

令和元年6月26日現在

機関番号：82636

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H05362

研究課題名（和文）デフォーマブル筋骨格モデルのカスタムメイド化技術の開発及びその妥当性の検証

研究課題名（英文）Development and verification of custom-made musculoskeletal model

研究代表者

平島 雅也（HIRASHIMA, Masaya）

国立研究開発法人情報通信研究機構・脳情報通信融合研究センター脳情報通信融合研究室・主任研究員

研究者番号：20541949

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 18,400,000円

研究成果の概要（和文）：筋骨格モデルは、運動中の人体にかかる負荷を推定できるため、人間工学的デザインの設計や、リハビリ・スポーツ分野における運動負荷の解析などで広く使われている。しかし、解析対象となる個人を忠実に再現した筋骨格モデルは存在せず、個人にあわせたカスタムメイドな設計・診断・治療を行うことができない状況が続いている。本研究では、個人のMRI画像から、筋や骨の形状を抽出するだけでなく、皮膚・脂肪・筋膜などの結合組織までモデル化することによってカスタムメイドな筋骨格モデルを作成する技術を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、医療分野では、遺伝子解析から個人に合わせた治療薬を提供する「テーラーメイド医療」が成果をあげ注目を集めてきているが、運動器障害についてはテーラーメイドな診断・予防を行うための技術やサービスは殆んど整備されていない。その大きな原因として、個人の運動器の特徴を正確に表現できる人体モデルが存在しないことが挙げられる。本研究で開発したカスタムメイド筋骨格モデルを作成する技術は、高齢者の運動器障害だけでなく、こどもや成人のスポーツ障害の早期診断・予防にも適用可能であり、今後、健康・スポーツ分野におけるテーラーメイドサービスの創出に大きく貢献することが期待される。

研究成果の概要（英文）：Musculoskeletal model has been used in a variety of fields such as ergonomics, rehabilitation, and sports, because it enables us to estimate physical burden during movement. However, a technique to produce personalized model which completely reproduce individual human body has not been developed, hence it has been difficult to perform diagnosis and treatment in a tailor-made manner. This study has developed a technique to produce personalized musculoskeletal model not only by extracting muscle and bone shapes from MR images but also by modeling connective tissues such as skin, fat, and fascia.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：筋骨格モデル MRI 筋 シミュレーション ポリゴン 干渉 GPU

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ヒトの運動を解析する際、筋骨格モデルを用いることによって、個々の筋や関節への負荷を推定できるようになるという大きなメリットがある。そのため、筋骨格モデルは、この20年の間に、世界中で盛んに開発・改良が重ねられてきた(引用文献 ~)。今では、商用モデルも多数登場し、スポーツ・リハビリテーションの動作解析、整形外科の手術計画、人間工学的デザインの検証、アニメーションの作成など、幅広い分野で利用されている。

しかし、現在普及している筋骨格モデルは、筋の走行を直線で近似するという原型をとどめたままであり、根本的な意味では20年前と何も変わっていない。従来のモデルでは、筋肉をボリュームのない直線や折れ線として単純化してしまっているため、筋肉が骨の中に埋まったり、本来表層にあるべき筋肉が深層の筋肉の内部に埋まったりといった不自然な状況が起きてしまう場合があり、ヒトの運動を扱うすべての分野で大きな障壁となってきた。

私は、この問題の根本的解決に向け、筋肉のボリューム(大きさ・形状)と干渉(ぶつかり合い)による変形を考慮したデフォーマブル筋骨格モデルの開発に取り組んできた(挑戦的萌芽24-26年度)。ボリュームの変形の計算には多大なコストがかかるが、近年急速に発展したGPU並列プログラミング手法を取り入れて解決を図り、従来モデルでは表現しきれなかった肩周辺の筋骨格モデルをスーパーコンピュータではなく、パーソナルコンピュータ(GPU搭載が必要)で動作させることに成功した。

2. 研究の目的

当初のデフォーマブル筋骨格モデルは標準体型モデルに過ぎず、整形外科、スポーツ、リハビリなどのバイオメカニクス関連分野に応用するには、各個人のモデル(カスタムメイドモデル)を作成する技術が必要である。本研究では、被験者の形状データに基づいてカスタムメイドモデルを作成する技術の開発を目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、デフォーマブル筋骨格モデルのテンプレートとなる形状としてBodyparts3D(引用文献)のポリゴン形状を用いた。BodyParts3Dでは筋の表面形状のみが表現されているが、本モデルでは筋の内部にも質点を配置することによって形状及び変形を表現した。これをテンプレートモデルとして、MRI画像に基づいてテンプレートモデルを変形することによってカスタムメイドモデルを得る方法の開発を行った。情報通信研究機構脳情報通信融合研究センターの3テスラMRI装置を用いて肩周辺の構造画像を撮影した。撮像方法はDIXON法を採用し、水画像、脂肪画像、in-phase画像、opposed-phase画像を得た。ボクセルサイズは1mm x 1mm x 1.5mmとした。被験者は健常成人男性を対象とした。本実験は、情報通信研究機構の倫理審査専門委員会及び安全委員会の承認を得たうえで実施した。

4. 研究成果

(1) 筋膜・皮膚のモデル化

筋骨格モデルで筋膜・皮膚(皮下脂肪を含む)までモデル化することは非常に稀であるが、MRIなどの医用画像から個人を忠実に再現したモデルを作成するためには必要不可欠である。図1のような薄いシート状のオブジェクトを作成し、これを互いに接する筋の間に挿入することで筋膜を表現し(図1左)、また、表層の筋に貼付することで皮膚を表現した(図1右)。

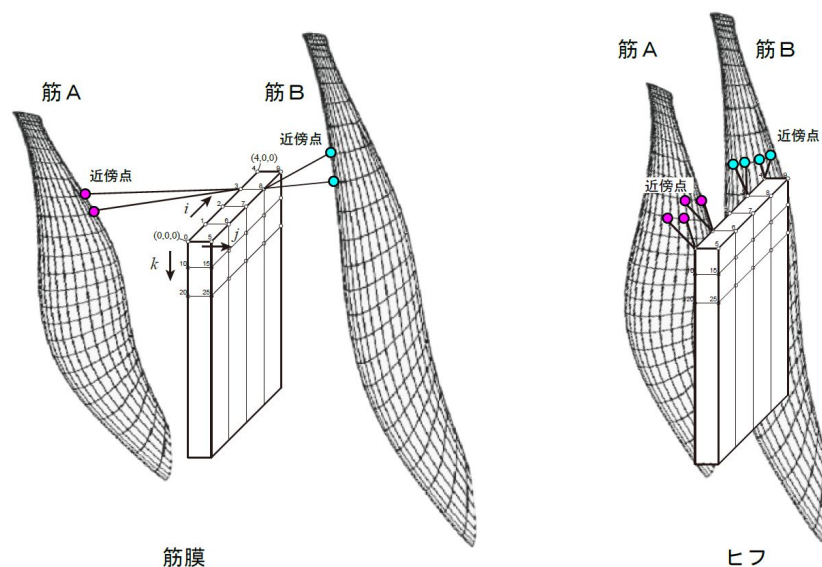


図1 筋膜(左)と皮膚(右)のモデル化

筋膜オブジェクトの形状は、筋オブジェクトと同様の3次元格子座標を用いて表現し、厚み方向(j方向)の質点数を2に限定することで薄さを表現した。筋A側の面(j=0)の質点を筋Aの質点と結合し、筋B側の面(j=1)の質点を筋Bの質点と結合することによって、筋Aと筋Bを結合した。これにより、隣り合う筋同士は筋膜オブジェクトを介して常に反発しあえるため、計算コストの高い干渉判定を行う必要がなくなる。さらに、干渉判定時の急激な力の発生がなくなるため、シミュレーションが安定するという効果も得られる。従来の方法では、多数の筋が集中する上腕骨大結節稜付近のシミュレーションで発散する問題があったが、筋膜法を用いることによってこの問題を解決することができた。

皮膚は、筋膜オブジェクトと同様の構造でモデル化を行った。具体的には、皮膚オブジェクトの筋側の面(j=0)の各質点について、最も近くにある筋オブジェクトの近傍2質点とバネマスタンプで結合した(図1右)。皮膚には、皮膚割線と呼ばれる皮膚張力方向を示す線があることが知られており、この線に沿って複数の皮膚オブジェクトをパッチ状に貼り合わせることで皮膚を表現した。また、皮下脂肪以外の脂肪(例えば腋窩の脂肪)については、筋オブジェクトと同様の3次元格子座標で表現し、筋の隙間に配置することによって再現した。これらのモデリングにより、皮膚が複数の筋を束ねる効果や、身体内部を充填する効果を得た。

(2) カスタムメイドモデルの作成

ここでの最大の課題は、MRI画像から個々の筋の形状を抽出するのが困難なことであった。筋の筋腹付近の形状ははっきりと識別できるものの、起始・停止に近い部分は、細く薄い構造をしているため、識別することが困難である。そこで本研究では、形状を抽出しやすい骨、皮膚、脂肪の形状を活用することによって、筋の形状を予測するという方略を採用した。

骨に対する筋の起始・停止の解剖学的位置は、すでにテンプレートモデルに存在しているため、骨の形状さえ抽出できれば、そこから筋の起始・停止の位置をある程度予測できるはずである。そこで、「テンプレートの骨形状」を「抽出した骨形状」に変形するための変形場を非剛体レジストレーションによって求め、その変形場を「テンプレートの筋形状」に適用することによって「個人の筋形状」を予測する手法を確立した(図2)。

しかし、この段階では予測に過ぎないため、実際の筋形状とは必ずしも一致しない。そこで、MRI画像から筋郭(全ての筋が結合した形状)を抽出し、その形状に合うように個々の筋形状の調整を行った。さらに、MRI画像から抽出した皮膚(皮下脂肪を含む)を最表面に貼り付けることによって個人の身体を忠実に再現したテーラーメイドモデルを作成した(図2)。

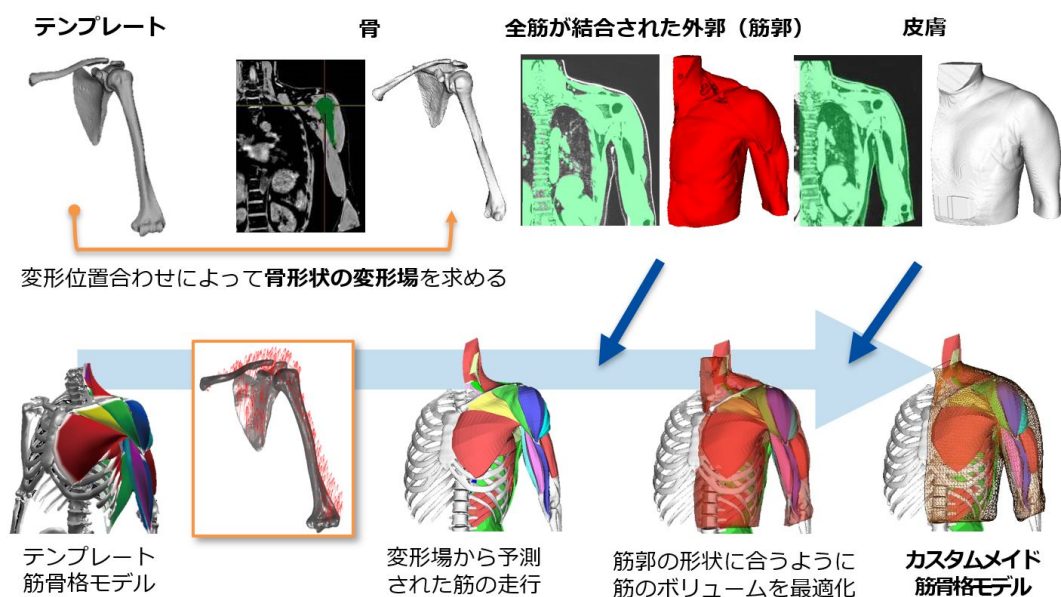


図2 カスタムメイドモデルの作成手順

(3) 全身モデルへの展開

本研究で主に肩周辺部を対象として技術開発を行ってきたが、今後様々な応用を促進するためには、全身のカスタムメイドモデルを作成する必要がある。MRI装置の撮影範囲の制限により一度に両腕を含む全身を撮影することはできないため、全身を7回程度で分割して撮影し、それらをソフトウェアで結合するプロトコルの確立を行った。また、筋同士の干渉シミュレーションの安定化・高速化に有効な筋膜の形状は、MRI画像から抽出することが困難であったため、(2)で得られた筋形状に基づいて筋膜形状を自動生成する技術の開発も行った。これらの技術を用いることによって、MRI画像に基づいて全身のカスタムメイド筋骨格モデルを作成することが可能となり、今後、健康・スポーツ分野における様々な革新的サービスの創出が期待される。

<引用文献>

Delp et al., An interactive graphics-based model of the lower extremity to study orthopaedic surgical procedures. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 37(8): 757- 767, 1990.

Komura et al., Creating and retargeting motion by the musculoskeletal human body model. Visual Computer, 16: 254-270, 2000.

Hase et al., Human gait simulation with a neuromusculoskeletal model and evolutionary computation. Journal of Visualization and Computer Animation, 14: 73-92, 2003.

Nakamura et al., Somatosensory Computation for Man - Machine Interface From Motion-Capture Data and Musculoskeletal Human Model. IEEE Transactions on Robotics, 21(1): 58-66, 2005.

Nagano et al., Contribution of non-extensor muscles of the leg to maximal-effort countermovement jumping. BioMedical Engineering OnLine, 4:52, 2005.

Seth et al., OpenSim: Simulating musculoskeletal dynamics and neuromuscular control to study human and animal movement. Plos Computational Biology, 14(7):e1006223, 2018.

BodyParts3D, <https://lifesciencedb.jp/bp3d>, ライフサイエンス統合データベースセンター licensed by CC 表示-継承 2.1 日本, 2008

Mitsuhashi et al. BodyParts3D: 3D structure database for anatomical concepts. Nucleic Acids Research, 37:D782-D785, 2009.

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 7 件)

平島雅也「筋のボリュームと変形を考慮した次世代筋骨格モデルの開発」第 4 回 Muscle Biomechanics Imaging seminar、京都、2018 年 12 月 1 日

平島雅也、藺田拓哉、近田彰治「筋のボリュームと変形を考慮したデフォーマブル筋骨格モデルの妥当性の検証」第 25 回日本バイオメカニクス学会、東京、2018 年 9 月 4-6 日

近田彰治、藺田拓哉、平島雅也「MRI 画像に基づくテララメイド筋骨格モデルの開発」第 12 回 Motor Control 研究会、東京、2018 年 8 月 18-20 日

藺田拓哉、平島雅也「皮膚・脂肪を含む筋骨格モデルの開発」第 12 回 Motor Control 研究会、東京、2018 年 8 月 18-20 日

Hirashima M. Next-generation volumetric musculoskeletal model for motor neuroscience. Society for Neuroscience. Washington DC. November 11-15, 2017.

藺田拓哉、平島雅也「ボリュームメトリック筋骨格モデルにおける分岐構造を持つ筋のモデル化」第 11 回 Motor Control 研究会、名古屋、2017 年 8 月 24-26 日

平島雅也「筋のボリュームと干渉を考慮したデフォーマブル筋骨格モデルの開発」第 10 回 Motor Control 研究会、日吉、2016 年 9 月 1-3 日

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 2 件)

名称：運動解析装置

発明者：平島雅也、藺田拓哉

権利者：国立研究開発法人情報通信研究機構

種類：特許

番号：特願 2018-086037

出願年：平成 30 年 4 月 27 日

国内外の別：国内

名称：モデル解析装置、モデル解析方法、およびモデル解析プログラム

発明者：平島雅也、藺田拓哉、近田彰治

権利者：国立研究開発法人情報通信研究機構、国立大学法人大阪大学

種類：特許

番号：特願 2018-063617

出願年：平成 30 年 3 月 29 日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

平島雅也

<http://www2.nict.go.jp/bnc/hirashima/index.html>

技術移転先

<https://www.ddd.co.jp/def-muscle/>

6 . 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：近田 彰治

ローマ字氏名：(KONDA, shoji)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。