

令和 4 年 6 月 30 日現在

機関番号：45507

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K17913

研究課題名(和文) 歩行運動に関与する筋活動の協調構造から探る関節間シナジーの形成メカニズム

研究課題名(英文) Study on the mechanism of formation of inter-joint synergy in walking movements

研究代表者

日置 智子 (Hioki, Tomoko)

山口短期大学・その他部局等・准教授

研究者番号：30390272

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：ヒトの歩行時における関節間の相補的な連携(関節間シナジー)の形成メカニズムを探るため、歩行時の関節間シナジーと筋群の活動の解析を行った。その結果、遊脚期に足先が最も地面に近づく瞬間等に強く働く足先の高さのばらつきを抑える関節間シナジーは、膝関節と足関節の共変動によるものであることを明らかにした。また、足先の高さのばらつきを抑える関節間シナジーが強く働く一方で、前後方向の位置のばらつきを抑える関節間シナジーの働きが弱い時期があることを発見した。更に、立位時に体幹の揺動を抑える姿勢制御が、歩行時における前後左右方向の姿勢制御と脚運動制御に寄与していることを示唆する結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、足先の高さのばらつきを抑える関節間シナジーと前後方向の位置のばらつきを抑える関節間シナジーを比較し、いずれかのシナジーが強く働く一方で、もう一方の働きが弱い時期があることを発見した。また、立位時に体幹の揺動を抑える姿勢制御が、歩行時における前後左右方向の姿勢制御と脚運動制御に寄与していることを示唆する結果も得た。これらは、生体が「足先位置のばらつきの抑制」や「体幹の揺動の抑制」といった歩行の安定化のための複数の目的をいかに効率よく果たしているのかを明らかにする足がかりとなる結果であり、歩行のリハビリテーション等において、より効率的なトレーニング法の開発につながることを期待される。

研究成果の概要(英文)：To elucidate the formation mechanism of the complementary cooperative movement between joints (inter-joint synergy) in human gait, we analyzed inter-joint synergy and muscle activity during walking and balance task and obtained the following results. First, we found that the inter-joint synergy that suppresses toe height variability at the moment of Minimum Toe Clearance, is due to the co-variation of the knee and ankle joints. Second, we also found that the inter-joint synergy that suppresses toe height variability works strongly, when the inter-joint synergy that suppresses anterior-posterior position variability works weakly. Furthermore, the results suggest that postural control that inhibits trunk sway during standing contributes to postural control in the anterior-posterior and lateral directions and to leg motion control during walking.

研究分野：生体情報処理

キーワード：歩行解析 関節間シナジー 運動制御 UCM解析 筋シナジー

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ヒトの歩行における脚の軌道計測を行うと、安定した歩行時であっても一歩ごとに脚の関節軌道にばらつきがみられるが、ある関節の変動を他の関節が補うような働き（関節間シナジー）により足先の高さのばらつきは抑えられている。例えば、歩行の一周期におけるある時期（例えば、後期両脚支持期や Minimum Toe Clearance (MTC) の瞬間には足先の高さが一定になるように脚関節が協調して変動する関節間シナジーが働くことにより精密な制御がなされていることが報告されている。しかし、関節間シナジーはどのようなメカニズムで実現されているのかは明らかとなっていなかった。関節間シナジーは必ずしも中枢神経系からの運動指令のみによるものではなく、脚の物理的な構造にも影響を受けている可能性もある。このことから、中枢神経系が関節間シナジーを形成するためにどのような運動指令を行っているのかを知るためには、関節間シナジー形成時に活動している筋群の協調構造を解析する必要があると考え、本研究課題の着想に至った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、歩行中のある瞬間において足先位置のばらつきを抑えるように働く関節間シナジーに着目し、その形成メカニズムを明らかにすることである。関節間シナジーを形成するためには、関節間シナジーの形成に寄与する複数の関節運動に関与する複数の筋群の活動にも協調構造が存在するはずである。本研究では、ヒトの歩行における脚運動に寄与する筋群の活動の協調構造とその効果を明らかにすることで、より安定した歩行を実現するために中枢神経系が歩行中のどの瞬間に特に注意を払って関節間シナジーを形成するための運動指令を行っているのかを解明することを目指した。

3. 研究の方法

(1) 歩行における脚の関節軌道を計測し、Uncontrolled Manifold (UCM) 解析により、関節間シナジーを定量評価する。UCM 解析を行うことで、歩行の1周期のどの瞬間に足先位置のばらつきを抑える関節間シナジーが働いているのかを評価できる。同時に、脚の関節軌道に対し、Covariation Analysis by Randomization (CR) 解析を行うことで、どの関節同士が共変動しているのかを評価できる。この2つの解析結果を比較することにより、歩行中に働く関節間シナジーがどの関節同士の共変動によるものかを明らかにする。

(2) 安定した歩行を実現するためには、歩行中の姿勢制御も重要である。そこで、歩行中の筋群の活動とテープ状の綱であるスラックラインに片足を乗せるバランスタスク中の筋群の活動を比較することにより、立位維持のための姿勢制御が歩行中における体幹の揺動を抑える姿勢制御と脚運動制御においてどのように利用されているのかを解明する。具体的には、歩行中およびバランスタスク中の脚の片側16筋（前脛骨筋 (TA)、長腓骨筋 (PERL)、内側広筋 (VM)、外側広筋 (VL)、大腿直筋 (RF)、長内転筋 (ADD)、外側腓腹筋 (LG)、内側腓腹筋 (MG)、長母趾屈筋 (FPL)、大腿二頭筋 (BF)、半腱様筋 (ST)、大腿筋膜張筋 (TFL)、中殿筋 (Gmed)、大殿筋 (GM)、脊柱起立筋 (ERSP)、外腹斜筋 (EO)）の表面筋電位を計測し、Non-negative Matrix Factorization (NMF) より筋シナジーを推定する。歩行中の筋活動から推定された筋シナジーとバランスタスク中の筋活動から推定された筋シナジーを比較し、共通筋シナジーを抽出することで、歩行中のどの時期にどのような姿勢制御が行われているのかを明らかにする。

4. 研究成果

(1) 歩行中の各時刻における足先の平均位置を実現する脚の関節角度の組み合わせを UCM と定義し、UCM 解析を行った。図1の (a), (b) はそれぞれ足先の水平方向および足先の高さのばらつきを抑える関節間シナジーを示す。横軸は脚の足部が地面に接地した瞬間（立脚期の開始）から再び接地するまでの一歩行周期を100%として正規化した時間である。縦の実線は、左から順に片足支持期の開始時、後期両脚支持期の開始時、遊脚期の開始時を示す。縦の点線は、遊脚期に足先が最も地面に近づく瞬間（MTC）を示す。また、UCM 解析によって定量評価された関節間シナジーが、どの関節同士の協調によるものなのかを明らかとするために CR 解析を行った（図2）。

後期両脚支持期初期では、UCM 解析と CR 解析の両結果において足先の高さのばらつきを抑える関節間シナジーの値 (S_y , R_y) が大きくなっており、この時期は足関節のばらつきが大きくなっていくが、関節間シナジーの働きにより、足先の高さのばらつきが抑制されていることがわかる。後期両脚支持期後期では、 S_x と R_x がともにやや大きく、このことは足先の水平位置のばらつきを抑制する弱い関節間シナジーが存在していることを示しており、実際に足先の水平位置のばらつきが減少していることが確認できた。遊脚開始時では、 S_y が大きい値をとっている

一方で、 R_y の値は小さくなっている。このことは、関節角の共変動はないが、足先の高さに影響をおよぼすような関節角の変動は抑制されていることを示唆している。この時期の脚姿勢は、足部が地面に対してほぼ垂直に近い形をとっており、足先の高さに対する足関節の変動の影響は少ないと考えられる。一方で足先の高さに影響を与えやすい股関節と膝関節のばらつきは小さい。これらのことから、生体は足先の高さのばらつきへの影響が少ない足関節のばらつきのみ許容していると考えられる。MTC では、 S_y と R_y の値はともに大きい。この時期は、膝関節と足関節のばらつきが大きく、足先の水平位置のばらつきも大きい。足先の高さのばらつきは抑えられている。これらのことから、MTC においては、足先の高さのばらつきを抑える関節間シナジーが強く働くことによって、つまづきなどを防いでいると考えられる。また、図 2 の (a)、(b) の両結果を比較すると、足先の水平位置のばらつきを抑える関節間シナジーが強く働く一方で足先の高さのばらつきを抑える関節間シナジーの働きが弱い時期がある。また、その逆の時期もあることがわかる。このことから、足先の水平位置または高さのいずれかの制御が重要である時期には、一方の制御を犠牲にしてもう一方の制御を優先的に行っている可能性があると考えられる。

さらに、歩行中に働く関節間シナジーに対する各関節の寄与を調べるため、脚の各関節角を 1 つずつランダム化して CR 解析を行った (図 3)。実線は股関節のみ、点線は膝関節のみ、破線は足関節のみをランダム化した場合の関節間シナジーを示す。図 2 の CR 解析結果では、後期両脚支持期と MTC で関節間シナジーが強く働いているが、これらの時期には膝関節のみと足関節のみランダム化した場合に関節間シナジーを示す値が大きくなっている。このことから、後期両脚支持期と MTC で働く強い関節間シナジーは膝関節と足関節の共変動によるものであり、股関節はほぼ寄与していないことがわかった。

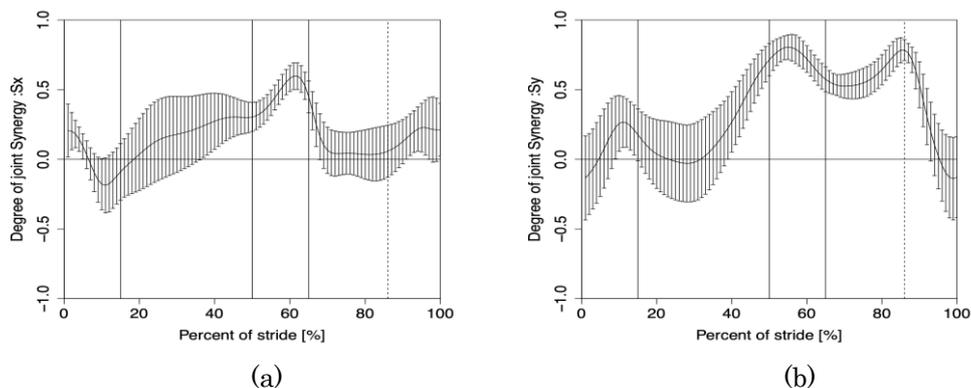


図 1 UCM 解析によって評価した歩行の 1 周期における足先位置のばらつきを抑える関節間シナジー。(a) 水平位置、(b) 高さのばらつきを抑える関節間シナジー。

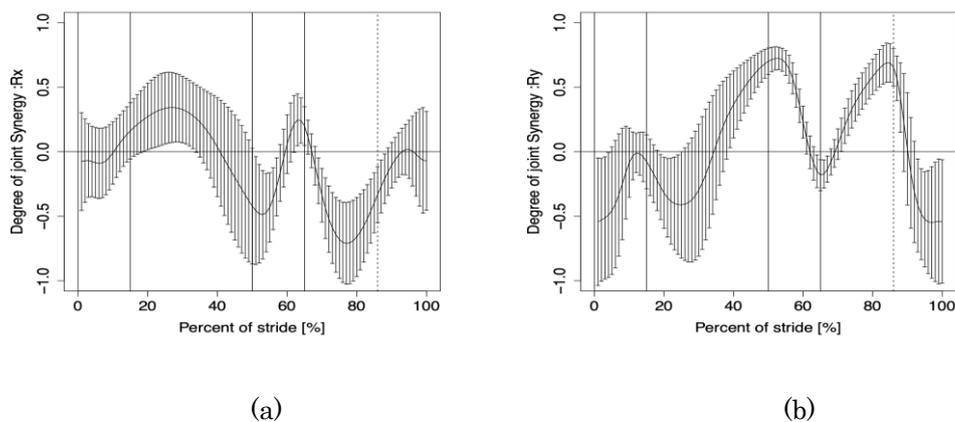


図 2 CR 解析によって評価した歩行の 1 周期における足先位置のばらつきを抑える関節間シナジー。(a) 水平位置、(b) 高さのばらつきを抑える関節間シナジー。

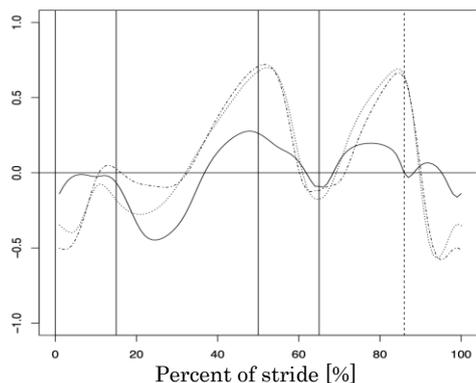


図3 脚の各関節角を1つずつランダム化してCR解析を行うことにより評価した歩行の1周期における足先位置の高さのばらつきを抑える関節間シナジー.

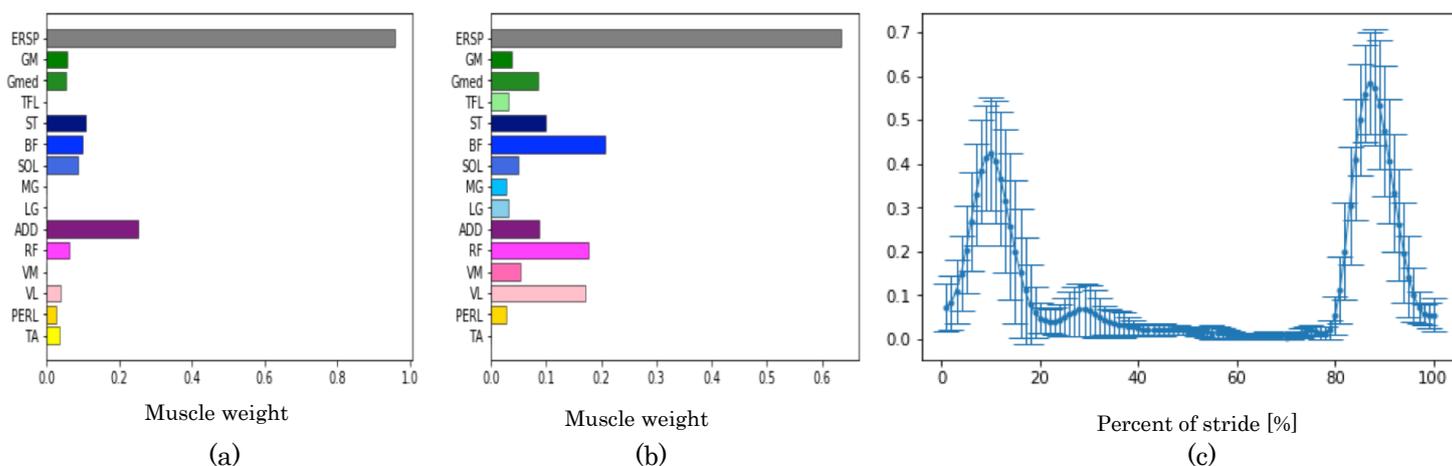


図4 共通筋シナジーの例.

(2) 歩行中とバランスタスク中に計測した筋電データに対し NMF を施し、筋シナジーの推定を行った。歩行の立脚期とバランスタスクにおける共通筋シナジーとして、股関節の外転に寄与する共通筋シナジーや足関節の底屈に寄与する共通筋シナジーを確認した。これらは、左右方向の姿勢の安定化や立脚期後期の蹴り出しに寄与している。また、脊柱起立筋(ERSP)の寄与が高い共通筋シナジーを確認した。図4はその一例である。(a)、(b)はそれぞれ歩行とバランスタスクから抽出された筋シナジーで、両者は類似性が高い。(c)は歩行の立脚期におけるこの共通筋シナジーの活動度の時間変化 (mean±SD) で、縦軸は共通筋シナジーの活動度、横軸は立脚期を100%として正規化した時間である。この共通筋シナジーは、バランスタスクにおいて、前傾した体幹を後方に戻す姿勢制御に寄与していると考えられる。この共通筋シナジーの活動度は歩行の立脚期の前期と後期に高くなっていた。これらの時期は両脚支持期であり、重心が前方へ大きく移動する時期であるため、立位時に体幹の揺動を抑える姿勢制御が、歩行の両脚支持期においても同様の役割を担っている可能性があると考えられる。遊脚期においても解析を行った結果、半腱様筋(ST)の寄与が高い共通筋シナジーを確認した。この共通筋シナジーの活動度は遊脚期後期に高くなっていた。このことは、股関節の伸展によって重心を後方に移動させる立位姿勢制御は、歩行の遊脚期後期では接地前の脚の引き付けに寄与していることを示唆する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 藤本雄太郎, 橋爪善光, 日置智子, 西井淳, 垣内田翔子
2. 発表標題 立位時における揺動に対する慣れの解析
3. 学会等名 電子情報通信学会MEとバイオサイバネティックス研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 C. Yamane, T. Hioki, S. Kaichida, J. Nishii
2. 発表標題 Posture control for standing contributes to walking control
3. 学会等名 International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (AMAM2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山根千佳, 日置智子, 垣内田翔子, 西井淳
2. 発表標題 立位姿勢制御は歩行時の脚運動制御にも寄与する
3. 学会等名 第30回日本神経回路学会 全国大会 (JNNS2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tomoko Hioki, Jun Nishii
2. 発表標題 Contribution of each joint to the inter-joint synergy during walking.
3. 学会等名 The 9th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomoko Hioki, Mari Goto, Jun Nishii
2. 発表標題 Posture Control during Walking by Muscle Synergy Recruited by Plantar Information
3. 学会等名 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (国際学会)
4. 発表年 2018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