

令和 4 年 5 月 16 日現在

機関番号：13101

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K17193

研究課題名（和文）MRIによる膝関節の3次元運動解析法の構築

研究課題名（英文）Construction of a three-dimensional motion analysis method for the knee joint using magnetic resonance imaging

研究代表者

近藤 達也（Kondo, Tatsuya）

新潟大学・医歯学系・助教

研究者番号：30821813

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：膝関節運動に伴う靭帯の変形を評価するために、MRIを用いた膝関節の3次元運動解析法を構築した。構築した運動解析法では、運動中の膝関節を対象にした2D multi slice cine画像と静止中の膝関節を対象にした3D画像を取得し、それぞれのイメージレジストレーションにより骨位置を同定する。2D multi slice cine画像では、膝蓋腱が弛緩する様子や緊張する様子が評価可能であった。また、運動解析に重要な膝関節座標系を構築する手法として、下肢全長のMR画像を用いて座標系を構築する手法を検討し、合成処理をしたMR画像は骨座標系構築に有用であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

膝関節の機能や痛みの原因を評価するためには、運動中における軟部組織の変形を評価することが重要である。軟部組織の評価は、光学カメラやX線を用いた運動解析を基準にした推定評価が主に行われる。しかし、光学カメラやX線検査では軟部組織を描出できないことが課題である。また、X線検査は被ばくを伴うことも課題となる。一方、MRIは放射線の被ばくがなく、軟部組織のコントラストに優れることが利点である。本研究では、膝関節の軟部組織である膝蓋腱を対象に、運動に伴う変形をMRIで評価できる手法を構築した。

研究成果の概要（英文）：A three-dimensional (3D) motion analysis method of the knee joint was developed using magnetic resonance imaging (MRI) to evaluate ligament deformation due to knee joint motion. A two-dimensional (2D) multi-slice cine image of the knee joint in motion and a 3D image of the knee joint at rest were acquired in this method. The bone position was identified through the registration of each image. Patellar tendon relaxation and tension were evaluated using the 2D multi-slice cine images. In addition, a method to construct a knee joint coordinate system, which is important for motion analysis is developed using the MR images of the entire length of the lower limb. The MR image composing was found useful for constructing a bone coordinate system.

研究分野：放射線技術学

キーワード：MRI cine MRI 運動解析 膝関節 膝蓋腱 骨座標系 MR image composing

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

膝関節の運動に伴う軟部組織の変形を解析することは、関節の機能や痛みの原因を評価するために重要である。運動中の軟部組織は、骨を基準にした運動解析により評価されることが多い。運動解析を光学カメラや X 線による画像検査を用いて行う場合、軟部組織を描出することができない。そのため、軟部組織の評価は、骨運動に基づく推定で行われることが課題となる。この課題を解決するためには、MRI を用いて骨運動を解析することが有用となる。MRI は軟部組織の描出に優れ、X 線による被ばくもないことが利点である。これまでも MRI による運動解析は報告されているが、対象にできる運動が制限されることが課題であり、特殊な撮像シーケンスや補助器具が必要な手法、解剖画像が 1 枚のみとなる手法などであった。解剖画像を複数枚取得できることは、軟部組織の変形解析に有用となる。また、対象とする運動の制限をなくすためには、短時間の連続撮像を応用することが有用である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、MRI を用いた軟部組織の評価を含めた運動解析法の確立である。また、運動解析において重要となる骨座標系の構築を、下肢全長の MR 画像を用いて行う手法を確立することである。下肢全長の MR 画像は、MR 画像の合成処理で取得する必要があるため、合成処理をした MR 画像を用いて構築した骨座標系の精度を評価した。

3. 研究の方法

(1) MRI を用いた運動解析

運動解析の概念図を図 1 示す。運動中に撮像した multi slice cine 画像を対象に、静止中に撮像した 3D 画像から作成した MPR 画像のイメージレジストレーションを行った。イメージレジストレーションは、それぞれの画像における大腿骨と脛骨、膝蓋骨それぞれの骨輪郭を対象に行った。イメージレジストレーションに用いた変換行列の逆行列が骨運動を示す。

MR 撮像

対象は健康ボランティア 5 名の右膝関節とした。MRI は 3T MRI 装置 MAGNETOM Prisma (Siemens 社製)、コイルは 15 ch Knee コイルを使用し、撮像体位は仰臥位とした。静止時と運動時の膝関節画像は 3D 撮像と 2D 高速 cine 撮像が可能な T1 強調 spoiled gradient echo (SPGR) を基本としたシーケンスを用いた。また、スライス方向の評価を可能とするために運動中の撮像は multi slice に設定した。運動を行う直前に 3D 撮像を行い、2D multi slice cine の撮像開始時の膝関節の位置が静止時の膝関節と同じ位置になるようにした。静止した膝関節の撮像条件は 3D Volumetric Interpolated Breath-hold Examination (VIBE), TR 5.69 msec, TE 2.46 msec, FOV 250×250 mm, matrix 256×256, phase partial fourier 7/8, slice partial fourier 7/8, slice thickness 0.5 mm, parallel imaging mode Generalized autocalibrating partially parallel acquisitions (GRAPPA), accel factor PE 2, flip angle 6 degrees, bandwidth 400 Hz/pixel とした。続けて運動中の撮像を行うために静止中の固定が十分にできないため、撮像時間は臨床条件よりも短く、1 分程度に設定した。また、運動中の膝関節の撮像条件は 2D fast low angle shot (flash), TR 4.92 msec, TE 2.31 msec, FOV 180×180 mm, matrix 192×192, phase partial fourier 55%, slice partial fourier 5/8, slice thickness 5 mm, parallel imaging mode GRAPPA, accel factor PE 3, flip angle 12 degrees, bandwidth 605 Hz/pixel とした。5 スライスの撮像を 1 秒程度で行い、運動中の撮像は 2 分程度に設定した。ボランティアに撮像が開始してから屈曲伸張運動を 2 cycle/min 程度でゆっくり繰り返すように指示をした。また、運動を行いやすいように固定が十分でないことを伝え、静止中の撮像と運動中の撮像の間も動かないように指示をした。

3D 骨モデルの作成と骨座標系の定義

静止中に撮像した 3D 画像から大腿骨と脛骨、膝蓋骨の 3D 骨モデルを作成した。3D 骨モデルの作成は intuition 3D workstation (TeraRecon 社製) を使用し、3D モデルの表示は Rhinoceros (Robert McNeel & Associates 社製) を用いて行った。また、作成された 3D 骨モデルはワークステーションで定義された座標系で表示されるため、MR 装置の座標系と一致するようにモデルを移動させて使用した。大腿骨と脛骨、膝蓋骨それぞれの骨座標系の定義は静止中に撮像した 3D 画像を用いて行った。大腿骨座標系は大腿骨軸と大腿骨内外側顆部を用いて定義した。原点は大腿骨内外側後顆の中心、Z 軸は骨軸として定義し、Y 軸は大腿骨内外側後顆の中心を結んだ直線と Z 軸の外積として定義した。また、X 軸は Z 軸と Y 軸の外積として定義した。脛骨座標系は脛骨軸と脛骨近位関節面の内外側の中心点、膝蓋骨座標系は膝蓋骨の遠近位と内外側の頂点を用いて、それぞれ大腿骨と同様の手順で決定した。

イメージレジストレーション

関節運動中に撮像した multi slice cine 画像の骨輪郭を基準として、3D 画像から作成した

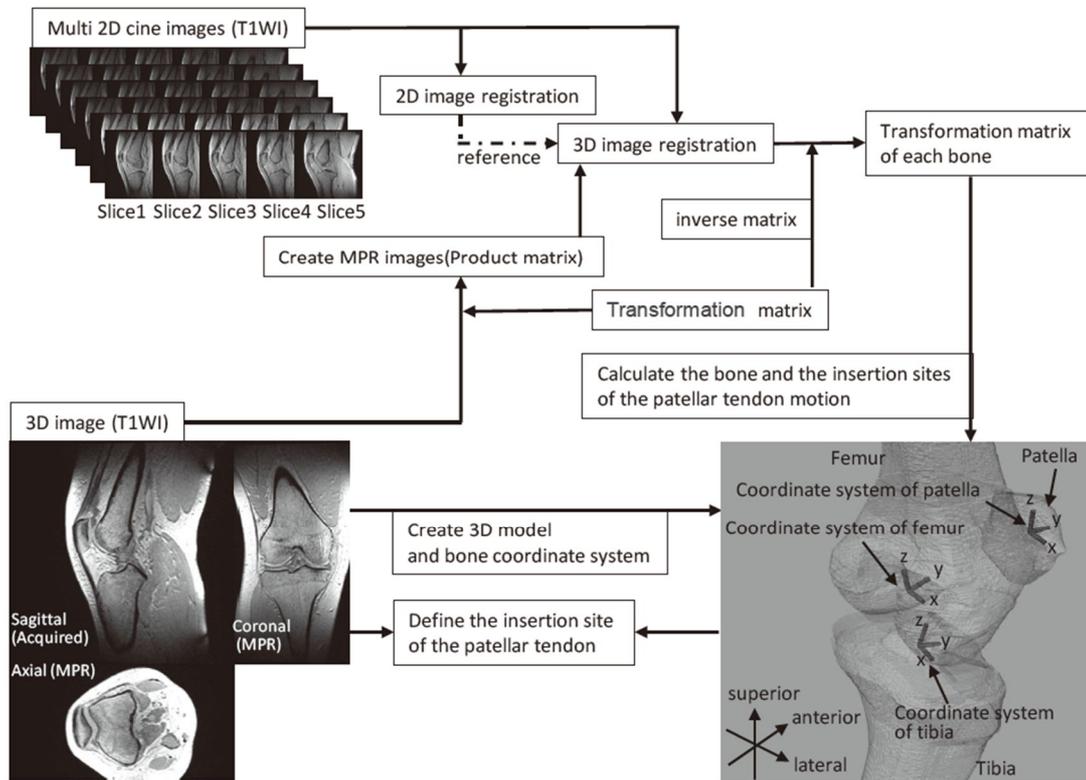


図1 MRIを用いた運動解析の概略図。

MPR 画像の骨輪郭が一致するようにイメージレジストレーションを行った。イメージレジストレーションは MATLAB (MathWorks 社製) を使用して行った

膝蓋腱の長さ変化の解析

屈曲伸展運動中の膝蓋腱の長さ変化を測定した。膝蓋腱の骨付着部を 3D 画像で同定し、運動中の骨付着部の位置変化を骨位置から算出した。膝蓋腱の様子を 2D multi slice cine 画像で確認し、膝蓋腱が緊張しているとき、骨付着部間の直線距離を膝蓋腱の長さとして定義した。

(2) MR 画像の合成処理を用いた骨座標系構築の精度評価

MR 画像の合成処理を用いた骨座標系構築の精度評価を行うため、牛大腿骨の全長を含む画像を用いて、大腿骨座標系を構築した。牛大腿骨全長の MR 画像は、3 ステップに分割して撮像した。それぞれの MR 画像に 3 次元のひずみ補正処理を行い、合成処理を行った。合成処理をした牛大腿骨全長の MR 画像を用いて、大腿骨座標系を構築した。MR 画像から構築された大腿骨座標系を CT 画像から構築した座標系と比較した。また座標系構築を複数回を行い、再現性を検証した。大腿骨座標系構築における画像歪みの影響を検討するため、合成処理をした MR 画像の歪みを測定した。

牛大腿骨全長の MR 画像の取得

大腿骨全長の MR 画像は、プラスチック格子に固定した牛大腿骨を対象に、3 ステップで撮像した 3D 画像を合成して取得した。MR 撮像において設定した field of view (FOV) を図 2 に示す。プラスチック格子は希釈したガドリニウム造影剤で満たした。MRI 装置は 3T MRI 装置 MAGNETOM Prisma, 18 channel body matrix coil, spine coil (Siemens 社製) を使用した。MR 画像の撮像条件は、sequence name 3D-VIBE (Volumetric Interpolated Breath-hold Examination), imaging plane sagittal, FOV 250 × 250 mm, number of slices 384, acquisition matrix 256 × 256, reconstruction matrix 512 × 512, repetition time (TR) 5.19 ms, echo time (TE) 2.46 ms, slice thickness 0.5 mm, bandwidth 415 Hz/pixel, acquisition time 1 minute とした。合成処理の条件として、composing function spine とした。MR 画像に対する後処理として 3 次元の歪み補正処

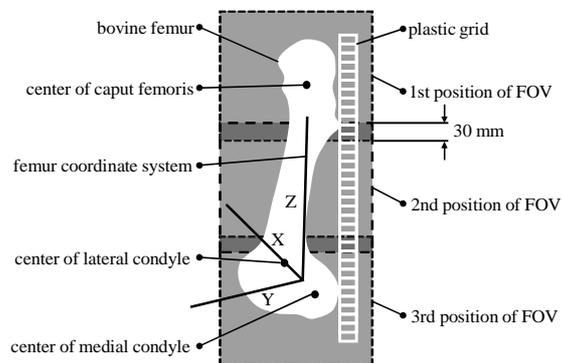


図2 FOVを設定した位置。

理を行った後、大腿骨全長を含む画像となるように自動で合成処理をした。MR 画像の後処理は MR 装置のコンソールで行った。

合成処理後の MR 画像を用いた大腿骨座標系の構築

合成した MR 画像を用いて、内顆と外顆、骨頭それぞれの中心を基準点とする大腿骨座標系を構築した。大腿骨座標系構築に必要な基準点は、Aquarius iNtuition 3D workstation (TeraRecon 社製) を使用してプロットした。大腿骨座標系の中心は、内顆と外顆それぞれの中心の midpoint とした。内顆と外顆を結ぶベクトルを X 軸、座標系中心と骨頭中心を結ぶベクトルを仮 Z 軸と定義し、仮 Z 軸と X 軸それぞれのベクトルの外積を Y 軸とした。X 軸と Y 軸それぞれのベクトルの外積を Z 軸とした。

合成処理後の MR 画像を用いた大腿骨座標系の評価

大腿骨全長の MR 画像を用いた大腿骨座標系を評価するために、同じ牛大腿骨の CT 画像を用いて構築した大腿骨座標系と比較した。牛大腿骨の CT 画像は MR 画像と同じ状態になるように、牛大腿骨とプラスチック格子の固定を保持して取得した。プラスチック格子を MR 画像と CT 画像の位置合わせに利用した。取得した CT 画像を用いて、大腿骨全長の MR 画像を用いた構築法と同じ手法で大腿骨座標系を構築した。CT 画像を用いて構築した大腿骨座標系を基準にして、MR 画像を用いて構築した大腿骨座標系の中心位置と軸回転を評価した。また、大腿骨全長の MR 画像を用いて構築する大腿骨座標系の再現性を評価するため、3 人の測定者がそれぞれ 5 回の解析を行い、平均値をそれぞれの測定結果とした。3 人の測定者による大腿骨座標系の中心位置と軸回転の平均値と標準偏差を算出した。

合成処理後の MR 画像の歪み評価

合成処理後の MR 画像の歪み評価は、牛大腿骨に固定したプラスチック格子を用いて、CT 画像を基準にして算出した。プラスチック格子が 1 枚で描出できる MPR 画像を、MR 画像と CT 画像それぞれで作成した。MR 画像と CT 画像の MPR 画像で、プラスチック格子の上下、左右、対向方向の同一点をプロットした。プロットしたそれぞれの座標から 2 点間の距離を算出し、MR 画像と CT 画像それぞれから求めた距離の差を、CT 画像から求めた距離の差で除した値を歪みとして評価した。

4. 研究成果

(1) MRI を用いた運動解析による膝蓋腱の長さ変化の解析

屈曲伸展運動に伴う膝蓋腱の長さ変化を図 3 に示す。膝蓋腱は屈曲中よりも伸展中の方が長い傾向にあった。膝蓋腱の変形は大腿四頭筋の緊張に依存すると考えられる。大腿四頭筋は伸展中に強く緊張すると考えられるため、膝蓋腱は伸展中に長くなる傾向があったと考えられる。膝蓋腱の長さ変化を解析するためには、3 次元の解析に加え、膝蓋腱の緊張状態を考慮する必要がある。本研究で構築した解析手法は、膝蓋腱の緊張状態を 2D multi slice cine 画像で評価可能である。また、骨運動を 3 次元で評価することで、膝蓋腱の変形を 3 次元で評価可能であった。

(2) MR 画像の合成処理を用いた骨座標系構築の精度

MR 画像の合成処理を用いて構築した大腿骨座標系の中心位置は、CT 画像から構築された座標系を基準として、X 軸 0.1 ± 1.4 mm, Y 軸 1.7 ± 0.2 mm, Z 軸 -0.1 ± 0.3 mm, それぞれの軸回転は 1° 以下であった。合成処理後の MR 画像の歪みは 1% 以下であり、MR 画像の歪みと合成処理が大腿骨座標系構築に与える影響は小さいと考えられる。MR 画像の合成処理を用いて構築された大腿骨座標系は、CT 画像から構築された座標系と同等に扱えると考えられる。

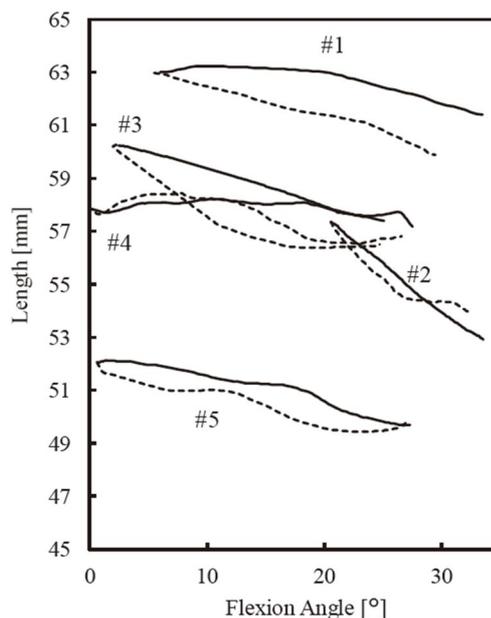


図 3 屈曲伸展運動に伴う膝蓋腱の長さ変化 .5 人の被験者の結果を示す .実線が伸展中,点線が屈曲中を示す .

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kondo Tatsuya, Yagi Yuta, Saito Hiroaki, Kanazawa Tsutomu, Saito Yutaro	4. 巻 -
2. 論文標題 Evaluation of a Bone Coordinate System Constructed Using MR Image Composing	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Radiological Technology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.6009/jjrt.2022-1232	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 Tatsuya KONDO, Makoto SAKAMOTO, Koichi KOBAYASHI, Surangika WADUGODAPITIYA	4. 巻 4
2. 論文標題 A Dynamic Method of Measuring the Length of the Patellar Tendon Using Cine Magnetic Resonance Imaging	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advanced Experimental Mechanics	6. 最初と最後の頁 157-162
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11395/aem.4.0_157	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4件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 近藤 達也, 金沢 勉, 斉藤 宏明, 斎藤 祐太郎
2. 発表標題 MRI による大腿骨全長を用いた大腿骨座標系構築法の提案
3. 学会等名 第77回日本放射線技術学会総会学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木彩香, 近藤達也
2. 発表標題 MR画像のイメージレジストレーションを用いた運動解析の基礎検討
3. 学会等名 第11回東北放射線医療技術学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tatsuya KONDO, Makoto SAKAMOTO, Koichi KOBAYASHI and Surangika WADUGODAPITIYA
2. 発表標題 The effect of quadriceps force to the balance between quadriceps and patellar tendon
3. 学会等名 International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古屋 咲子, 近藤 達也, 坂本 信
2. 発表標題 2D MRI と3D MRI における膝蓋腱の長さ測定の比較
3. 学会等名 第9回東北放射線医療技術学術大会
4. 発表年 2019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
---------	---------