

課題名 (タイトル) :

人体の力学と運動機能の計算法の研究

利用者氏名 : ○ 泰地 真弘人, 中村 仁彦, 高野 渉, Sreenivasa Manish, 鮎澤 光, 池上 洋介,
橋本 淳, 濱野 聖也, 平澤 謙章

所属 : 神戸研究所 HPCI 計算生命科学推進プログラム 高度化推進グループ

1. 本課題の研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

ロボティクスの運動学・動力学を基盤とした人間の全身の骨格・筋・神経のモデリングが実現され、人間の外部運動計測から筋張力の推定や反射ネットワークの同定が可能になりつつある。また、上記のモデルを通じて人間の多様な運動データが蓄積され、身体性に基づく認知情報処理の枠組みが構築されてきた。本課題では、各体組織の体積効果を考慮した詳細な全身神経筋骨格のための計算論の確立、および運動情報・体性感覚情報と人間の認知を繋ぐ情報処理を構築することを目的とする。人間の身体と認知情報処理のメカニズムを解明する新たな手法となる。

2. 具体的な利用内容、計算法

・前年度から引き続き筋肉の体積効果を考慮した全身の筋張力の並列計算手法の開発を行った。本手法では、ロボティクスにおける剛体リンク系の力学計算法と、筋形状モデルに対する非線形有限要素解析を同時に解く。逐次二次計画法を応用することで、一回あたりの収束計算の最中では、筋の有限要素計算を剛体リンク系の力学計算と独立に分離することができるため、一つ一つの筋の有限要素計算を並列に計算できる。本年度は、大規模計算に向けて安定な計算を実現するために、微圧縮性を考慮した Mooney-Rivlin 体を利用する計算手法へと変更を行った。弾性体の変位の他に圧力も未知変数となるが、昨年度までに開発した手法と同様の定式化ができることを示し、矛盾ない拡張を行った。

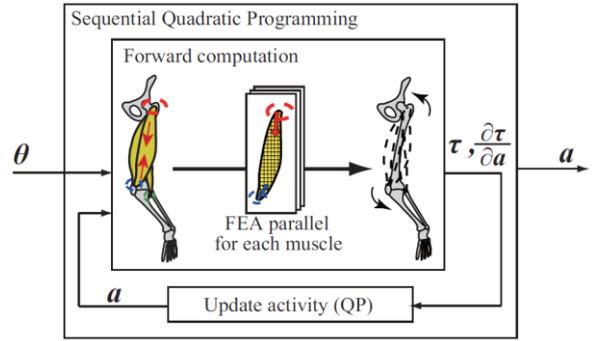


図 1. 体積効果を考慮した筋活動度推定法

・大規模脊髄神経ネットワークの構築を行い、骨格筋と脊髄神経モデルの接続を行い、神経筋骨格シミュレータを開発した。脊髄神経ネットワークは並列ニューロシミュレータ NEST を用いて構築し、筋骨格は既に関節駆動型の筋骨格モデルを利用した。ワイヤ駆動型筋骨格モデルは後に有限要素筋骨格モデルに置き換わる予定である。脊髄神経ネットワークと筋骨格モデル間の神経信号のやり取りにおいて、運動ニューロンのスパイク信号から筋活動度へ、筋長変化から感覚ニューロンのスパイク信号へ変換を行うインターフェースも同時に開発した。これらは MPI によって実装され並列計算が可能である。

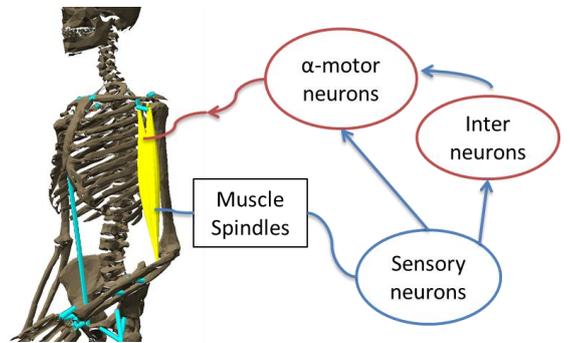


図 2. 脊髄神経筋骨格シミュレータの概要

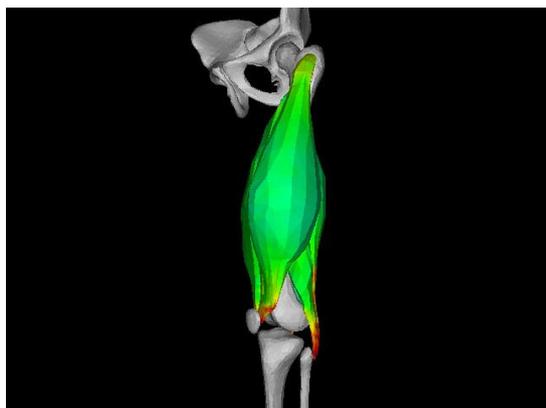


図 3. 下肢モデルの筋有限要素計算の様子

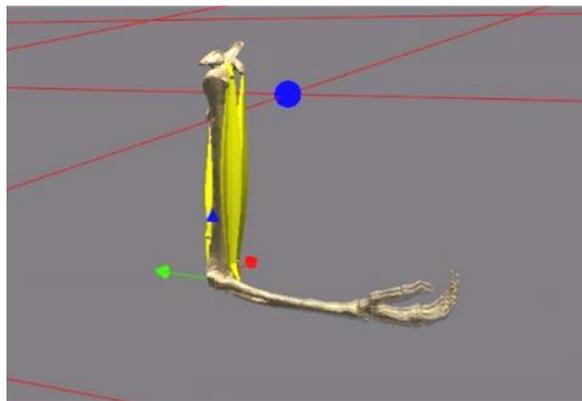


図 4. 上腕の伸長反射シミュレーションの様子

3. 結果

・Zygot社製の三次元人体形状モデルを基盤に、下肢の骨格モデルおよび膝関節回りの六つの主要な筋の有限要素モデルを作成した。簡易モデルでは筋数が6つのため、6CPUを用いてマルチプロセス並列計算を行った。作成したモデルを用い、筋活動推定の際の二次計画問題を並列計算と逐次計算の二種類とで実行して、実行時間を比較した。逐次計算、並列計算での実行時間はそれぞれ 5.03×10^3 秒、 1.067×10^4 秒であり、並列計算により逐次計算の約 3.4 倍の実行速度が得られた。また得られた6つの筋活動度は、解析対象とする運動中の膝関節の関節トルクを再現できた。

・上肢の筋骨格モデルと脊髄神経ネットワークを接続し、伸長反射シミュレーションを行った。脊髄神経系ではニューロン数が約 500 程度、ワイヤ数は約 300 程度となる。脊髄神経系および筋骨格系で合わせて4CPUを用いてMPIによる並列計算を行った。逐次計算、並列計算での実行時間はそれぞれ 361 秒、279 秒となった。計算効率の向上は課題ではあるが、外乱を加えた際に上腕の筋の伸長反射を再現することができた。

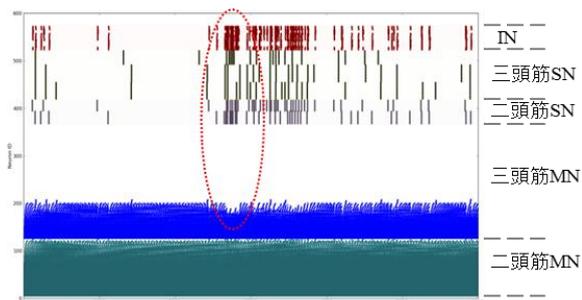


図 5. 運動(MN)・感覚(SN)・介在(IN)ニューロンのスパイク信号時系列。赤丸付近で下腕に対して鉛直下方向へ外乱を加えた。

4. 今後の計画・展望

・三次元人体形状モデルを基盤に、全身の骨格モデルおよび全身の筋の有限要素モデルを完成させ、干渉計算を考慮した全身骨格モデルの動作生成を行う順動力学計算法を開発する。

・全骨格筋の有限要素モデルと脊髄神経モデルの接続を行う。また脊髄神経系のパラメータの同定技術を開発する。

・行動に基づく認知計算論の研究では、人間の知覚と運動の計測データから詳細筋骨格モデルを通じて推定されるマルチモーダルな体性感覚情報を統計的解析手法によって分類する計算法を確立する。この行動分類を通じて知覚から行動の因果律を表現する統計モデルを詳細化することによって人間の認知計算モデルを構築する

- RICC の継続利用を希望の場合は、これまで利用した状況（どの程度研究が進んだか、研究においてどこまで計算出来て、何が出来ていないか）や、継続して利用する際に行う具体的な内容
 - ・下肢の小規模な骨格・有限要素筋モデルにおい

ては、体積効果を考慮した筋活動度推定計算の並列計算エンジンを開発したので、これを全身へと展開する。また筋同士の干渉を考慮した力学計算へと発展させる。

- ・上腕のワイヤ駆動筋骨格モデルと脊髄神経系の接続を行い、シミュレーションを行った。筋骨格モデルを全骨格筋の有限要素モデルへと発展させる。また脊髄神経系のニューロンのパラメータ同定技術を開発する。

- ・クラスタ構造を用いた行動の分類では、扱う知覚・運動データの量を膨大にした時にも実用可能な計算時間で解析が行えるようにするための並列化処理を行う必要がある。また、運動データとして筋活動度や体性感覚情報などのマルチモーダルな情報を処理するための計算方法を実装する必要がある。

6. 利用研究成果が無かった場合の理由

RICC を用いた計算結果を含んだ論文等の研究成果発表は現在準備中。