステップ動作においてステップ動作の方向により筋シナジーの重みが異なり、ステップ動作の筋シナジーは動作方向に依存することがわかった。前方向の筋シナジー数は少なく、純粋に前方向に至適方位を持つヒラメ筋、腓腹筋内側頭、腓腹筋外側頭、大腿直筋、外側広筋による筋シナジーの重みにより動作が簡略化されていた。後方向も前方向と同様に筋シナジー数は、少なく、純粋な後方向に至適方位を持つ前脛骨筋、大腿二頭筋長頭による筋シナジーの重みにより動作が簡略化されていた。前後方向に比べ横方向(左・右)の筋シナジー数は多くなった。前後方向に至適方位を持つ筋は多く存在する(ヒラメ筋、腓腹筋内側頭、腓腹筋外側頭、前脛骨筋、外側広筋、大腿直筋、大腿二頭筋長頭)が、横方向に至適方位を持つ筋は中殿筋のみである。したがって、横方向へのステップ動作では、前方向と後方向に至適方位を持つ筋のベクトルの合力により達成されていると考えられ、その結果として筋シナジー数が多くなったと考えられる。最も筋シナジー数が多かった課題は、後ろ斜め方向(左後・右後)に踏み出すステップ動作であった。これら方向では、比較的類似した筋シナジーの活動度が枝分かれして、複数の筋シナジーによりステップ動作が達成されていた。この結果は、後ろ斜め方向への動作はより複雑な筋協調が必要であることを意味しており、被験者の主観と一致していた。さらに、この結果は、斜め後ろ方向へのステップ動作は、筋シナジーの時間的・空間的に選択する必要性が生じ、極めて不安定なステップ動作になると考えられる。

前方向のステップ動作のみ、目的指向型運動を行い、視覚回転外乱による運動適応と筋シナジーとの関係を検討した。つま先の座標に視覚回転外乱を与えたところ、つま先の座標と目標値との誤差は大きくなり、試行数の増加により誤差は小さくなった。この適応プロセスにおいて、視覚外乱開始時から試行を重ねると、筋シナジー数は減少した。これは、運動適応が進むにつれて動作の簡略化が促進することを意味している。ウォッシュアウト試行の直後には逆方向の誤差が大きくなり、運動学習の後効果が観察された。このことは、本研究の視覚回転外乱により運動適応が起こったことを意味している。ウォッシュアウト試行直後の筋シナジー数は増加した。筋シナジーの重みは、足を前に踏み出すステップ動作とは異なり、斜め前方向に踏み出すステップ動作に類似していた。運動適応過程において、筋シナジーの重みおよび活動度が変化したことから、筋シナジーを調節することで下肢の運動を脊髄レベルで適応することが考えられた。

(2) またぎ動作において、筋シナジーの重みは3つの高さの違いに影響を受けなかった。これは、またぎ動作の高さは、同じ筋シナジーで達成されていることを意味している。一方、またぎ動作の高さにより、筋シナジーの活動度が変化した。より高い障害物を跨ぐ場合、大腿直筋を主とする筋シナジーおよび大腿二頭筋長頭・腓腹筋内側頭・腓腹筋外側頭を主とする筋シナジーの活動度が高まり、活動のタイミングも早くなった。これは、障害物を認識したことにより、あらかじめ股関節屈曲および膝関節屈曲動作が起こったことを意味する。すなわち、筋シナジーの活動度によりまたぎ動作の高さを制御していると考えられた。また、またぎ動作の後続脚は先導脚のつま先の軌跡情報をもとに軌道を修正していることが観察され、これは、両脚の軌跡は筋シナジーにより簡略化されていることが示唆された。

本研究により、立位動作から歩行動作への移行期の不安定な動作は、筋シナジーにより簡略化されていることが示唆された。さらに、立位動作から歩行動作への運動適応は、筋シナジーにより調節されていることが考えられた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Moriyama M, Kouzaki M, Hagio S	4. 巻 4
2. 論文標題 Visuomotor adaptation of lower extremity movements during virtual ball-kicking task	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Sports and Active Living	6. 最初と最後の頁 883656
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fspor.2022.883656. eCollection 2022.	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3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 森山真衣、神崎素樹、萩生翔大
2. 発表標題 フットボール経験者と未経験者におけるボールキック動作の視覚運動適応
3. 学会等名 第15回モーターコントロール研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤村泰成、萩生翔大、神崎素樹
2. 発表標題 転倒リスクが目標指向型の二足立位の制御に与える影響の解明
3. 学会等名 第151回京都滋賀体育学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 犬走渚、萩生翔大、神崎素樹
2. 発表標題 新奇な運動技能課題における複数の関節運動の学習過程
3. 学会等名 第151回京都滋賀体育学会
4. 発表年 2021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
---------	---------