

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 21 日現在

機関番号：14301
 研究種目：挑戦的萌芽
 研究期間：2009～2012
 課題番号：21650136
 研究課題名（和文） 筋骨格モデルを用いた順動力学的評価に基づく新たな
 リハビリテーションシステムの開発
 研究課題名（英文） Development of rehabilitation system based on assessment by forward
 dynamic simulation using musculoskeletal model
 研究代表者
 坪山 直生（TSUBOYAMA TADAO）
 京都大学・医学研究科・教授
 研究者番号：90261221

研究成果の概要（和文）：

筋骨格モデルを用いたシミュレーション解析により、従来のリハビリテーションシステムにおいては困難であった動作時の筋個々の発揮張力や関節負荷を推定し、患者の代償動作のメカニズムを客観的に評価することを試みた。股関節疾患患者においては、関節モーメント値からの推定のみでは窺い知れない特定の筋（腸腰筋）の発揮張力低下を示すことができ、また、大腿部軟部腫瘍切除後の患者においては、切除された筋の代償として張力増加を示す筋を明確にすることができた。本研究課題で試みた方法は、運動器疾患患者のリハビリテーションシステムにおいて、動作特性の客観的評価に有用であると考えられる。

研究成果の概要（英文）：

The purpose of this study was to provide objective evaluation of muscle tension and joint force during locomotion by simulation analysis using a musculoskeletal model. In patients with hip dysfunction, decreased tension of the iliopsoas muscle was detected by using forward dynamic analysis. This change of the muscle tension was difficult to predict from the conventional analysis of joint moment without simulation. In addition, in patients after thigh muscle resection for soft tissue sarcoma, increased tension of the residual muscles was found in compensation for resected muscles. The techniques of this study are useful for objective motion analysis of patients with disability in locomotive system.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,500,000	0	1,500,000
2010 年度	800,000	0	800,000
2011 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	240,000	3,340,000

研究分野：複合領域

科研費の分科・細目：人間医工学・リハビリテーション科学

キーワード：筋骨格モデル・順動力学・リハビリテーションシステム

1. 研究開始当初の背景

近年、人体の骨格および筋を忠実に再現した種々の筋骨格モデルを用いたシミュレーション解析が行われている。筋骨格モデルは、

骨や筋あるいは靭帯などの軟部組織の特性などを任意に設定することが可能であり、バイオメカニクス領域において新たな研究領域となっている。これらを用いることで、

骨・関節に加わる力学的負担の測定や歩行などの動作のシミュレーションなどに応用が可能である (Neptune: Gait Posture 2008, Arnold: Gait Posture 2007, Whittington: Gait Posture 2007)。

筋骨格モデルの特徴の一つとして、動作解析システムとの併用により動作の逆動力学解析による筋活動や関節モーメントの推測に加えて、順動力学的解析が可能である点が挙げられる。順動力学的解析とはすなわち、筋骨格モデルにおいて、ある特定の筋に対してその出力程度や筋活動のタイミングを任意に変化させることにより、それによる動作の変化 (改善) を観察することが可能となることを意味している。このような筋骨格モデルによる順動力学的解析を用いた研究は未だ少なく (Hicks: Gait Posture 2007, Arnold: J Biomech 2006)、実際に臨床における患者の評価に対して応用されている例は少ない。

そこで本研究では、筋骨格モデルを利用した動作の逆動力学的および順動力学的解析を行い、その技術を評価・治療システムに応用することを目的とした。本研究課題により、筋骨格モデルを用いたシミュレーション解析をリハビリテーションの中核をなす障害の評価・治療プロセスに応用することで患者の現状に対してどの筋にどの程度の出力の増加が得られれば、どの程度の動作改善が獲得されるかを明確に判断することができるようになると思われる。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、筋骨格モデルを用いたシミュレーション解析により、実際の患者が行う各種動作時の筋張力を推定することにより、従来の方法では推定が困難であった筋個々の発揮張力や関節負荷を推定することで、代償メカニズムの客観的評価を試みることである。

3. 研究の方法

(1) 健常者におけるシミュレーション解析

①片脚立位における股関節周囲筋の筋張力バランスの順動力学解析

筋骨格モデルの作成、操作は全てシミュレーションソフト LifeMod(Lifemodeler 社)により行った。モデルは健常中年女性 (55 歳、身長 154.6cm、体重 42.8kg) の身体計測データに基づいて作成し、あらかじめ三次元動作解析装置 (VICON 社) により測定した片脚起立の動作データによる逆動力学解析を行った。逆動力学解析の結果を元に順動力学解析を行い、片脚立位が安定している 1 秒間における股関節周囲筋の筋張力、股関節に生じる関節間力の平均を調べた。主要な股外転筋 (中殿筋前部・後部) が標準的に発揮可能な

最大筋力を 100% とし、標準時に加えて (1) 中殿筋前部 5%・後部 100%、(2) 中殿筋前部 100%・後部 5%、(3) 中殿筋すべて 5%、(4) 中殿筋すべて 0% 出力可能とした 4 条件の解析を行った。

②歩行時の下肢筋筋張力変化の順動力学解析

健常若年男性 1 名 (年齢 20 歳) を対象として、歩行動作 (通常歩幅 (下肢長の 75%)、短い歩幅 (65%)、長い歩幅 (85%))、段差 (230 mm) 昇降動作を記録した。測定機器は、3 次元動作解析装置 (Vicon Motion System 社製)、床反力計 (Kistler 社製)、表面筋電計

(Noraxon 社製) を用いた。動作時に Plug-in-gait モデルに準じて全身に反射マーカーを貼付し、マーカーの動作時の座標を記録した。また、筋骨格モデルの妥当性を検証するために、下肢筋 (大殿筋、大腿直筋、半腱様筋、外側広筋、腓腹筋、ヒラメ筋) の筋電図を記録した。各動作ともに、安定した試行 3 試行を記録し、歩行動作では、規定した歩幅に最も近い動作をモデル作成に用いた。筋張力および関節間力の解析には、3 試行の平均値を用いた。LifeMod を用い、記録したマーカー座標データを基に、各動作について筋骨格モデルを作成した。本研究課題で用いたモデルは、片側下肢につき 45 筋を装備したモデルである。順動力学解析において、特定の筋の筋張力を低下させた場合の影響を分析した。対象は、大殿筋、腸腰筋、広筋群、ヒラメ筋とし、それぞれの筋張力を 0N とした場合の他筋の筋張力変化と股・膝・足関節間力の変化を分析した。

(2) 運動器疾患患者におけるシミュレーション解析

①人工股関節全置換術 (THA) 術後患者
対象は、術後 6 ヶ月以上が経過した THA 術後患者 24 名 (患者群) および年齢をマッチさせた健常者 12 名 (健常群) とした。まず、3 次元動作解析システムを用いて、両群の自然歩行における速度と股・膝・足関節の矢状面の関節角度・モーメントの平均値を求めた。次に、上記変数が各群の平均値に最も近い被験者 (代表的健常者および患者) を各 1 名選択し、動作解析データよりシミュレーションソフトを用いて各々の筋骨格モデルを作成した。さらに筋骨格モデルを用いた順動力学的解析を行い、歩行時の筋張力を算出した。立脚中期以降の下肢関節角度、内的関節モーメント、および大腿直筋、腸腰筋、腓腹筋の筋張力の最大値を求め、健常者と股関節疾患患者との比較解析を行った。

②大腿部軟部腫瘍切除術後患者

5 名の軟部組織切除術後患者を対象とした。

それぞれの診断名は、1)脂肪肉腫、2)平滑筋肉腫、3)紡錘細胞肉腫、4)粘液線維肉腫、5)類上皮型血管内皮腫であった。患者 1)と 2)では、股関節内転筋とハムストリングス、患者 3)では大腿二頭筋短頭、患者 4)では内側広筋と縫工筋、患者 5)では大腿直筋が切除された。運動学的、運動力学的データの測定には、3次元動作解析装置と床反力計を使用した。OpenSim を用いて、19 度の自由度と 92 筋を装備した患者固有の筋骨格モデルを作成した。各患者において、歩行時の左右下肢の筋張力を比較した。

4. 研究成果

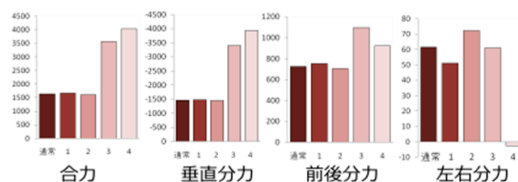
(1) 健常者におけるシミュレーション解析結果

①片脚立位における股関節周囲筋の筋張力バランスの順動力学解析 (図 1)

結果として、条件(1)では中殿筋後部・半腱様筋の張力がそれぞれ通常時に比べ 130%、4%増大し、また条件(2)では中殿筋前部・大殿筋近位部の張力がそれぞれ通常時に比べ 57%、5%増大したが、この時両条件ともに股関節負荷の大幅な増大はなかった。一方、条件(3)では大殿筋近位部・半腱様筋・腸骨筋でそれぞれ通常時に比べ張力が増大するとともに股関節負荷合力で 118%の増大が見られた。条件(4)では半腱様筋・腸骨筋・大腿直筋の張力が通常時と比べ増大し、股関節負荷合力は 146%増大した一方で、大殿筋・外側広筋・内側広筋の張力は条件(3)と比べ低下した。また、片脚立位時の姿勢では条件(4)で股関節内転・骨盤の非立脚側への傾斜の増強が見られたが、他の条件で大きな変化はなかった。

中殿筋(前部・後部)の最大筋力の調整を行う

1. 中殿筋前部 5%、後部 100%
2. 中殿筋前部 100%、後部 5% + 通常条件
3. 中殿筋前部・後部ともに 5%
4. 中殿筋前部・後部ともに 0%



筋出力の部分的な低下のみによる関節間力への影響は少ない
中殿筋全体の出力が著明に低下すると、関節間力は2倍以上となる
この時は長軸方向だけではなく、前後方向の分力が増大している

図 1 片脚立位における中殿筋筋張力変化による影響

②歩行時の下肢筋腱複合体の動態解析ならびに筋張力変化の順動力学解析

歩行、段差昇降ともに筋骨格モデルの筋張

力変化パターンと筋電図による筋活動パターンとは、ほぼ同様のパターンを示し、妥当性が確認された。

歩行では、通常条件と比較して大殿筋 0 条件でハムストリングスと広筋群に、広筋群 0 条件では大殿筋とヒラメ筋に、ヒラメ筋 0 条件では広筋群と腓腹筋に筋張力増加を認めたが関節間力の明らかな変化はなかった。一方、腸腰筋 0 条件では、大腿直筋と腓腹筋の張力が増加し、膝関節間力が 15.5%増加した。昇段動作では、大殿筋 0 条件ではハムストリングス、大腿直筋、腸腰筋に、ヒラメ筋 0 条件では大腿直筋に筋張力増加を認めたが、関節間力の明らかな増減はなかった。一方、広筋群 0 条件では大殿筋、大腿直筋、腓腹筋、ヒラメ筋の張力が増加し、股関節と足関節の関節間力がそれぞれ 117.0%、63.0%増大した。降段動作では、大殿筋 0 条件ではハムストリングス、腓腹筋に、腸腰筋 0 条件では広筋群と腓腹筋に、ヒラメ筋 0 条件では腓腹筋に筋張力増加を認めたが、関節間力の増減はなかった。しかし、広筋群 0 条件では大殿筋とヒラメ筋に筋張力増加を認め、股関節と足関節の関節間力がそれぞれ 179.0%、16.6%増大した。

歩行動作においては、腸腰筋の筋張力が低下することで、腓腹筋と大腿直筋の筋張力が代償的に増加し、その結果、両筋が関与する膝関節において膝関節の負荷が増大しやすい傾向が示された。また、段差昇降では、広筋群の張力低下の影響が最も重大であり、股・足関節への負荷増大につながりやすいことが示唆された。

(2) 運動器疾患患者における解析結果

①人工股関節全置換術 (THA) 術後患者
代表的健常者 (68 歳女性) の歩行は、速度 (m/s) ; 1.18、股伸展角度 (°) ; 14.0、関節モーメント (Nm/kgm) は股屈曲; 6.4、膝伸展 (立脚終期) ; 1.4、足底屈; 7.8、シミュレーション解析による筋張力推定値 (N/kg) は大腿直筋; 19.8、腸腰筋; 5.7、腓腹筋; 5.8であった。それに対して、代表的患者 (人工股関節全置換術術後、61 歳女性) の歩行は、速度 1.12、術側の股伸展角度; 7.7、関節モーメントは股屈曲; 5.5、膝伸展; 1.8、足底屈; 8.7、筋張力推定値は大腿直筋; 11.8、腸腰筋; 1.8、腓腹筋; 7.3であった。

健常者に対して患者では、股屈曲モーメントは 86%に低下した状態であったが、筋張力は大腿直筋で 60%、腸腰筋で 32%まで低下していた。本研究課題を行うことにより、従来の関節モーメントの比較だけでは窺い知れない、筋個々の機能低下が明らかとなり、関節や筋に障害を有する患者の動作障害の解明やその改善方法に関して、重要な示唆を与えることができた。

②大腿部軟部腫瘍切除後患者 (図 2)

同側の大殿筋の筋張力の増加が、患者 1)~3)において確認された。患者 1)と 2)では、立脚前半から同側の足底屈筋の張力増加が認められた。患者 4)と 5)では、同側の股関節や足関節での代償的な筋張力増加は確認されなかった。

大腿部の軟部組織を切除した患者においては、その代償として同側の大殿筋や足底屈筋の張力を高める傾向にあることが明らかとなり、患肢温存術後のリハビリテーションに関して、重要な知見を提供するものである。

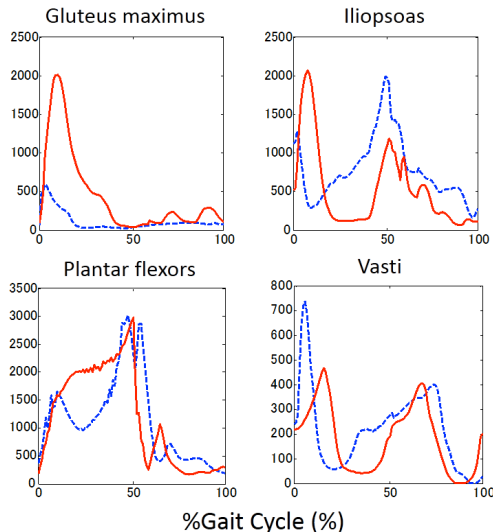


図 2 患者 2)における歩行時下肢筋張力の患側と健側との比較 (赤(実線)が患側、青(破線)が健側)

本研究課題では、健常者におけるシミュレーション解析によりその方法を確立し、実際の患者における評価まで発展させることができた。筋骨格モデルを用いたシミュレーション解析をリハビリテーションにおける評価システムに組み入れることで、患者個々で異なる代償動作のメカニズムを客観的に評価することが可能であり、治療対象を明確にすることが可能であると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

建内宏重：下肢人工関節置換術周術期の歩行分析の有用性、MB Medical Rehabilitation、査読なし(依頼原稿)、No.156、2013、31-39

[学会発表] (計 6 件)

Yusuke Okita, Hiroshige Tateuchi, Noriaki Ichihashi, Tadao Tsuboyama, et al.:

Compensation by residual muscles during walking in a patient after medioposterior thigh muscle resection for soft tissue sarcoma. XXIV congress of the international society of biomechanics, 2013.8.4-9, Brazil

Yusuke Okita, Hiroshige Tateuchi, Noriaki Ichihashi, Tadao Tsuboyama, et al.:

Altered muscle forces of the lower limbs during walking in patients after thigh muscle resection for soft tissue sarcoma. International society of limb salvage 17th general meeting,

2013.9.11-13, Italy

建内宏重、市橋則明、坪山直生、他：動作時の下肢筋張力低下による筋張力バランスと関節負荷の変化、第 48 回日本理学療法学会大会、2013 年 5 月 24-26 日、愛知

建内宏重、市橋則明、坪山直生、他：筋骨格モデルを用いた歩行時の下肢筋筋腱複合体の動態解析、第 39 回日本臨床バイオメカニクス学会、2012 年 11 月 9-10 日、千葉

建内宏重、市橋則明、坪山直生、他：人工股関節全置換術後患者における歩行時の下肢筋張力の推定、第 38 回日本股関節学会、2011 年 10 月 7-8 日、鹿児島

沖田祐介、建内宏重、市橋則明、坪山直生：股関節外転筋の弱화가片脚立位時の股関節周囲筋の筋張力や股関節負荷に及ぼす影響、第 21 回日本バイオメカニクス学会、2010 年 8 月 28-30 日、東京

[図書] (計 1 件)

建内宏重：医学書院、標準理学療法、2013 年、110-128 (変形性股関節症の理学療法)

6. 研究組織

(1)研究代表者

坪山 直生 (TSUBOYAMA TADAO)

京都大学・医学研究科・教授

研究者番号：90261221

(2)連携研究者

市橋 則明 (ICHIHASHI NORIAKI)

京都大学・医学研究科・教授

研究者番号：50203104

建内 宏重 (TATEUCHI HIROSHIGE)

京都大学・医学研究科・助教

研究者番号：60432316