

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 10 日現在

機関番号：55503

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18328

研究課題名(和文) 身体の力学的特性と姿勢が歩行中の関節間シナジーに及ぼす影響とその対策の検討

研究課題名(英文) Study on effect of body structure and position on joint synergy

研究代表者

垣内田 翔子 (Kaichida, Shoko)

徳山工業高等専門学校・機械電気工学科・助教

研究者番号：90638537

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：ヒトは歩行を行う際、股・膝・足関節が連携(関節間シナジー)し、一歩毎の足先の高さのばらつきや股関節位置のばらつきを抑えている。このような関節間シナジーが加齢などで身体的特徴が変化した際に変化するかを明らかにすることをを行った。歩行中の関節間シナジーが強く働くパターンについては、加齢による変化は見られず、前かがみなど通常と異なる歩行姿勢においても共通している可能性を示した。また、これら関節間シナジーの特徴は、歩行速度・走行においても共通していた。これらの結果から、歩行条件が異なっても平常時と同様の関節間シナジーが発生することから、筋活動の働きが関節間シナジーを生成している可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ヒ成人以降、高齢者に至るまで、歩行中の関節間シナジー及び、歩行から走行に至る歩行速度に依存しない二足運動中の関節間シナジーの発現パターンが発見された。これは、発達段階で獲得された運動のコツを一貫して活用している事を示す。また、健康被験者において姿勢に制約を与えても関節間シナジーの発現パターンが変化しないことは、歩行運動に重要なポイント(瞬間)の変化に中枢神経が関わっていることを示す1つの結果である。

研究成果の概要(英文)：When human walk, their hip, knee, and ankle work together (joint synergy) to suppress variations in the height of the toe position relative to the hip at each step. Does such joint synergy change when the body-like feature changed by aging? A change by aging wasn't seen about the movement timing the joint synergy which is being walked. It was suggested that the joint synergy might be common even in the unusual walking postures such as leaning forward. It was also common in walking speed and running. Even if it's different in the walking condition, the results show that the joint synergy similar to that in normal pattern. It was suggested that the function of muscle activity might generate joint synergy

研究分野：生体情報工学

キーワード：関節間シナジー 歩行

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ヒトは、身体に備わった冗長自由度を活用することで様々な状況下で目的の運動を柔軟に実現するに至っている。これまでに、若年者の歩行において、遊脚中に足先が最も地面と近づく瞬間などつまずきや不安定さの生じやすい瞬間などの、ある特定の瞬間に股・膝・足関節が連携(関節間シナジー)し、一步毎の足先の高さのばらつきや股関節位置のばらつきを抑えていることを発見した。しかし、このような関節間シナジーが加齢などで身体的特徴が変化した際に変化するか。また、変化があるのであれば、どのような要因で変化するかは明らかになっていなかった。

ヒトの運動は、中枢神経系からの運動指令が全身に張り巡らされた神経系を介して筋肉を刺激し、筋肉が収縮することで実現されている。ゆえに、関節間シナジーも中枢神経系による身体制御によって生じている可能性がある。一方、McGeer はアクチュエータ等の駆動機構を持たない骨格と関節のみのロボットが緩やかな坂道を下る受動歩行を実現することを示している。このことは、骨格の力学特性のみで歩行の実現が可能であることを示すものである。ヒトは進化の長い時間をかけて現在の身体的特徴と歩行をするに至っており、ヒトは歩行周期中のある特定の瞬間に関節間シナジーが強く働くような身体比率や二関節筋や腱のバネ要素などの力学的特性を持っている可能性が考えられた。

2. 研究の目的

歩行運動中において観察される、股・膝・足関節の相補的連携(関節間シナジー)は、歩行中のつまずきなどを上手く回避し、適応的な歩行の実現に役立っている。そこで、関節間シナジーが(1)歩行姿勢や(2)成長・加齢により変化する身体の力学的構造とどのように関係しているのかを明らかにすることで、(3)つまずきによる転倒予防や歩行中の関節の連携機能維持・回復のために有効となる、身体の力学的特性を生かしたアシストの方法を検討し、提案することが本研究の目的であった。

3. 研究の方法

(1) 通常歩行と腰や膝の曲がった状態や、がに股の姿勢での歩行の脚関節軌道を計測し、一步毎の関節軌道のばらつきを Uncontrolled Manifold (UCM) 解析を行うことで、歩行一周期中の各瞬間における関節間シナジーを求めた。関節間シナジーの解析は、UCM 解析によって、一步毎の同じ瞬間における関節角度が、異なっていたとしても、複数の関節が連携した結果を調べることができる。例えば、ある瞬間の脚姿勢は異なっているとしても、関節間シナジーにより足先位置のばらつきが抑えられているなどの情報を得ることができる。

歩行の1周期中の各瞬間の関節角のばらつきが一步毎にどのような傾向にあるか調べることにより、どの瞬間に、足先位置等どのような量のばらつきを抑えるように関節間シナジーが働いているか、その時間推移を調べる。さらに、股関節に対する足先位置の脚姿勢による可操作性を解析し、身体の力学的特性及び身体の姿勢によって生み出される関節間シナジーによる歩行安定化への影響を明らかにするための解析をおこなった。また、歩行速度による関節間シナジーへの影響を明らかにするため、健常者の速い歩行速度や走行における関節間シナジーの解析を行った。

(2) 加齢などによる筋力低下により筋張力が変化した高齢者の歩容の変化は、突然的な身体姿勢の変化とは異なっている可能性がある。そこで、歩行中の関節間シナジーについて(1)と同様の方法で調べることにより、歩行における関節間シナジーの活用の変化について比較を行った。

(3) つまずき防止や歩行運動維持に有効な身体へのアシスト機能の検討、提案に向けて、健常被験者がトレッドミル上で歩行する際の片側下肢14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)の表面筋電位を測定した。その結果より、足先位置を調整するような筋活動や筋活動パターンを非負値行列因子分解(Non-negative Matrix Factorization, NMF)によって処理し、関節間シナジーと歩行中に発生する筋活動パターンとの関係の解析を行った。NMFで抽出した筋グループで再構成した筋電位データが、取得データをどの程度再現しているかを示す数値(Variance Accounted For, VAF)により決定した。VAFは、取得した筋活動データが抽出した筋グループにより平均して90%以上再現され、かつ書く筋ごとの筋活動が75%以上再現されるような筋グループの最小個数を、筋グループとして定義した。また、テープ状の綱であるスラックライン上に片足を乗せた際に生じる振戦運動と比較することで、関節間シナジーの起点と仮定した股関節(体幹)を支える姿勢制御に関わる筋活動について解析した。

4. 研究成果

(1) 身体姿勢の違いによる、歩行中の足先位置の関節間シナジーの特徴を明らかにするために、若年健常被験者が高齢者の姿勢変化として報告されている背中や腰・膝の曲がり姿勢を再現した歩行計測実験を行い、UCM解析を行った。その結果、歩行一周期中で、股関節に対する足

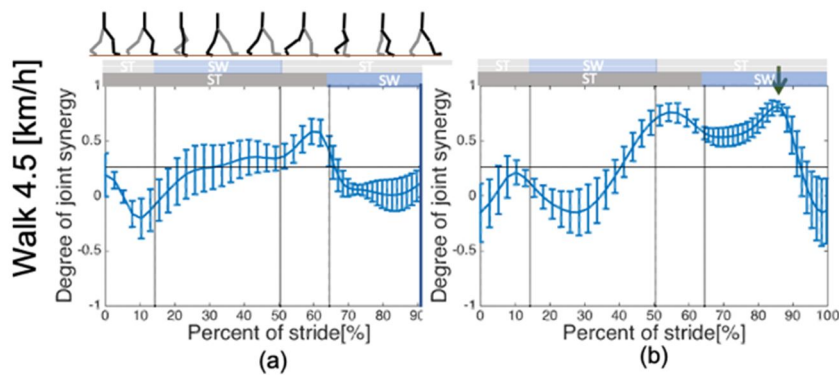


図 1 歩行における関節間シナジーの時間推移
(a)水平位置, (b)鉛直位置のばらつきを抑えるはたらきの関節間シナジー

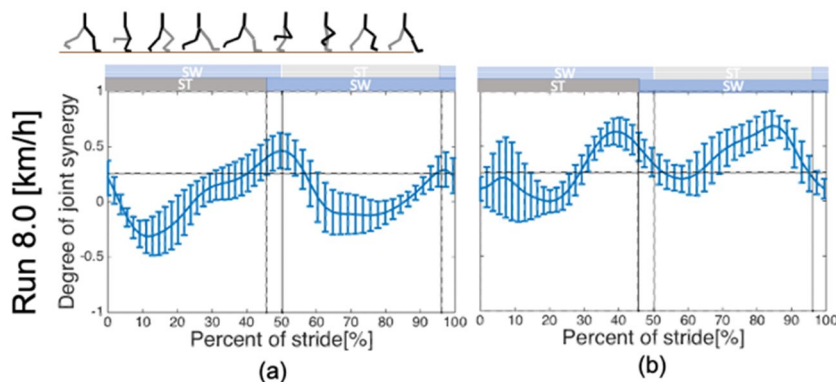


図 2 走行における関節間シナジーの時間推移
(a), (b)は図 1 と同様

先位置を調整する関節間シナジーが強く働くタイミングについては、異なる歩行姿勢においても共通していた。この結果により、通常と筋活動が違っていても中枢神経系の司令により、関節間シナジーを発生している可能性を得た。

図 1, 図 2 はそれぞれ、通常姿勢での歩行と走行時の(a)足先の水平位置と(b)鉛直位置のばらつきを抑える関節間シナジーの時間推移の被験者 7 名の平均値とその標準偏差を示している。図中の縦線は、片足支持期、後期両足指示期、遊脚期の開始を示す。図中横線は、F 検定により関節間シナジーが有意水準 $p < 0.05$ で判定できる基準の線を示す。通常姿勢での歩行において立脚中、対足が振り下ろされている時刻 (Minimum toe clearance: MTC) (図 1 (b) 矢印) には、股関節に対する足先位置のばらつきが少なくなるような関節角度の組み合わせをとっている事を示す。

歩行速度による関節間シナジーの特徴の変化を捉えるため、走行を含めた関節間シナジーの解析を行った。その結果、歩行・走行共に立脚相から遊脚相に向けて相が切り替わる前後や、遊脚中の足部の前方への振り抜きのタイミングで関節間シナジーが強く働くことが明らかになった (図 1, 図 2)。また、脚を最も折りたたんだ姿勢で前方へ振り出す速度についても歩行・走行に共通して足先速度を関節間シナジーによって調節していた。歩行時と走行時に共通して、遊脚相から接地相への着地前後では、一歩毎の姿勢のばらつきが抑えられており、同じ姿勢での着地が行われている事があきらかになった。これらの結果は、歩行と走行において関節間シナジーが同じように活用している事を示唆するものである。

(2) 70 歳代の高齢被験者の歩行において、関節間シナジーに着目した解析を行った。図 3 はそれぞれ、高齢被験者 (赤線) と若年被験者 (青線) の足先の(a)水平位置と(b)鉛直位置のばらつきを抑える関節間シナジーの時間推移の複数被験者の平均値 (実線) とその標準偏差 (破線) を示している。図中の縦線は、青線、赤線それぞれ図 1, 2 と同様に各動作の時刻を表す。横線についても同様である。歩行中の一歩毎の関節角度のばらつきは、高齢被験の方が若年被験者に比べて増加していた。関節間シナジーの発現パターンには、図 3 に示すように、類似しており、検定の結果からも高齢被験者と若年被験者で優位な差はなかった。これは、加齢による身体変化で関節角度のばらつきは増加するが、関節間シナジーを活用することで、足先位置など躓きの要因となる足先位置への影響を抑えているといえる。一方で、関節間シナジーの強く働く瞬間と MTC などの歩行動作とのタイミングのずれ及び、片足支持期に体を支える側の股関節位置のばらつきが若年被験者と比較して大きくなっていることが明らかになった。

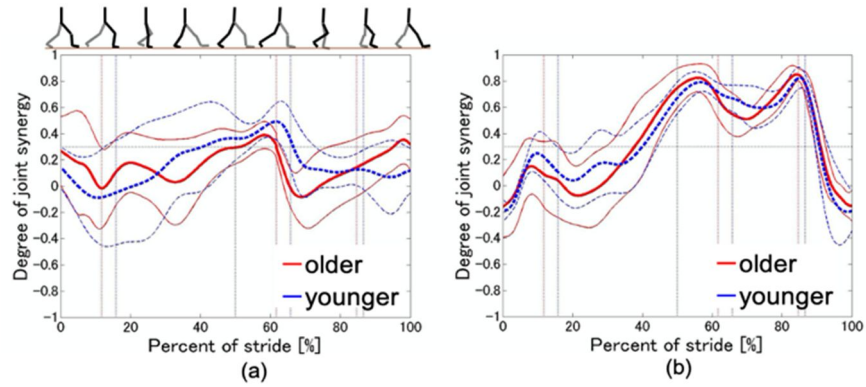


図 3 高齢被験者と若年被験者の歩行中の関節間シナジーの時間推移
(a), (b)は図 1, 2 と同様

(3) つまずき防止や歩行運動維持に有効な身体へのアシスト機能の検討, 提案に向けて, 片脚 14 筋の表面筋電位計測した. 計測結果から, 脚の筋活動パターンを調べ, 関節間シナジーと歩行中に発生する筋活動パターンとの関係を解析した. しかし, 足先位置のばらつきを調整する筋活動について, 明確な結果を示す事ができず解析手法に課題が残った.

歩行のために必要な直立姿勢制御には, 脊髓反射を介したフィードバック制御に起因する姿勢制御が関わっていることが示唆されている. 高齢被験者において, 片足支持期に生じる股関節位置のばらつきが関節間シナジーの活用を妨げている可能性が考えられた. そこで下肢 14 筋の活動の内, 姿勢制御に関わる筋活動について NMF を用いて解析を行った. その結果, 図 4 に示すように, 股関節の外転筋を含む共通の筋グループが抽出された. そして, この共通筋グループは, 歩行中支持脚側へ最も体重がかかる立脚期中期において高い活動が見られることを報告した. このことから, 歩行アシストと体幹安定化へのアシストを共通して行える可能性を得たと考えている.

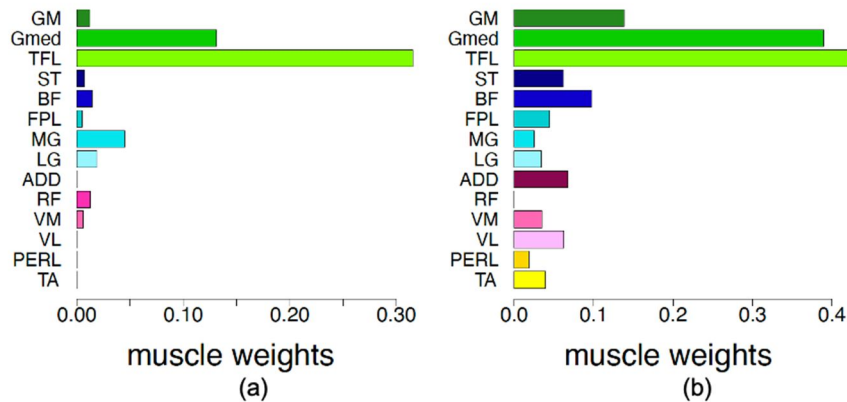


図 4 歩行とスラックラインに共通して発現していた筋グループの一例
(a)歩行, (b)スラックライン上での振戦運動における NMF 解析により分類した筋グループ

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 0件）

1. 著者名 C. Yamane, S. Kaichida and J. Nishii	4. 巻 -
2. 論文標題 Elucidation if posture control during bipedal walking	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 9th International Symposium on Adaptive Motion if Animals and Machines	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5075/efl-BIOROB-AMAM2019-23	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 S. Kaichida, Y. Hashizume, J. Nishii
2. 発表標題 A common strategy of running and walking from the viewpoint of joint synergy
3. 学会等名 Progress in Motor Control XI（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Hashizume, S. Kaichida, K. Takeda, J. Nishii
2. 発表標題 Leg joint synergy during walking in older adults
3. 学会等名 Progress in Motor Control XI（国際学会）
4. 発表年 2017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
---------------------------	-----------------------	----