

令和 2 年 7 月 5 日現在

機関番号：25301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K00356

研究課題名(和文) 協調を仮想拘束とする神経筋骨格系の運動制御機構

研究課題名(英文) Motor control mechanism of neuro-musculo-skeletal system with motor coordination as virtual 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) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：ヒトの身体運動には、様々な構成要素(関節角度、筋活動など)の間に協調がみられる。本研究では、このような協調の実現を運動制御の中心戦略とした、新たな運動制御モデルを提案した。制御の難しい運動の例として、体操競技のつり輪、平行棒でのスイングなどの運動制御モデルを提案した。複数の協調を同時に考慮する運動の例として、立位姿勢において対象物に腕を伸ばす運動(全身リーチング)などの運動制御モデルを提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の意義は、従来の運動制御モデルでは陽に扱われることの少なかった、身体運動の協調を、達成すべき制御目的として陽に扱った運動制御モデルを提案したことにある。本研究の成果は、人間の運動制御の仕組みを理解すること、特に運動制御における協調の役割の理解すること、スポーツやリハビリテーションなどの運動解析に新たな視点を提供すること、同じ原理をロボットの制御に応用することなどに、つながるものである。

研究成果の概要(英文)：Coordination among various components (joint angle, muscle activity, etc.) is widely observed in human motion. Here, we proposed a new motor control model with such motor coordination as the central strategy of motor control. As an example of difficult-to-control motion, we proposed a motor control model of gymnastic exercises: swing on the gymnastic rings, swing on parallel bars, etc. As an example of a motion requiring multiple coordinations, we proposed a motor control model of the whole body reaching to extend an arm to the object in the standing posture.

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 協調 体操

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ヒトの身体運動には筋間、関節間などさまざまな要素の間に「協調」が見られ、様々な研究がなされている。例えば、歩行運動では、大腿、下腿、足部の各セグメントの鉛直軸に対する角度が、特定の線形関係を維持しつつ変化することが知られており、平面法則と呼ばれている。これは典型的な協調といえる。類似した協調は、歩行以外の様々な運動にもみられる。また例えば、神経系は運動の目的に関わる変数のみを制御し、そうでない変数の制御には無頓着であると仮定して運動のばらつきの偏りを解釈する Uncontrolled Manifold Analysis も、協調を定量化する試みといえる。また例えば、神経系は運動の目的に関わらない変数のばらつきには無頓着であると仮定して運動のばらつきの偏りを定量化する Uncontrolled Manifold Analysis も、協調を定量化する試みといえる。しかし、このような協調の背後にある運動制御機構の工学的・数理的な理解は、まだ十分になされていなかった。また、協調の役割は、身体自由度を下げ制御を容易にするという、補助的なものとみなされることも多かった。

一方、制御工学の分野では、系の自由度（例えば、関節数）よりも制御入力（例えば、アクチュエータ）の数が少ないシステムは、劣駆動系と呼ばれ、制御困難な系として様々な研究がなされている。ヒトの全身運動も、身体と環境との間には、直接駆動できる筋が備わっていないか、十分な駆動力を発生できないことがほとんどなので、その動力学には広義の劣駆動性が潜んでいるといえる。劣駆動系における、最も単純な制御戦略の一つは、すべての状態変数を直接制御するのではなく、一部の状態変数に対して適切な仮想拘束を実現することによって、間接的に本来の制御目的を達成しようとするものである。ここでの仮想拘束は、身体運動における協調に近い概念ともいえるが、これらを結びつける議論は従来ほとんどなされていなかった。

### 2. 研究の目的

本研究は、ヒトの運動制御機構の理解へ向けて、制御の難しさの「質」の異なる様々な運動の制御を、「協調の実現」という共通の視点でとらえ、これを制御の中心戦略に据えることによって、新たな運動制御モデルを生み出すことを目的とした。

### 3. 研究の方法

様々な身体運動に対して、筋骨格系の動力学をできるだけシンプルにモデル化し、各運動に合わせた協調を仮想拘束としてモデル化し、協調を実現する神経制御系について、劣駆動系の制御にも用いられる制御法であるフィードバック線形化を応用してモデル化することで、新たな運動制御モデルを構築した。モデルの動作を実際のヒトの運動と比較した。具体的には、以下のような運動に着目した。

器械体操における身体運動には、その制御を難しくする劣駆動性が様々な形で潜んでいる。本研究では、いずれも広義の劣駆動性をもつとみなせる、鉄棒、つり輪、平行棒、あん馬に対して、運動制御モデルを構築した。すべてのモデルに共通して、ホロノミックな仮想拘束としてモデル化した「協調」の制御を取り入れた。一方、各モデルの開発には、枠組みを拡張するための独自の試みも取り入れた。鉄棒運動のモデルでは、仮想拘束上での位置の表現、複数の仮想拘束の切り替えや、それに伴う入力の不連続性への対処、つり輪や平行棒のモデルでは、どのような仮想拘束によって技を実現できるかの検討、平行棒やあん馬のモデルでは、仮想拘束の表現の工夫などである。

ヒトが床面上に立った状態から対象物に手を伸ばす「全身リーチング運動」は、手先位置の制御と姿勢制御を両立するという多目的性がある。本研究では、全身リーチング運動を題材として、関節間協調のような仮想拘束に加えて、関節結合などの物理拘束も、共通の枠組みで扱えるような運動制御モデルを構築した。

ヒトが手先に握ったクランクを回転させる「クランク回転作業」は、自由度の数よりも駆動入力の数が多い駆動冗長性を特徴とする運動といえる。本研究では、クランク回転作業には、筋間の負荷配分問題として知られる最適化問題と相似の問題が存在することを指摘して、これを解くための静的最適化モデルを構築した。

### 4. 研究成果

(1) 鉄棒運動を3リンク劣駆動系と、協調の制御を通じた運動制御系によってモデル化した。このモデルでは申請者らの提案している従来モデルを以下の点で拡張したものである。関節トルクの発生における筋活動の遅れを考慮することで、関節トルクが不連続に変化するという従来モデルの欠点を克服した。媒介変数を使って仮想拘束を表現することで、仮想拘束の数理表現に由来した特異点をもつという従来モデルの欠点をなくした。仮想拘束の実現を目的とする複

数の制御モジュールを切り替えることで、モジュール構造をもつ制御モデルを構築した。さらに、このように拡張したモデルが実際に体操選手の運動に類似した運動を生み出せることを、鉄棒での「け上がり」のシミュレーションによって例示した。

(2) つり輪運動は、鉄棒運動よりも非駆動関節が多くその制御がさらに難しい運動としてモデル化される。体操の熟練者によると、つり輪において良いスイングを行なうためには、つり輪と身体の重心がつり輪の支点を通る鉛直線上を往復するように運動することが重要であるという。本研究では、これを重心位置に着目した協調とみなし、対応する仮想拘束を実現しつつ、スイングを行える可能性を解析した。解析の結果、関節トルクがつり輪と身体の水平方向および鉛直方向の重心加速度に与える影響を明らかにするとともに、運動中の姿勢には関節トルクが水平方向の重心加速度に影響を与えることのできない特異点が存在することを示した。これは、重心がつり輪の支点を通る鉛直線上を厳密に往復するような関節間協調の困難さを示している。

(3) (2)の結果から、つり輪におけるスイングは、重心に関する仮想拘束ではなく、関節間角度空間における平面で表される仮想拘束(協調)を設定し、その実現を制御目的においた制御系を新たに提案した。そして、数値シミュレーションによって、このモデルが体操選手のスイングに類似した運動を再現できることを確認した。

(4) 平行棒で行われるスイング(支持振動)に対して、関節間協調(仮想拘束)の制御に基づく運動制御モデルの構築と解析を行った。平行棒における支持振動を、2リンク劣駆動系(Acrobot)と、関節間協調を仮想ホロノミック拘束とみなした制御によってモデル化した。このモデルには関節間協調を関節角度に加えて、(デカルト座標系でみた)セグメントの重心位置なども併用できるような仮想拘束の表現を新たに導入した。

モデルのシミュレーションから、以下の結果を得た。まず、構築したモデルは体操選手の支持振動によく類似した運動を生成できることを示した。さらに、仮想拘束に関する解析から、支持振動の開始時における上肢・傾斜角度には、関節トルクの滑らかさ、関節トルクの絶対値の小ささ、力学的エネルギー変動の少なさの意味で「適度な大きさ」が存在することを示した。

体操競技者・指導者らの間には、スイング・スピードを高めるには「できるだけ肩を前に出さない」(上肢を前傾させない)ことが重要だ、というような経験知が共有されているという。本研究の結果は、経験知の理論的な裏付けになることや、新たな知見を追加することにつながる可能性がある。

(5) ヒトが床面上に立った状態から対象物に手を伸ばす「全身リーチング運動」に対し、仮想拘束(関節間協調)と物理拘束(リンクの関節結合など)を同じ枠組みで扱える運動制御モデルを提案するとともに、モデルが実験データに類似した動作を再現できることを、シミュレーションによって確認した。

(6) あん馬での両足旋回における水平面内の身体運動を、2次元的にモデル化するとともに、仮想拘束の制御を軸とした運動制御モデルを提案した。片手支持期を非駆動関節を1つもつ(劣駆動度1)の劣駆動系、両手支持期を全駆動系とみなした。関節間協調は重心軌跡に着目した設定し、その実現を制御目的においた制御系を構築した。そして、数値シミュレーションによって、このモデルが体操選手の行う両足旋回に類似した様々な周期解をもつことを確認した。

(7) あん馬での両足旋回の運動制御モデルを、3次元空間での身体運動を説明するモデルに拡張した。体操選手の身体全体を1本の剛体とみなして、その3次元的回転を考慮した。さらに、あん馬の把手(ポメル)と腕の間の関節、および肩関節において発生するトルクがゼロのまま回転できる運動軌道を導出して、その制御が可能であることを示した。なお、この条件をみたく運動軌道は、体操選手の運動に類似した特徴を有していることを確認した。

(8) クランク回転作業および自転車ペダリング動作の運動制御モデルの基礎検討を行った。これらの運動の特徴は、系の自由度よりも駆動入力数が多いこと(駆動冗長系であること)にあるが、この特徴は1つの関節を複数の筋で駆動する、一般的な筋骨格系にも共通の特徴である。そのため、本研究では、クランク回転作業には、筋間の負荷配分問題として知られる最適化問題と相似の問題が存在することを指摘して、その解決法を提案した。

以上の結果は、本研究で開発している運動制御モデルの枠組みが、様々な運動に拡張可能なことを示している。

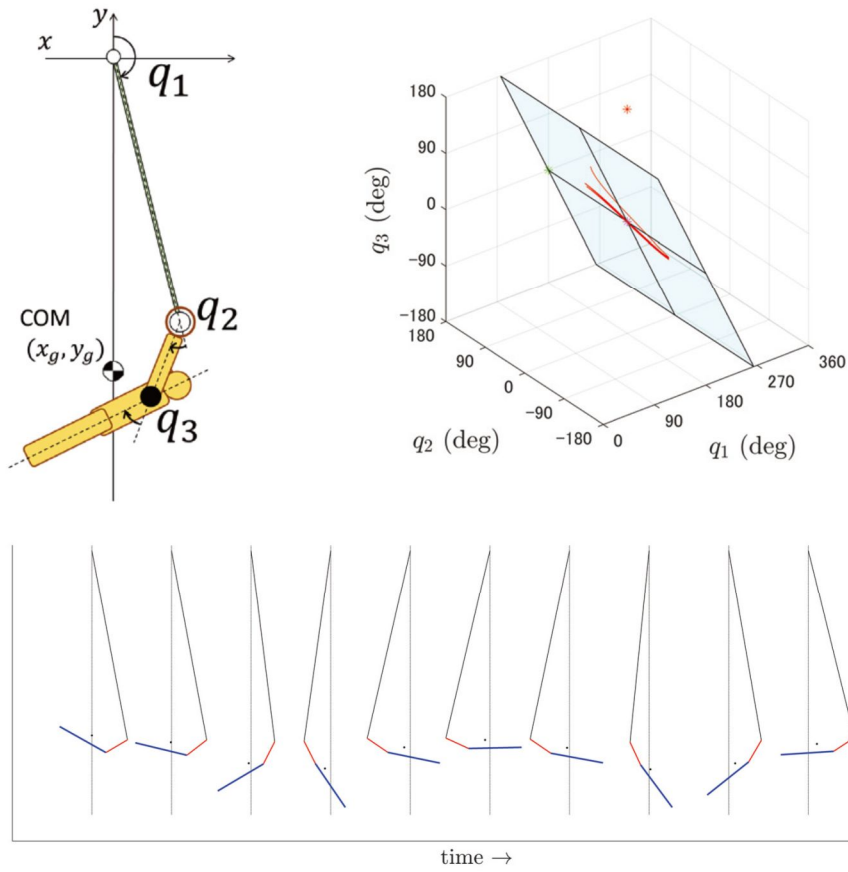


図1 つり輪でのスイングにおける仮想拘束と運動制御モデルによるシミュレーション結果

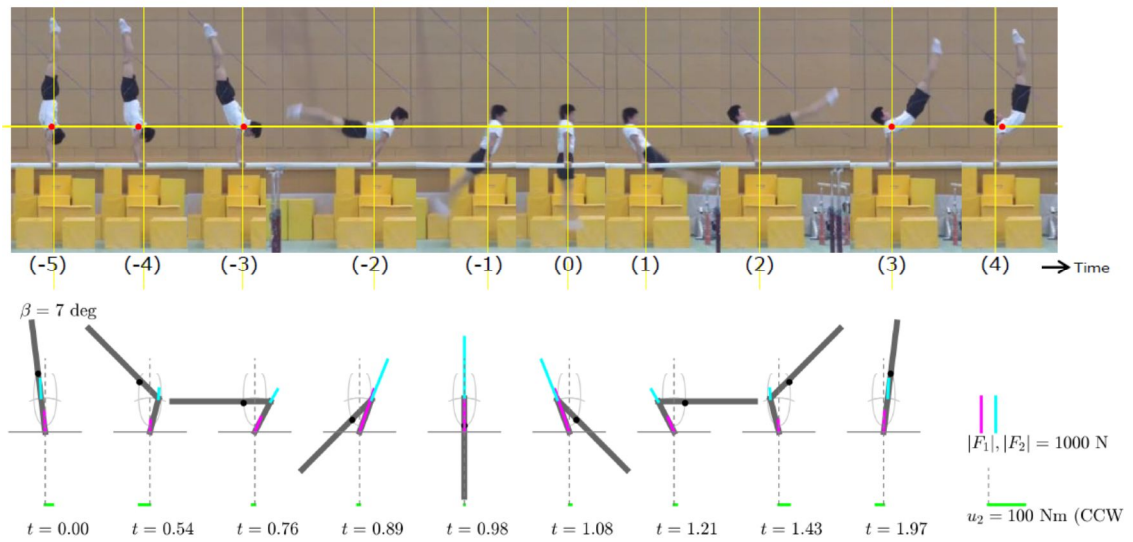


図2 平行棒でのスイングと運動制御モデルによるシミュレーション

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 Taiga Yamasaki , Katsutoshi Idehara, and Xin Xin	4. 巻 49(10)
2. 論文標題 Estimation of muscle activity using higher-order derivatives, static optimization, and forward-inverse dynamics	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of biomechanics	6. 最初と最後の頁 2015-2022
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2016.04.024">https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2016.04.024</a>	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19件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 山崎大河, 山脇恭二
2. 発表標題 平行棒でのスイングの制御モデル
3. 学会等名 日本機械学会 シンポジウム：スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス2018 (SHD2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山崎大河, 忻欣, 泉晋作, 西脇一宇, 中村仁彦, 後藤大輔
2. 発表標題 あん馬旋回運動の2次元劣駆動モデル
3. 学会等名 日本機械学会 シンポジウム：スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 今井秋介, 山崎大河, 忻欣, 泉晋作
2. 発表標題 つり輪におけるスイングの運動制御モデル
3. 学会等名 日本機械学会 シンポジウム：スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 丸山琢郎, 山崎大河, 忻欣, 泉晋作
2. 発表標題 物理拘束と仮想拘束に着目した全身リーチング運動制御モデル
3. 学会等名 第26回計測自動制御学会中国支部学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 吉岡優太郎, 山崎大河, 忻欣, 泉晋作
2. 発表標題 仮想空間における可変長振子を制御する人間の運動学習特性
3. 学会等名 平成29年 電気学会 電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Taiga Yamasaki, Hiroshi Takeshita, Xin Xin, Shinsaku Izumi
2. 発表標題 Adaptation of cycling motion to a non-uniform load
3. 学会等名 SICEライフエンジニアリング部門シンポジウムLE2017論文集
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shusuke Imai, Taiga Yamasaki, Kyoji Yamawaki, Xin Xin, Shinsaku Izumi
2. 発表標題 EFFECT OF JOINT TORQUE ON HORIZONTAL MOTION OF CENTER-OF-MASS DURING SWING ON GYMNASTIC RINGS
3. 学会等名 34th International Conference on Biomechanics in Sports (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 山崎大河, 竹下洋, 田口恵理, 忻欣, 泉晋作
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第60回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 山崎大河, 今井秋介, 山脇恭二
2. 発表標題 つり輪での重心制御に関する解析
3. 学会等名 洛翔体操研究会 (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 岡本恵里子, 山崎大河, 忻欣, 泉晋作
2. 発表標題 筋活動を推定する計算筋制御法の精度について
3. 学会等名 日本人間工学会第57回大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 山崎大河, 岡本佑太, 忻欣
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第10回 Motor Control 研究会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Taiga Yamasaki, Yuta Okamoto
2. 発表標題 A study on control objectives in human motor control: high bar motion
3. 学会等名 SICEライフエンジニアリング部門シンポジウムLE2016
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 岡本佑太, 山崎大河, 忻欣, 泉晋作
2. 発表標題 関節間協調の切り替えを用いた運動制御モデルの検討
3. 学会等名 第37回バイオメカニズム学術講演会講演予稿集
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 岡本佑太, 山崎大河, 忻欣, 泉晋作
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第18回IEEE広島支部学生シンポジウム
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 今井秋介, 山崎大河, 忻欣, 泉晋作
2. 発表標題 つり輪運動中の関節トルクが重心加速度に与える影響
3. 学会等名 第18回IEEE広島支部学生シンポジウム
4. 発表年 2016年



1. 発表者名 岡本恵里子, 山崎大河, 忻欣, 泉晋作
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第18回IEEE広島支部学生シンポジウム
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 岡本佑太, 山崎大河, 忻欣, 泉晋作
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第4回制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 城崎和輝, 山崎大河, 忻欣, 泉晋作
2. 発表標題 クランク回転作業における負荷配分の静的最適化モデル
3. 学会等名 第63回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山崎大河, 西脇一字, 名和基之, 山脇恭二, 中村仁彦, 忻欣
2. 発表標題 あん馬旋回運動の単純化モデル
3. 学会等名 日本機械学会 シンポジウム: スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス2019(SHD 2019)
4. 発表年 2019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
--	---------------------------	-----------------------	----