

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：25301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23700236

研究課題名(和文) 身体的・動力学的拘束下における運動の冗長性と変動性

研究課題名(英文) Redundancy and variability of movements under physical and kinetic constraints

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) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：鉄棒運動において、いくつかの経由姿勢によって定義されたタスクの達成要件をみたく運動の冗長性を探索するための従来の手法を、歩行運動のような周期運動にも適用できるように拡張した。さらに、鉄棒でのけ上がり運動における身体全体の重心運動に対し、この手法を応用することで、その冗長性の探索を全探索に近いレベルで行えることを示した。また、歩行運動中の下肢関節の協調やその変動を反映する平面法則は、姿勢を表現する座標系の選択に大きな影響を受けることを示した。ある種の腕の周期運動は、筋骨格系に対する神経系からのフィードフォワード制御だけでも安定化できる可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：We extended the previous method for exploring redundant solutions of the high bar movements that satisfy the task requirement imposed by via points into walking movements. By focusing on the movement of the center of mass of the human body during the kip on the high bar, we showed that the method can also be extended to exploring almost all movements that achieve the task. We showed that the planar law of walking movements relating intersegmental coordination and its variations is significantly affected by the coordinate systems for describing the limb configuration. We showed that some cyclic movements in the musculo-skeletal system of the human arm could be stabilized only by the feedforward control from the central nervous system.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：モーションプランニング

## 1. 研究開始当初の背景

ヒトが行う多くの運動タスクには、タスクの達成要件を満たすような運動が無数に存在しており、ヒトの神経系はこのような運動の選択肢からいずれかの運動を選択し実行しているとみなす視点は、運動制御研究において古くから重要な役割を果たしてきた。しかし、鉄棒運動や歩行運動をはじめとした多くの運動では、複雑な非線形動力学で表される身体的な拘束を満たし、実行可能な運動パターンとして、実際のところ、どの程度、選択の余地があるのかを明確に示すことは難しかった。

これに対し、近年我々は、体操選手の鉄棒運動の研究に取り組み、動力学的な拘束下で開始姿勢から終了姿勢へ至る運動の冗長性をシステマティックに探索する手法を開発・提案している。ただし、冗長性を実際に計算した運動は、まだ鉄棒運動の一部に限られていた。さらに、そのような冗長性の様相が、実際の運動や神経系の運動計画に与える影響は明らかにされていなかった。

## 2. 研究の目的

本研究では以下の目的を掲げた。

- (1) 運動の冗長性の探索手法を、歩行運動などにも応用し、できるだけ様々な条件における冗長性を探索できるように手法の拡張を行う。
- (2) 運動計測の結果から、ヒトが歩行運動や鉄棒運動などの動力学的な拘束を強く受ける運動を繰り返し行う際の試行間での運動のばらつきについて、その時空間的な偏りを評価する手法を確立する。
- (3) (1) と (2) の結果の比較・検討を通じて、タスク達成のために神経系が用いている運動表現や制御戦略の解明につなげる。

## 3. 研究の方法

本研究では、まず(1)の目的に対し、冗長性の探索手法を、鉄棒運動だけでなく歩行運動のような周期運動にも適用できるように拡張した。また、鉄棒運動中の身体の重心軌道の冗長性に焦点を絞り、探索法を拡張することで、その冗長性のほぼ全容を明らかにすることを目指した。つぎに(2)の目的に対し、歩行運動にみられる平面法則に着目した。平面法則とは、歩行中の大腿、下腿、足部の仰角を、これらの角度からなる3次元空間中にプロットすると、その軌道がほぼある平面に沿うように見えるというものである。本研究では、同じ情報を含む計測データであっても、表現する座標系のとり方が異なれば、平面法則の見え方は大きく異なることを示すとともに、その数理的な背景を議論した。また、計測データにみられる運動のばらつきには、その運動軌道の安定性も関わっていること

から、筋骨格系の動的な性質と運動の安定性の関係について解析した。(3) 上記の研究から、運動の冗長性やばらつきの評価には、運動を表現する座標系の選択が、非常に大きな影響を与えていることが示されたことを受け、本研究では、特に、筋に関わる座標系の役割に着目し、筋への運動指令まで含めた筋骨格系モデルの構築へ向けた基礎検討も行った。

## 4. 研究成果

### (1) 冗長性の探索手法の発展

#### 歩行運動の冗長性

本研究では、ヒトの歩行運動について、タスクの達成要件を仮定した上で、その冗長性の一部を具体的に示す手法を開発した。そのため、鉄棒運動において提案されている従来法を歩行運動に応用した。この方法では、駆動関節の時間変化をフーリエ級数などを使ってパラメトリックに表現した動力学モデルを用い、境界条件によって指定したタスクの達成要件を満たすようなパラメータ集合をシステマティックに探索する。本研究では、この手法を、境界条件の一部や運動の周期なども調節可能なパラメータに加えることで、歩行速度の異なる運動なども探索に含めることができるように拡張した。そして、数値解析により、仮定した達成条件をみたく様々な歩行運動を探索できることを示した。冗長性の探索結果の一例を図1に示す。

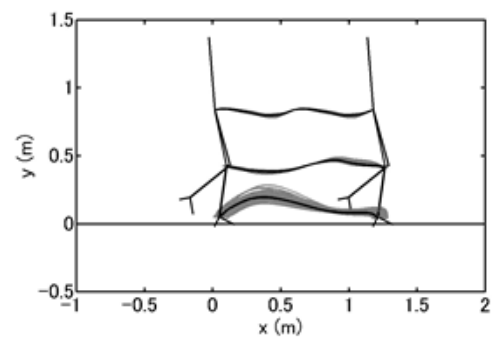


図1 歩行運動の冗長性の解析例

#### 重心運動の冗長性

本研究では、体操選手が鉄棒で行う「け上がり運動」に着目した。け上がり運動における運動選択の冗長性について、これまでに我々は剛体3リンクモデルを用いた解析を行っていたが、計算量の問題で、冗長性の一部しか実際には計算できていなかった。本研究では、鉄棒運動中の身体を可変脚長振子によってモデル化することで(図2)、身体の重心運動の冗長性に焦点を絞り、さらに従来解析手法を拡張することで、その冗長性を実質的に全探索に近いレベルとみなせる程度に探索できることを示した(図3)。

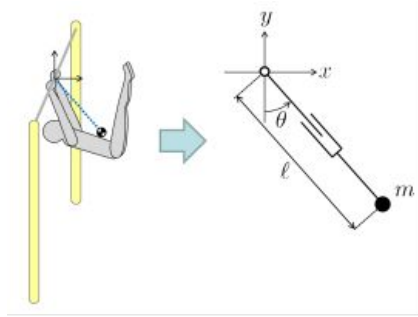


図2 可変脚長振子モデル

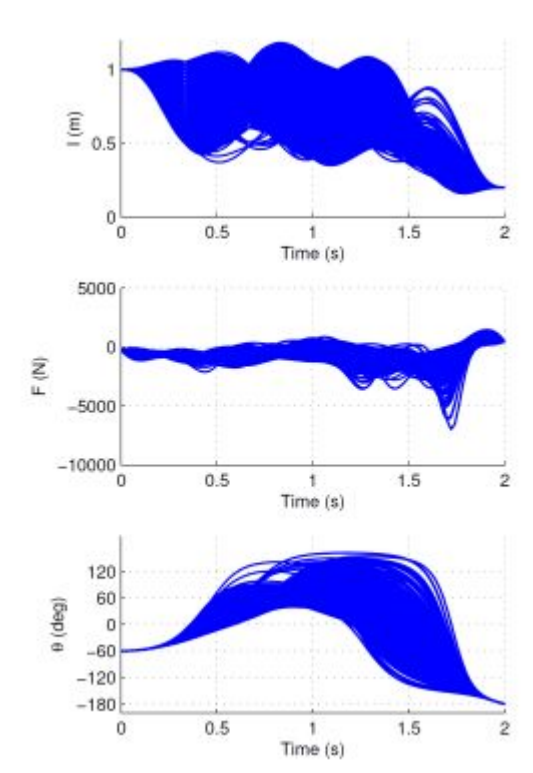


図3 け上がり運動での重心軌道の冗長性の計算結果

## (2) 運動の変動性の評価

### 歩行の平面法則

ヒトの定常歩行運動中の大腿, 下腿, 足部が鉛直軸に対してなす角度(仰角)を計測し, その時系列データを3次元空間にプロットすると, データはある平面にほぼのることが知られている(平面法則). この仰角は歩行中の下肢の協調構造を記述する座標系として重要とされているが, 下肢の姿勢を記述する座標系は, 仰角のほかにも無数に存在する同じ情報をもつデータであっても, 表現する座標系が異なれば, 平面性の高さも変化するはずである.

本研究では, 平面法則の成立に対して, 座標系の取り方が与える影響を明らかにすることを目指した. そのため, 様々な速度におけるトレッドミル上での定常歩行において大腿の仰角, 膝関節角, 足関節角を計測し, これを  $\{1, 0, -1\}$  を要素とする3次元の正則

な線形写像によって様々な座標系に移し, それぞれの座標系において平面性の高さを評価した(図5). 解析の結果, 座標系の取り方によって平面性の高さは大きく変化すること, 仰角よりも高い平面性を生む座標系も低い平面性を生む座標系も数多く存在することを示した. さらに, 座標変換が平面性の高さを変化させる数理的な仕組みを示した. 仰角において平面法則が成立することは, 必ずしも仰角のもつ情報の重要性を意味しないといえる.

また, この結果は, 運動のばらつきの評価は運動を表現する座標系の選択に大きな影響を受けることを示しているともいえる.

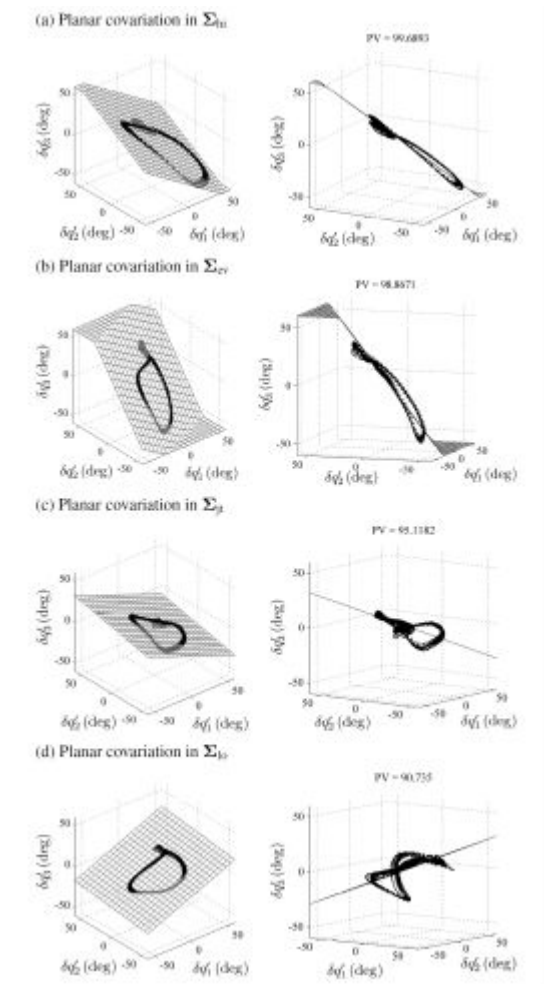


図5 様々な座標系における平面法則の成立状況

### 自転車ペダリング運動の平面法則

本研究では, 自転車エルゴメータにおけるペダリング運動でも平面法則が成立するかどうかを調査した. ペダリング運動には股関節がサドルの位置に拘束され, 足部がペダルの回転円周上に拘束されるという運動学的な拘束はあるが, 歩行のように転倒することがないため, この拘束さえ満たせば, 明らかに平面法則に従わない姿勢で運動することも

可能である点が、歩行とは異なる。そのため、ペダリング運動では下肢関節の協調戦略も歩行とは異なる可能性がある。しかし、調査の結果は、ペダリング運動でも、歩行運動と類似した平面法則が成立していることを示唆するものであった。

#### 腕の運動の安定性

同じ運動を繰り返したときの、運動のばらつきは、様々な複合的な要因から生じていると考えられる。運動の安定性は、その一つであり、安定性の程度の低い運動は、ばらつきが生じやすいと予想される。

本研究では、上肢の運動において着目し、上肢の筋骨格系をフィードフォワード制御した際に実現される周期運動の安定性を解析した。そのため、肩と肘関節に関わる単関節・二関節筋を考慮した上肢の筋骨格モデルに対し、指定した目標軌道に沿って筋骨格系をフィードフォワード制御する制御系を構成した。そして、このモデルにおいて様々な周期や振幅の周期運動を目標軌道としたときの安定性解析を行った。その結果、様々な条件下での周期運動が、筋の粘弾性的な性質によって、フィードフォワード制御のみでも安定化可能であることが示唆された。

### (3) その他

#### 筋骨格系モデルの基礎研究

本研究では、肘関節を屈曲・伸展する周期運動および到達運動に着目し、筋の活性化・非活性化ダイナミクスの制約が、その実行可能な速度や振幅に与える影響を具体的に評価した。そのため、筋の活性化ダイナミクスを考慮しない条件と考慮した条件の下で筋骨格系の逆モデルを構築し、様々な運動軌道を与えることでそれらの実行可能性を推定した。その結果、速度の速い運動の解析では、活性化ダイナミクスの影響が無視できないことが示唆された。

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

- [1] 山崎大河, 仲達俊介, 忻欣, 歩行運動の平面法則が成立する座標系について, 計測自動制御学会論文集, Vol. 49, No. 12, pp. 1172-1178 (2013) 査読有

〔学会発表〕(計14件)

- [1] 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(6日発表),

Osaka

- [2] Taiga Yamasaki, Naohiro Nakada and Xin Xin, Dynamic Stability of Rhythmic Forearm Movements in the Vertical Plane, Proceedings of SICE Annual Conference 2012 (SICE2012), August 20-23, Akita, pp. 1828-1832, CD-ROM (2012)
- [3] T. Yamasaki, X. Xin, Planning of rhythmic forearm movements in human: On stability achieved by physical property of musculo-skeletal system, Proceedings of 18th IFAC World Congress, DVD (2011.9.2)
- [4] 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)
- [5] 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, サテライトキャンパスひろしま
- [6] 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 (17日発表), 兵庫県民会館
- [7] 山崎大河: 動力学的な拘束下におけるヒトの運動選択の冗長性について, 第3回デザインバイオニクス講演会(同時開催: 第7回非線形テクノサイエンス講演会) 特別講演 pp. 8-9 (2012.2.21) 大阪大学
- [8] 中田直宏, 山崎大河, 忻欣: フィードフォワード制御下の上肢筋骨格系における周期運動の安定性解析, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012, DVD-ROM, 2P1-104, 2012.5.27-29 (29日発表), アクティシティ浜松
- [9] 山崎大河, 後藤清志, 忻欣: 鉄棒運動における重心軌道の冗長性, 電子情報通信学会技術研究報告, 回路とシステム, CAS2012-19, pp. 103-107 (2012.7.3) 京都市サーチパーク
- [10] 中田直宏, 山崎大河, 忻欣: 上腕周期運動における快適な周期と振幅について, 第14回IEEE広島支部学生シンポジウム, DVD-ROM, A-29, pp. 86 - 89, 2012.11.17-18 (17,18日発表), 岡山県立大学
- [11] 仲達俊介, 山本順平, 山崎大河, 忻欣: ペダリング運動中の関節間協調における平面法則の検証, 第14回IEEE広島支部学生シンポジウム, DVD-ROM, B-29, pp. 362 - 365, 2012.11.17-18 (17,18日発表), 岡山県立大学
- [12] 中田直宏, 山崎大河, 忻欣: 腕の周期運

動の安定性に慣性モーメントが与える影響, 日本人間工学会 中国・四国支部, 2012.12.15, 川崎医療福祉大学

[13] 仲達 俊介, 山崎 大河, 忻 欣, 歩行運動の平面法則が成立する座標系について, 生体医工学シンポジウム 2011, 長野. (2011年9月17日)

[14] 北林 峻人, 山崎 大河, 忻 欣, 歩行運動における運動軌道の冗長性の解析, 第34回日本生体医工学会中国四国支部大会講演抄録, p. 26, 2011, 徳島 (2011年10月22日)

## 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: 40364096