

令和 5 年 5 月 21 日現在

機関番号：15401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K21255

研究課題名（和文）機械学習を活用した変形性膝関節症患者の異常な歩行パターン評価法の開発

研究課題名（英文）Development of a method for evaluation of abnormality gait patterns in patients with knee osteoarthritis using machine learning

研究代表者

山科 俊輔（Yamashina, Shunsuke）

広島大学・人間社会科学研究科（総）・研究員

研究者番号：20911233

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では変形性膝関節症患者を対象に（1）歩行パターン評価の妥当性の検証，（2）マーカレスモーションキャプチャシステムによる歩行パターンの検査方法の検討，（3）マーカレスモーションキャプチャシステムから得られるデータを使用し，機械学習による膝重症度判断方法の検討を試みた。本研究の結果より，変形性膝関節症患者の歩行パターンを評価することの妥当性が明らかとなった。膝重症度を判断する機械学習モデルを作成した。今後の課題としては，モデルの精度については検証，マーカレスモーションキャプチャシステムによる歩行パターンの検査方法の再考である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究結果より，歩行パターンの検査結果を用いることで，1年後の身体活動量が低下しやすい変形性膝関節症患者をスクリーニングできる可能性がある。変形性膝関節症患者に対する予防的介入方法の検討に繋がると考えられる。

また，本研究で作成した機械学習のモデルは，患者情報（年齢，性別，痛み）と歩行キネマティクス指標（下肢の関節運動）を用いて変形性膝関節症患者の重症度を判断するものである。臨床応用には限定的であるが，本研究をさらに検証することで動画情報から変形性膝関節症の状態を判断できるツールの開発に繋がると考えられる。そのため，早期の病態判断への発展性があると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we attempted to (1) verify the validity of gait pattern evaluation in patients with knee osteoarthritis, (2) examine a gait pattern examination method using a markerless motion capture system, and (3) examine a machine learning method for determining knee severity using data obtained from the markerless motion capture system. The results of this study revealed the validity of evaluating the gait patterns of patients with knee osteoarthritis. We created a machine learning model to determine knee severity. As future issues, the accuracy of the model needs to be verified, and the method of examining gait patterns using a markerless motion capture system needs to be reconsidered.

研究分野：リハビリテーション科学

キーワード：変形性膝関節症 歩行パターン 機械学習 マーカレスモーションキャプチャシステム 身体活動量
予後 予測

1. 研究開始当初の背景

変形性膝関節症 (Knee Osteoarthritis 以下、膝 OA) 患者には、主に筋力低下や骨棘の変化がみられる。筋力低下や骨棘の変化は、膝 OA が初期の段階では認められず、進行期以降にみられる (Palmieri-Smith; 2010, 津田; 2017)。つまり、これらの兆候がみられる段階では、膝 OA は進行期に至っている可能性がある。そのため、膝 OA の進行を早期に発見するためには、膝 OA が初期の段階でもみられる兆候を捉える必要がある。

歩行パターンの異常は、初期の膝 OA 患者でも見られる兆候である。また、膝 OA 患者の歩行パターンの異常は筋力低下や疼痛などの身体所見と関連している (Chen; 2003)。一般的に歩行されている歩行の規定要因は筋機能、関節機能、感覚機能などの複数の機能で構成されている (Kirsten; 2005)。つまり、膝 OA が初期の段階であっても、膝 OA に起因する複数の機能の障害が異常な歩行パターンとして表れていると考えられる。これらのことから、膝 OA の進行を早期に発見するために、歩行パターンの異常に着目することは合理的といえる。

歩行パターンの評価は、三次元動作解析を用いる場合が多いが、導入コストや計測の時間的制約により臨床で扱われる場面は少ない。我々はその代替指標として、ビデオ動画を観察し、膝 OA 患者の歩行パターンを得点化する歩行異常性尺度を開発した (山科, 他; 2019)。この尺度については、三次元動作解析との基準関連妥当性、膝 OA 患者の身体的特徴 (重症度, 筋力, 歩行速度等) との併存的妥当性、再検査信頼性、検者間信頼性を検証した。しかし、この尺度は専門家 (理学療法士など) が肉眼で観察し、評価することを前提に開発されたため、専門家でさえも気づけていない異常は見落とされている。また、検者間信頼性に関して、尺度の項目によって中程度の一致にとどまっていることも課題である。

これらのことから、マーカレスモーションキャプチャシステム等の簡易デバイスを用いて歩行を計測し、歩行パターンの検査方法を構築することが必要であると考えられる。また、簡易デバイスから得られるデータを用いて、機械学習による良し悪しの判断が可能となれば、異常を客観的に検出し、かつ信頼性の高い評価が可能になると考えた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、人工知能の手法の一つである機械学習を活用して、膝 OA 患者の異常な歩行パターン評価の方法を構築することとしている。そのため、3つの検証を行なった。研究1では歩行パターン評価の妥当性を検証した。研究2ではマーカレスモーションキャプチャシステムによる歩行パターンの検査方法を検討した。そして、研究3ではマーカレスモーションキャプチャシステムから得られるデータを使用し、機械学習による膝重症度判断方法の検討を試みた。

3. 研究の方法

研究1

(目的)

研究1の目的は、膝 OA 患者の歩行パターンの異常と身体活動量の関係を検証し、歩行パターン検査の臨床的有用性を検討することとした。

(対象)

対象は保存療法中の内側型膝 OA 患者とした。取込基準は取り込み基準を 10 m 以上の屋内独歩が可能者 (Functional Independence Measure のスコアが 6 点以上) とした。除外基準は、認知機能の低下がある者 (長谷川式簡易知能スケールが 20 点未満)、中枢神経疾患の既往がある者 (運動麻痺を生じている者) とした。

(方法)

研究デザインは前向きコホート研究とした。ベースライン調査として年齢、性別、Kellgren-Lawrence 分類 (以下、K-L 分類)、膝関節屈曲可動域、膝関節伸展・屈曲筋力、歩行パターン尺度、歩行速度、および 1 日当たりの身体活動量を調査した。追跡調査としてベースラインから 1 年後の身体活動量を収集した。

歩行パターンの検査はビデオカメラで記録した動画データを使用し、7 項目の尺度により採点した。最高点が 21 点、最低点が 0 点であり、高得点になるにつれて歩行パターンの異常が重度と判断した。身体活動量は歩数 (steps/day) を扱った。計測は活動量計 (OMRON 社製、Active Style Pro HJA-350 IT) を用いた。加速度計を腰部に装着し、睡眠時、入浴時、激しい接触のある運動時以外を除き、1 日中装着し、7 日間の計測を行った。

1 年後の身体活動量が 2700 歩未満を活動量低値群、2700 - 4399 歩を活動量中間群、4400 歩以上を活動量高値群に分類し、ベースライン時の歩行パターンの検査結果との関連性を検証した。

統計手法は一元配置分散分析を実施した後、多重比較検定を行なった。また、Receiver operator characteristic (以下、ROC) 分析を行い、身体活動量の低下に対する歩行パターンの検査のカットオフ値を算出した。1 年後の身体活動量が 2700 歩未満をイベント発生とした分析と、4400 歩未満をイベント発生とした分析をそれぞれ実施した。統計解析のソフトウェアは SPSS statistics

24 (日本 IBM 社) を使用した。

研究 2

(目的)

研究 2 の目的は膝 OA を対象とし、マーカレスモーションキャプチャシステムによる歩行パターンの検査方法を検討することとした。そのため、マーカレスモーションキャプチャシステムから得られる歩行キネマティクス指標と観察に基づく歩行パターンの検査の関連性を検証した。

(対象)

対象は研究 1 と同じ条件の膝 OA 患者とした。

(方法)

研究デザインは横断研究とした。調査項目は、年齢、性別、K-L 分類、疼痛、歩行中の動画(歩行パターン尺度、座標の算出)を収集した。

歩行の座標抽出にはマーカレスモーションキャプチャシステム (VisonPose single 3D) を用いた。前顔面からの歩行を撮影し、Spine Mid, Spine Base, Hip, Knee, Ankle の 3 次元座標を抽出した。抽出した 3 次元座標を用いて、股関節、膝関節のキネマティクス指標を算出した。算出には数値処理ソフトウェア (MATLAB 2022a) を使用した。

歩行パターンの検査は理学療法士が採点し、各項目を、0=異常なし、1=中程度の異常、2=重度の異常とした。そのうち、0 を異常なし群、1 または 2 を異常あり群とし、歩行キネマティクス指標との関連性を検証した。統計手法は対応のない T 検定を用いた。統計解析ソフトウェアは JMP Pro 16 を使用した。

研究 3

(目的)

研究 3 の目的はマーカレスモーションキャプチャシステムから得られるデータを使用し、機械学習による膝重症度判断方法の検討を試みることにした。

(対象)

対象は研究 2 と同じ膝 OA 患者とした。

(方法)

研究デザインは横断研究とした。調査項目は、研究 2 同様とした。膝 OA の重症度に影響する変数を推定するために、機械学習を用いた。従属変数は膝 OA の重症度とし、軽症群 (K-L 分類 1 度、2 度)、重症群 (K-L 分類 3 度、4 度) とした。独立変数は年齢、性別、疼痛、歩行キネマティクス指標 (股関節伸展、膝関節屈曲・伸展・内反) とした。機械学習のアルゴリズムはロジスティック回帰、サポートベクトルマシン、ランダムフォレスト、ニューラルネットワーク、K 近傍法を用い、最適なモデルを検証した。モデルの精度検証には k 分割交差検証 (k=5) を用いた。統計解析ソフトウェアは JMP Pro 16 を使用した。

4. 研究成果

研究 1

46 例の膝 OA 患者のデータを収集した。そのうち 1 年後の追跡調査が可能であった対象は 24 例であった (平均年齢: 76.33 ± 8.0 歳、男性: 5 例、女性: 19 例)。身体活動量に関連を示した検査は、年齢、歩行パターン、歩行速度であった。歩行パターンの検査は高い効果量を示した (F=14.62)。

表 1 身体活動量低下に対する歩行パターン検査の検査特性値

	AUROC	Cut-off 値	感度	特異度	陽性 LR	陰性 LR
<2700 歩	0.91	8	1.00	0.89	9.09	0
<4400 歩	0.89	5	0.92	0.91	10.2	0.09

AUROC: Area Under the ROC Curve, LR: likelihood ratio

ROC 分析の結果では、1 年後に身体活動量が 2700 歩未満であることをイベント発生とし場合、歩行パターンの検査のカットオフ値が 8 点であった。その際の ROC 曲線下面積 (Area Under the ROC Curve: 以下 AUROC) は 0.91、感度 1.00、特異度 0.89 であった。陽性尤度比 (Likelihood ratio: 以下, LR) は 9.09、陰性 LR は 0 であった。1 年後に身体活動量が 4400 歩未満であることをイベント発生とし場合、歩行パターンの検査のカットオフ値が 5 点であった。その際の AUROC は 0.89、感度 0.92、特異度 0.91 であった。陽性 LR は 10.2、陰性 LR は 0.09 であった (表 1)。

本研究結果から、歩行パターンの異常は将来の身体活動量に関連する要因であることがわかった。また、歩行パターンの検査結果から1年後に身体活動量が4400歩未満となる膝OA患者をスクリーニングできる可能性を示唆した。

研究2

50例の膝OA患者のデータを収集した(平均年齢: 75.96 ± 6.08 歳, 男性: 11例, 女性: 39例)。マーカレスモーションキャプチャシステムから「立脚期の膝関節内反角度」、「立脚期の膝関節伸展角度」、「遊脚期の膝関節屈曲角度」、「立脚期の股関節伸展角度」の算出が可能であった(表2)。今回使用したマーカレスモーションキャプチャシステムでは、足先の三次元座標を取得できなかったため、足関節の角度の算出は困難であった。

T検定の結果では、観察項目と立脚期の膝関節内反角度が $p=0.37$ (図1-A)、立脚期の膝関節伸展角度が $p=0.69$ (図1-B)、遊脚期の膝関節屈曲角度が $p=0.47$ (図1-C)、立脚期の股関節伸展角度が $p=0.83$ (図1-D)であり、理学療法士の観察による歩行パターンの検査とマーカレスモーションキャプチャシステムによる歩行キネマティクス指標の関連性は認められなかった。

表2 対象者の記述統計量

変形性膝関節症患者, n=50	
年齢, 歳	75.96 (6.08)
性別	男性: 11, 女性: 39
身長, cm	155.88 (7.59)
体重, kg	58.62 (10.41)
K-L 分類	I: 24, II: 6, III: 3, IV: 17
痛み (VAS), mm	30.84 (22.14)
立脚期の膝関節内反角度, °	186.90 (4.11)
立脚期の膝関節伸展角度, °	11.72 (9.21)
遊脚期の膝関節屈曲角度, °	20.66 (8.76)
立脚期の股関節伸展角度, °	-20.81 (32.73)

平均 (標準偏差), K-L 分類: Kellgren-Lawrence 分類

マーカレスモーションキャプチャシステムによる歩行キネマティクス指標の

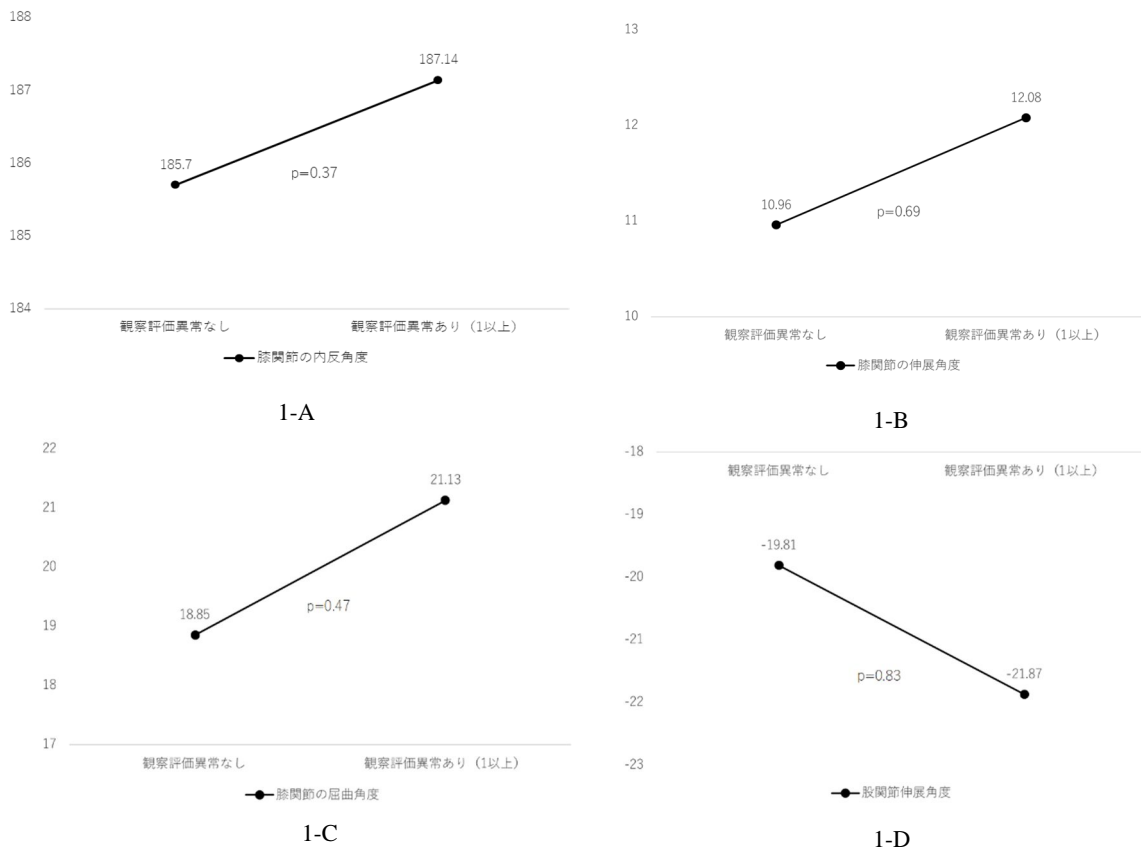


図1 観察による検査と歩行キネマティクス指標の関連性

観察に基づく歩行パターンの検査とマーカレスモーションキャプチャシステムで算出されるキネマティクス指標の一致度は、統計学的有意水準を超える結果ではなかった。なかでも、マーカレスモーションキャプチャシステムから算出した股関節伸展角度については分散も大きい結果であった。角度の算出方法や、マーカレスモーションキャプチャシステムの系統誤差等も再度検証することが課題として残された。

研究 3

対象者は研究 2 と同様であった (表 2)。モデルスクリーニングを行ない、各アルゴリズムを比較するとニューラルネットワークの平均 Receiver Operating Characteristic curve (ROC 曲線) の曲線下面積 (Area Under the ROC Curve: AUC) が最も高く、平均平方二乗誤差 (Root Average Squared Error: RASE) が最も低い結果であった (表 3)。

ニューラルネットワークの分割検証の結果、学習サンプルの AUC が 0.97, RASE が 0.28, 誤分類率が 0.08 であった。一方、検証サンプルでは AUC が 0.87, RASE が 0.36, 誤分類率が 0.13 であった。学習サンプル、検証サンプルの混同行列および混同率は表 4, 5 に示す通りである。

本研究では、膝 OA の重症度を従属変数としたニューラルネットワークのモデル作成を試みた。独立変数は年齢、性別、疼痛、歩行キネマティクス指標 (股関節伸展、膝関節屈曲・伸展・内反) であった。今回作成されたニューラルネットワークのモデルは一定の精度を有していることがわかった。しかしながら、サンプルが小数であることが本研究の限界であり、過剰適合の可能性も考えられる。サンプルの増加による精度の高いモデルの作成や、別サンプルを用いた交差妥当性の検証が今後の課題であると考えられる。

表 3 各アルゴリズムの精度の比較

	平均 AUC	平均 RASE
ニューラルネットワーク	0.62	0.45
ランダムフォレスト	0.48	0.51
K 近傍法	-	-
サポートベクトルマシン	0.47	0.56
ロジスティック回帰	0.38	0.58

AUC: Area Under the ROC Curve, RASE: Root Average Squared Error

表 4 学習サンプルの混同行列および混同率

		予測値の度数 (割合)	
		膝 OA 軽症	膝 OA 重症
実測値	膝 OA 軽症	23 (0.96)	1 (0.04)
	膝 OA 重症	2 (0.13)	13 (0.87)

OA: Osteoarthritis

表 5 検証サンプルの混同行列および混同率

		予測値の度数 (割合)	
		膝 OA 軽症	膝 OA 重症
実測値	膝 OA 軽症	4 (1.00)	0 (0.00)
	膝 OA 重症	1 (0.25)	3 (0.75)

OA: Osteoarthritis

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yamashina Shunsuke, Harada Kazuhiro, Tanaka Ryo, Inoue Yu	4. 巻 8
2. 論文標題 Abnormal Gait Pattern Examination Screening for Physical Activity Level after One Year in Patients with Knee Osteoarthritis	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Functional Morphology and Kinesiology	6. 最初と最後の頁 24 ~ 24
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/jfmk8010024	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1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yamashina S, Harada K, Tanaka R, Inoue Y
2. 発表標題 Relationship between observation-based gait abnormality assessment and physical activity after one year in patients with knee osteoarthritis
3. 学会等名 International Society of Physical and Rehabilitation Medicine 2022（国際学会）
4. 発表年 2022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
研究協力者	田中 亮 (Tanaka Ryo) (50454880)	広島大学・人間社会科学研究科・教授 (15401)	
研究協力者	井上 優 (Inoue Yu) (90726697)	吉備国際大学・保健医療福祉学部・准教授 (35308)	
研究協力者	原田 和宏 (Harada Kazuhiro) (80449892)	吉備国際大学・保健医療福祉学部・教授 (35308)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	岡田 竜磨 (Okada Tatsuma)	平病院・リハビリテーション部	
研究協力者	足立 真澄 (Adachi Masumi)	平病院・リハビリテーション部	

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