

[原著論文]

Kinect による動作時膝関節屈曲角度測定の 相対信頼性と絶対信頼性の検討

二宮 省悟¹・田島 慎也²・原野 達也³
西原 翔太⁴・吉里 雄伸¹・森本 将司⁵

【要 旨】

〔目的〕簡易型多視点モーションキャプチャー装置 Kinect を用いた動作時膝関節屈曲角度測定における相対信頼性と絶対信頼性を検討すること。

〔方法〕対象は成人男性16名。スクワット、フォワードランジ（ランジ）、Drop Vertical Jump（DVJ）を Kinect と三次元動作解析装置 Vicon で同時に2回ずつ測定し、それぞれで算出した膝関節角度の相対信頼性と絶対信頼性を求めた。

〔結果〕スクワットとランジ、DVJ の級内相関係数 ICC（1, 1）は Kinect 0.79、0.85、0.62、Vicon 0.88、0.94、0.73であった。系統誤差はみられなかった。ICC（2, 1）はスクワット1回目0.65、2回目0.61、ランジ0.75、0.79、DVJ0.77、0.79であった。全ての動作に固定誤差を認めた。

〔結語〕Kinect で算出した膝関節角度の再現性は高く、同一対象者の比較には有効利用できる可能性がある。しかし誤差の範囲の軽減に向け測定回数を増やすなどの対策を検討する必要がある。

キーワード：Kinect、モーションキャプチャー、動作分析、相対信頼性、絶対信頼性

【緒言】

理学療法士は、機能的状態の把握や障害因子の抽出を目的とし理学療法評価を行う。その評価の1つとして動作分析がある。それは対象者を視覚的に捉えることに特化したものであり理学療法士にとって必須の評価法である。動作分析は三次元動作解析装置を使用することで客観的な評価が可能となるが、費用が高額であり、利用できるのは限られた病院や施設のみである。そのため評価者の肉眼による動作分析が臨床現場では一般的に行われるが、評価者の知識や経験、観察能力、結果に対する考察力などの因子に影響を受けやすく、主観的評価となりやすい。

近年、新たな動作分析のツールとして簡易型多視点モーションキャプチャー装置である Kinect for Windows v2（以下、Kinect）が注目されている（図1）。Kinect を使用した動作分析を行うには、

Body（人の関節）の取得を利用する。Body の取得では一度に6人の骨格を検出し、1人につき25の関節点および三次元座標を取得することができる（図2）。Kinect は Time of Flight（以下、ToF）方式デプスカメラを利用し Body の取得を行っている。ToF 方式とは赤外線光のパルスがカメラ側から照射し、その光パルスが対象物に反射して戻ってくるまでの飛行時間を計測する方法である。さらに Kinect は自動で人体の骨格モデルを形成し25の関節点を定めるため、従来の三次元動作解析装置のように赤外線マーカーを貼付することなく三次元座標を抽出し、その座標を用いて動作分析を行うことが可能である。Kinect が抽出する三次元座標は、Kinect の赤外線カメラを原点とし左右方向を x 軸、上下方向を y 軸、奥行きを z 軸で表す（図3）。

Kinect を動作分析装置として利用するメリットとして、従来の三次元動作解析装置と比較し安価で

¹九州看護福祉大学、²熊本赤十字病院、³聖マリア病院、⁴琉球リハビリテーション学院、⁵貞松病院



図1 Kinect (縦65mm、横245mm、厚さ68mm)



図3 Kinect による三次元座標

小型、利便性が高いことがあげられる。Kinect はパーソナルコンピュータがあれば動作分析が可能となるため運搬性に優れており、研究機関や病院に限らず体育館や屋外といったスポーツ現場など様々な場所での測定が可能となる。Kinect を動作分析装置として利用するにあたりその信頼性に関して多く検討されている。Kinect の前のバージョンである Kinect v1 を用いた研究が多く、Huber らは肩関節の関節可動域を対象者の正面に設置した Kinect v1 と三次元動作解析装置、ゴニオメーターで測定し比較したところ、肩関節屈曲、外転角度において高い信頼性と妥当性を認めたと報告している²⁾。類似した研究として Hawi らは、肩関節と肘関節を Kinect v1 とゴニオメーターで測定し、優れた再現性を報告している³⁾。このように高い信頼性の報告がある一方で、坂井らは Kinect v1 を使用した関節可動域計測システムは誤差が生じるため関節点のズレを考慮し座標値にオフセット値を加えるなどの工夫が必要と述べている⁴⁾。また臨床での利用頻度が高い動作に関して Moataz らは、両脚スクワット、片脚スクワット、DVJ の股関節と膝関節の屈曲・外転角度を Kinect v1 と三次元動作解析装置で比較したところ高い一致度と一貫性を認めたと報告している。しかし、これは測定値を修正したものを利用した結果であり、修正なしの場合の信頼性は乏しく従来の



図2 取得可能な25の関節点 Ana 5 (2018) を参考に作成¹⁾

動作分析装置の代用は難しいかもしれないと述べている⁵⁾。このように Kinect v1 を使用した動作分析の信頼性に関しては良好な結果を報告しているものもあれば、不良な結果を示す報告もあり、検討の余地があるといえる。

Kinect v1 は深部情報取得の仕方が Kinect と異なり Light Coding 方式である。これは本体から投影するドットパターンを赤外線カメラで撮影する方式であり、投影されたドットパターンが物体までの距離や物体の形状によって変わるため、その変化量から物体までの距離や形状を算出している。深部情報取得の違いにより、Kinect v1 と比較し Kinect の方が同程度の計測範囲で約 2～3 倍は精度が高いと言われている⁶⁾。また Kinect はカラー画像の解像度や、デプス認識範囲も向上しているため Kinect で行う測定は Kinect v1 よりも高い信頼性が期待できる。

国内の理学療法評価の信頼性に関しては相対信頼性を用いて検討したものが多く、評価の信頼性を低下させる誤差は、偶然誤差と系統誤差に大別されるが相対信頼性は誤差を偶然誤差に限定しており、誤差の種類と量に関する情報を得ることができない⁷⁾。

対して、測定値の中にどの種類のばらつきや誤差がどの程度混入しているか検討する方法が絶対信頼性であり、評価方法を臨床応用する際には測定の際の誤差を最小限にする対策を検討できる点で、絶対信頼性の方が実用的といわれている⁸⁾。その統計学的手法の1つに、Bland-Altman分析があり、系統誤差が混入しているかどうか検討することができる。下井らの先行研究ではBland-Altman分析は検者内・検者間それぞれについて2つの測定値を用い、横軸が2つの測定値の平均、縦軸が2つの測定値の差を表す散布図(Bland-Altman plot)を作成する。固定誤差については、2つの測定値の差の平均95%信頼区間を算出し、この区間内に0が含まれない場合、固定誤差の存在を判断する。また比例誤差については、Bland-Altman plotにおけるPearsonの相関係数を算出し、有意水準5%にて優位な相関がみられる場合、比例誤差の存在を判断する。系統誤差である固定誤差と比例誤差が存在しない場合は個体差と測定誤差からなる偶然誤差のみが存在すると考え、測定の標準誤差(standard error of measurement: 以下、SEM)や最小可検変化量(minimal detectable change: 以下、MDC)を算出する⁷⁾。MDCとは再テストなどの繰り返し測定により得られた2つの測定値の変化量の中で測定誤差の大きさを示したもので、MDC以内の変化は測定誤差によるもの、それ以上の変化が測定誤差以上の変化と判断される⁹⁾。一般的にはMDCの95%信頼区間であるMDC₉₅が用いられる。そこで本研究では、

Kinectを臨床で動作分析装置として応用するため、関節角度に着目し測定の信頼性を相対信頼性および絶対信頼性を用いて検討した。

【方法】

1. 対象

対象は成人男性16名(年齢 22.9 ± 5.7 歳、身長 173.8 ± 5.7 cm、体重 72.6 ± 11.6 kg:平均 \pm 標準偏差)とした。また除外基準は整形外科疾患・障害の既往がある者、中枢及び末梢神経系の疾患・障害の既往がある者、内科的リスクを有する者、研究内容の理解に問題がある者とした。

2. 方法

測定動作はスクワット、フォワードランジ(以下、ランジ)、Drop Vertical Jump(以下、DVJ)の3つとした(図4)。これらは前十字靭帯(以下、ACL)損傷の術後トレーニングやACL損傷の予防に対してのトレーニング、また評価としてよく使用されている動作である。先行研究で明確な信頼性を得ている関節角度の測定部位はないため、本研究においてはこれら3つの動作時の膝関節角度に着目した。Kinectは対象者から距離2.5m、高さ0.75mの位置に設置し、先行研究で多くみられた対象者の前額面上から測定を行った¹⁰⁻¹²⁾。測定はKinectと三次元動作解析装置Viconを用いた。Viconはカメラ10台を用いて計測周波数100Hzで測定し、上下ボディー



図4 測定項目—運動開始姿勢(左:スクワット、中央:フォワードランジ、右:DVJ)

スーツを着用した上で赤外線反射マーカーを右側大転子、大腿骨外側上顆、足関節外果に貼付した。測定した三次元座標のデータは csv ファイル形式で出力した。さらに Kinect で自動抽出した右側股関節、膝関節、足関節の三次元座標と Vicon で得られる赤外線マーカーの三次元座標より右側膝関節角度を Excel ファイル上で算出した。最終的に2つのデータの時間を同期させ、比較した。スクワットとランジは1回の測定につき膝関節を3回屈曲させ、それぞれの最大膝関節屈曲角度を使用した。膝関節屈曲角度に関しては指示を出さず任意の角度とした。ランジに関しては右足を前方に出させた際の膝関節屈曲角度を測定しその際の最大膝関節屈曲角度を使用した。また DVJ は高さ30cm の台よりジャンプし着地後すぐにジャンプする試行を行い、一度目の着地時の最大膝関節屈曲角度を使用した。スクワットとランジ同様、ジャンプの高さや膝関節屈曲角度に関しては指示を行わなかった。各動作の測定は2回ずつ実施した。全てのデータに対して Shapiro-wilk 検定を行い、正規性を確認した。相対信頼性の検討として級内相関係数（以下、ICC）を用い、1回目と2回目の膝関節屈曲角度の再現性に関しては検者内信頼性である ICC (1, 1) を、Kinect と Vicon で算出した膝関節屈曲角度の一致度に関しては検者間信頼性である ICC (2, 1) および (3, 1) を求めた。また系統誤差の検討として絶対信頼性の1つである Bland-Altman 分析を用いた。系統誤差の有無・種類について検討後、誤差の範囲の推定を行った。系統誤差が認められなかった場合、先行研究を参考に MDC を算出した¹¹⁾。統計処理には SPSS Statistics 19 を使用し、有意水準は5%とした。

3. 倫理的配慮

本研究は九州看護福祉大学倫理審査委員会の承認を得て行った（承認番号：28-029）。ヘルシンキ宣言に基づき、対象者には研究の内容を十分に説明した。また、参加しないことで不利益を受けないことを伝え、文書にて同意を得て行った。得たデータに関しては、個人が特定されないように注意して厳重にデータ管理することを説明した。データはテキストデータとしてデジタル化し、そのファイルはパスワードを設定後、暗号化可能なハードディスク内に保存して、研究代表者が管理した。

【結果】

Kinect と Vicon で算出された最大膝関節屈曲角度の平均を表1に示した。全てのデータにおいて正規性を認めた。Kinect と Vicon それぞれの再現性を求めた結果、Kinect においてスクワットとランジ、DVJ の ICC (1, 1) はそれぞれ Kinect 0.79、0.85、0.62、Vicon 0.88、0.94、0.73であった。Bland-Altman 分析を行った結果、固定誤差や比例誤差は認めなかった（表2）。Kinect と Vicon で求めた膝関節角度の一致度を求めた ICC (2, 1) はそれぞれスクワット1回目0.65、2回目0.61、ランジ0.75、0.79、DVJ 0.77、0.79であった。ICC (3, 1) はスクワットとランジにおいて ICC (2, 1) を上回っていたが、DVJ は ICC (2, 1) とほぼ同程度の結果となった。Bland-Altman 分析を行った結果、全ての動作に固定誤差を認めた（表3）（図5、6、7）。

表1 最大膝関節屈曲角度の平均

	Kinect		Vicon	
	1回目	2回目	1回目	2回目
スクワット	86.16±10.05	84.79±10.88	78.85±10.78	77.68±10.09
ランジ	84.11±9.70	84.74±11.82	89.37±9.68	89.70±9.15
DVJ	88.81±13.38	87.88±14.96	85.59±12.37	86.18±10.61

表2 Kinect と Vicon の再現性

		Bland-Altman分析						
		ICC(1,1)	固定誤差		比例誤差		LOA (°)	MDC95 (°)
			95%信頼区間	結果	相関係数	結果		
スクワット	Kinect	0.79	-0.09~2.79	なし	-0.13	なし	-	14.29
	Vicon	0.88	-0.07~2.41	なし	0.13	なし	-	10.58
ランジ	Kinect	0.85	-1.95~0.68	なし	-0.37	なし	-	11.96
	Vicon	0.94	-1.32~0.65	なし	0.11	なし	-	6.64
DVJ	Kinect	0.62	-0.97~2.82	なし	-0.16	なし	-	24.81
	Vicon	0.73	-2.16~0.98	なし	0.16	なし	-	17.04

表3 Kinect と Vicon の一致度

		Bland-Altman分析							
		ICC(2,1)	ICC(3,1)	固定誤差		比例誤差		LOA (°)	MDC ₉₅ (°)
				95%信頼区間	結果	相関係数	結果		
スクワット	1回目	0.65	0.81	6.52~9.10	あり	-0.21	なし	-1.46~17.01	-
	2回目	0.61	0.74	6.24~9.03	あり	0.02	なし	0.48~18.48	-
ランジ	1回目	0.75	0.85	-6.45~-4.04	あり	-0.06	なし	-13.54~3.03	-
	2回目	0.79	0.87	-6.19~-3.72	あり	0.60	なし	-13.43~3.42	-
DVJ	1回目	0.77	0.79	1.68~4.77	あり	0.09	なし	-10.10~16.54	-
	2回目	0.79	0.78	0.15~3.27	あり	0.58	なし	-11.85~15.26	-

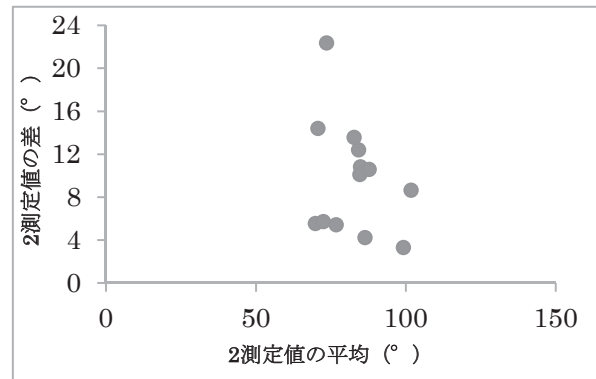
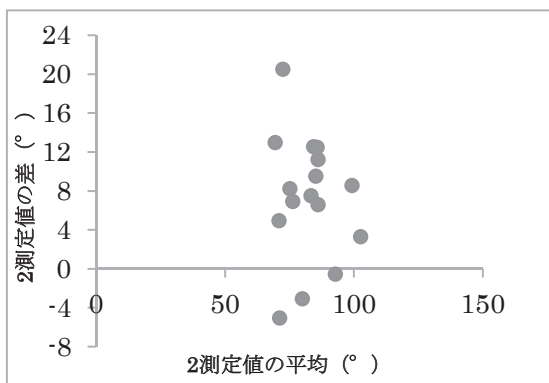


図5 スクワットの検者間信頼性に関する Bland-Altman plot (左: 1回目、右: 2回目)

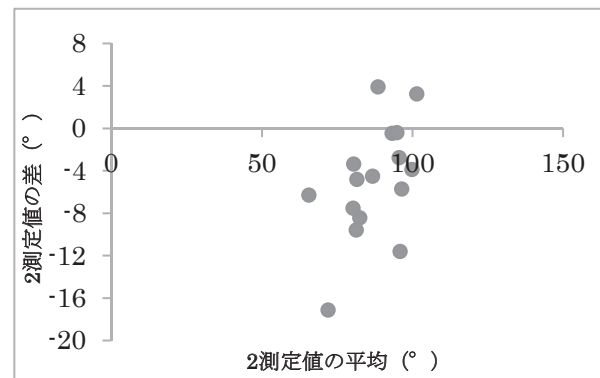
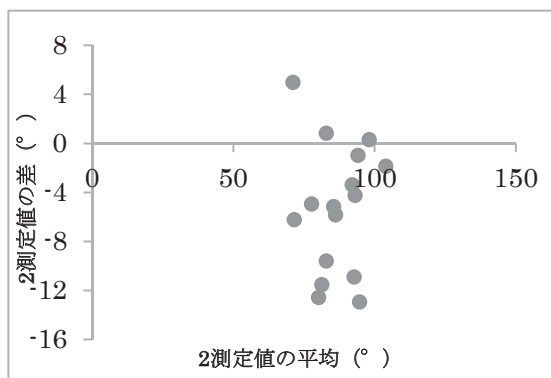


図6 ランジの検者間信頼性に関する Bland-Altman plot (左: 1回目、右: 2回目)

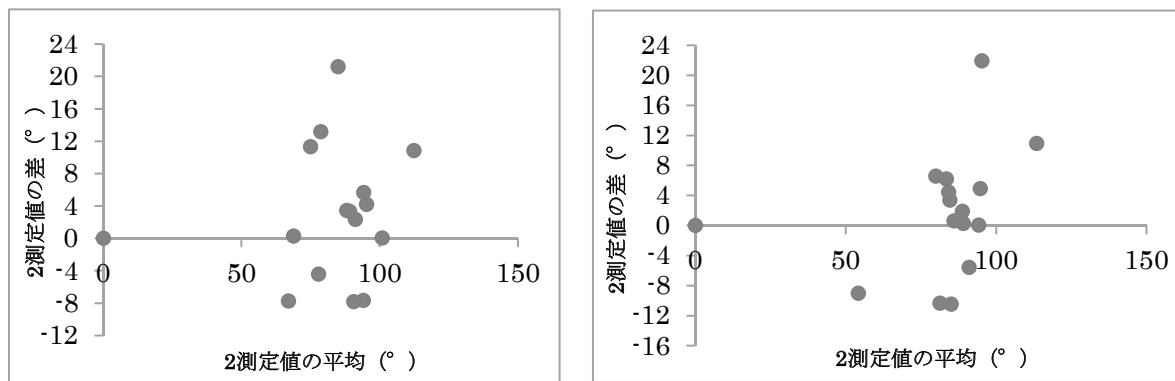


図7 DVJの検者間信頼性に関する Bland-Altman plot (左：1回目、右：2回目)

【考察】

本研究は Kinect の臨床利用に向け動作時膝関節屈曲角度を Vicon と比較し、相対信頼性と絶対信頼性を検討した。

ICC の判断基準に関して、Landis らは、0.00–0.20を slight、0.21–0.40を fair、0.41–0.60を moderate、0.61–0.80を substantial、0.81–1.00を almost Perfect としており、本研究では Landis らの判定基準を用いた¹³⁾。

Kinect において検者内信頼性である ICC (1, 1) はスクワットと DVJ で substantial、レンジで almost perfect であり、Vicon に劣るものの高い再現性を示し、同一対象者の比較に対して有効利用できる可能性が示唆された。本研究において測定時の膝関節屈曲角度は任意の角度としており、膝関節屈曲角度の基準を設定することでさらに高い信頼性を得ることができたのではないかと考える。絶対信頼性に関しては固定誤差、比例誤差ともに認めなかった。この場合の測定の信頼性を低下させる誤差として考えられるものは偶然誤差である。偶然誤差は、生物学的な個体差と測定の際に生じる測定誤差に分けられ、この測定誤差を検討する方法として MDC_{95} を算出した。Kinect で 2 回測定した際の数値を使用した MDC_{95} はスクワットで約 14 度、レンジで約 12 度、DVJ で約 25 度となり、DVJ に関してはその他の動作と比較し特に大きい結果となった。Kinect を使用して動作分析を行った際に 1 回目と 2 回目が MDC_{95} の数値以上の結果ができればそれは対象者に生じた真の変化と捉えることができる。逆

に MDC_{95} の数値以内であれば測定誤差によるものと判断される。本研究結果より算出した MDC_{95} は 12–25 度と測定誤差の範囲が大きく、臨床において対象者に生じた真の変化を捉えるにはさらなる改善が必要と考えられる。

検者間信頼性である ICC (2, 1) においては全て substantial だった。検者間の一貫性を求める ICC (3, 1) では、スクワット 0.81、0.74、レンジ 0.85、0.87 とスクワットの 2 回目以外は almost perfect を認めた。測定値そのものの一致はみられないものの、Kinect と Vicon が示す測定値の傾向の一致度は高く、動作時の最大膝関節屈曲角度を同様に捉えていることが示唆された。検者間信頼性における絶対信頼性に関しては、全ての動作において固定誤差を認めた。固定誤差のみが認められた場合、この誤差の許容範囲を「誤差の許容範囲 (limits of agreement : 以下、LOA)」と定義し算出することができる⁶⁾。本研究結果より算出した LOA は 1 回目の測定においてスクワット -1.5–17.0 度、レンジ -13.5–3.0 度、DVJ -10.1–16.5 度となり非常に誤差の範囲が広い結果となった。

【今後の課題】

Kinect による 2 回の測定では系統誤差は認めておらず、偶然誤差は同一条件下の測定の繰り返しにより精度が向上するため⁷⁾、信頼性の高い測定ができるように測定回数の検討が必要である。今回は Kinect で得られたデータをそのまま利用したが、先行研究では取得したデータにカットオフ周波数を

加えて利用しているものもあり^{14, 15)}、信頼性の向上にむけ検討の余地があるといえる。また本研究では健常成人男性のみを対象としたため、女性や疾患を有する者は含まれておらず、サンプルサイズの不足も含めて今後の課題といえる。

Kinectの最大の利点はマーカーレスで測定可能ということであり、マーカーを貼付する必要がなく短時間での測定が可能である。Kinectの設置位置や対象者の服装の違いによる影響などに関しては不明な点も多く残っている。2020年3月末にKinectの最新機器であるAzure Kinect Developer Kitが日本で発売され、より高度な動作分析装置の開発が可能となることが予想されるため、今後は臨床利用に向けたさらなる研究が望まれる。

【利益相反】

本研究において開示すべき利益相反はない。

【謝辞】

本研究の実施にあたり、多忙のなか、被験者としてご協力いただいた皆様に深謝いたします。

【文献】

- 1) Ana PA, Hugo MPC, et al.: System for automatic gait analysis based on a single RGB-D camera. PLoS One. 2018; 13 (8): 1-24.
- 2) Huber M.E, A.L.Seitz, et al.: Validity and reliability of Kinect skeleton for measuring shoulder joint angles: a feasibility study. Physiotherapy. 2015; 101 (4): 1-5.
- 3) Hawi N, Liodakis E, et al.: Range of motion assessment of the shoulder and elbow joints using a motion sensing input device: a pilot study. Technol Health Care. 2014; 22 (2): 289-295.
- 4) 坂井希, 川北あすみ, 神谷直希: 骨格トラッキングを用いた作業療法士のための関節可動域計測システムの開発. 第12回情報科学技術フォーラム講演論文集. 2013: 601-607.
- 5) Moataz E, Adam K, et al.: Validation of the Microsoft Kinect® camera system for measurement of lower extremity jump landing and squatting kinematics. Sports Biomechanics. 2016; 15 (1): 89-102.
- 6) 千葉慎二: 次世代のインターフェイスとして Kinect. 日本ロボット学会誌. 2014; 32 (3): 231-235.
- 7) 下井俊典: 評価の絶対信頼性. 理学療法科学. 2011; 26 (3): 451-461.
- 8) 下井俊典, 谷浩明: 最小可検変化量を用いた2種類の継ぎ足歩行テストの絶対信頼性の検討. 理学療法科学. 2010; 25 (1): 49-53.
- 9) 日本理学療法士学会 JSPT EBPT用語集 http://jspt.japanpt.or.jp/ebpt_glossary/minimal-detectable-change-95.html (閲覧日2020年5月5日)
- 10) Aaron D.G, Brad W.W, et al.: Development and Validation of a Portable and Inexpensive Tool to Measure the Drop Vertical Jump Using the Microsoft Kinect V2. Sports health. 2017; 9 (6): 537-544.
- 11) Erik E. S, Michael B, et al.: Evaluation of the Microsoft Kinect for Screening ACL Injury. Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc., 2013: 4152-4155.
- 12) Moataz E, Adam K, at al.: Validation of the Microsoft Kinect® camera system for measurement of lower extremity jump landing and squatting kinematics. Sports Biomechanics., 2016; 15 (1): 89-102.
- 13) Landis J.R, Gary GK: The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. Biometrics, 1977, 33 (1): 159-174.
- 14) 稲垣潤, 春名弘市, 昆恵介, 他: Kinectを用いた身体合成重心の測定による歩容解析の検討. 第14回情報科学技術フォーラム: 2015: 547-548.
- 15) Trent M.G, Swithin R, et al.: Comparison of 3D joint angles measured with the Kinect 2.0 skeletal tracker versus a marker based motion capture system. Appl Biomech. 2017; 33 (2): 176-181.

[Original Article]

Relative Reliability and Absolute Reliability of a 3-dimensional Motion Analyzer and a Multiview Motion-capture Device

Shogo Ninomiya¹, Shinya Tajima², Tatsuya Harano³
Shota Nishihara⁴, Yushin Yoshizato¹, Masashi Morimoto⁵

¹ *Department of Physical Therapy, Kyushu University of Nursing and Social Welfare*

² *Japanese Red Cross Kumamoto Hospital*

³ *St. Mary's Hospital*

⁴ *Ryukyu Rehabilitation Academy*

⁵ *Sadamatsu Hospital.*

[Abstract]

[Purpose] To investigate the relative reliability and absolute reliability of a 3-dimensional motion analyzer (Vicon) and a simple multiview motion capture device (Kinect) . [Subjects and Methods] Sixteen adult men were included in the study. Squats, forward lunges, and drop vertical jumps (DVJs) were measured twice simultaneously with the Kinect and the Vicon. Relative reliability and absolute reliability were calculated for the knee joint angles in each measurement. [Results] The intraclass correlation coefficients (ICC) (1, 1) for squats, forward lunges, and DVJs were 0.79, 0.85, and 0.62, respectively, with the Kinect and 0.88, 0.94, and 0.73, respectively, with the Vicon. No systematic errors were observed. The ICC (2, 1) values were 0.65 and 0.61 for the first and second squats, 0.75 and 0.79 for the forward lunges, and 0.77 and 0.79 for the DVJs. Fixed bias was observed for all movements. [Conclusion] The knee joint angles calculated with the Kinect exhibited high reliability and may be useful for comparisons within the same participant. However, countermeasures such as increasing the number of measurements should be considered to reduce the error range.

Keywords: kinect, motion capture, motion analyzer, relative reliability, absolute reliability

* Corresponding author. (Shinya Tajima)