

令和 3 年 5 月 7 日現在

機関番号：12102

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2020

課題番号：19K24294

研究課題名（和文）個人の体つきに応じた最適跳躍動作の解明

研究課題名（英文）Clarification of the optimal jumping motion according to the individual morphology

研究代表者

佐渡 夏紀（Sado, Natsuki）

筑波大学・体育系・助教

研究者番号：60844983

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では体つきと動作の個人差を精細に取得できる分析方法論を構築し、個人の体つきに応じて最適な身体動作が異なるという仮説の検証を目指した。MRIを用いて異なる密度を持つ各身体組織の3次元分布を考慮した体つきの評価手法を確立した。動作分析で中核となる関節中心の定義方法について、特に機能的方法が確立していなかった足関節の機能的方法を提案し、従来法と比較した。MRIデータと動作データを組み合わせ、詳細な形態分析が行われた個人が他者の跳躍動作を行ったとするシミュレーション手法を考案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

MRI方法論の構築により、「競技種目に従事するアスリートの特異的な適応（例：「協働筋群の中で発達度合いが均一でない）」のような身体の不均一性を考慮しつつ物理的な動かしにくさを詳細に検討することが可能となった。

足関節中心について従来法では特に足関節内外反負荷が過小評価されていることが明らかになり、各種動作の足関節捻挫リスクの再考の必要性を示された。提案した手法はそのための有益な手段となる。

検討したシミュレーションは跳躍だけでなく様々な動作で応用可能である。今後体つきの個人差に応じた最適動作が様々なスポーツ動作で検討され、将来的には科学的に個人に即した動作の提示に繋がることを期待される。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to develop a methodology to accurately analyse the individual morphology and motion and to test the hypothesis that optimal motions for motor performance differ according to individual morphological characteristics. Using MRI, I established a method to assess morphological characteristics considering the three-dimensional distribution of body tissues with different densities. For accurate motion analysis, I examined functional methods for defining joint centres, which have critical effects on motion analysis results. Especially, I proposed a functional method for the ankle joint having no established functional methods currently. I examined a simulation methodology with combining MRI and motion data, in which an individual who has undergone a detailed morphological analysis performs a jumping motion by another person.

研究分野：スポーツバイオメカニクス

キーワード：MRI 形態 慣性パラメータ 個人差 動作 モーションキャプチャー 関節中心

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

より速く・より高く自らの身体を動かす能力はあらゆるスポーツ競技のパフォーマンスに直結する。これまで、一流競技者に存在する共通点、あるいはパフォーマンス変数(例:跳躍高)と算出されたパラメーター(例:関節角度・関節トルク)の間の統計学的関係によって、パフォーマンス決定因子が検討されてきた。

他方で、全力移動運動の遂行能力を人間の限界近くまで高めたと考えられる世界一流競技者にも動作に個人差が存在することが報告されている。これまでは、動作の個人差という現象を確認できても、観察された個人差はパフォーマンスと関係ないばつつきとして捉えられてきた。しかし、世界一流競技者にも動作に個人差が存在することは、パフォーマンスが最大になる動作が個人で異なることを示唆していると捉えることもでき、対象者全体の傾向だけではパフォーマンス決定因子の全容を知ることができないと考えられる。

申請者は、最適な動作を決定づける一要因として各身体部分長比・質量比といった体つきの個人差に着目している。身体運動では、筋張力によって関節まわりに身体部分を回転させ、この回転を適切に協調させることで目的とする方向(例:跳躍であれば上向き運動)へ身体を移動させる。関節運動によって生まれる並進移動は体つきの影響を受ける。多数の身体部分が関節で連結されて身体が構成されているという観点から、特定の身体運動に「向き・不向き」な体つきが存在するだけでなく、個人の体つきに応じてパフォーマンスが最大化する動作パターンが異なることと予想される。この仮説が正しいならば、各スポーツ実施者がパフォーマンスを高めるには、パフォーマンスが高い競技者を参考にするだけでは不十分であり、個人の体つきに応じて最適な動作を追求する必要がある。

### 2. 研究の目的

本研究では体つきと動作の個人差を精細に取得できる分析方法論を構築するとともに、個人の体つきに応じて最適な身体動作が異なるという仮説の実証を目的とした。

### 3. 研究の方法

当初の計画においては、MRI データ取得と跳躍データの取得を行い、これらを融合したシミュレーションを行うことを予定していた。しかし、初年度に外部委託を予定していた全身 MRI データの組成同定に関して、分析プログラムを自ら作成する必要性が生じたこと、動作取得方法を精査していく中で跳躍動作に大きく影響を持つ足関節の関節運動の取得方法が当該分野で不十分であると認められたこと、COVID-19 の影響により最終年度前半に実験制限が生じたこと、などの要因から当初からいくつかの計画変更が生じた。

#### (1)全身のMRIデータを用いた形態分析

右上肢・右下肢・骨盤・頭頸部・胸郭部・腰部の各身体セグメントについて、DIXON法を用いた水強調画像と脂肪強調画像を取得した。右上肢・右下肢・骨盤については2mm置き、頭頸部・胸郭部・腰部については5mm置きの画像をそれぞれ取得した。

MRI 画像は磁場の不均一などによって画像内の輝度不均一が生じる。そこで、Morphology closing 演算を各スライスのそれぞれの強調画像データに適用して輝度不均一を推定した。推定された輝度不均一を除去した後、スライス毎に Otsu 法を用いて閾値を定め、二値化処理を行った。各スライスのそれぞれの強調画像の二値化データから各ピクセルで筋・皮膚と脂肪のいずれであるかを同定した。また、水強調と脂肪強調の二値化データを併合することで対象者が映っている領域を関心領域として各画像で定めた。関心領域内で MRI に映らない骨皮質とその内部の脂肪と同様の特徴を示す骨髄を探索し同定した。以上の処理は MATLAB を用いて行った(図1)。

取得した MRI 画像を OsiriX ソフトウェア内に取り込み、各解剖学的特徴点の3次元座標値をマニュアルで取得した。MATLAB を用いて得られた3次元座標値から、身体セグメントの定義およびセグメント長の算出を行った。

上記処理を経た各身体セグメントの組成データ、3次元座標情報を用いたセグメントデータ、先行研究で取得されている各組成の密度データから各身体セグメントのバイオメカニクス変数(セグメント長、セグメント質量

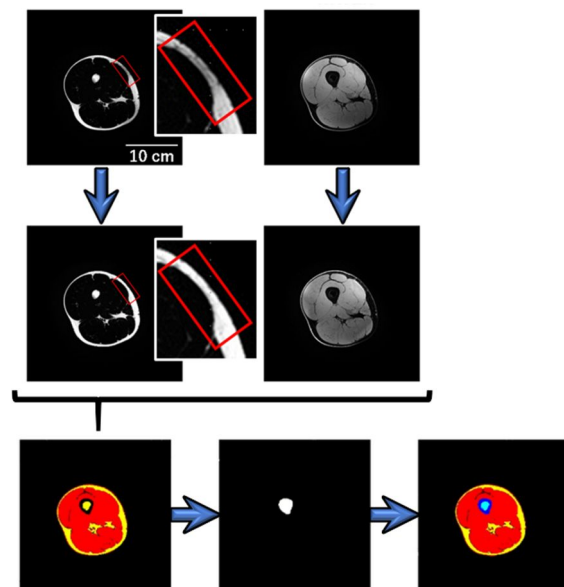


図1 MRI処理の例

輝度不均一補正の後、脂肪強調画像と水強調画像の二値化から組成の同定を行い、最後に骨組織の位置を探索する。

比、セグメント質量中心位置、慣性モーメントなど) を算出した。

### (2) 足関節の幾何学的な回転中心位置の推定と従来法(内果と外果の midpoint) の比較

足関節を、足部一下腿部を連結する関節として定義する。Journal of Biomechanics で示されている股関節中心推定のガイドライン (Camomilla et al., 2006) に記されている star-arc 動作を参考に、足関節を 3 次元的に動かす次の動作を提案した。

1. 最大底屈位・最大内転位から、徐々に外転しながらの最大限に底背屈の繰り返し
2. 最大底屈位・最大外転位から、徐々に背屈しながらの最大限の内外転の繰り返し
3. “大きく足部で円を描く”という教示による底背屈と内外転の複合動作

上記の機能的動作で推定される幾何学的な回転中心と従来法を比較することを目的に以下 2 つの実験を行った。

#### 実験 2-1

健康な成人男女を対象に、上記の足関節推定のための機能的動作の動作データと足関節周辺の MRI 画像を取得する。実験試技に先立ち、MRI で確認可能な脂質含量が高いブレスケアカプセルを内蔵した反射マーカーを作成し、対象者の下腿と足部に貼付した。モーションキャプチャシステムを用いて足関節推定動作中の反射マーカーの 3 次元座標を取得した。なお、動作データの取得と MRI 撮像のいずれを先に行うかはランダムに決定し、カウンターバランスをとった。

得られたデータから推定された足関節中心と従来法で定義される足関節中心の位置関係を定量化した。また、MRI 画像で確認された反射マーカーをデジタイズすることで MRI 座標系における反射マーカーの位置を同定し、推定された足関節中心位置をプロットした。

#### 実験 2-2

健康な成人男女を対象に、上記の足関節推定のための機能的動作、各自の至適速度による歩行、30 回・2.6 Hz の片足連続ホッピングを行わせた。モーションキャプチャシステムとフォースプレートを用いてマーカーの座標データと地面反力データを取得した。

得られたデータから、幾何学的な回転中心と従来法それぞれを用いた関節トルクを算出し比較した。

### (3) 跳躍シミュレーション

申請者が保有する助走からの片脚踏切の動作データにおける解剖学的特徴点の座標値から、身体 16 セグメントの移動座標系を定義する。(1)の MRI データで、身体各セグメントに移動座標系を定義し、各解剖学的特徴点のセグメント内の相対位置を定義する。得られた跳躍動作中の移動座標系と MRI データで得た各解剖学的特徴点の相対位置を用いて、角度ドリブンの階層モデルにより、MRI で分析された対象者が他の跳躍競技者が行った踏切動作を行ったとする仮想的な踏切動作をシミュレートする。MRI データ分析で得た身体セグメントの質量データを用いることで、質量中心位置および踏切動作中に獲得される速度を推定する。

## 4. 研究成果

### (1) 全身の MRI データを用いた形態分析

MRI 法には、骨組織を取得できないという特徴がある。しかし、本研究で確立した手法により、骨組織が同定できることが確認された(図 2)。また、四肢の各セグメントの質量の 2 倍と体幹の各セグメントの質量の相和は、測定された身体質量とよく一致していることが確認された(誤差: 1.01%)。

本研究で採用した身体モデルと同一のモデルを用いつつ、全身の密度を  $1 \text{ g/cm}^3$  で一定と仮定した Dumas et al. (2007; 2015) と本研究のデータでセグメントの質量比を比較すると、特に組織間の密度を考慮した本研究では胸部セグメントについては小さかった。これは、特に肺組織の密度が小さいことに起因することが考えられた。

MRI を用いた身体各セグメントの慣性パラメータを導出しようとする取組もこれまで散見されるものの、これらでは、各セグメントについて 1 枚あるいは数枚をマニュアルトレースすることで、各セグメントの密度を推定するといった方法を取られた。つまり、セグメント内で“密度一定”の仮定を置いて導き出される。しかし、申請者の成果により、身体各組織の 3 次元分布を考慮して分析が可能となった。これは、本研究で目的とした体つきによる身体動作への影響にとどまらず、様々な応用が考えられる。例えば、競技種目に従事するアスリートの特異的な適応(例:「協働筋群の中で発達度合いが均一でない」)について、重心位置や慣性モーメントなど“慣性特性”に対するその特異的な体つきの影響を精細に検討するといったことが可能となった。

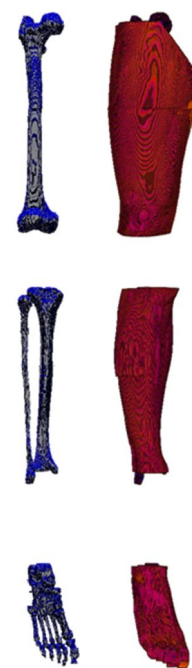


図 2 MRI データの 3 次元構築データの典型例

## (2) 足関節の幾何学的な回転中心位置の推定と従来法（内果と外果の midpoint）の比較

足関節の幾何学的中心は、従来法から有意に前側約 15 mm・内側約 10 mm に位置しており（図 3）、この結果は実験 2-1、2-2 でよく一致していた。本研究で提案した推定方法の個人内再現性が非常に高いことが認められた（前後、左右、上下すべての推定位置と従来法の相対位置関係で  $ICC \geq 0.989$ ）。

従来法と幾何学的な推定法を用いた足関節のトルクを歩行とホッピングで比較したところ、従来法では歩行接地直後の背屈トルクと内反トルクの最大値と発揮時間を過小評価してしまうこと、反対に底屈トルクを約 10 % 過大評価してしまうことが明らかになった。

以上の成果は、査読付き国際誌（Gait & Posture）に受理され（Sado et al., 2021）、公開されている。

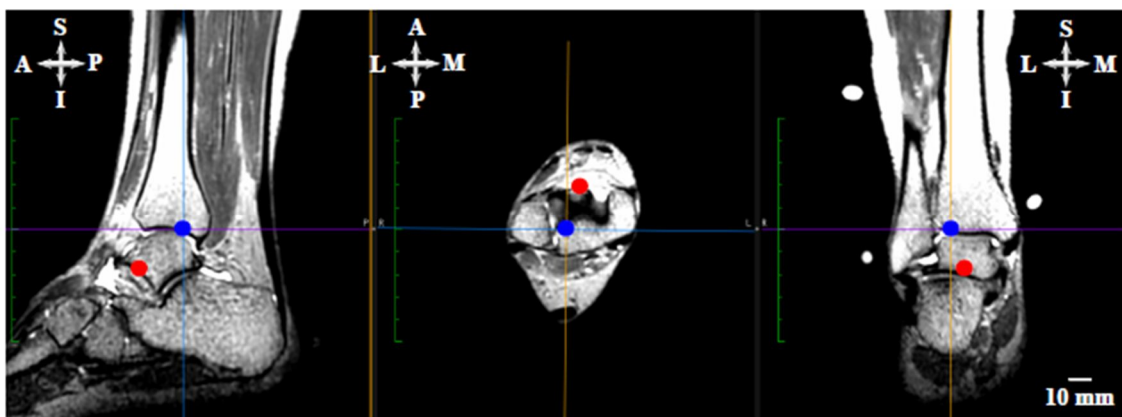


図 3 男性被検者の足関節中心位置の比較例

赤が幾何学的な回転中心、青が従来法（外果と内果の midpoint）による定義。左から矢状面、横断面、前額面の図。

## (3) 跳躍シミュレーション

MRI 測定対象者 a の解剖学的特徴点のセグメント内相対位置と跳躍者 A の踏切動作中の身体各セグメントの姿勢を定義する移動座標系とを併合することで、a が A の跳躍動作を行ったとする踏切動作を作成する角度ドリブンなシミュレーションプログラムの作成を進めた。階層モデルにおいて、足関節より近位部についてはプログラムが事実上完成したと考えられる。一方、地面と接する足部についてはいくつかの方法が存在しており検討すべき点が残されている。この点の解決を含め、(3) については今後さらなる検討を進めていく。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Sado Natsuki、Yoshioka Shinsuke、Fukashiro Senshi	4. 巻 15
2. 論文標題 Three-dimensional kinetic function of the lumbo-pelvic-hip complex during block start	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 e0230145
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1371/journal.pone.0230145	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Sado Natsuki、Yoshioka Shinsuke、Fukashiro Senshi	4. 巻 104
2. 論文標題 Free-leg side elevation of pelvis in single-leg jump is a substantial advantage over double-leg jump for jumping height generation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Biomechanics	6. 最初と最後の頁 109751
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jbiomech.2020.109751	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Sado Natsuki、Yoshioka Shinsuke、Fukashiro Senshi	4. 巻 113
2. 論文標題 Non-extension movements inducing over half the mechanical energy directly contributing to jumping height in human running single-leg jump	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Biomechanics	6. 最初と最後の頁 110082 ~ 110082
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jbiomech.2020.110082	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Sado Natsuki、Yoshioka Shinsuke、Fukashiro Senshi	4. 巻 111
2. 論文標題 Lumbar axial torque actively induces trunk axial rotation during sidestep cutting manoeuvre: Insight to expand the trunk control concept	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Biomechanics	6. 最初と最後の頁 110003 ~ 110003
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jbiomech.2020.110003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Sado Natsuki, Shiotani Hiroto, Saeki Junya, Kawakami Yasuo	4. 巻 83
2. 論文標題 Positional difference of malleoli-midpoint from three-dimensional geometric centre of rotation of ankle and its effect on ankle joint kinetics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Gait & Posture	6. 最初と最後の頁 223 ~ 229
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gaitpost.2020.10.018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Takatsuka, R., Sado N., Fukashiro, S., Yoshioka, S.
2. 発表標題 Simulation of the trajectory of shuttlecock in badminton
3. 学会等名 24th Annual Congress of the ECSS (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐渡夏紀, 吉岡伸輔, 深代千之.
2. 発表標題 方向転換における体幹の機能は固定・安定化だけなのか?-Coreの概念の再考と体幹のトレーニングへの示唆-
3. 学会等名 第32回日本トレーニング科学学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐渡夏紀, 吉岡伸輔, 深代千之.
2. 発表標題 走高跳で用いられる曲線助走は直線助走と同様の力発揮でより大きな跳躍高を導く
3. 学会等名 替ひろば (バイオメカニクス学会研究会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐渡夏紀
2. 発表標題 最新の跳ぶ科学：下肢の伸展動作に留まらない巧みな全身動作としての跳躍
3. 学会等名 第28回身体運動科学シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shiotani H., Sado N., Kurumisawa K., Saeki J., Kawakami Y.
2. 発表標題 Acute effects of static stretching of ankle and metatarsophalangeal joint on plantar fascial and muscular stiffness, passive joint range of motion, and foot arch deformation during drop jump
3. 学会等名 日本バイオメカニクス学会第26回大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 一瀬星空, 長瀬嘉剛, 佐渡夏紀, 呂匯, 山田雄基, 川上泰雄
2. 発表標題 ボディビルダーの減量における大腿部筋横断面積および非収縮要素横断面積の変化
3. 学会等名 第33回日本トレーニング科学会大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------