

第 20 回計算工学講演会 に参加して

澤 弘 樹

Hiroki SAWA

機械システム工学専攻修士課程 1年

1. はじめに

私は、2015年6月8日（月）につくば国際会議場で開催された第20回計算工学講演会に参加した。「今、計算バイオメカニクスで何ができるか」のセッションで、「変形性股関節症の歩行における股関節周囲筋力推定のための筋骨格シミュレーション」という演題で発表を行った。

2. 研究内容

2.1 研究背景

変形性股関節症は、股関節と大腿骨間の軟骨が磨耗することで、臼蓋や大腿骨頭が変形し、筋疾患による痛みや異常歩行を引き起こす。股関節周囲に作用する下肢筋力は、股関節の位置や歩行姿勢に関連し変化するため、疾患の重症度と異常歩行の関係の評価、術後の歩行動作の回復などの評価には、股関節周囲筋力の推定が重要となる。これに対し、複数の骨、筋肉を含んだ計算モデルによる運動動作中の生体内の筋力変化の推定が可能な筋骨格シミュレーション手法の適用が有用であると考えられる。この筋骨格モデルに対し、個体ごとの特徴的な動作を捉えることが可能である光学式モーションキャプチャによる歩行動作を組み合わせることで、個体別の筋骨格モデルに基づく変形性股関節症の歩行姿勢の変化や筋疾患の進行による筋力変化の評価を行うことができる。本研究では、変形性股関節症患者における疾患の重篤度が股関節周囲の筋力に与える影響を計算により評価することを目的とし、症状の進行した患者を想定して股関節外転筋の最大等尺性筋力を低下させたモデルを作成して、下肢筋力の変化を予測した。

2.2 筋骨格モデルの作成方法と計算手法

本研究では、人体の骨と筋をモデル化し、動作中に作用する個々の筋力を計算することが可能な筋骨格シミュレーションシステムである Anybody Modeling System (AnyBody Technology Inc., Aalborg) を用いた。本研究では、左右合計 318 の下肢筋と、腕を除いた骨格で構成された下半身モデルを用いた。このモデルに対し、変形性股関節症患者の歩行動作と床反力、被験者の身長、体重、筋特性を適用させることにより、任意の姿勢の各部位の幾何学的配置を反映し、筋力・モーメントを求めることができる。本研究では、年齢 68 歳、身長 155 cm、体重 56 kg の THA 術前の患者の歩行動作を対象とした。

2.3 筋力の計算方法

モデルは、筋の数が関節の自由度よりも多く、高次の不静定問題となるため、力のつりあい式のみでは筋力が定まらない。このため、最適化手法を用い、各筋力を決定する。本研究では、以下の非線形最適化問題を解くことにより、筋力 $f_i^{(m)}$ を求める。

$$\text{目的関数: } G = \sum_{i=1}^{n^{(m)}} \left(\frac{f_i^{(m)}}{N_i} \right) \rightarrow \min \quad (1)$$

$$\text{制約条件: } \mathbf{M} = \mathbf{r}\mathbf{f} \quad (2)$$

$$f_i^{(m)} \geq 0 \quad i \in \{1, \dots, n^{(m)}\} \quad (3)$$

ここで、 N_i , $f_i^{(m)}$, $n^{(m)}$ は、それぞれ i 番目の筋の最大等尺性筋力と筋力、筋の数として定義される。制約条件としては、式 (2) の関節モーメント \mathbf{M} と筋力 $\mathbf{f} = [f^{(m)} f^{(j)}]$ 、筋のモーメントアーム $\mathbf{r} = [r^{(m)} r^{(j)}]$ のつりあい式を定める。添字の m と j はそれぞれ筋と関節を表し、 \mathbf{M} , \mathbf{r} , \mathbf{f} はベクトルを表す。筋は引張力のみを持つため、 $f_i^{(m)} \geq 0$ とする。式 (1) により、線形計画法に基づき、すべての筋の活動度 ($f_i^{(m)}/N_i$) の 3 乗和が最小になるように筋力 $f_i^{(m)}$ が決定される。ここで、本筋骨格モデルの各筋において、筋線維が能動的に生成する最大筋力である最大等尺性筋力は、文献を基に予め定義されている。

表 1 外転筋群の最大等尺性筋力 N_i (N)

筋	Original モデル	疾患重篤モデル
中臀筋	8880	4440
小臀筋	2297	1149
大腿筋膜張筋	792	396

2.4 疾患の重篤度を考慮したモデルの作成

本研究では、疾患の進行に伴う筋強度の低下が股関節周囲の筋力に与える影響を評価することで、症状の重篤度に対応した筋力変化の推定に対する提案手法の有用性を検討する。筋疾患の進行を想定するため、股関節の形態異常に起因する股関節外転筋の作用不全により、50歳代の末期の変形股関節症患者の股関節外転筋力が健常者に比べて約50%低下するとの報告を基に、2.2節で構築したモデルを「Original モデル」とし、Original モデルの外転筋の最大等尺性筋力を50%低下させた「疾患重篤モデル」を定義した。これにより、異常歩行を有する患者の疾患の進行を想定した筋力変化の評価を行った。各モデルの股関節外転筋群（中殿筋、小殿筋、大腿筋膜張筋）の最大等尺性筋力 N_i を表1に示す。

2.5 解析結果と考察

まず、歩行一周期を0%から100%とし、Original モデルにおける前面から0%、25%、50%の歩行周期における姿勢および、発揮される筋力を可視化して図1に示す。図では、歩行周期0%において体が左に傾向していることが確認できる。本研究で提案した手法では、このように患者の特徴的な動作姿勢を捉えることが確認できたとともに、これを反映した筋力推定が行われている。次に、歩行動作中における股関節を支持する筋力の変化について、Original モデルと疾患重篤モデルを比較して図2に示す。図2は、歩行動作中において、筋力が最大となる瞬間の股関節周囲の筋力を表している。疾患重篤モデルの中臀筋力は低下し、それに伴い、他の多くの筋力が上昇していることがわかる。股関節外転

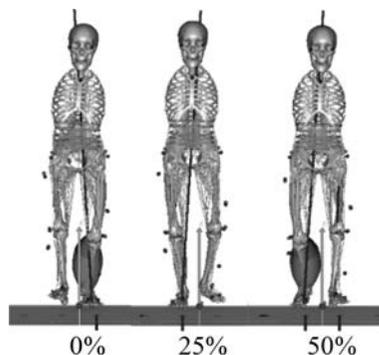


図 1 歩行姿勢と歩行中の筋活動

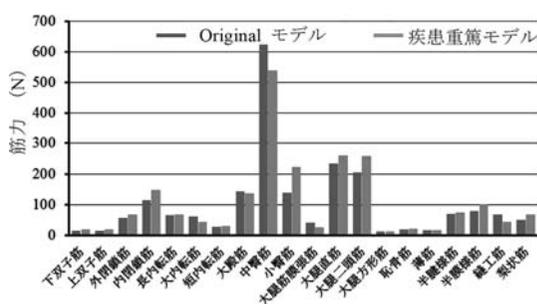


図 2 Original モデルと疾患重篤モデルの筋力比較

筋群の筋力変化の一つの解釈として、外転筋群の機能不全により、下肢を持ち上げるために重要な働きをする中臀筋の筋力が低下することで、歩行姿勢の変化が起こるとともに、各筋の筋力が上昇することで、中臀筋力の低下を代償していることが示唆された。以上の結果により、本計算手法が変形性股関節症の症状の進行に対応した筋力推定手法として有用であることが示された。今後の課題として、実際の変形性股関節症患者のMRI画像等から得られた筋断面積を基に最大等尺性筋力を求め、計算に反映させる必要がある。これにより、現実的な個体別の疾患の進行に対応した筋力の推定が可能になると考えられる。

3. おわりに

今回の学会で多くの方々にご意見を頂き大変勉強になりました。ご指導いただいた田原大輔先生、横浜市立大学整形外科の皆様にお礼を申し上げます。