

学位論文題名

Numerical Analysis of Cooperative Abduction Muscle Forces in a Human Shoulder Joint

(肩関節における外転協調筋力の数値解析)

学位論文内容の要旨

【緒言】肩関節運動における筋力解析にはこれまで主に筋電位測定が用いられてきたが、手技上測定が困難な筋が存在すること、測定手技および解析方法により結果に違いが出やすいこと、侵襲性のある検査であること、筋力値を直接求めることは不可能であることなどの問題点があった。また、肩関節運動においては多数の筋が協調して複雑に作用しているため、全ての筋を生体において測定することは實際上困難である。これらの理由から、コンピューターシミュレーションによる筋力解析の有用性が指摘されてきた。しかし、肩関節は解剖学的に多様な筋形状と複雑な複合運動を持つことより、精度の高い解析を行うためには複雑なモデルが必要である。特に、肩関節周囲筋には筋長に比し幅広い起始領域を持つ筋が多く、そのような筋は肩関節運動に伴って変形し、ベクトルも大きく変化すると考えられるため、一本の固定された直線ベクトルで表わすことは解析結果に大きな誤差を生じる可能性がある。この問題を解決するため、著者らは最適化手法を用いることにより、幅広い起始領域をもつ筋の走行ベクトルの関節角度に応じた変化を解析に組み込んだ新しい三次元モデルを作成し、外転運動時の筋力解析を行った。

【方法】まず、正常ボランティアの肩関節三次元 CT データより、画像解析ソフト Analyze を用いて三次元骨形状モデルを作成した。次に、同一被験者の MRI データを参考に肩関節周囲筋の起始および停止を骨形状モデル上で決定した。対象とした筋は、三角筋前部線維、三角筋中部線維、三角筋後部線維、棘上筋、棘下筋、肩甲下筋、小円筋、大円筋、上腕二頭筋長頭、上腕二頭筋短頭、上腕三頭筋の 11 筋であり、原則として停止から起始に向かう筋ベクトルを定義した。起始領域が広範囲にわたる三角筋各線維、棘上筋、棘下筋、肩甲下筋では、主に働く筋線維が外転角度によって変化すると仮定し、以下のように筋ベクトルを決定した。筋の起始領域近位端を直線で設定し、この直線を底辺とし停止点を頂点とする三角形で筋をモデル化する。この場合、起始点は設定した直線上を移動することとし、各外転角度において最適起始点を最適化手法を用いて求めた。解析運動は肩甲平面上での肩外転 10° から 150° とし、肘関節伸展位での上肢全体を単一の剛体とみなし、上腕骨頭中心を回転中心とした。外力は上肢の自重のみとし、関節における摩擦はないものと仮定した。力 (筋力、関節反力) とモーメントのつりあい方程式より、各筋応力値の二乗

和という目的関数が最小となるよう最適化手法を用いて各筋力値を求めた。求めた筋力値は、体重で除して標準化した値 (% body weight; %BW) で表した。次に、解析結果の妥当性を評価するために、同一被験者の筋電位測定を行った。三角筋各線維，上腕二頭筋，上腕三頭筋は表面電極，棘上筋，棘下筋，肩甲下筋，小円筋，大円筋は白金針電極を用いて、肩甲平面における外転 10° ごとの静止筋電位を 10° から 150° まで測定し、3 分間の積分筋電位を算出した。解析筋力値と積分筋電位値の相関を回帰分析にて統計学的に検討した。

【結論】三角筋中部線維が外転 75° 付近をピークとし最大値 27.5 %BW を示した。次いで棘上筋，三角筋前部線維，棘下筋が大きな筋力値（順に、10.9 %BW、9.5 %BW、8.0 %BW）を示した。三角筋後部線維，小円筋，肩甲下筋は外転後期に作用していた。大円筋，上腕三頭筋はほとんど作用していなかった。大円筋，上腕三頭筋を除く全ての筋において、解析筋力値と積分筋電位値の間には有意な相関を認めた ($P < 0.05$)。広範囲筋 6 筋の起始点は、外転角度に伴って移動していた。

【考察】肩関節運動の筋力シミュレーションにおいては、これまで筋を直線ベクトルでモデリングする報告が多かった。起始が広範囲にわたる筋については、複数のベクトルに分割してモデル化する方法などが提案されているが、全運動範囲にわたって固定されたベクトルを用いている。著者らは、そのような筋においては力の働く方向が肩関節角度によって変化すると推測し、最適化手法を用いて各角度における最適起始点を選択する新しい方法を考案した。本法により、11 筋の複雑な協調運動を同時に解析し、筋電位と良好に相関する結果を得ることができた。今後、本解析モデルを用いて、筋・腱断裂や麻痺による筋力バランスの変化，筋・腱移行術後の筋力変化などのシミュレーションに臨床応用ができると考えている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 安 田 和 則

副 査 教 授 三 浪 明 男

副 査 教 授 渡 邊 雅 彦

学 位 論 文 題 名

Numerical Analysis of Cooperative Abduction Muscle Forces in a Human Shoulder Joint

(肩関節における外転協調筋力の数値解析)

学位論文では、まず CT データから肩関節の三次元筋骨格モデルを作成し、筋力数値解析を行う方法を示した。広範に起始を持つ筋において、過去の研究では最適なモデリング手法が確立されていない事実を踏まえた上で、最適化手法を用いて肩の外転角度ごとに変化する最適起始点を選択するという新しい手法を提案した。新しいモデルを用いて解析を行い、筋電位と統計学的に相関する良好な結果が得られることを示した。また本研究の臨床応用として腱板断裂のシミュレーションを行い、三角筋中部線維筋力が変化することを示した。質疑応答では、まず渡邊雅彦教授より同一筋の異なる部位で筋活動を測定した報告が過去にあるのかという質問があり、肩甲下筋では肩関節の肢位により筋上部と下部の筋活動には違いがあることが報告されていると解答した。次に本研究モデルの具体的な臨床応用について質問があり、腱板断裂をはじめとする腱断裂、筋麻痺の患者において、残存筋の代償作用をシミュレーションすることによるリハビリテーションへの応用や、それらの患者に対する筋・腱移行術の効果のシミュレーションなどが考えられると解答した。次に三浪明男教授より筋の最適起始点を決定する際に直線上から選択するのではなく、起始点の深さも考慮して三次元的に決定する可能性について質問があり、そのような方法が理想的であり実際に試みたが、計算が複雑になり解が収束しないため困難であったと解答した。また外転角度によって広範な筋のどの部分が最も収縮しているかわかるのかという質問があり、それは示すことができると解答した。次いで安田和則教授より筋電位測定結果を normalization しなかったのはなぜかという質問があり、解析値が筋力の絶対値として求められており、それと比較するために normalization する前の元データを使用したと解答したが、針筋電位と表面筋電位を比較することはできないのではないかという指摘があった。モデル作成時に筋電位をもとにあらかじめ活動していない筋を除外しなかったのかという質問があり、解析の結果筋力を示さない筋はあったが、本研究では解剖学的に全ての筋を含むモデル作成を試みたと解答した。筋力解析モデルの妥当性を評価するためには上肢に

自重以外の外力を加えた解析を行うことが有効であるが、そのような評価は行ったかという質問に対しては、手に 1kg の重りをもった状態を解析した結果過去の報告と比較して筋力、関節反力ともに低い値が得られた。その原因としては、本解析では肩甲上腕関節だけでなく体幹に起始する筋が含まれていないこと、肩甲上腕関節を ball-and-socket joint と定義したため骨頭を安定化させる筋力も考慮されていないことから、総筋力値が低くなり関節反力も小さくなったと考えられると解答した。学位論文および公開発表は、研究手順をわかりやすく解説し新しい画期的なモデリング手法を考案し、良好な解析結果を示したことに対して審査委員より高い評価が得られた。

この論文は、筋力数値解析における筋のモデリング法として画期的な新しい手法を提案した点で高く評価され、今後様々な解析プログラムへの応用と臨床応用が期待される。

審査員一同は、これらの成果を高く評価し、大学院課程における研鑽や取得単位なども併せ申請者が博士（医学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。