



原著

# マーカレスモーションキャプチャを用いた 膝関節位置覚評価動作の信頼性と妥当性の検討 — 荷重位法と非荷重位法の比較 —

山内 綸<sup>1,2\*</sup>, 幸田 仁志<sup>3</sup>, 来田 宣幸<sup>3</sup>, 瀬川 寛<sup>4</sup>, 角谷 泰斗<sup>4</sup>, 入江 紗凜<sup>4</sup>, 伊勢戸 瑞生<sup>4</sup>, 村上 咲弥<sup>5</sup>, 甲斐 義浩<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup> 医療法人徳洲会 宇治徳洲会病院リハビリテーション科

<sup>2</sup> 京都橘大学大学院 健康科学研究科

<sup>3</sup> 京都工芸繊維大学 基盤科学系

<sup>4</sup> 京都橘大学 健康科学部 理学療法学科

<sup>5</sup> 医療法人社団順和会 京都下鴨病院リハビリテーション科

## 要旨

【緒言】本研究では、マーカレスモーションキャプチャ（以下、マーカレス）を用いて、膝関節位置覚評価を荷重位法と非荷重位法に分けて測定し、その測定値の絶対および相対信頼性の比較を行った。【方法】健常成人女性 16 名を対象に、教示した膝関節角度を自動運動にて 3 回再現させた。関節位置覚評価について、荷重位法は立位、非荷重位法は端座位にて実施した。膝関節角度の測定は、マーカレスと光学式モーションキャプチャ（以下、光学式）を用いて行い、得られた膝関節角度から絶対および相対角度誤差を算出した。解析は、相対信頼性として級内相関係数を求め、絶対信頼性として Bland-Altman 分析を行った。【結果】測定肢位や測定方法に関わらず、高い相対信頼性が確認された。膝関節角度は、両測定肢位ともにマーカレスと光学式との間で固定誤差が確認された。また、絶対および相対角度誤差を算出することで、荷重位法では固定誤差が消失したが、非荷重位法では相対角度誤差において固定誤差が残存した。【結論】マーカレスを用いた膝関節位置覚評価は、非荷重位法においても有用である可能性が示された。

受付日 2025 年 5 月 13 日

採択日 2025 年 12 月 13 日

## \*責任著者

山内 綸

京都橘大学大学院 健康科学研究科

E-mail:

h901123012@st.tachibana-u.ac.jp

## キーワード

膝関節位置覚評価

マーカレスモーションキャプチャ

光学式モーションキャプチャ

## 序論

関節位置覚は、空間における関節の位置を知る働きがある<sup>1)</sup>。先行研究では、特に膝関節において多くの検討がされており、スポーツ障害の原因<sup>2)</sup>や結果<sup>3)</sup>として生じることが報告されている。また、その評価方法は、非荷重位法と荷重位法に分けられる。非荷重位法は、従来より臨床的に使用されている手法であり、感覚入力 of 介入を最小限に減らし、関節位置覚を純粹に評価する目的で使用される。先行研究<sup>4,5)</sup>では、ACL 損傷後における膝関節位置覚の経時的変化や、トレーニングによる介入の効果を前後で比較した報告がされている。しかしなが

ら、スポーツ障害の多くは動的環境かつ荷重下にて発症することから、膝関節位置覚評価も同様の肢位で評価することが望ましいとされ、荷重位による評価の必要性も述べられている。荷重位法について、Romero ら<sup>6)</sup>は、立位の荷重下にて、自動運動で教示した角度までしゃがみ込み、角度を記憶し、その後同肢位を再現する手法を報告している。先行研究<sup>7,8)</sup>では、膝関節位置覚低下と膝関節スポーツ障害との関連や、ウォーミングアップにより、膝関節位置覚の精度が向上することも報告されており、障害予防の観点から重要視されている。したがって、両者は評価目的に応じて、適切に使い分ける必要が

ある。

膝関節位置覚評価における関節角度の測定には、これまでにゴニオメーターを用いた簡易的な方法から、ゴールドスタンダードとされる光学式モーションキャプチャ（以下、光学式）やアイソキネティックダイナモメーターによる方法まで用いられてきた。しかし、ゴニオメーターを用いた方法は、信頼性が低いことが報告されている<sup>9)</sup>。一方、光学式やアイソキネティックダイナモメーターは、機器の高額さや測定環境の制限、操作に専門知識を要するなどの課題が挙げられる。そこで近年、AIによる姿勢推定アルゴリズムを用いたマーカレスモーションキャプチャ（以下、マーカレス）が注目されている。これはAIが画像から関節位置を自動推定する技術であり、汎用性ビデオカメラ1台で簡便に測定可能である。また、光学式やアイソキネティックダイナモメーターのように測定環境の制約を受けにくく、臨床現場でも使いやすい。

山内ら<sup>10)</sup>は、荷重位法における光学式とマーカレス間の信頼性を検討しており、良好な信頼性であったことを報告している。一方で、非荷重位法におけるマーカレスの信頼性を検証し、荷重位法との比較に焦点を当てた先行研究は、筆者の調査した限りでは確認されていない。マーカレスに関する既存の研究<sup>11, 12)</sup>は、主に歩行やスクワットといった立位における動作を対象としており、端坐位のような非荷重位姿勢における測定精度の検討は少ない。このように、測定肢位と測定精度の関係を明らかにすることは、マーカレスの適用可能性を評価する上で重要である。

したがって、本研究の目的は、光学式およびマーカレスを用いて、荷重位法および非荷重位法における膝関節位置覚評価動作を測定し、両者の信頼性を比較検証することである。また、マーカレスを用いて荷重位法と非荷重位法の両測定肢位を評価し、それぞれの測定環境における誤差の傾向や特性を明らかにすることは、評価法の選択や解釈に有用である。本研究では、マーカレスが非荷重位法においても精度の高い評価ツールであるという仮説を立てた。

## 対象と方法

対象者は、健常成人女性16名であった。対象者の平均年齢は $20.44 \pm 0.51$ 歳、平均身長は $159.44 \pm 3.81$ cm、平均体重は $52.01 \pm 6.01$ kgであった。除外基準は、膝関節位置覚に影響を与える可能性のある下肢痛や腰背部痛、および下肢の関節疾患の既往を有する者とした。なお、対象者には、本研究の主旨と内容を十分に説明し、同意を得た上で研究を開始した。また、本研究は所属機

関のヒトを対象とする倫理審査委員会の承認を得て実施した（承認番号：23-57）。

荷重位法および非荷重位法の測定は、光学式による測定とマーカレスによる動画撮影を検査脚側の矢状面から同時に行い、測定肢位の順番をランダム化して実施した。また、掛川ら<sup>13)</sup>の先行研究に準じ、ボールを蹴る脚を利き脚と定義し、利き脚にて測定を実施した。さらに、マーカレスの測定は、汎用性カメラで撮影した映像をもとに、AIが関節の特徴点を検出する。その際、人物のシルエットに影響を与えるような服や、黒色のように非常に暗い色の服では、関節の特徴点をAIが誤認識する可能性がある。そこで、被検者には適切なサイズかつ暗すぎない色の衣服を着用させ、白色の背景布を用いて測定した。

荷重位法は、山内らの先行研究<sup>10)</sup>を参考にした。開始肢位は、対象者の前方に設置した支持台にて体幹を支持し、検査脚は下腿三頭筋の受動的緊張を抑制する目的で5°の傾斜台に載せ、非検査脚は股関節および膝関節を軽度屈曲位でリラックスさせるため、20cmの台上に静止させた立位姿勢とした（図1A）。また、開眼した状態では試技の練習を行わず、視覚情報をアイマスクで遮断し、測定を開始した。測定は、口頭指示で検査者が示した教示角度（膝関節屈曲60°）まで膝関節を自動運動にて屈曲させ、その肢位を5秒間保持させた（図1B）。次に、開始肢位に戻るよう指示したのち、検査者の指示に合わせて3回連続して教示角度を再現するよう求めた。再現運動の速度は3秒間として、対象者が教示角度に達したと判断した再現角度で3秒間保持するよう指示した。なお、教示角度はゴニオメーターを用いて測定した。

非荷重位法は、Romeroら<sup>14)</sup>の方法を参考にした。開始肢位は、検査台上で両上肢を胸の前で組み、検査脚は

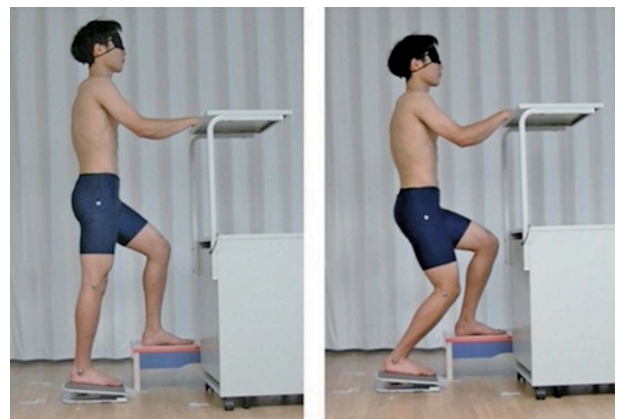


図1. 荷重位法の膝関節位置覚評価場面

左図 (図A)：開始肢位

右図 (図B)：教示角度の再現場面

下腿を下垂位、非検査脚はマーカレスに認識されやすいように、大腿とベッドが平行になるように調整した端坐位姿勢とした(図2A)。また、開眼した状態では試技の練習を行わず、視覚情報をアイマスクで遮断し、測定を開始した。測定は、口頭指示で検査者が示した教示角度(膝関節屈曲60°)まで膝関節を自動運動にて屈曲させ、その肢位を5秒間保持させた(図2B)。次に、開始姿勢(下腿を下垂位)に戻るよう指示したのち、検査者の指示に合わせて3回連続して教示角度を再現するよう求めた。再現運動の速度は3秒間として、対象者が教示角度に達したと判断した再現角度で3秒間保持するよう指示した。なお、教示角度はゴニオメーターを用いて測定した。

光学式およびマーカレスにおける膝関節位置覚評価の解析場面を図3に示す。白印で示した光学式のマーカ貼付位置に加え、マーカレスにより推定された関節中心も示している。光学式の測定には、OptiTrack V120 Duo (Acuity inc. Japan) および Motive2.0 を用いた。Opti-

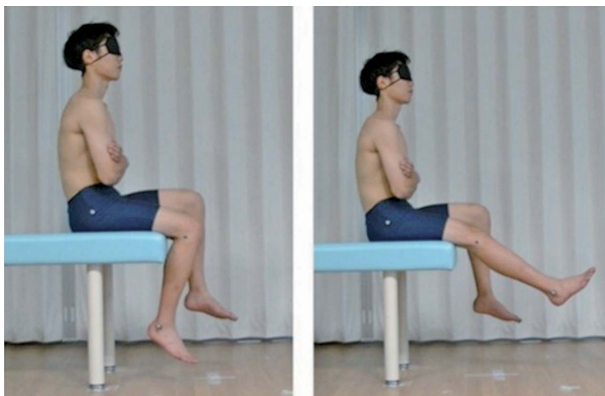


図2. 非荷重位法の膝関節位置覚評価場面

左図(図A): 開始肢位  
右図(図B): 教示角度の再現場面

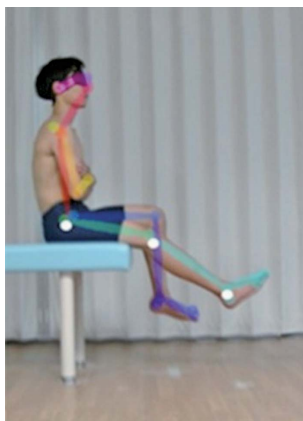


図3. 光学式およびマーカレスモーションキャプチャの膝関節位置覚評価解析場面  
白印: マーカー貼付位置

Track V120 Duo は、2台の赤外線カメラ(計測周波数120Hz)がユニット化されており、1台の装置で3次元座標の取得が可能である。使用した反射マーカの直径は15mmであり、大転子、膝関節中央(外側裂隙)、および足関節外果に貼付し、各反射マーカの三次元座標を取得した。測定は、1回の教示課題と3回の再現課題によって取得された座標情報から、解析ソフトSKY-COM3.2 (Acuity inc. Japan)を用いて、x-y平面(対象者の矢状面)上における3点のなす角を算出した。教示角度および各再現角度は、姿勢保持中に安定した角度を0.1°単位で求めた。

マーカレスの測定には、OpenPose ver. 1.7.0 (Carnegie Mellon University)と、汎用性ビデオカメラ(GC-YJ40, JVC ケンウッド社)を用いた。OpenPoseは、AIがビデオ映像から関節位置を推定する技術である。加えて、オープンソースで提供されており、商用利用でなければ無料で使用可能である。汎用性ビデオカメラの計測周波数は60Hzであり、対象者からの距離340cm、高さ65cmの位置に配置した。撮影された動画は、測定後にOpenPoseに読み込んで、AIによって推定された3点の関節中心、すなわち股関節、膝関節、および足関節の座標を求めた。3点の関節座標は、Python スクリプト ver. 3.12.2 (Python Software Foundation)を用いてベクトルの大きさと内積を求め、膝関節屈曲角度を0.1°単位で算出した(図3)。

それぞれのモーションキャプチャによって同時に測定された教示角度および再現角度から、絶対角度誤差と相対角度誤差を以下の計算式で求めた。絶対角度誤差 =  $\{|(\text{教示角度} - 1 \text{ 回目再現角度})| + |(\text{教示角度} - 2 \text{ 回目再現角度})| + |(\text{教示角度} - 3 \text{ 回目再現角度})|\} / 3$ とした。相対角度誤差 =  $\{(\text{教示角度} - 1 \text{ 回目再現角度}) + (\text{教示角度} - 2 \text{ 回目再現角度}) + (\text{教示角度} - 3 \text{ 回目再現角度})\} / 3$ とした。

統計処理には、IBM SPSS Statistics ver. 24を用いた。Shapiro-Wilk 検定によりデータの正規性を確認後、荷重位法と非荷重位法における測定肢位間の比較を行うため、それぞれの肢位で得られた絶対および相対角度誤差の値に対して対応のあるt検定を実施した。また、相対信頼性の評価には級内相関係数 (Intraclass Correlation Coefficients: ICC) を、測定機器間の絶対信頼性の検証には Bland-Altman 分析を用いた。ICC では3試行分の再現角度を用いて、検者内信頼性として ICC (1, 3) を算出した。さらに、検者間信頼性(測定方法間信頼性)として、各測定間(教示, 再現1回目~3回目)、絶対角度誤差および相対角度誤差間の ICC (3, 2) を算出した。Bland-Altman 分析における系統誤差の判定には、

固定誤差については、光学式およびマーカレスによる測定値の差の平均の95%信頼区間を求め、この区間に0が含まれない場合を固定誤差と判定した。比例誤差については、光学式およびマーカレスの差をy軸、平均値をx軸としたBland-Altman plotに単回帰分析を行い、有意差が認められた場合を比例誤差と判定した。加えて、誤差の許容範囲としてLimits of Agreement (LOA)と最小可検変化量 (Minimal Detectable Change: MDC)の95%信頼区間 (MDC<sub>95</sub>)を算出した。なお、有意水準は5%とした。

## 結果

光学式およびマーカレスを用いて測定された膝関節角度を表1に示す。光学式による測定では、教示角度、再現角度1回目~3回目において、荷重位法ではそれぞれ44.5±6.7°, 47.4±6.9°, 47.8±7.5°, 47.3±8.2°, 非荷重位法は46.3±4.8°, 38.6±6.7°, 37.4±6.1°, 37.4±7.4°だった。一方、マーカレスによる測定では、荷重位法では47.6±6.5°, 51.0±7.0°, 51.5±7.3°, 50.4±7.8°, 非荷重位法では50.3±5.6°, 42.9±6.5°, 42.8±7.0°, 42.7±7.7°であり、荷重位法および非荷重位法ともに、光学式と比べてマーカレスが有意に高値を示した (p<0.05) (表1)。

測定肢位別の検者内信頼性について、荷重位法では、光学式とマーカレスにおいて、それぞれICC (1, 3) = 0.98 (0.96~0.99), 0.96 (0.90~0.98), 非荷重位法では、0.95 (0.88~0.98), 0.95 (0.88~0.98)であった (表2)。

次に、測定方法間信頼性について、荷重位法は、教示角度、再現角度1回目~3回目において、それぞれICC (3, 2) = 0.94 (0.82~0.98), 0.93 (0.79~0.98), 0.96

(0.89~0.99), 0.94 (0.83~0.98)だった。非荷重位法は、0.84 (0.56~0.95), 0.90 (0.71~0.96), 0.88 (0.67~0.96), 0.89 (0.69~0.96)だった。絶対角度誤差間において、荷重位法は0.94 (0.84~0.98), 非荷重位法は0.98 (0.94~0.99), 相対角度誤差間では荷重位法は0.97 (0.91~0.99), 非荷重位法は0.99 (0.96~0.99)であった (表3, 4)。

系統誤差について、肢位および測定方法に関わらず、各測定間で固定誤差を認めたが、比例誤差は認められなかった。また、各測定間の固定誤差は、肢位に関わらず、光学式と比べてマーカレスで測定される膝関節角度が有意に高値を示した (p<0.05)。一方、絶対および相対角度誤差間では、非荷重位法の相対角度誤差のみ固定誤差が認められた (表3, 4) (図4)。

LOAは、各測定間で、荷重位法は-8.37~1.83°であり、非荷重位法は-11.37~1.02°であった。さらに、MDC<sub>95</sub>は、荷重位法は5.62~7.36°, 非荷重位法は7.47~9.22°であった。加えて、絶対および相対角度誤差間

表2. 測定肢位別の検者内信頼性

	光学式	マーカレス
	ICC(1, 3) (95%CI)	
非荷重位	0.95 (0.88~0.98)	0.95 (0.88~0.98)
荷重位	0.98 (0.96~0.99)	0.96 (0.90~0.98)

光学式：光学式モーションキャプチャ  
 マーカレス：マーカレスモーションキャプチャ  
 ICC: Intraclass Correlation Coefficients  
 CI: Confidence Interval

表1. 荷重位法および非荷重位法における膝関節位置覚評価の各測定方法による測定値

	光学式		マーカレス		2値の差 (光学式-マーカレス)	
	荷重位	非荷重位	荷重位	非荷重位	荷重位	非荷重位
教示角度	44.5±6.7	46.3±4.8	47.6±6.5	50.3±5.6	-3.0±3.3	-4.0±3.8
再現角度1回目	47.4±6.9	38.6±6.7	51.0±7.0	42.9±6.5	-3.7±3.6	-4.3±4.0
再現角度2回目	47.8±7.5	37.4±6.1	51.5±7.3	42.8±7.0	-3.7±2.9	-5.4±4.2
再現角度3回目	47.3±8.2	37.4±7.4	50.4±7.8	42.7±7.7	-3.1±3.8	-5.2±4.7
絶対角度誤差	4.3±3.2	8.9±6.0	5.0±3.5	8.3±5.6	-0.8±1.6	0.7±1.6
相対角度誤差	3.0±4.5	8.5±6.6	3.4±5.1	7.5±6.4	-0.4±1.7	1.0±1.5

光学式：光学式モーションキャプチャ  
 マーカレス：マーカレスモーションキャプチャ  
 平均値±標準偏差  
 単位 (°)

表 3. 荷重位法における測定方法間信頼性

	ICC (3, 2) (95%CI)	光学式-マーカレス				LOA (95%LOA) (°)	MDC95 (°)
		Bland-Altman analysis					
		固定誤差	有無	比例誤差	有無		
教示角度	0.94 (0.82 ~ 0.98)	-4.78 ~ -1.31	有	p=0.75	無	-3.04 (-7.30 ~ 1.21)	6.38
再現角度1回目	0.93 (0.79 ~ 0.98)	-5.58 ~ -1.73	有	p=0.90	無	-3.66 (-8.37 ~ 1.06)	7.07
再現角度2回目	0.96 (0.89 ~ 0.99)	-5.20 ~ -2.14	有	p=0.79	無	-3.67 (-7.42 ~ 0.08)	5.62
再現角度3回目	0.94 (0.83 ~ 0.98)	-5.08 ~ -1.08	有	p=0.64	無	-3.08 (-7.99 ~ 1.83)	7.36
絶対角度誤差	0.94 (0.84 ~ 0.98)	-1.60 ~ 0.07	無	p=0.49	無	-0.76 (-2.81 ~ 1.28)	3.06
相対角度誤差	0.97 (0.91 ~ 0.99)	-1.31 ~ 0.46	無	p=0.18	無	0.42 (-1.74 ~ 2.59)	3.24

ICC: Intraclass Correlation Coefficients  
 CI: Confidence Interval  
 LOA: Limits of Agreement  
 MDC: Minimal Detectable Change  
 光学式：光学式モーションキャプチャ  
 マーカレス：マーカレスモーションキャプチャ

表 4. 非荷重位法における測定方法間信頼性

	ICC (3, 2) (95%CI)	光学式-マーカレス				LOA (95%LOA) (°)	MDC95 (°)
		Bland-Altman analysis					
		固定誤差	有無	比例誤差	有無		
教示角度	0.84 (0.56 ~ 0.95)	-5.99 ~ -1.93	有	p=0.43	無	-3.96 (-7.93 ~ 1.02)	7.47
再現角度1回目	0.90 (0.71 ~ 0.96)	-6.39 ~ -2.13	有	p=0.87	無	-4.26 (-9.49 ~ 0.97)	7.84
再現角度2回目	0.88 (0.67 ~ 0.96)	-7.61 ~ -3.12	有	p=0.37	無	-5.37 (-10.88 ~ 0.14)	8.26
再現角度3回目	0.89 (0.69 ~ 0.96)	-7.72 ~ -2.71	有	p=0.78	無	-5.22 (-11.37 ~ 0.93)	9.22
絶対角度誤差	0.98 (0.94 ~ 0.99)	-0.18 ~ 1.53	無	p=0.25	無	0.68 (-1.43 ~ 2.78)	3.15
相対角度誤差	0.99 (0.96 ~ 0.99)	0.17 ~ 1.80	有	p=0.68	無	0.99 (-1.01 ~ 2.98)	2.99

ICC: Intraclass Correlation Coefficients  
 CI: Confidence Interval  
 LOA: Limits of Agreement  
 MDC: Minimal Detectable Change  
 光学式：光学式モーションキャプチャ  
 マーカレス：マーカレスモーションキャプチャ

における LOA と MDC は、それぞれ荷重位法では -2.81~2.59°, 3.06~3.24°, 非荷重位法では -1.43~2.98, 2.99~3.15° であった (表 3, 4)。

### 考察

本研究では、健常成人女性を対象に、マーカレスモーションキャプチャを用いた膝関節位置覚評価を実施し、測定肢位別に信頼性および妥当性を検証・比較した。その結果、非荷重位法による相対角度誤差において、光学

式では 8.5±6.6° に対して、マーカレスは 7.5±6.4 と、相対角度誤差にて固定誤差が認められた。なお、測定方法間の誤差は 1.0±1.5° であり、臨床で実践するには容認可能な誤差である可能性が示された。以上の結果は、本研究の仮説を支持するものであった。

荷重位法および非荷重位法における測定肢位間の比較について、光学式およびマーカレスともに、荷重位法と比較して非荷重位法の絶対および相対角度誤差が有意に高値を示した。先行研究<sup>15)</sup>においても、荷重位法と比較

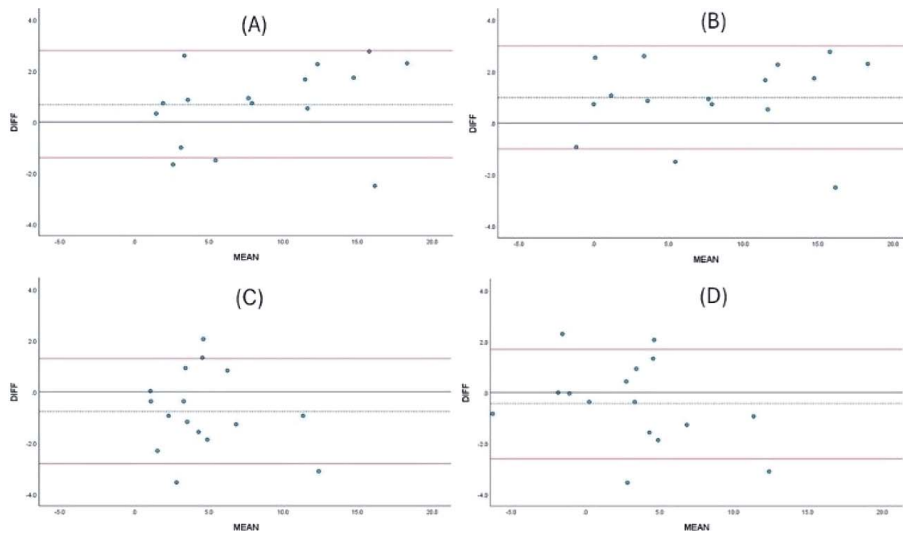


図 4. 測定肢位別の絶対および相対角度誤差における Bland-Altman plot

DIFF：光学式とマーカレスの差

MEAN：光学式とマーカレスの平均

単位 (°)

A：非荷重位法の絶対角度誤差

B：非荷重位法の相対角度誤差

C：荷重位法の絶対角度誤差

D：荷重位法の相対角度誤差

して、非荷重位法における角度誤差の値が大きくなることが示されている。したがって、マーカレスにおいても、光学式と同様に、測定肢位間に存在する角度誤差の差異を検出可能であることが示された。

相対信頼性について、本研究における光学式およびマーカレスの ICC (1, 3) は、荷重位法および非荷重位法ともに 0.96 以上であった。また、光学式とマーカレス間の ICC (3, 2) では、荷重位法および非荷重位法において、それぞれ 0.93~0.97, 0.85~0.99 であった。Landis ら<sup>16)</sup>の分類によると、いずれも「almost perfect」に該当する。したがって、関節位置覚評価における膝関節角度は、測定方法や測定肢位に関わらず高い検者内および検者間信頼性を有することが示された。

絶対信頼性について、各測定間において測定方法および測定肢位に関わらず固定誤差が認められたものの、角度誤差の算出により、非荷重位法の相対角度誤差を除き、すべての固定誤差が解消された。さらに、両測定肢位において、誤差の許容範囲を示す LOA および測定誤差を示す MDC95 は、各測定間よりも、角度誤差間において低値を示した。杉原ら<sup>17)</sup>は、高齢者の関節位置覚評価において、偶然誤差の影響を排除するために 3 回測定値の平均値を用いることが必要であることを述べている。また、山内ら<sup>10)</sup>は、荷重位法の関節位置覚評価を光学式とマーカレス間で比較し、求められた関節角度の差分平均を求めることで、測定方法間に生じる固定誤差が

オフセットされることを報告している。これらのことから、マーカレスを臨床応用していく上で、光学式との間に生じる偶然誤差や固定誤差を考慮するため、3 回測定値の差分平均を求める関節位置覚評価は有用である可能性がある。

一方、荷重位法の絶対および相対角度誤差において解消された固定誤差は、非荷重位法の相対角度誤差においては解消されなかった。固定誤差は、真の値にかかわらず正か負の特定方向に生じる誤差であり、その誤差の程度は LOA の算出により評価される。本研究において、非荷重位法における各測定間の LOA は、荷重位法と比較して高値であった。また、OpenPose は立位などの直立姿勢を前提として学習されている。先行研究<sup>18, 19)</sup>では、人物が倒立するような動作や、四肢が重なり合うような姿勢に対しては、認識精度が低下する可能性が述べられている。非荷重位法による膝関節位置覚評価では、足が地面から離れており、下肢が重複して見えることや、荷重位法と非荷重位法における運動試技の違いから、相対角度誤差において固定誤差が生じた可能性がある。しかしながら、本研究の結果から、非荷重位法の相対角度誤差において、光学式とマーカレス間の固定誤差は  $1.0 \pm 1.5^\circ$  だった。加えて、MDC95 は、 $2.99^\circ$  だった。これらのことから、本研究で認められた固定誤差は、統計学的に有意な最小の変化量とされる範囲よりも小さく、臨床でよく用いられる ROM 計測の許容範囲



(5°未満)よりも小さいため、実用的には問題なく、簡便に臨床応用可能な測定手段である可能性が示された。

本研究にはいくつかの限界がある。1つ目に、本研究で用いた非荷重位法は端座位のみであり、その他の臨床的な肢位(側臥位や仰臥位など)における信頼性は検証されていない。2つ目に、本研究では健常成人女性を対象としている。OpenPoseは、RGBカメラで撮影されたピクセル変化から関節の特徴点を検出しており、衣服や体格の影響を受ける可能性がある。そのため、今後臨床応用する上で、これらの影響を考慮し測定精度を検討していく必要がある。

### 利益相反

開示すべき利益相反はない。

### 謝辞

本研究の遂行にあたり、マーカレスを用いた膝関節位置覚評価に関し、測定スクリプトの作成を含む技術的支援を通じて多大な助言と協力をいただいた山内詩音氏に感謝申し上げます。また、測定にご協力いただいた学生の皆様に厚く御礼申し上げます。

### 文献

- 1) 松澤正, 江口勝彦: 理学療法評価学(改訂第4版), pp106, 金原出版株式会社, 2011.
- 2) 岡村義久, 星忠行, 平賀庸晴. 前十字靭帯損傷と関節固有感覚. 臨床スポーツ医学 19: 1011-1015, 2002.
- 3) Barrack RL, Skinner HB, Buckley SL, et al. Proprioception in the anterior cruciate deficient knee. Am J Sports Med 17: 1-6, 1989.
- 4) 高石翔. 前十字靭帯再建術後症例に対する認知運動課題が膝関節位置覚に与える効果. 理学療法科学 35: 565-570, 2020.
- 5) Pànics G, Tállay A, Pavlik A, et al. Effect of proprioception training on knee joint position sense in female team handball players. Br J Sports Med 42: 472-476, 2008.
- 6) Romero-Franco N, Montaña-Munuera JA, Jiménez-Reyes P. Validity and Reliability of a Digital Inclinator to Assess Knee Joint-Position Sense in a Closed Kinetic Chain. J Sport Rehabil 26, 2017.
- 7) Magalhães T, Ribeiro F, Pinheiro A, et al. Warming-up before sporting activity improves knee position sense. Phys Ther Sport 11: 83-90, 2010.
- 8) 山内綸, 幸田仁志, 来田宣幸・他: ジュニアアスリートにおける成長期の膝関節スポーツ障害と膝関節位置覚および身体機能との関係. 日本臨床スポーツ医学会誌 (in press)
- 9) Bonne DC, Azen SPO, Lin CM, et al. Reliability of goniometric measurements. Phys Ther 58: 1355-1360, 1978.
- 10) 山内綸, 幸田仁志, 来田宣幸・他: マーカレスモーションキャプチャを用いた膝関節位置覚の評価動作測定における相対および絶対信頼性の検討. 運動器リハビリテーション 35: 264-270, 2024.
- 11) Pfister A, West AM, Bronner S, et al. Comparative abilities of Microsoft Kinect and Vicon 3D motion capture for gait analysis. J Med Eng Technol 38: 274-280, 2014.
- 12) Ota M, Tateuchi H, Hashiguchi T, et al. Verification of reliability and validity of motion analysis systems during bilateral squat using human pose tracking algorithm. Gait Posture 80: 62-67, 2020.
- 13) 掛川晃, 鈴木康之, 林英俊. 踏切脚と利き脚が下肢運動機能テストに及ぼす影響. 日本臨床スポーツ医学会誌 27: 466-472, 2019.
- 14) Romero-Franco N, Montaña-Munuera JA, Fernández-Domínguez JC, et al. Validity and reliability of a digital inclinometer to assess knee joint position sense in an open kinetic chain. J Sport Rehabil 28: 332-338, 2019.
- 15) Herrington L. Knee-joint position sense: the relationship between open and closed kinetic chain tests. J Sport Rehabil 14: 356-362, 2005.
- 16) Landis JR, Koch GG. The measurement of observer agreement for categorical data. Biometrics 33: 159-174, 1977.
- 17) 杉原敏道, 郷貴大, 三島誠一. 高齢者の関節位置覚測定で信頼性を得るための測定回数に関する検討. 理学療法学 20: 49-52, 2005.
- 18) 川島早紀子, 石川孝明, 渡辺裕. 縦方向の回転運動に対する OpenPose. ITE Technical Report 42: 25-27, 2018.
- 19) 鈴木康雄, 金井章. 撮影画像による姿勢推定手法の動作解析への応用. 日本福祉大学健康科学論集 26: 1-6, 2023.



Original article

# Reliability and Validity of Knee Joint Position Sense Assessment Using Markerless Motion Capture: A Comparison Between Weight-Bearing and Non-Weight-Bearing Methods

Rin Yamauchi<sup>1, 2\*</sup>, Hitoshi Koda<sup>3</sup>, Noriyuki Kida<sup>3</sup>, Kan Segawa<sup>4</sup>, Hiroto Kadoya<sup>4</sup>, Sara Irie<sup>4</sup>, Mizuki Iseto<sup>4</sup>, Saya Murakami<sup>5</sup>, Yoshihiro Kai<sup>2, 4</sup>

<sup>1</sup> Department of Rehabilitation, Uji Tokushukai Hospital, Tokushukai Medical Corporation

<sup>2</sup> Graduate School of Health Sciences, Kyoto Tachibana University

<sup>3</sup> Department of Fundamental Sciences, Kyoto Institute of Technology

<sup>4</sup> Department of Physical Therapy, Faculty of Health Sciences, Kyoto Tachibana University

<sup>5</sup> Department of Rehabilitation, Kyoto Shimogamo Hospital, Junwakai Medical Corporation

## ABSTRACT

**【Introduction】** This study compared the absolute and relative reliabilities of knee joint position sense (JPS) assessments conducted using markerless motion capture under weight-bearing (WB) and non-weight-bearing (NWB) conditions. **【Methods】** Sixteen healthy adult females participated in the study. Knee JPS was evaluated by asking participants to actively reproduce the target knee joint angle after receiving an initial demonstration. The WB condition was assessed in a standing posture, whereas the NWB condition was assessed in a seated posture. The knee joint angles were simultaneously measured using markerless and optical motion capture systems. Both the absolute and relative angle errors were calculated from the measured angles. To assess the relative reliability, intraclass correlation coefficients (ICC) were calculated, including ICC(1, 3) for test—retest reliability within each method and ICC(3, 2) for agreement between the markerless and optical motion capture systems. Bland—Altman analysis was employed to evaluate the absolute reliability and detect systematic bias between the two systems. **【Results】** The results demonstrated high intra-rater and inter-rater reliability regardless of the testing posture or motion capture method. A fixed bias was observed between the markerless and optical motion capture systems for knee joint angles in both the WB and NWB conditions. However, when analyzing the absolute and relative angle errors, the fixed bias disappeared in the WB condition but persisted in the relative angle error of the NWB condition. **【Conclusion】** These findings suggest that knee joint position sense assessment using markerless motion capture may also be useful even in NWB conditions.

**Key words:** Knee joint position sense assessment, markerless motion capture, and optical motion capture