

# 冗長自由度簡略化の観点から身体運動を捉える

神崎素樹<sup>1</sup>, 萩生翔大<sup>2</sup>, 久保 陽<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学 大学院人間・環境学研究科

<sup>2</sup> 東京大学 大学院教育学研究科

## 概要

我々の動作は冗長かつ複雑である。中枢神経系は膨大な自由度を簡略化するための戦略ととっていると考えられている。その戦略として「筋シナジー」という概念が提唱されてきた。この筋シナジーによる冗長自由度の簡略化の観点から我々の動作を捉えたい。様々な方向に力を発揮する複雑な力調節課題時、立位保持時、歩行から走行動作時に下肢筋群から表面筋電図を取得し、非負値行列因子分解により筋シナジーとその活動度を抽出した。各身体活動時の筋シナジーは2~8個であり、活動の変化に応じて筋シナジーが融合あるいは分離した。筋シナジーの機能的意義を明らかにするために、筋シナジー有り無しのニューラルネットワークの学習速度を比較したところ、筋シナジー有りが学習がはやかった。これらの結果より、筋シナジーが存在することで我々の冗長な身体動作が達成されていることが結論づけられた。

## Motor control based on simplification of the redundant degree of freedom

Motoki Kouzaki<sup>1</sup>, Shota Hagio<sup>2</sup>, Akari Kubo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Graduate School of Human and Environmental Studies Kyoto University

<sup>2</sup> Graduate School of Education The University of Tokyo

## Abstract

Human achieves complex and redundant movements, such as standing and walking. Central nervous system (CNS) coordinates huge degree of freedom of the musculoskeletal system. To this end, muscle activities were accounted for with low-dimensional sets of muscle synergies. Present review focused on the muscle synergies to comprehend human movements from the simplification of the redundant degree of freedom. The muscle synergies during human movements were extracted from the data matrix of recorded EMGs of lower limb muscles using non-negative matrix factorization. During motor output at various conditions, postural maintenance and walking, the CNS flexibly changed patterns of the muscle synergy recruitment to achieve effectively human movements. To examine the functional role for existing muscle synergy, learning speed of neural network model with and without muscle synergy layer was calculated. As a result, the learning speed was higher with muscle synergy layer than without it, because the muscle synergy reduces the bias in the mechanical direction of the muscles. From these investigations, present review concluded that complex and redundant human activities are enabled under existence of low-dimensional sets of muscle synergies.

# 1 はじめに

我々が何気なく行っている身体運動は、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 [1] と言われており、運動制御研究における長年の疑問である。この問題に対し、中枢神経系は膨大な情報量を簡略化するための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。すなわち、中枢神経系は個々の筋へ別々に指令を送るのではなく、筋シナジーを介した指令を送ることで情報を簡略化していると考えられる (図1)。筋シナジーの存在下では、個々の筋 ( $m_i$ ) の活動は、中枢神経系から個々の筋シナジーへ送られる入力 ( $C_j$ ) の大きさ ( $C_j$ ) と筋シナジーが支配する各筋の重み ( $W_{ij}$ ) との積の全筋シナジーでの総和によって決定される ( $M_i = W_{i1}C_1 + W_{i2}C_2 + \dots + W_{in}C_n$ )。これまで、様々な運動において筋シナジーが算出され、その特徴が示されてきたが [2]、筋シナジーは未だ概念であり、その存在や機能的意義については不明な点が多い [3]。本研究では、冗長性を有する骨格筋の制御を簡略化する筋シナジーの観点から我々の身体動作を捉え、さらに数理的手法により筋シナジーの機能的意義について検討したい。

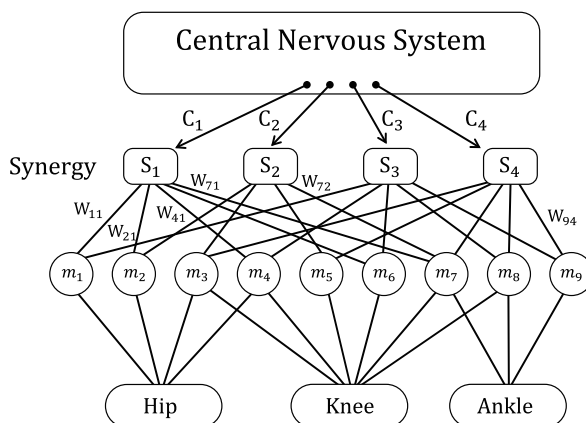


図1: Concept of muscle synergy.

## 2 生理学実験による検討

本研究のすべての実験は、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で承認されている。

### 2.1 立位動作

立位課題は、床反力計上で静止立位を維持した後、前方のディスプレイに呈示された水平面12方向に設定された目標値に約10秒間できるだけ足圧中心を一

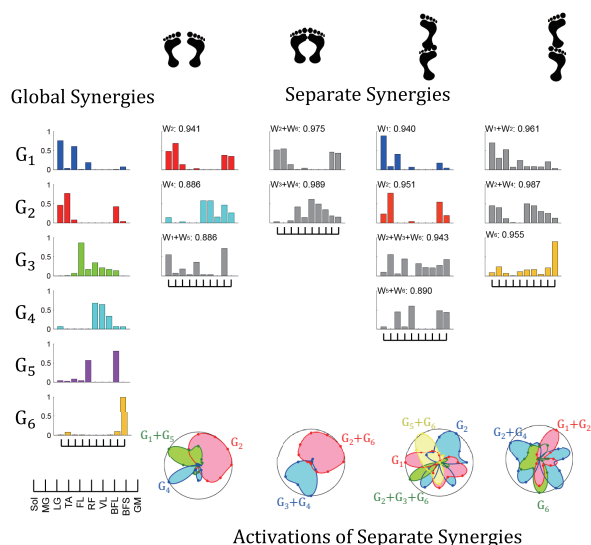


図2: Global and separate synergies in each postural stance. The muscle weightings of global (most left) and separate synergies in normal, narrow, and tandem stances. Directional tuning of separate synergy activations in each postural task.

致させるもの（12方向×4スタンス＝48試行回数）とした[6]。立位課題は、通常のスタンス、狭いスタンス、タンデムスタンス（右脚前）、タンデムスタンス（左脚前）の4スタンスで行った。これら課題中、右脚のヒラメ筋、腓腹筋内側頭、腓腹筋外側頭、前脛骨筋、長腓骨筋、大腿直筋、外側広筋、大腿二頭筋長頭、大腿二頭筋短頭、中殿筋から表面筋電図を導出した。各試行の表面筋電図の平均振幅を算出し、非負値行列因子分解により各スタンス毎の筋シナジーとその活動度およびすべての試行の筋シナジーとその活動を求めた[3]。前者をセパレート条件、後者をグローバル条件とし、グローバル条件より算出された筋シナジー（グローバルシナジー）は、全ての立位課題において必要とされる筋シナジーの最小単位を示し、セパレート条件より算出された筋シナジー（セパレートシナジー）は、各スタンスにおいて立位維持を行うために必要とされる最小数の筋シナジーを示している[4]。その結果、6個のグローバルシナジーが得られ（図2左）、セパレートシナジーは2～4個であった（図2右）。グローバルシナジーと各スタンスでのセパレートシナジーとを比較すると、一見類似性のない筋シナジーが見られる。しかし、異なるグローバルシナジー同士を融合させたものとの間には高い類似性が認められた。例えば、右脚前のタンデムスタンスにおける筋シナジー（図2の上から3番目の筋シナジー）は、一見グローバルシナジーと類似性がないが、グローバルシナジー2とグローバルシナジー3とグローバルシナジー6を融合させた筋シナジーと高い類似性（相関係数0.943）が得られた。この筋シナジー同士の融合は、運動課題が複雑になるにつれ顕著に見られる傾向にあった。すなわち、通常のスタンスでは、3つのセパレートシナジーの内、2つの筋シナジーがグローバルシナジーを使っているのに対し、狭いスタンスおよびタンデムスタンスでは、2つのシナジーがグローバルシナジーを融合させたシナジーである（図2）。この結果は、日常生活でよく用いられる立位課題では、個々のグローバルシナジーを用いて柔軟な制御を行っているが、日常生活であまり用いない難しい立位課題では、安定な立位維持が困難なため、異なるグローバルシナジーに同時に入力を与えることによって立位維持の複雑性を減少させ、少ない情報量により最低限の立位維持を行っていると考えられる。

## 2.2 歩行・走行動作

歩行・走行動作の相転移現象の筋シナジーを捉えた[5]。歩行と走行間の相転移とは、移動速度の上昇または下降にともなって、移動様式が歩行から走行へ、あるいは走行から歩行へ転移する現象である。歩行と走行の相転移現象は、エネルギー代謝や運動学的観点から検討がなされてきたが、本研究では筋シナジーの観点からこの相転移現象を検討した。被験者はトレッドミル上で時速3kmにて歩行を開始し、ランプ状にトレッドミルの速度を上昇させ、明らかに走行していると確認される速度まで運動を行った。課題中、両脚のヒラメ筋、腓腹筋内側頭、腓腹筋外側頭、前脛骨筋、大腿直筋、外側広筋、内側広筋、大腿二頭筋長頭、大腿二頭筋短頭、中殿筋、大殿筋から表面筋電図を導出した。相転移前後の歩行および走行の17周期に関して非負値行列因子分解により筋シナジーおよびその活動度を算出した。各被験者から約9個の筋シナジーが得られた（図3）。いくつかの筋シナジーにおいて、相転移の前後で活動度の大きさやその1周期内でのタイミングが変化した。例えば、下腿三頭筋を支配する筋シナジー（W1およびW6）は、歩行から走行への相転移中において活動度が最大となるタイミングが1周期内でより早いタイミングへと変化した。また、前脛骨筋を中心とする筋シナジー（W2、W3、W7）では、歩行から走行に転移すると活動度が激減あるいは消失した。逆に、大腿部を支配する筋シナジー（W5、W8、W9）は、歩行から走行に転移すると活動度が増加した。そもそも歩行と走行は異なる神経機構で制御されていると言われていたが、それらの切り替えは同様の筋シナジーへの入力のオンオフあるいはタイミングを変化させることによって行われていると考えられた。

## 3 シミュレーションによる検討

筋シナジーの存在意義を明確にするために、数理的手法を用いて筋シナジーの有無が学習速度に及ぼす影響を検討した。神経モデルは、一次運動野の神経細胞、筋という二層の従来のモデル（図4中）に筋シナジーの層を加えた三層とした（図4左）。シミュレーションは右手首周りの水平面上で多方向に力を発揮し、肘関節および肩関節まわりのトルクを制御するものとした。筋は肩関節および肘関節をまたぐ8筋とし、それぞれの筋の力学的方位は第一象限と第三象限に力学的方位が偏っている。神経モデ

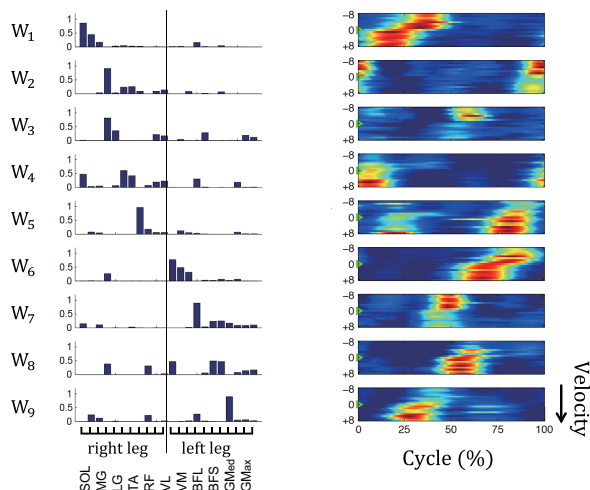


図 3: Muscle synergies (left panels) and their activation profiles (right panels) during walking and running. Left panels indicate muscle weighting of each muscle synergy in both legs. Right panels indicate activation profiles. The vertical axis shows the gait transition step. Zero means walk-to-run gait transition. The horizontal axis shows the phase of one gait cycle (from the onset of the right leg to the next).

ルの入力は出力したい肘関節トルクおよび肩関節トルクとした。入力トルクと実際に出力されたトルクの誤差が最小になるように誤差逆伝搬法により学習を行った。その結果、シナジー有りの神経モデルでは約 50 回の学習で入力トルクと出力トルクの誤差がほぼゼロとなった。一方、シナジー無しの神経モデルでは学習回数が 5000 回となっても誤差はゼロにならずオフセットが存在した。この結果より、筋シナジーの存在は学習速度を高めることが明らかになった。そして、それぞれの筋シナジーの力学的方位は、すべての象限に分布していた。上述したように、肩関節および肘関節まわりの筋の力学的方位は偏っており、第二象限および第四象限には存在しない。しかし、筋シナジー 2 および 4 はこれら象限に力学的方位を持つ。筋シナジー 2 は肩関節伸展と肘関節屈曲により構成され、筋シナジー 4 は肩関節屈曲と肘関節伸展により構成されているシナジーである。これら関節運動を生み出す二関節筋はヒトには存在しない。したがって、筋シナジーの存在意義は、筋骨格系の力学的方位の偏りを補い、多方向への力発揮の学習に重要であるといえる。

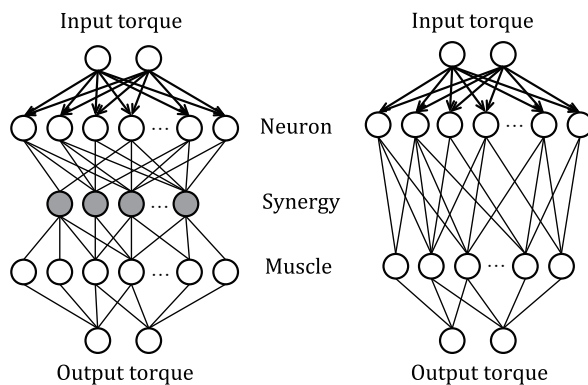


図 4: Neural network model with (left) and without (center) muscle synergies, and learning performance in both neural network models (right).

## 4 まとめ

本研究では、立位・歩行・走行動作時の筋シナジーの貢献、および筋シナジーの機能的意義について生理学的実験および数理的手法により紹介した。筋シナジーの存在により我々の身体動作が円滑に行われていること、筋シナジーの存在が筋骨格系の偏りを軽減し柔軟な力出力を実現していることが示唆された。

## 参考文献

- [1] Bernshtein NA, The Coordination and Regulation of Movements, Pergamon Press (1967)
- [2] d'Avella A, Portone A, Fernandez L, Lacquaniti F, J. Neurosci. **26** (2006) 7791-7810.
- [3] Hagio S, Kouzaki M, Adv. Exerc. Sports Physiol. **19** (2013) 1-6.
- [4] Hagio S, Kouzaki M, J. Neurophysiol. **112** (2014) 316-327.
- [5] Hagio S, Fukuda M, Kouzaki M, Front. Hum. Neurosci. **9** (2015) 1-12.
- [6] Imagawa H, Hagio S, Kouzaki M, J Electromyogr. Kinesiol. **23** (2013) 430-437.