学位論文題名

上肢運動時に作用する協調筋力の数値解析に関する研究

学位論文内容の要旨

本格的な高齢社会の到来とともに、自立活動が困難で、介護が必要となる人々の数は、確実に増加する。それらの人々の日常生活活動(ADL)を支援する機器の出現に、より一層大きな期待が寄せられている。特に、コミュニケーションを除いたADLのほとんどは、上肢の運動機能に關与する。そのため、上肢運動機能の代行、あるいは補完する機器が現れば、自立活動が低下した人々のADLが、大幅に改善されることになる。福祉機器は、機器と人間との機能調和を配慮して開発・設計されなければならない。そのため、人間の力学的運動機能を解明するバイオメカニクスの研究が不可欠である。人間が機器を操作したり、機器を用いて作業したりする場合、評価すべき基本的な運動機能は、身体運動の可動域と筋力である。可動域の研究は、従来より人間工学の学問領域で発展してきた。また人間の運動機能を力学的に解析する研究は、筋力のバイオメカニクスに限定すると、日常生活を司る上肢あるいは下肢の解析が盛んに行われている。上肢および下肢の任意の関節運動は、関節を取り巻く複数の筋の協調収縮による。筋の協調運動を数学的な評価関数で表示し、その最小値問題を解くための数理的最適手法が提案されてきた。このような解析は非線形最適法の問題となり、さまざまな方法が提案されたが、ある限定した条件(関節)に適用できるものの、より汎用的に適用可能な最適手法は見当たらない。

そのため本研究では、上肢の関節を駆動するために、協調運動する各筋力を求める数値解析手法を提案する。本論文の構成は全6章からなり、その内容は以下に示す通りである。

第1章は序論であり、上肢の筋・骨格システムや運動様式についての基礎事項、本研究の背景と目的などについて述べている。

第2章では、数値解析のための上肢関節運動の一般モデル化について述べる。これは、3関節を有する剛体リンクモデルとする。適切な関節モデルを作り、荷重条件が決定されると、筋の単位方向ベクトルから力とモーメントのつりあい方程式をたて、筋力を解析することができる。しかし実際には、関節運動を駆動するための筋の数は、力とモーメントのつりあい方程式の数より多いため、このままでは筋力を特定することはできない。このことは、静的な不静定問題の解析となる。これを解析するために、Lagrange 未定乗数法による最適化手法を利用した。目的関数には、Raikovaによって提案された筋力の2乗の総和を示す式を用いた。前述のつりあい方程式を条件式として、目的関数の極値を求めることにより、解剖学的に忠実な筋の数をモデル化しても、上肢関節運動の各筋力が求められることを示した。

第3章では、前述の手法に筋の解剖学的特性を組み込むための解析手法を提唱し、肘関節屈曲運動の解析を行った。前章から得られる解は、単純に機構学的な力とモーメントのつりあいが成り立つことを条件として求めたことになる。解剖学的に見ると、筋は協調して運動を行う協力筋と、運動に關与しない拮抗筋に分類できる。また、収縮方向にのみ作用し、伸長方向には作用しないという特性を持っている。しかし、得られる解には当然これらの特性が考慮されていない。つまり、この計算結果で得られた負の筋力は実際には存在せず、不適な解になる。

また、このような最適化手法を用いた解析では、目的関数の係数の値も、解析結果に大きな影響を及ぼす。この目的関数の係数の決定法も提案した。その際、拮抗筋の影響を排除し、協力筋の負の筋力量を減少させ、目的関数で規定される筋力が、最小になる組み合わせが得られるプロセスを示した。また、モデル化する筋のなかには、骨への付着位置が一点ではなく、広範囲にわたるものもある。運動中、筋は広範囲な付着領域で均等に力を伝達するとは考えにくい。このことを考慮するために、付着領域内に数個の付着点を設定し、関節角度によって、起始位置が変化すると仮定して、最適な点を探索する方法も示した。それによって、最適な起始位置が決定された。

第4章では、解剖学的な筋の三次元走行と付着位置を考慮した解析手法を提唱した。前述の手法を拡張し、前腕回旋運動の解析を行った。回旋運動に作用する筋は、屈曲運動に作用する筋に比べて、筋長が極端に短いうえ、筋ベクトルの方向が運動中つねに変化する。また、起始と停止位置座標の読みとり精度や筋の走行形態も、精度の良い解析を行うためにはより重要となる。そこで本章では、上肢の三次元骨格モデルをできるだけ忠実に作ることで、より解剖学的な筋の三次元走行と付着位置を考慮した筋力の数値解析を行った。具体的には、筋の起始と停止位置を結んだ直線が、骨部を貫いてしまう場合に、その骨表面に沿った最短距離を結んだ線で走行すると仮定する手法を示した。それによって、上腕二頭筋のような二関節筋が、骨に巻き付いて作用するといった生体内に近い条件下で、筋の走行を考慮した解析が可能となった。

第5章では、前章までで行った肘関節と前腕運動時における上肢筋力の数値解析を、一般的な上肢運動に拡張するため、肩関節運動を含めたモデルを構築した。肩甲骨上腕関節に限っても、肘関節と比べて可動域や運動自由度が大きく、また運動を司る筋も複雑である。肩関節運動時における筋力の数値解析では、解剖学的により忠実な形状モデルが必要になる。これまでの報告では、非常に簡略化されたモデルが提案されてきた。通常、筋の走行は複数の経由点を結ぶ直線によって表される。肩関節の場合、筋長の短い筋や、運動中の筋ベクトルの変化が大きい筋を含むので、経由点の選択が解析結果に大きな影響を及ぼす。この点を詳細に検討した解析例は見当たらない。本章では、著者らが提案している手法を応用し、肩関節屈曲時に作用する上肢筋力の数値解析手法を示した。本解析手法は形状モデルの作成が解析精度を大きく左右する。そのため筋が骨に巻き付く状況を三次元骨格モデル上に再現し、コンピュータ上で経由点を幾何学的に決定した。その結果、一般的な上肢運動の解析が可能となった。

第6章は、本論文の結論であって、得られた結果を総括した。

以上、本論文では協調運動している時の各筋力を最適化手法で求める新たな数値解析手法を提案した。また、これらの解析結果は筋電位測定結果と比較検討し、定性的な一致を確認した。特に、解剖学的に忠実なモデリング手法と、筋の特性なども考慮した解析手法により、より一般的な上肢運動中の筋力が精度良く求まることを明らかにした。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 鶴 飼 隆 好
副 査 教 授 石 川 博 將
副 査 教 授 野 口 徹
副 査 助 教 授 但 野 茂

学位論文題名

上肢運動時に作用する協調筋力の数値解析に関する研究

本格的な高齢化社会を迎え、自立活動が困難で、介護が必要となる人々の数は、急激に増加している。それらの人々の日常生活活動（ADL）を支援する新たな機器の出現に、大きな期待が寄せられている。特に、コミュニケーションを除いたADLのほとんどは、上肢の運動機能に關与する。そのため、上肢運動機能の代行あるいは補完する機器が現れれば、自立活動の低下した人々のADLが、大幅に改善されることになる。

福祉機器は、機器と人間との機能調和を配慮して開発・設計されなければならない。そのための基礎研究として、人間の力学的運動機能を解明するバイオメカニクスの研究が不可欠である。人間が機器を操作したり、機器を用いて作業したりする場合、機器設計のために評価すべき基本的な運動機能は、関節可動域と筋力である。上肢の運動は、関節を取り巻く複数の筋の協調収縮による。このような筋力を数理的に推定するためには、筋の協調運動を数学的な評価関数で表示し、その最小値問題を解く最適化手法が必要となる。この解析は非線形最適法の問題となる。これまでさまざまな方法が提案されたが、上肢の一般運動に適用可能な解析手法は見当たらない。

本論文では、上肢の関節駆動時に協調作用する筋力の数値解析手法を示したものであり、その主要な成果は以下の点に要約される。

1) 本手法は、上肢を3関節からなる剛体リンクモデルで表現し、筋ベクトルのつりあい方程式から筋力を解析することを基本としている。しかし一定の1関節運動でも、関節駆動に作用する筋の数は、つりあい方程式の数より多いため、解は不静定となる。この問題を解決するために、Lagrange未定乗数法による最適化手法を示している。その際の評価関数には、筋力の2乗和を示す式を用いている。

2) 筋は、関節運動に協調して収縮する協力筋と、關与しない拮抗筋がある。

これは、収縮方向にのみ作用し、伸長方向には作用しないという筋特性によって分類される。本解析では、拮抗筋を排除し、協力筋のみの作用とする筋の生理学的特性を考慮した評価関数の係数決定法を示している。

3) 筋の中には、骨表面の付着位置が1点ではなく、広範囲にわたるものもある。このため付着領域内に数個の付着点を設定し、関節角度によって、最適な付着点を探索する方法を示している。

4) 筋の三次元走向形態と付着位置を表現する形状モデリング手法を示している。回旋運動に作用する筋は、筋長が極端に短いうえ、筋ベクトルの方向が運動中大きく変化する。そのため、筋の起始と停止位置を結んだ直線が、骨部を貫いてしまう場合に、その骨表面に沿って最短距離で走向する解析手法を示している。それによって、上腕二頭筋のような2関節筋が、骨に巻き付いて作用するといった生体内現象に近い条件下の解析が可能となった。

5) 本手法を一般的な上肢運動に拡張するため、肩関節モデルを示している。肩関節の場合、運動可動域が大きく、筋長の短い筋や、運動中の筋ベクトルの変化が大きい筋を含むので、骨表面経由点の選択が解析結果に大きな影響を及ぼす。この点を詳細に検討し、肩関節屈曲時に作用する筋力の数値解析手法を示している。

以上、本論文では上肢が運動している時の協調筋力を求める新たな数値解析手法を提案した。そして、肘関節屈曲運動、前腕回旋運動、肩関節屈曲運動の解析を行った。これらの解析結果は筋電位測定結果と比較検討し、定性的に一致することを確認した。解剖学的に忠実なモデリング手法と、筋特性を考慮した数値解析手法により、一般的な上肢運動中の筋力が精度良く解析されることを明らかにした。

これを要するに、著者は、上肢運動中の協調筋力を解析する最適化手法を提案し、筋力の数値解析に関し有益な多くの知見を得たものであり、バイオメカニクスおよび福祉機器設計工学の発展に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。