

機関番号：25301

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009 ～ 2010

課題番号：21700225

研究課題名 (和文) 鉄棒運動スキルの冗長性と生成規範

研究課題名 (英文) Redundancy and Optimization Criteria for Planning of the High Bar Movements

研究代表者

山崎 大河 (YAMASAKI TAIGA)

岡山県立大学・情報工学部・助教

研究者番号：40364096

研究成果の概要 (和文)：

体操選手が鉄棒で行う「け上がり」運動の最適性を、関節トルクの時間微分の二乗を最小化する指令トルク変化最小規範と、関節トルクの二乗を最小化するエフォート最小規範を組み合わせる2種類の最適化規範（複合型規範と階層型規範）を提案した。さらに、タスクの達成条件を仮定した上で、その条件を満たすような運動の冗長性を系統的に探索する手法を提案し、体操選手が鉄棒で行う「け上がり」や「後方車輪」の背後にある運動選択の冗長性の一部を具体的に示した。

研究成果の概要 (英文)：

(1) We proposed two optimization criteria for explaining the kip movements of expert gymnasts on the horizontal bar: a combined criterion and a hierarchical criterion. Both criteria require the minimization of the square of the joint torques and the time derivatives of the joint torques during the movements. (2) We proposed a systematic method to calculate a set of movements that achieve the tasks defined by an initial pose and a final pose, and showed a part of redundancy of the kip movements and the giant swing backward movements on the horizontal bar.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2010 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：知能情報処理・知能ロボティクス

キーワード：鉄棒、冗長性、最適性、生成規範、モーションプランニング、運動制御

## 1. 研究開始当初の背景

ヒトの運動制御のメカニズムの解明を目指す基礎研究は、主に腕のリーチング運動などの単純な運動を対象になされていた。これらの運動においてヒトの神経系が選択する

運動軌道を説明するために、種々の最適化規範が提案・比較されていた。しかし、これらの規範で説明できると報告されている運動は比較的単純な運動がほとんどであった。一方、スポーツにおける各種動作など、より一般的で複雑な運動を最適性の観点から解析

している研究の多くは、対象とする運動ごとに異なる規範が用いられるなど、個別のアプローチがとられることが多く、腕のリーチング運動を含む他の運動との関連まで視野に入れた議論が行われることは少なかった。

体操選手が鉄棒において行うことのできる運動は、2 階の非ホロノミック拘束と呼ばれる力学的な拘束の影響を強く受けていることが知られていた。しかし、体操選手が鉄棒において実現している技（運動）は、この力学的な拘束によって運動の選択技（冗長性）が非常に限定されているために必然的にほぼ決まりきった運動になってしまうのか、あるいは腕のリーチング運動などのように、運動の選択の自由度がある程度以上存在するなかから、何らかの規範によって選択された結果として理解できるのかは明らかでなかった。

## 2. 研究の目的

本研究課題では以下の研究目的を掲げた。

- (1) 体操選手の身体的な制約を取り入れ、鉄棒運動における運動選択の冗長性を解析する手法を確立し、鉄棒での種々の技に対して、その運動の背後にある運動の冗長性の様相を具体的に明らかにする。
- (2) 体操選手が鉄棒で行う「け上がり運動」を含む様々な技について、腕のリーチング運動を説明するとされる指令トルク変化最小規範などの仮定の下で、運動の経由点（分節点）の抽出を行う。
- (3) 体操選手の鉄棒運動の背後に広がる運動の冗長性の様相と、最適化規範を使って予測される運動の分節点（経由姿勢）との比較・検討を通じて、運動の「コツ」に対応するような概念を、科学的に理解・解析できるような新しい理論の提案を目指す。

## 3. 研究の方法

### (1) 鉄棒運動の計測

十分な体操競技歴をもった体操選手による高鉄棒での通常のけ上がり運動と後方車輪運動を計測した。被験者には、各技を普段行っているのとできるだけ同じ要領で行うように指示した。ビデオカメラ（1 台または 3 台）によって運動とキャリブレーション用の器具を撮影し、PC に取り込んだ映像から座標のキャリブレーションを行った後、鉄棒軸、肩関節、股関節、および足関節の座標をデジタルサイズして関節角度の時間波形を得た。

### (2) 鉄棒運動のモデル化

鉄棒運動を行う体操選手の身体を矢状平面内を運動する剛体 3 リンク（上肢、頭部・体幹、下肢）としてモデル化して、その動力

学モデルを構築した。また、モデルの詳細さの影響をみるため、上記のモデルにおいて鉄棒のしなりをバネ・ダンパモデルとして追加したモデルも構成した(図 1)。これらの動力学モデルに対して、ヒトの神経系が直接駆動する関節角度（肩関節および股関節）の時間変化を、計測データを近似したスプライン関数またはフーリエ級数によって入力し、残った自由度に対応する変数（鉄棒に対する上肢の角度および地面に対する鉄棒の位置）に関する状態方程式を数値的に解いた。それぞれのモデルの物理パラメータはアスリートの身体パラメータの統計データや実際の計測データに合わせて設定した。

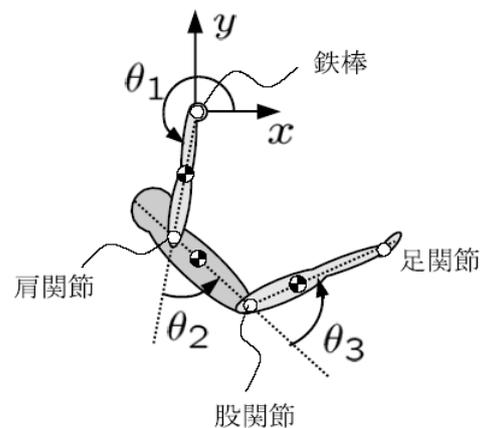


図 1 鉄棒運動を行う体操選手のモデル

### (3) 最適性の解析

指令トルク変化に加え、できるだけエフォート（関節トルクの二乗積分）の小さい運動を選択するという規範を考えることで、1) 経由点を用いずに運動を説明できる可能性、2) 経由点の選択を説明できる可能性、について検討した。そのため、1) エフォートと指令トルク変化の加重和による評価関数を最小化する複合型規範、2) 経由点の時空間的な配置をエフォートを最小化するように決める階層型規範、をそれぞれ提案した。

上記の規範を仮定した上で、け上がり運動（または後方車輪運動）の境界条件を満たす最適な運動を数値計算によって探索した。数値計算は境界条件と関節可動域を考慮したペナルティ法と準 Newton 法を組み合わせで行った。複合型規範に関しては経由点を仮定せず最適化計算を行った。階層型規範に関しては、まず、様々な経由点（体操選手の運動に沿った経由点や体操選手の運動に沿わない経由点を関節可動域内に規則的に配置）を仮定して指令トルク変化最小規範を用いた最適化計算を行い、次に、求められた解を比較して運動全体のエフォートが最も小さく

なるような経路点を推定した。

#### (4) 冗長性の解析

体操選手の「け上がり」や「後方車輪」の動力学モデルにおいて、駆動関節角度の時間変化をスプライン関数やフーリエ級数を用いて表現した(2)のモデルにおいて、これらの技の達成条件(図2)を定義した上で、その背後にある運動の冗長性の一部を、スプライン関数やフーリエ級数のパラメータの集合として、設定した条件下で一意的に求める方法を提案した。

この手法は、状態空間の次元に1を加えた数に対応する次元のパラメータの部分空間では、初期姿勢から出発した状態点を終了姿勢に到達させるようなパラメータの集合が曲線を成すことを用いている。具体的には、状態空間が2次元の場合、探索過程ではあるパラメータ  $q_b \in \mathbf{R}^1$  を微小に変化させ、その影響によって生じる終点の誤差をパラメータ  $q_a \in \mathbf{R}^2$  によって補正するということを繰り返す(図3)。特殊な状況を除き、この修正量は一意に決まるため、境界条件を満たす運動をシステムティックに探索することができる。

本研究では、さらに、探索によって得られたパラメータ集合から、関節トルクやパワーなどの制限を満たす要素のみを抽出することで、実際に実現可能な運動の集合を見積もった。

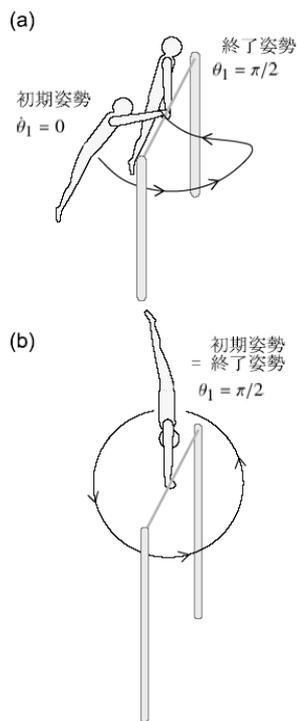


図2 技の達成条件。(a) け上がり, (b) 後方車輪。

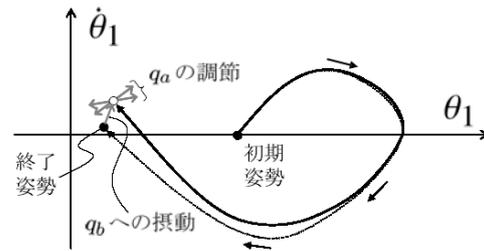


図3 冗長性の探索方法。

## 4. 研究成果

### (1) 最適性の解析結果

け上がり運動に対して、指令トルク変化最小規範またはエフォート最小規範を仮定し、経路点なしで、初期姿勢と終了姿勢の境界条件だけの指定から生成された運動は、いずれも体操選手の運動とはあまり類似していなかった。

次に、経路点を指定せず、指令トルク変化とエフォートの加重和を最小化する複合型規範を仮定して生成した運動は、最適化計算における初期値に依存して2つの解に収束した。一方の解は体操選手の運動に類似しており、もう一方は類似しなかった。

さらに、関節可動域全体に配置した種々の経路点(265種類)の仮定の下で指令トルク変化最小規範に従った運動をそれぞれ生成した。生成結果を比較すると、指令トルク変化のコストは、体操選手の運動に対する誤差が大きい運動において小さい傾向が見られたが、エフォートのコストは体操選手の運動との誤差が小さい運動において小さい傾向が認められた(図4)。エフォートの最も小さくなった運動を階層型規範の近似的な解とみなした(図5)。

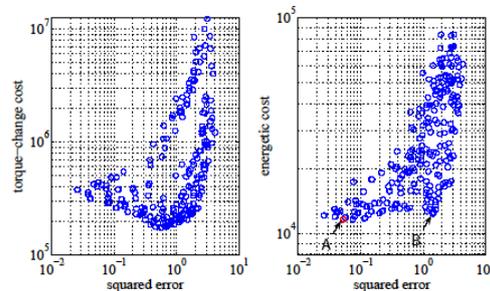


図4 体操選手の運動と最適化計算による運動生成結果との誤差(横軸)に対する指令トルクコスト(左パネル:縦軸)および(右パネル:縦軸)。

(H-A)

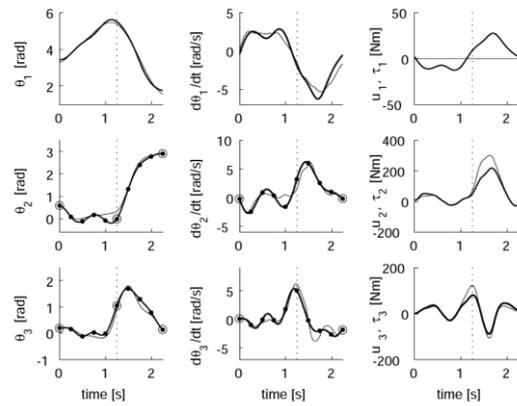


図5 階層型規範の近似的な解. 左2列において細線は計測データ, 太線は運動生成の結果を表す. 右列における太線と細線はそれぞれモデルの指令トルクとトルクを表す.

数値解析の結果, 複合型規範と階層型規範のどちらのアプローチにも, 経由点を指定しない場合の指令トルク変化最小規範よりも, 体操選手のけ上がり運動をよく再現できる可能性があることが示された. 結果のスタック図を図6に示す(複合型規範の解は計測データに近い方のみ). 以上の結果から, 体操選手のけ上がり運動では, 指令トルク変化だけでなくエフォートも低く抑えるような運動が選択されていることが示唆された.

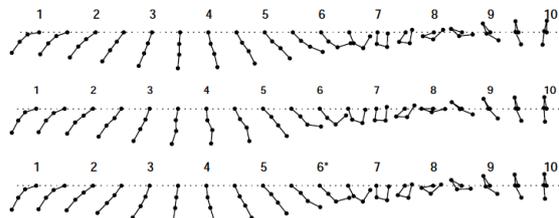


図6 体操選手の運動の計測結果(上段)と最適化の結果(中段: 複合型規範, 下段: 階層型規範)を表すスタック図. 時間は左から右へ進む.

この結果は, 従来, 腕のみの運動(リーチングなど)の説明に使われていた指令トルク変化最小規範と, 全身運動の説明に使われていたエフォート最小規範という2つの規範を統一的に理解できる方向性を提示したという点で意義のあるものと考えている.

また, ここで提案した階層型規範では, 上位層ではエフォート, 下位層では指令トルク変化という異なる量を最小化するものである. このように階層的なモデルを用いることで, タスクによらず汎用的に使用される筋骨格系と, タスクによって異なる規範が使われる可能性のある神経系の特性を合わせて説明できる可能性を持っている. さらに, 運動制御の分節化が求められるような「複雑な」

運動の説明にも対応しやすいという利点も持っている. この最適化規範の階層化は本研究において, 新しく提案した方向性であり, 最適性という視点からヒトの運動を解き明かす上で, 今後の研究において重要な意味を持つ可能性がある.

## (2) 冗長性の解析結果

提案した解析手法を用いて, 鉄棒でのけ上がり運動と後方車輪運動という技の背後にある運動の冗長性の一部を実際に数値計算で求められることを示した. この探索において運動の冗長性を表すパラメータの集合がパラメータ空間において曲線を成す様子を図7に示す. また, け上がり運動と後方車輪運動の関節角度変化の冗長性の解析結果を図8と図9にそれぞれ示す.

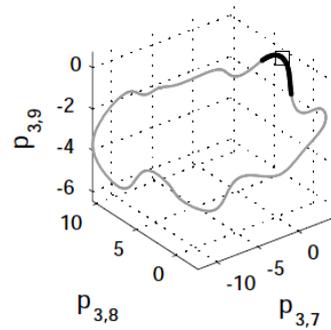


図7 運動の冗長性を現すパラメータの集合がパラメータ空間において曲線を成す様子. 太線部分は関節角度の可動範囲を満たす運動を表す.

種々のパラメータの部分空間において運動の冗長性の探索を行った結果, 関節可動域および関節トルクや関節パワーなどの制約を考慮した場合にも, これらの技を達成できるような運動は少なくとも無視できない程度に冗長に存在していることが分かった.

この結果は, 鉄棒運動という動力学的拘束を強く受ける運動においても, そこで実行される技は, 身体運動の力学や身体的な能力から一意に決まっているのではないことを意味している. 逆に言えば, 鉄棒においても神経系は運動選択の自由度を持っていると言える. すなわち, 鉄棒運動の最適性についての検討はトリビアルな問題ではないといえる.

また, 解析結果から運動軌道に沿った冗長性の大きさは, 着目する物理量によって全く異なる様相を呈することが明らかになった. 例えば, タスクを達成するような運動の集合を関節角度の時間波形としてプロットすると, その角度波形の「束」は運動時間に沿って図8や図9のようにその「太さ」を変える. しかし, このような関節角度の「束」と, 関節トルクの「束」では, その太さの変化の様

相は大きく異なりうるということが分かった(図10と図11にその例を示す)。この結果は、運動軌道に沿って冗長性の変化を評価する際に、認識しておく必要のある非常に重要な知見である。

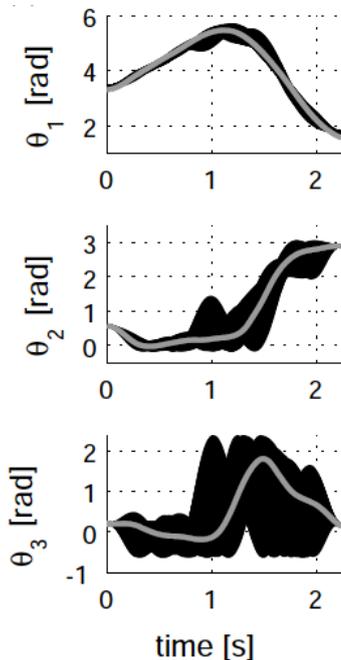


図8 け上がり運動における関節角度変化の冗長性(灰色の線は体操選手の運動)。

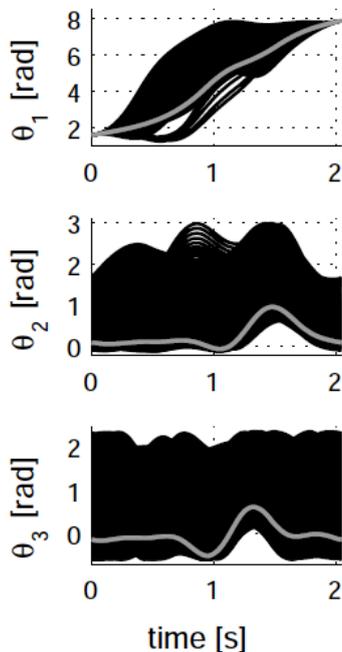


図9 後方車輪運動における関節角度変化の冗長性(灰色の線は体操選手の運動)。

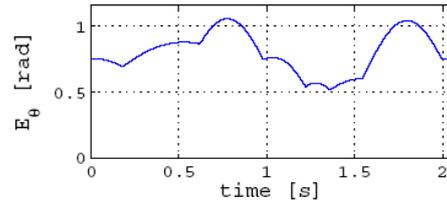


図10 体操選手の後方車輪運動を中心にした関節角度波形の冗長性の評価例。

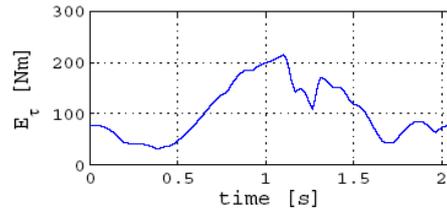


図11 体操選手の後方車輪運動を中心にしたトルク波形の冗長性の大きさの評価例。

### (3) 今後の展望

本研究では、鉄棒運動の冗長性と最適性に着目した解析を行い、上記のような成果を得たが、その過程において、冗長性の大きさをどのような物理量に着目して定量的に評価すべきかという課題や、階層型規範に基づく最適化問題を精度良く解くことが難しいという課題なども明らかになった。

しかし、本研究に引き続き、動力的拘束を受ける様々な運動の冗長性の様相をより詳細に調査・理解していくこと、階層型規範による運動の説明をより精度良く行えるような解析手法を開発していくこと、さらにそれらの結果を比較検討していくことによって、俗に言う運動の「コツ」を科学的に理解することにつながる可能性は十分にあると考えている。

### 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 3 件)

- ① 山崎大河, 金本賢典, 後藤清志, 忻欣: 鉄棒運動の背後にある運動選択の冗長性, バイオメカニズム 20, pp. 31-42 (2010)
- ② Taiga Yamasaki, Kiyoshi Gotoh, Xin Xin: Optimality of a kip performance on the high bar: an example of skilled goal-directed whole-body movement, Human Movement Science, 29, pp. 464-482 (2010)

- ③ 山崎大河, 竹内三世, 後藤清志, 忻欣:  
鉄棒運動の生成規範: トルク変化とエ  
フォートに着目した二つのアプローチ,  
システム制御情報学会論文誌, Vol. 22,  
No. 12, pp. 399-406 (2009)

[学会発表] (計 5 件)

- ① Yoshinori Kanemoto, Taiga Yamasaki,  
Xin Xin, Kiyoshi Gotoh: Redundancy of  
the Giant Swing Backward Movement on  
the High Bar, Proceedings of  
ICROS-SICE International Joint  
Conference 2009 (ICCAS-SICE2009),  
August 18-21, Fukuoka, CD-ROM (2009)
- ② 木原一将, 山崎大河, 後藤清志, 忻欣: 鉄  
棒にかかるトルクを再現する鉄棒運動  
の動力学モデルの構築へ向けた一考察,  
第21回日本バイオメカニクス学会大会,  
プログラム, p. 98, 2010/8/28-30, 国  
士舘大学 (2010.8)
- ③ 金本賢典, 山崎大河, 忻欣, 後藤清志,  
鉄棒運動における冗長性の評価法に関  
する一考察, 平成22年度(第61回)電  
気・情報関連学会中国支部連合大会論文  
集, pp161-162, 2010年10月23日, 岡  
山, (2010.10)
- ④ 山崎大河, 金本賢典, 後藤清志, 忻欣: 鉄  
棒運動の背後にある冗長性と最適性,  
第21回バイオメカニクスシンポジウム  
箱根 前刷, pp. 201-210, 2009年8月  
4-6日(2009.8)

## 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・助教  
研究者番号: 40364096