

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 22 日現在

機関番号：25301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25330311

研究課題名(和文) 神経筋骨格系の動力学を考慮した身体運動の変動性の解析

研究課題名(英文) Analysis of motor variability in the dynamics of the neuro-musculo-skeletal system

研究代表者

山崎 大河 (Yamasaki, Taiga)

岡山県立大学・情報工学部・准教授

研究者番号：40364096

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：ヒトが同じ運動を繰り返し行ったときの各試行間での運動の変動には、神経系にとっての制御目的やその実現を助ける協調構造などの情報が隠れているとされるが、詳細はわかっていない。本研究では、一定速度での自転車ペダリング運動における関節角速度や関節トルクの変動には、それぞれクランク接線方向でのペダル軸の速度や力の変動を抑制しようとする傾向がみられることなどを示した。また、筋骨格モデルと静的最適化を用いて、関節角度やその高次微分のデータから、運動指令や筋活動を高精度に推定する新しいアルゴリズムを提案した。本研究の成果は、神経筋骨格系における運動制御メカニズムの工学的な理解につながる。

研究成果の概要(英文)：The fluctuation of human motions across repetitive trials can reflect the control objective and the motor coordination used by the nervous system. However, its details are unclear. We showed, in the bicycle pedaling movements at a steady speed, that the inter-trial variances of the angular velocities and the joint torques of the lower limbs were distributed asymmetrically so that the variances of the tangential velocity and the tangential force on the pedal shaft were suppressed selectively. We proposed a new algorithm to estimate muscle activity with high accuracy by using a musculo-skeletal model, a static optimization, and the input of the joint angle and its first to fourth derivatives with respect to time.

研究分野：生体やロボットの運動制御

キーワード：運動制御 変動性 神経筋骨格系

1. 研究開始当初の背景

ヒトが同じ運動を繰り返したときの運動の変動には、身体の冗長性を減らし制御を容易にするための協調構造や神経系にとっての制御変数の情報が隠れていると考えられており、近年その解析が盛んである。

歩行運動中の大腿、下腿、足部の仰角（矢上面内で鉛直軸となす角度）は、仰角の3次元空間において平面的な関係を保ちつつ変化することが知られている（平面法則）。これは、身体の運動学的な自由度を減らすために神経系が生み出す協調構造の一つと考えられている。平面法則の解析は、通常、下肢の姿勢を仰角で表現して行われ、この座標系の重要性を主張する声もある。しかし、ある座標系において平面法則が成立するように見えるデータでも、座標系のとり方を変えることで、平面法則が成立しないように見えたり、逆に平面性がさらに際立ってみえたりすることもある。そのため、平面法則にみられる「平面性」（線形性）に本質的な意味があるのかは不明である。

神経系は運動課題の達成要件に関係する運動の変動は抑制しようとするが、関係しない変動には寛容であるとする Bernstein の観察から、Uncontrolled Manifold Analysis (UCM 解析) と呼ばれる手法が提案されている。UCM 解析では、例えば腕のリーチング運動を繰り返し行ったときの関節角の変動を、関節角から手先位置（制御変数）へのヤコビ行列の零空間と直交補空間の成分に分けて、その偏りを定量化することで、神経系にとっての制御変数を推定する。しかし、UCM 解析でも、姿勢を表現する座標系の選択が解析結果に影響するなどの理由で、必ずしも、神経系にとっての制御変数を明確に特定できるわけではない。

平面法則や UCM 解析などの手法は、歩行運動のように動力学的な拘束の強い運動の解析に多数応用されているが、基本的には運動学に着目するもので、動力学的な要素は考慮されないことが多い。一方、骨格系の動力学的な拘束と課題の達成条件をみたま運動軌道の候補は、状態空間において一様に広がっているとは限らない（申請者は鉄棒運動に関してその冗長性の具体例を示している）。試行間での運動の変動の特性も、このような動力学的な制約を受けるはずであり、その変動の偏りのすべてが神経制御の影響とはいえない。その起源を明らかにするには、神経筋骨格系全体の動力学を考慮しなければならない。

2. 研究の目的

ヒトが同じ運動を繰り返したときの運動の変動には、神経筋骨格系の動力学的な特性を背景として、協調構造や制御目的など、その中に働く制御メカニズムに関連する情報

が隠れていると考えられているが、その実体は十分にわかっていない。また、関連した運動の変動は、神経筋骨格系のさまざまな階層レベルにおいて観察されるが、複数の階層において同時に研究されることは少ない。本研究では、神経筋骨格系の多様なレベルにおいて、実験データの変動の解析や、制御系のモデル化を行うことを通じて、その総合的な理解につなげることを目指した。具体的には、自転車や足漕ぎ車椅子でのペダリング運動を対象として、骨格系の運動学や動力学的レベルにおける運動の変動の解析を行い、単関節運動を対象として、神経筋骨格系全体の動力学的レベルでのモデル化を行い、鉄棒運動、起立・着座運動、立位姿勢を対象として、制御戦略としての協調構造の役割について考察を行い、これらの結果を総合することにより、運動の変動とその背後にある制御メカニズムの関係解明の道を拓くことを目的とした。

3. 研究の方法

ペダリング運動に関して以下の研究を行った。制御系の全体像を知るには多様な視点からの調査が重要との考えに基づき、自転車でのペダリング運動や足漕ぎ車椅子でのペダリング運動に関して、関節角速度とクラック角速度との運動学的な関係、関節トルクとペダル踏力の動力学的な関係に着目してこれらの変数の変動の関係を明らかにするための UCM 解析や、平面法則とペダル踏力との関係の解析を行った。自転車ペダリング運動の被験者は、サイクリング部に所属している健常大学生、足漕ぎ車椅子でのペダリング運動の被験者は、健常大学生とした。メトロノームなどで指定した速さにあわせて、一定速度でのペダリング運動を行い、そのときの運動を光学式モーションキャプチャ装置 (Natural Point, Optitrack/Motive) を用いて計測し、ペダルにかかる踏力を 6 軸力センサ (テック技販, M3D-FP-U) を用いて計測した。まず、さまざまな負荷強度において計測した自転車エルゴメータでのペダリング運動のデータから、下肢セグメントの仰角の時間変化にから求めた近似平面が、足部にかかるペダル反力（または逆向きのペダル踏力）によって受ける影響を調査した。次に、ペダリング運動における関節角速度とクラック角速度との運動学的な関係、および関節トルクとペダル踏力の動力学的な関係に対する、UCM 解析の手法を新たに開発して解析を行った。

単関節運動に関して以下の研究を行った。運動の変動の理解には、神経筋骨格系の動力学的特性の考慮が重要との考えから、筋活性化の動力学、筋収縮の動力学、骨格運動の動力学を考慮した単関節の筋骨格系モデルを構築し、このモデルを用いて、運動指令のような高次の信号と、関節角度のような低次の信

号の間の関係について考察した。

鉄棒運動，起立・着座運動，立位姿勢に関して以下の研究を行った。運動の変動には，神経筋骨格系において実現しようとしている制御目的や制御則の選択が大きな影響を与えると考えられる。本研究では，制御則を含めた理解へ向けた制御系のモデル化へ向けた検討を行った。運動課題の達成要件を制御目的とするのではなく，関節間協調の実現を制御目的とした制御を行うことが，間接的に，運動課題の達成につながる可能性について検討した。

4. 研究成果

自転車ペダリング運動に関して以下の成果を得た。

(a) 自転車ペダリング運動では，下肢セグメントの仰角に対して歩行運動に類似した「平面法則」がみられること，および，足部にかかるペダル反力が大きくなるにつれてこの近似平面の傾きが変化することを示した。この近似平面の向きの変化に対応する下肢の姿勢変化は，ペダルから足部にかかる力の向きと一致している場合が多いことを示した。(b) 自転車ペダリング運動や足漕ぎ車椅子において一定速度を意識して行ったペダリング運動について，関節角速度の変動とクランク角速度の変動との関係に着目した UCM 解析を行った。その結果，関節角速度の変動は，クランク角速度に影響を与える方向には小さく，クランク角速度に影響を与えない方向には大きく分布していることを明らかにした。この結果は，関節角速度の変動には，クランク角速度の変動を一定にしようと制御する神経系の活動が表れていることを示唆する。

(c) 従来の UCM 解析の手法を自転車ペダリング運動における関節トルクとペダル踏力の間の解析に拡張して，関節トルクの変動の解析を行った。制御量の候補として以下の4種を考えた。片側（左右ごと）の関節トルクの変動特性を知るために，制御量の候補 A：関節トルクがペダル軸の水平・鉛直方向の運動に及ぼす力，候補 B：関節トルクがペダル軸のクランク接線方向の運動に及ぼす力，を仮定して両者の比較を行った。さらに，左右の下肢の関節トルク間をすべて合わせてみたときの変動特性を知るために，制御量の候補 C：左右の下肢が発生する候補 B の力，候補 D：左右の下肢が発生する候補 B の力の和，を仮定して両者の比較を行った。まず，候補 A と候補 B の比較の結果，関節トルクの変動は UCM 解析の意味において制御量候補 B に関して偏りが大きいことを示した。つぎに，候補 C と候補 D の比較の結果，UCM 解析の意味での関節トルクの変動は両者とも大きな違いはみられなかった。これらの結果は，ペダリング運動における神経系が，左右それぞれの下肢に対し，関節トルクがペダル軸の接線

運動に及ぼす力がばらつかないように下肢トルクを操作している可能性を示唆している。

単関節運動に関して以下の成果を得た。

(d) 神経筋骨格系モデルの構造によれば，神経から筋へ送られる運動指令は，関節角度の高次の時間微分（少なくとも4次まで）に深く関係する。この知見を応用して，関節角度やその高次微分のデータをもとに，筋骨格モデルと静的最適化を用いた複数筋間での負荷配分の仮定の下で，運動指令や筋活動を高精度に推定する新しいアルゴリズムを提案した。このアルゴリズムは，関節角度，角速度，角加速度に加えて，関節角度の高次微分（3次，4次）の情報を用いることで，従来の筋活動推定アルゴリズムよりも推定過程における近似計算が少なく，そのため高精度が期待できる。また，このモデルで行っている計算は，神経系が筋骨格系をフィードフォワード制御するために必要な運動指令計算のモデルともみなせる。

鉄棒運動，起立・着座運動，立位姿勢などに関して以下の研究を行った。

(d) ヒトの運動にはさまざまな協調構造がみられ，これを中心として運動の変動も生じると考えられる。本研究では，協調構造が運動制御において果たす役割を再考するために，劣駆動的な状況を仮定したいくつかの運動課題（鉄棒運動，足部と床との間が点接触でトルク伝達ができない状況での椅子からの起立・着座や立位姿勢）に着目した。これらの運動において，適切な関節間協調の実現を目的とした制御を行うことで，間接的に，鉄棒での技の実現，椅子からの起立・着座運動の実現，安定な立位姿勢を実現できる可能性があることを示した。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Taiga Yamasaki, Katsutoshi Idehara, and Xin Xin. "Estimation of muscle activity using higher-order derivatives, static optimization, and forward-inverse dynamics." *Journal of biomechanics*, Volume 49, Issue 10, pp. 2015-2022, 2016

〔学会発表〕(計 24 件)

岡本佑太, 山崎大河, 忻欣, 泉晋作: 複数の仮想ホロノミック拘束を用いた鉄棒運動の制御モデル, 第4回制御部門マルチシンポジウム, USB, PS-51, 2017.3.6-9

岡本恵里子, 山崎大河, 忻欣, 泉晋作: 静的最適化を用いた2種類の筋活動の推定手法の精度比較, 第18回 IEEE 広島支部学生シンポジウム, CD-ROM, B1-13, 2016.11.19-20

今井秋介, 山崎大河, 忻欣, 泉晋作: つり輪運動中の関節トルクが重心加速度に与える影響, 第 18 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム, CD-ROM, A1-13, 2016.11.19-20

岡本佑太, 山崎大河, 忻欣, 泉晋作: 関節間協調の連続的な変化を考慮した鉄棒運動の制御モデル, 第 18 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム, CD-ROM, B1-16, 2016.11.19-20

岡本佑太, 山崎大河, 忻欣, 泉晋作: 関節間協調の切り替えを用いた運動制御モデルの検討, 第 37 回バイオメカニズム学術講演会講演予稿集, USB, 1B-1-4, 2016.11.12-13

Taiga Yamasaki, Yuta Okamoto, A study on control objectives in human motor control: high bar motion, SICE ライフエンジニアリング部門シンポジウム LE2016, 2016 年 11 月 3 日~5 日 山崎大河, 岡本佑太, 忻欣, 関節間協調の実現を制御目的とした鉄棒運動の制御モデル, 第 10 回 Motor Control 研究会, 2016 年 9 月 1 日~3 日

岡本恵里子, 山崎大河, 忻欣, 泉晋作: 筋活動を推定する計算筋制御法の精度について, 日本人間工学会第 57 回大会, 論文集冊子, pp. 128-129, 2016.6.25-6.26

山崎大河, 竹下洋, 田口恵理, 忻欣, 泉晋作, 自転車ペダリング運動におけるクランク角速度と関節角速度のばらつきの解析, 第 60 回システム制御情報学会研究発表講演会, DVD-ROM, 351-3, 2016.5.25-27

Shusuke Imai, Taiga Yamasaki, Kyoji Yamawaki, Xin Xin, Shinsaku Izumi, EFFECT OF JOINT TORQUE ON HORIZONTAL MOTION OF CENTER-OF-MASS DURING SWING ON GYMNASTIC RINGS, 34th International Conference on Biomechanics in Sports, P0522430, July 18-22, 2016

岡本佑太, 山崎大河, 忻欣, 泉晋作: 関節角度間の協調が立位姿勢の安定性に与える影響, 第 24 回計測自動制御学会中国支部学術講演会論文集, pp.158-159, 2015.11.28

竹下洋, 山崎大河, 田口恵理, 忻欣, 泉晋作: ペダリング運動中の関節角速度間の協調に足関節運動の制約が与える影響, 第 24 回計測自動制御学会中国支部学術講演会論文集, pp. 160-161, 2015.11.28

田口恵理, 山崎大河, 忻欣, 泉晋作: 二次元閉リンクモデルを用いた自転車ペダリング運動の解析. シンポジウム: スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2015 講演論文集, USB フラッシュドラ

イブ, C-17, 2015.10.30-11.1

山崎大河, 忻欣, 後藤大輔: 関節間協調の切替による鉄棒運動の制御. シンポジウム: スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2015 講演論文集, USB メモリ, B-25, 2015.10.30-11.1

岡本佑太, 山崎大河, 忻欣: 着座運動における関節角度間の協調が運動の実現可能性や特性に与える影響の解析, 日本人間工学会第 56 回大会講演集, pp.374-375, 2015.6.13-6.14

竹下洋, 山崎大河, 田口恵理, 忻欣: 足漕ぎ車いすでのペダリング運動におけるクランク角速度と関節角速度のばらつきの関係, 日本人間工学会第 56 回大会講演集, pp. 372-373, 2015.6.13-6.14
出原勝利, 山崎大河, 忻欣: 運動指令を推定する筋骨格系の逆力学について, 第 15 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2014.12.15-17

田口恵理, 山崎大河, 忻欣: 自転車ペダリング運動における左右肢を考慮した関節トルクのばらつきの解析, 平成 26 年度日本人間工学会中国・四国支部, 関西支部合同大会 講演論文集, pp.78-79, 2014.12.13

田口恵理, 山崎大河, 忻欣: 自転車でのペダリング運動における関節トルクのばらつきの解析 制御量の同定へ向けて, 第 35 回バイオメカニズム学術講演会, 2014.11.8-9

Taiga Yamasaki, Ryugo Kataoka, Eri Taguchi, Xin Xin: Planar Covariation of Elevation Angles in Bicycle Pedaling and its Dependence on Pedal Force, 第 53 回日本生体医工学会大会, 2014.6.24-26

21 田口恵理, 山崎大河, 忻欣: 自転車でのペダリング運動における制御量の同定, 日本人間工学会第 55 回大会講演論文集 pp. 404-405 (2014.6.5-6)

22 中田直宏, 山崎大河, 出原勝利, 忻欣: 筋の活性化ダイナミクスが腕の周期運動の安定性に与える影響, 第 46 回日本人間工学会中国・四国支部大会, 2013.12.8

23 Katsutoshi Idehara, Taiga Yamasaki, Naohiro Nakada and Xin Xin, Influence of Muscle Activation and Deactivation Dynamics on Feasible Forearm Movements, 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Short Papers No. 3345, July 3-7, 2013, Osaka

24 出原勝利, 山崎大河, 松田啓佑, 中田直宏, 忻欣: 筋の活性化ダイナミクスが肘関節運動の実行可能性に与える影響, 第 57 回システム制御情報学会研究発表講

演会，CD-ROM，314-3，2013.5.15-17

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

特になし

6．研究組織

(1)研究代表者

山崎 大河 (YAMASAKI, Taiga)

岡山県立大学 情報工学部 准教授

研究者番号：4 0 3 6 4 0 9 6