

令和 5 年 4 月 28 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K17627

研究課題名（和文）歩行動作を構成する生体力学的サブタスク間での相互依存性

研究課題名（英文）Interdependence between the biomechanical subtasks during walking

研究代表者

木伏 紅緒（Kibushi, Benio）

神戸大学・人間発達環境学研究所・助教

研究者番号：30844998

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：歩行動作は、荷重応答や遊脚の加減速などのサブタスクを連続的に実行することで達成され、これらのサブタスクは相互依存している。本研究では、推進力生成とクリアランス高の調整に焦点を当て、サブタスク間での相互作用を筋シナジー（同期的な筋活動パターン）の観点から明らかにすることを目的とした。実験では足関節まわりの筋活動を調整し、推進力生成とクリアランス高を調整してもらい、計測した表面筋電図から筋シナジーを抽出した。その結果、足関節底屈筋を調整する場合、個々の筋レベルでは他のサブタスクに影響するものの、筋シナジー単位では影響しないことが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、足関節底屈筋の活動を調整する場合、筋シナジー単位では他のサブタスクに影響しないものの、個々の筋レベルでは影響することが明らかになった。この成果は、これまで知られなかったサブタスク間での相互依存性について理解が深められたという学術的な意義がある。また、サブタスク間の相互依存性をふまえたりハビリテーションやトレーニング方法の考案につながる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：The gait pattern is achieved by continuously executing subtasks such as load response and swing phase acceleration and deceleration, which are interdependent. This study aimed to clarify the interactions between subtasks from the perspective of muscle synergy (synchronous muscle activity patterns) by focusing on propulsion force generation and clearance height adjustment. Muscle synergies were extracted from surface electromyography measured while adjusting the muscle activity around the ankle joint and adjusting the propulsion force and clearance height. The results revealed that while individual muscles may have an impact on other subtasks, adjusting the ankle dorsiflexors did not affect muscle synergies.

研究分野：身体運動制御

キーワード：筋シナジー 筋協調 表面筋電図 歩行 運動学

### 1. 研究開始当初の背景

ヒトの歩行動作はいくつかのサブタスクによって構成されている。代表的なものでいえば、接地時における荷重応答、足関節底屈・股関節伸展による推進力生成、遊脚の加速、減速がある。これらのサブタスクを連続的に実行することで、歩行動作は達成される。これらのサブタスクは相互作用しており、いずれかのサブタスクが適切に実行できないことは他のサブタスクの実行にも影響を及ぼすことは容易に予想できる。こういったサブタスク間の相互依存性は、リハビリテーションのような運動学習が必要な場面においては念頭に置いた方が有益な治療につながるであろう。しかしながら、サブタスク間での相互依存性についてはほとんど理解が進んでいない。本研究課題において核心をなしているのは「歩行動作を構成するサブタスク間での相互依存性は何か?」という問いである。

### 2. 研究の目的

本研究においては、歩行動作における推進力生成と遊脚時のクリアランスを取り扱うこととした。そして、サブタスク間での相互依存性を神経筋制御の視点から明らかにするための分析手法として、筋シナジーの分析を選択した。ヒトの筋骨格系は約 200 種以上の骨および約 400 種以上の骨格筋という莫大な自由度で構成されており、神経機構に冗長自由度の低次元化を担う機構を仮定しないと、筋骨格系の協調的な制御は達成しえないと考えられてきた。この課題に対する制御戦略のひとつとしては、筋シナジーというモジュール式制御機構が提唱されている (Tresch et al., 1999)。筋シナジーは、いくつかの筋を協調的に制御する機構を指す (図 1)。筋シナジーの特徴は、サブタスクの実行と密接に関わっており、筋シナジーの特徴を捉えることで、サブタスクの実行に必要な筋の同期的活動の特徴を把握できる。あるひとつのサブタスクの力学的・運動学的特性に変更を加えた時に、変更を加えたサブタスクに関与する筋シナジーだけでなくそのほかの筋シナジーも調整されることが予想される。このような筋シナジーの調整を明らかにすることで、サブタスク間での相互作用を神経筋制御の観点から明らかにできると考えた。そこで本研究の目的を、歩行動作を構成するサブタスク間での相互依存性を筋シナジーの観点から明らかにすることとした。

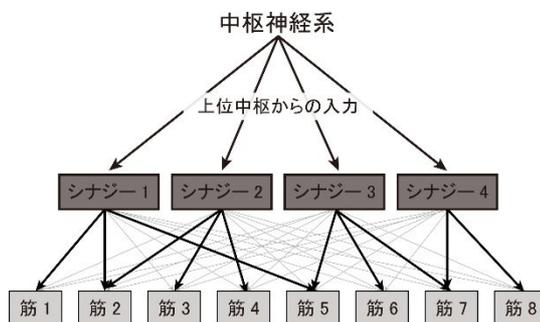


図1 筋シナジーを介した歩行の制御機構

### 3. 研究の方法

推進力生成と遊脚時のクリアランス高の調整は、筋活動の振幅を筋電図バイオフィードバックで調整することで達成した。推進力生成は下腿三頭筋が主働筋であるため、腓腹筋の活動を調整した (研究 )。また、遊脚時の足部クリアランス高の調整は前脛骨筋が主働筋であるため、前脛骨筋の活動を調整した (研究 )。

#### 【実験方法】

本研究には健康男性が対象であった。研究 は 11 名、研究 は 8 名の参加者が集まった。解剖学的特徴点 (全身 24 カ所) の位置座標値を動作分析システムにより 100 Hz にて取得し、関節角度と角速度を算出した。表面筋電図 (EMG) は表面筋電図システムを用いて 1000 Hz にて取得した。右側の体幹・下肢 12 筋を被験筋とした。

実験は、トレッドミル歩行の練習、通常歩行時の平均筋活動の計測、各実験条件の練習、各実験条件での計測、の順に実施された。実験中の歩行速度は 4.5 km/h、ストライド時間は 1 秒に統一した。研究 の実験条件として、以下の 2 条件を設定した：腓腹筋内側頭 (MG) の活動を通常歩行時の 1.4 倍に増加させる (High)、通常歩行と同等の活動に合わせる (Normal)。被検者には、モニターに表示された目標波形に現在の波形を合わせるように指示をした。研究 の実験条件として、以下の 2 条件を設定した：前脛骨筋 (TA) の活動を通常歩行時の 1.4 倍に増加させる、通常歩行と同等の活動に合わせる。被検者には、モニターに表示された目標波形に現在の波形を合わせるように指示をした。実験条件の練習として、被検者は各条件で 3 分間の歩行を 2 回行った。実験条件の計測で被検者は、各実験条件で 2 分間歩行した。分析区間は、計測開始後 80 秒以降の 30 周期とした。

#### 【分析方法】

筋シナジーの抽出のため、計測した EMG に対し、平滑化 (4 次のバターワースフィルタ、遮断周波数: 10 Hz) と、振幅と動作時間の正規化処理を施した。筋シナジーの抽出には、非負値行列因子分解を用いた (Lee & Seung, 1999)。筋シナジーは、時間に依存しない筋の共活動を表す重みづけと、時間的な活動を表す活動度から構成される。類似した筋シナジーの分類には、k-

**means** 法を用いた。筋シナジー間の類似性はコサイン相関 ( $r$ ) によって評価した。筋シナジーの活動度の特徴を比較するために、筋シナジーの活動度における活動中心 (**CoA**) と半値全幅 (**FWHM**) を歩行周期ごとに算出した。

研究の統計分析は、歩行パラメータ、関節角度・角速度のピーク値、立脚期後半(歩行周期**30–60%**)における**MG**、大腿直筋(**RF**)、大腿二頭筋長頭(**BF**)のピーク筋活動、筋シナジー数、筋シナジーの**CoA**および**FWHM**を対象とした。**Shapiro-Wilk**検定でデータが正規分布していることが確認された後、対応のある**t**検定を用い、条件間の平均値を比較した。有意水準は**0.05**とした。研究の統計分析は、進めている途中であるが概ねは上記項目と一致する。

#### 4. 研究成果

##### 【研究の結果】

**RF**のピーク活動は**High**条件の方が**Normal**条件よりも有意に低かった(**High:  $0.32 \pm 0.21$** , **Normal:  $0.45 \pm 0.17$** ,  $p = 0.02$ )。**BF**のピーク活動は**High**条件の方が**Normal**条件よりも有意に高かった(**High:  $0.16 \pm 0.01$** , **Normal:  $0.08 \pm 0.06$** ,  $p = 0.02$ )。

条件間の平均筋シナジー数に有意差は認められなかった(**High:  $3.5 \pm 0.8$** , **Normal:  $3.7 \pm 0.9$** ,  $p = 0.21$ )。条件間での各筋シナジーでの**r**の平均値は、重みづけと活動度いずれにおいても**0.70**を超えており、筋シナジーの高い類似性が観察された(図2)。**CoA**、**FWHM**を条件間で比較したところ、有意差は認められなかった( $p > 0.27$ )。

##### 【研究の考察】

筋シナジー数、筋シナジーの**CoA**、**FWHM**に有意差はみられなかった。このことは、筋シナジー以外の調整によって**push-off**の増強を実現していることを示唆している。本研究では筋シナジーの微調整はみられなかったものの、既存の筋シナジーを運動制御に利用することで、高速な適応や学習に貢献していると考えられている(Berger & D'Avella, 2014; Hagio & Kouzaki, 2018)。本研究の被検者は、**push-off**中の**MG**を活性化させる課題に3分×2回の練習で適応できた。このような早い適応は、既存の筋シナジーを用いているからかもしれない。

**Push-off**に関係する筋シナジーが調整されない理由としては、本研究では、推進力や身体支持力を増加させる必要性が少なかったことが挙げられる。歩行中に荷重しても、下腿三頭筋の活動は増加しないことが示されているが(Honeine et al., 2013)、このことは、下腿三頭筋の筋活動は、荷重によって生じた追加的な推進力生成に関与していないことを示している。歩行速度の増加や、身体支持力の増加を伴う場合は、**push-off**に関係する筋シナジーが調整される可能性がある。

研究では、筋シナジーの明確な微調整は確認できなかったものの、筋ごとの調整が観察された。**High**条件では、立脚後期での**BF**のピーク活動の増加と**RF**のピーク活動の低下がみられた。この調整は、筋シナジーの調整とは独立してなされ、膝関節屈曲による追加的な推進力の生成に寄与する可能性がある。

##### 【研究の結論】

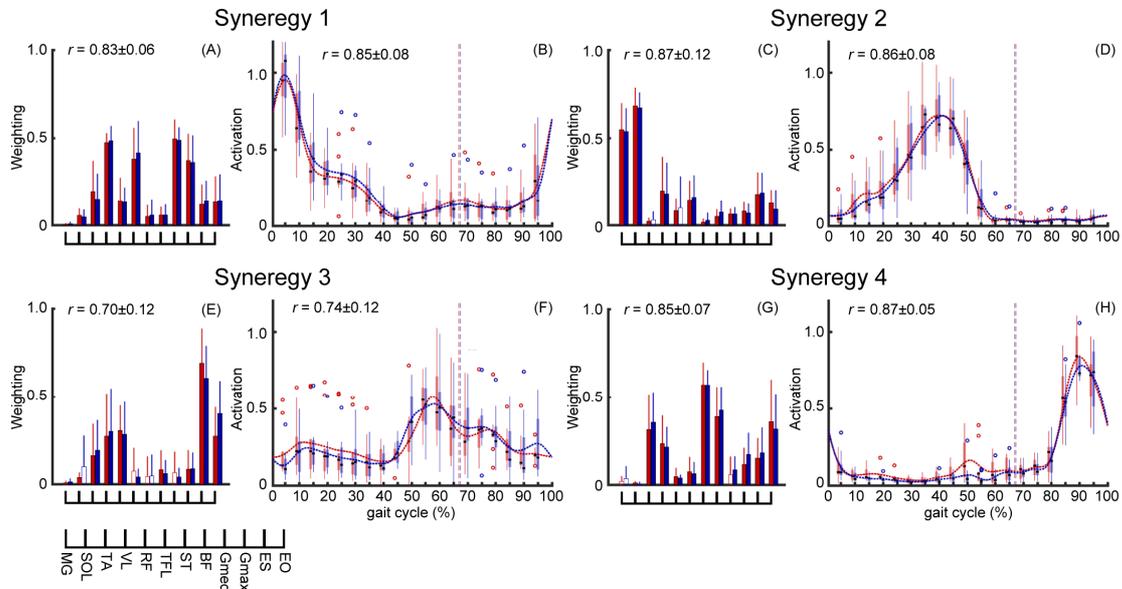
**Push-off**時に**MG**の活動量を調節した場合、筋シナジーではなく、筋ごとに筋活動量が微調整される。

##### 【研究成果の公表について】

研究で得られた研究成果は、国際学術雑誌に投稿し、査読が進んでいる。兵庫体育・スポーツ科学会大会への発表も予定している。研究については現在分析途中であり、**2023**年度内に国際学術雑誌への投稿を進める予定である。

##### 参考文献

- Berger, D. J., & D'Avella, A. (2014). Effective force control by muscle synergies. *Frontiers in Computational Neuroscience*, *8*, 46.
- Hagio, S., & Kouzaki, M. (2018). Modularity speeds up motor learning by overcoming mechanical bias in musculoskeletal geometry. *Journal of the Royal Society Interface*, *15*(147).
- Honeine, J. L., Schieppati, M., Gagey, O., & Do, M. C. (2013). The Functional Role of the Triceps Surae Muscle during Human Locomotion. *PLOS ONE*, *8*(1), e52943.
- Lee, D. D., & Seung, H. S. (1999). Learning the parts of objects by non-negative matrix factorization. *Nature*, *401*(6755), 788–791.
- Tresch, M. C., Saltiel, P., & Bizzi, E. (1999). The construction of movement by the spinal cord. *Nature Neuroscience*, *2*(2), 162–167.



**図 2: Normal 条件と High 条件における筋シナジー**

A, C, E, G は、筋シナジーの重みづけにおける被験者間での平均値を示している。B, D, F, H は、筋シナジーの活動度における被験者間での平均値を示している。Normal 条件は青, High 条件は赤である。各図の上方に表示されている  $r$  は、Normal 条件と High 条件間でのコサイン相関の被験者間平均値を示す。

棒グラフ上の縦線は標準偏差を示す。白抜きになっている棒は、信頼区間の下限がゼロを下回っている重みづけであり、有意な重みづけでないことを意味する。筋の略称は以下の通りである：腓腹筋内側頭 (gastrocnemius medialis: MG), ヒラメ筋 (soleus: SOL), 前脛骨筋 (tibialis anterior: TA), 外側広筋 (vastus lateralis: VL), 大腿直筋 (rectus femoris: RF), 大腿筋膜張筋 (tensor fasciae latae: TFL), 半腱様筋 (semitendinosus: ST), 大腿二頭筋 (biceps femoris: BF), 中殿筋 (gluteus medius: Gmed), 大殿筋 (gluteus maximus: Gmax), 第五腰椎レベルの脊柱起立筋 (erector spinae: ES), 外腹斜筋 (abdominal external oblique: EO)。

波形は活動度の平均値を示している。歩行周期 5%ごとの各時点において、データの偏りを箱ひげ図として示した。中央値は黒の横線, 第 1 四分位数は箱の下限, 第 3 四分位数は箱の上限, 最大値は髭の上端, 最小値は髭の下端, 丸は外れ値である。縦の点線は、右のつま先離地を示している。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Kibushi Benio, Kihira Naoto, Moritani Toshio, Kouzaki Motoki	4. 巻 761
2. 論文標題 Disturbance of neural coupling between upper and lower limbs during gait transition	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Neuroscience Letters	6. 最初と最後の頁 136100 ~ 136100
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.neulet.2021.136100	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 -

1. 著者名 Kibushi Benio, Okada Junichi	4. 巻 10
2. 論文標題 Auditory sEMG biofeedback for reducing muscle co contraction during pedaling	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physiological Reports	6. 最初と最後の頁 e15288
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14814/phy2.15288	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 -

1. 著者名 Kibushi Benio, Moritani Toshio, Kouzaki Motoki	4. 巻 94
2. 論文標題 Modular control of muscle coordination patterns during various stride time and stride length combinations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Gait & Posture	6. 最初と最後の頁 230 ~ 235
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.gaitpost.2021.04.006	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2件（うち招待講演 1件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 木伏紅緒
2. 発表標題 歩行におけるモジュール式制御機構
3. 学会等名 計測自動制御学会 ライフエンジニアリング部門シンポジウム2021（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木伏紅緒, 前角馨, 木村哲也
2. 発表標題 筋電図バイオフィードバックによる歩行中の身体重心加速度の低減
3. 学会等名 計測自動制御学会 ライフエンジニアリング部門シンポジウム2022
4. 発表年 2022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
---------	---------