

氏名	こいで たくみ 小出 卓哉
本籍	兵庫県
学位の種類	博士(工学)
学位の番号	甲第60号
学位授与年月日	令和3年 3月11日
学位授与の要件	本学学位規則第14条
学位論文題目	立ち上がり動作における二関節筋の機構特性
論文審査委員	主査 教授 藤川 智彦 副査 教授 赤滝 久美 副査 教授 小柳 磨毅 副査 教授 新川 拓也 副査 教授 大島 徹(富山県立大学大学院所属)

論文内容の要旨

椅子やベッドからの離床である立ち上がり動作などは日常生活をおくる上で始点となる動作である。そのため、立ち上がり動作の維持は生活の質(QOL)を保つために非常に重要といえる。また、超高齢社会の現代において高齢者が自立した生活をおくることは非常に重要であり、歩行をはじめとする日常動作を可能とする運動能力が必要不可欠となる。この立ち上がり動作に着目すると、一般的に立ち上がり動作は股関節の伸展トルクと膝関節の伸展トルクの数値が重要であるとされ、その運動を生じさせている股関節の一関節伸筋と膝関節の一関節伸筋の収縮力の大きさが焦点となる。しかし、体幹保持を含めた抗重力の運動において、大腿部前面の二関節筋である大腿直筋に特異的な活動が見られる。この大腿直筋は股関節を屈曲させ、膝関節を伸展させる機能を有する二関節筋であるため、立ち上がり動作時に大腿直筋が収縮すると、膝関節の伸展トルクにはプラスに働くが、股関節の伸展トルクにはマイナスに働く。この理由から、二関節筋が関節駆動を阻害していると言われることがある。この要因に、ヒトの身体運動は各関節のトルクを基準にした力学であるため、二つの関節に同時に関与する二関節筋は冗長な存在と見られる傾向がある。そこで、本論文では立ち上がり動作における運動特性と筋活動のメカニズムの関係を明らかにした。特に、従来の運動評価の基準である関節トルクではなく、二つの関節に同時に関与する二関節筋の活動に着目し、その二関節筋の活動による機構特性を明らかにした。

本論文の構成は以下のとおりである。

第1章ではヒトの運動における立ち上がり動作の解析の必要性とその重要性を提示し、さらに、ヒトの筋配列を考慮したモデル、すなわち、生体特有の二つの関節に跨って存在する二関節筋を考慮したモデルをもちいることの必要性、さらに、二関節筋を考慮したヒトの運動解析の重要性を述べている。また、ヒトの筋配列を考慮したヒトの運動解析により、立ち上がり動作を解明することが可能であることを記述している。

第2章ではヒトの立ち上がり時の下肢の二関節筋の機構特性を明らかにするため、リンクモデルをもちいた解析の結果を記述している。2関節リンクモデルのリンク先端に発生する出力方向

制御と剛性制御の機能，自由度抑制による重心制御の機能を提示している．また，3関節リンクモデルでは二関節筋の機能の一つである平行リンク化の機能について明示している．これらの二関節筋を考慮したリンクモデルの機能により，立ち上がり動作に関与する下肢の機構特性を提示している．

第3章では体幹の揺動を抑えた立ち上がり動作時の動作筋電図学的解析の結果を述べている．ここでは，体幹を鉛直上向きにゆっくり移動させる立ち上がり動作中の筋活動と同時に立ち上がり時の姿勢変化と床反力を計測している．この結果と第2章のリンクモデルの機能より，体幹の揺動を抑えた立ち上がり動作時に活動する筋群の機能を提示している．また，その機能を明らかにするため，ヒト下肢の筋配列を基準に3関節リンクの実機モデルを製作し，実験的解析をおこなった結果を記述している．これらの結果より，大腿部前面の二関節筋である大腿直筋は動的な立ち上がり動作において，膝伸展トルクによって発生する体幹の慣性力(体幹を後傾させる力)を引き留めるワイヤのような機能であることを明らかにし，平行リンク化する二関節筋の機能である自由度抑制の機能であることを明らかにしている．

第4章では静的姿勢時の動作筋電図学的解析の結果を記述している．ここでは，立ち上がり姿勢の静的保持中の筋活動と同時に姿勢変化と床反力を計測している．この結果と第2章のリンクモデルの機能より，静的保持時に活動する筋群の機能を提示している．また，その機能を明らかにするため，ヒト下肢の3Dスケルトンモデルをもちいた結果を記述している．これらの結果より，大腿部前面の二関節筋である大腿直筋は静的な体幹保持においても，足関節に発生する鉛直上向きの床反力方向と股関節上の体幹重心のズレによる後傾する体幹の重力を引き留めるワイヤのような機能であることを明らかにし，平行リンク化する二関節筋の機能である自由度抑制の機能であることを明らかにしている．

第5章では本研究の総論として，各章の結論をまとめ，立ち上がり動作時の筋活動と下肢の機構特性の結論から得られた考察について記述し，立ち上がり動作時の大腿部前面の二関節筋である大腿直筋の機能を明示している．

以上のように本論文は，立ち上がり動作における下肢大腿部前面の二関節筋である大腿直筋が平行リンク化する機構特性を明らかにし，この二関節筋の平行リンク化によって生じる自由度抑制の機能を利用することにより，ヒトは安定した立ち上がり動作を可能にしていることを明らかにしたものである

論文審査結果の要旨

本論文は日常動作で最も重要な立ち上がり動作に着目し、その立ち上がり動作に関与する筋群の機能を明らかにしている。一般的に立ち上がり動作は股関節の伸展トルクと膝関節の伸展トルクの数値が重要であるとされ、その運動を生じさせる股関節の一関節伸筋と膝関節の一関節伸筋の収縮力の大きさが焦点となっている。しかし、立ち上がり動作は大腿部前面の二関節筋である大腿直筋も大きく関与していることが知られている。この大腿直筋は膝関節の伸展トルクと股関節の屈曲トルクを同時に発生させるため、立ち上がり動作における股関節の伸展トルクに関しては拮抗的に作用する。本研究はこの特異な立ち上がり動作の主働筋である大腿部前面の二関節筋である大腿直筋に着目し、この大腿直筋の機構的機能を明らかにすることを目指している。特に、動的な体幹を鉛直に持ち上げる動作と、静的な立ち上がり前の重心保持姿勢における動作について、動作筋電図学的解析とリンクモデルによる理論解析および実験解析をおこなっている。

本研究の意義について審査をおこなった。

この研究の着目点である二関節筋は二つの関節に同時に作用するため、一方の関節に協同的に働き、もう一方の関節に拮抗的に働く、矛盾した機能を有している。この一見矛盾に見える機能は動力源であるだけでなく、動力伝達機能や制御機能に大きく貢献していることが報告されているが、特定条件下の機能であるとされており、実際のヒトの運動に沿った機能の解明には至っていない。そこで、本研究は日常生活で重要な立ち上がり動作において深く関与する大腿部前面の二関節筋である大腿直筋の機能を明示したものである。この研究により、二関節筋である大腿直筋がワイヤとなる平行リンクとしての機能を有し、その両端のリンクを抑制することによる自由度抑制の機能、すなわち、2自由度の運動を1自由度に変換する機能があることを提示している。このように、日常生活に必要な立ち上がり動作における二関節筋の機構的機能の一因を明らかにしたことは十分意義のある成果であると考えられる。これらのことより、本論文の研究意義は認められると判断した。

本研究の研究方法について審査をおこなった。

本研究の方法はバイオメカニクスにおける手法を踏襲しており、ヒトの動作筋電図学的解析と下肢のリンクモデルによる理論解析をおこない、さらに、下肢の実機モデルの実験による検証もおこなっている。立ち上がり動作は一般的に大臀筋と膝関節の一関節伸筋群、二関節筋の大腿直筋が主働筋と言われているが、本研究では下腿部後面の二関節筋である腓腹筋の動力伝達機能を取り除くことで、足関節を拘束しない場合の立ち上がりは大腿直筋と膝関節の一関節伸筋群の2つの筋の活動で可能であることに着目し、リンクモデルによる解析により、大腿直筋の立ち上がり動作時の機能を提示している。特に、立ち上がり動作における実機モデルによる立ち上がり動作の検証において、膝関節の一関節伸筋群を圧縮バネ、二関節筋の大腿直筋をワイヤとする非常に単純な機構モデルでも、ヒトの立ち上がり動作に非常に近いものを再現でき、大腿直筋の二関節ワイヤによる自由度抑制の機能を証明するものであると思われる。これらのことより、この論文内に記載された研究方法およびその結果は認められると判断した。

本研究の二関節筋の動的な機能である自由度抑制の機能と静的な立ち上がり姿勢の保持の解析の関係について審査をおこなった。

本研究における大腿直筋の機能は動的な作用であり、膝関節の一関節伸筋群の収縮によって生じる伸展トルクが股関節の上方にある体幹を後方に傾倒することを引き止めるためにワイヤとなる作用である。このため、動的な膝関節トルクの回転運動が生じない限り、体幹が後方に傾倒する慣性力も生じないため、静的な立ち上がり姿勢における大腿直筋の機能を明示したものである。動的な立ち上がりでも静的な立ち上がり姿勢の保持でも、主働筋は共に膝関節の一関節伸筋群と二関節筋の大腿直筋の2筋であり、静的な体幹の慣性力が生じない場合の大腿直筋の機能は体幹

の重力を引き留める機能，すなわち，足関節に発生する鉛直上向きの床反力方向と股関節の回転中心は一致しておらず，体幹を支える股関節の回転中心は床反力方向より後方にあり，股関節上に発生する体幹の重力を大腿直筋が平行リンク化することにより，立ち上がりの姿勢を保持している．これらのことより，この論文内に記載された動的な立ち上がり動作の解析と静的な立ち上がり姿勢の保持の解析は共に大腿部前面の二関節筋である大腿直筋がワイヤとなる平行リンク化による自由度抑制の機能を提示しているものであり，立ち上がり動作の大腿直筋の機能を明示する解析内容であると判断した．

以上のように，本論文ではヒトの日常生活における立ち上がり動作に着目することによって，下肢大腿部前面の二関節筋である大腿直筋が一般的に記載されている動力源であることだけでなく，二関節筋の特有の平行リンク化する自由度抑制の機能が深く関与していることを明示した．なお，本論文はヒトの立ち上がり動作における動的な場合と静的な場合の2つの運動状態における二関節筋である大腿直筋の機能を解明しており，共に，大腿直筋の平行リンク化と膝関節の一関節伸筋群の伸展トルクの2つの要素で立ち上がり姿勢の運動制御が可能であることを提示している．これより，立ち上がり動作における従来の知見に，この二関節筋の新たな機能を提案できると考えている．このように，本論文はバイオメカニクス分野およびリハビリテーション分野に十分に貢献できる成果を示す意義のある内容であり，博士学位論文として価値あるものと認める．