

筋骨格人体モデルにおける筋張力計算の数理計画問題

Mathematical Programming Problem to solve muscle tensions of Musculo-Skeletal Human Model

○ 藤田悠介 (東京大) 中村仁彦 (東京大) 山根克 (CMU) 鈴木一郎 (東京大)

○ Yusuke FUJITA (University of Tokyo), Yoshihiko NAKAMURA (University of Tokyo),
Katsu YAMANE (Carnegie Mellon University), Ichiro SUZUKI (University of Tokyo)

In this paper, we described the method to compute somatosensory information of human body. We applied mathematical programming method to enable efficient dynamics computation of Musculo-Skeletal human model.

Key Words: Mathematical Programming, Dynamics Computation, Musculo-Skeletal Human Model

1. はじめに

人間は五感から得られる視覚情報や皮膚接触情報などのほかに、筋・腱の張力や骨応力などの内部感覚系を含めた感覚系情報を用いた運動感覚系情報処理を行っている。これらの運動感覚系情報処理が可能となれば、人間の身体性に基づく情報処理理論の研究における有用な研究基盤となる。しかし、これまで内部感覚系情報を運動情報と結びつけることができなかった。バイオメカニクス分野では筋骨格系人体モデルに基づく運動解析が行われてきたが¹⁾²⁾、これらは運動機能の解析を中心とするためモデルの簡略化がなされており、運動感覚系モデルとしては十分ではない。このような背景のもと、鈴木らは精緻な筋骨格系人体モデルを用いて、運動感覚系情報処理のための高速動力学計算法を開発した³⁾。しかし筋骨格系人体モデルの逆動力学計算において、運動を決定するパラメータに対して筋・腱・靭帯の要素数が非常に多く、力が一意に決まらないという未決定性問題が存在した。そこで本研究では数理計画法を用いることによって、大規模な最適化問題を効率的に解く方法を提案する。

2. 筋骨格人体モデルの逆動力学計算

2.1 計算概要

我々が構築した筋骨格人体モデルは、適当な細かさにグループ分けされた骨格系剛体モデルと、骨格上に張り巡らされた筋・腱・靭帯系ワイヤモデルからなる³⁾。このモデルにおいて、ある運動データからそれを実現するために必要な筋・腱・靭帯の力を計算する。計算の概要は以下のようになる。

計算1 骨格系剛体モデルにおいて、与えられた運動を実現するための一般化力 τ_g ($\tau_g \in R^m$) を求める。

計算2 一般化力 τ_g を実現する筋・腱・靭帯の力 f ($f \in R^n$) を求める。ここで、 τ_g と f は以下の関係を持つ³⁾。

$$\tau_g = J^T f. \quad (1)$$

J ($J \in R^{n \times m}$) は筋・腱・靭帯の長さの一般化座標に対するヤコビアンである ($J \triangleq \partial l / \partial \theta_g$)。ただし筋張力は引っ張り方向のみに働くので

$$f \leq 0 \quad (2)$$

となり、この拘束条件のもとで τ_g から最適な f へのマッピングを行う。

計算2において筋・腱・靭帯の数が一般化力の要素数に対して冗長であるため一意に定まらない問題が本質的に存在する。この問題を解くには行うためには何らかの最適化計算が必要であるが、Eq.(1)Eq.(2)の条件を満たすような大規模な計算が必要となる。この計算を効率的に行うために、数理計画法の手法を用いて筋・腱・靭帯の張力を決定する。

2.2 数理計画法による筋の冗長性問題の解法

τ_g から Eq.(1)Eq.(2)を満たす f を求める未決定性問題に対する2種類の解法を以下で述べる。

2.2.1 線形計画法による解法

条件式 Eq.(1)Eq.(2)が共に線形な方程式であるため、計算2に線形計画法 (Linear Programming) を適用する。線形計画法は、いくつかの線形方程式、あるいは線形不等式の制約条件のもとで、ある目的関数を最大化 (最小化) するような解を求める問題である。線形計画法の代表的な計算法である単体法は大規模な計算を高速に行うことができる。今、非負なる重みを要素とするベクトルを a ($a \in R^n$) とおき、以下のような目的関数を考える。

$$a^T f \quad (3)$$

f のすべての要素は負または0なので、Eq.(3)を最大化することは f の要素の重みつき総和を最小化することになる。よって計算2を拘束条件 Eq.(1)Eq.(2)のもとで Eq.(3)を最大化するような線形計画問題に定式化することで、 f の総和を最小化するような解が求められることができる。

しかし実際は上述の定式化にしたがって計算を行ったところ Eq.(1) 厳密にを満たす解が存在しなかったため Eq.(1) を以下のように修正した。

$$\tau_g - \alpha \leq J^T f \leq \tau_g + \alpha \quad (4)$$

α は実際の τ_g の値からのずれをあらわし, なるべく小さな値を選んだ。

2.2.2 二次計画法による解法

線形計画法による手法においては Eq.(4) の α のずれは許すような f を求めているが, 二次計画法 (Quadratic Programming) を用いることでできるだけ厳密に Eq.(1) を満たす f を求める。二次計画法は拘束条件:

$$Ax = b \quad (5)$$

$$Cx \leq d \quad (6)$$

の下で, 目的関数:

$$Z = \frac{1}{2} x^T Q x + c^T x \quad (7)$$

を最小化するような問題である。特に Q が半正定値対称行列の場合の計算アルゴリズムは非常に良く用いられている。今, Eq.(2) を拘束条件,

$$\begin{aligned} Z &= \| \tau_g - J^T f \|^2 \\ &= f^T J J^T f - 2 (J \tau)^T f + \tau \tau^T \end{aligned} \quad (8)$$

を目的関数と設定すれば, Eq.(1) をできるだけ厳密に満たす f を求めることができる。

3. 実験

モーションキャプチャーで計測した跳りの動作において, 全身の筋・腱・靱帯の張力がどのように発生しているかの計算を行った。計算の結果求めた筋・腱・靱帯の張力を可視化したものを Fig.1 に示す。筋張力が発生すると筋の色が黄から赤に変化し, 腱や靱帯も同様に水色から青色に変化するようにした。

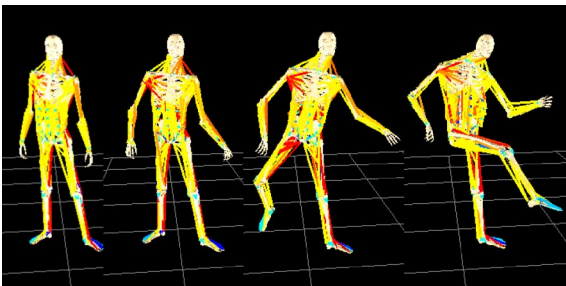


Fig. 1 an Example of Inverse Dynamics

線形計画法の計算にはフリーのライブラリの GLPK (GNU Linear Programming Kit)⁴⁾ を用い, 二次計画法の計算にはフリーのライブラリ OOQP (Object Oriented software for Quadratic Programming)⁵⁾ を用いた。

Table 1 computational time and accuracy

	LP method	QP method
time [sec/frame]	0.375	27.25
Z [N ²]	8,622	2,339

線形計画法 (LP) と二次計画法 (QP) を用いたときの計算結果を Table 1 に示す。計算は PentiumIV 2GHz のマシンで行った。ある 1 フレームの最適化計算に計算にかかった時間と Eq.(8) の Z の値を比較している。計算時間は線形計画法を用いた場合のほうがはるかに高速になっている。 Z の値は二次計画法を用いた場合のほうが幾分良い値となっている。二次計画法の手法においては, もっと多く計算時間をかければ Z の値をもっと小さくすることもできる。ただし, 計算時間はさらに大きくなってしまう。線形計画法の手法においては Z の値を意図的に小さくするには手動で Eq.(4) の α の値を小さくしていくしかないが, どれだけ小さくできるかは現在のところ試行錯誤を行うほかない。ただし現在は $\forall_i \alpha_i = 10[N]$ としており, Z は $\|\alpha\|^2 = 31400$ 以下になることは保証されている。

線形計画法による手法と, 二次計画法による手法は用途に応じて使い分けることができるだろう。前者は高速に計算が行え, 後者は妥当性が高い f が得られる。

4. 結論

本研究において, 筋骨格モデルの逆動力学計算の際の筋・腱・靱帯の冗長性を効率的に解決するために線形計画法と二次計画法を用いた 2 つの手法を提案した。それぞれの特徴は以下のとおりである。

- 線形計画法を用いた手法は, 全体の筋・腱・靱帯における総和を最小化するような張力を高速に求めることができる。ただし, 得られた張力は厳密にはもとの運動を再現するものではない。
- 二次計画法を用いた手法は, もとの運動を厳密に再現するような筋・腱・靱帯の張力を求めることができる。ただし, 計算時間は大きくなる。

今後は, 筋電位計測や床反力計測の情報を利用し, 人間が実際に出している力に合うような筋・腱・靱帯の張力の算出を考えていく。

参考文献

- 1) 長谷和徳, 山崎信寿, 汎用 3 次元筋骨格モデルの開発, 日本機械学会論文集, Vol.61, pp.295-300, 1995
- 2) 幸村琢, 多重解像度手法による筋骨格モデルの動作生成, ライフサイエンス関連研究講演会予稿集, AIST, 2002
- 3) 鈴木一郎, 山根克, 多谷浩嗣, 中村仁彦, 高速動力学計算法を用いた詳細人体モデルに基づく人間の力学計算, 第 20 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp3C14, 2002.
- 4) GLPK: <http://www.gnu.org/software/glpk/glpk.html>
- 5) OOQP: <http://www.cs.wisc.edu/~swright/ooqp/>