

マーカレスの自動デジタイジングソフトウェアの精度検証
－手動デジタイジングデータと比較して－

浦田 達也・久野 峻幸・野方 円・山田 一典・屋嘉部 真央

Accuracy Verification of Markerless
Automatic Digitizing Software
－ Compared with Manual Digitizing Data －

Urata Tatsuya, Hisano Takayuki, Nokata Madoka, Yamada Kazunori, Yakabu Mao

神戸医療福祉大学紀要 第22巻 第1号

(令和3年12月)

<研究ノート>

マーカレスの自動デジタイジングソフトウェアの精度検証 －手動デジタイジングデータと比較して－

浦田 達也¹⁾・久野 峻幸¹⁾・野方 円²⁾・山田 一典³⁾・屋嘉部 真央⁴⁾

Accuracy Verification of Markerless Automatic Digitizing Software － Compared with Manual Digitizing Data －

Urata Tatsuya¹⁾, Hisano Takayuki¹⁾, Nokata Madoka²⁾,
Yamada Kazunori³⁾, Yakabu Mao⁴⁾

The purpose of this study was to verify the accuracy of the manual digitizing data by a skilled analyst by comparing it with the automatic digitizing data of the Markerless skeletal detection software (Pose-Cap, 4assist Inc.) . One adult male was asked to perform a jumping motion, a running motion, and a throwing motion twice each, which were captured using a digital video camera (120 fps) . In Verification 1, manual digitizing data were collected by two skilled analysts; in Verification 2, average data of the data compared in Verification 1 (d-ave data) and automatic digitizing data (P-Cap data) ; and in Verification 3, d-ave data and modified automatic digitizing data (modified P-Cap data) were compared with intra-class correlation coefficients and variability. were compared using the intraclass correlation coefficient and the coefficient of variation. As a result, the accuracy of the digitizing data in Verification 1 was high for the jumping motion, while low agreement was observed for the shoulder joint and hip joint points in the running and throwing motions. Next, in Verification 2, there were some digitizing points that agreed, but the overall agreement was low in the running and throwing motions. In Verification 3, there were some points that did not match at all in the throwing motion, but the degree of match became higher after corrective digitizing. From these results, we thought that this is a tool to obtain data efficiently by modifying the automatic digitizing data, because it is possible to obtain data with a high degree of agreement by modifying the data to some extent.

key words : Motion Analysis, Accuracy, Two Dimensios

動作分析、精度、2次元

-
- 1) 神戸医療福祉大学 (Kobe University of Welfare) 〒679-2217 兵庫県神崎郡福崎町高岡1966-5
 - 2) 松山東雲女子大学 (Matsuyama Shinonome) 〒790-8531 愛媛県松山市桑原3丁目2-1
 - 3) 新島学園短期大学 (Nijima Gakuen Junior College) 〒370-0068 群馬県高崎市昭和町53番地
 - 4) 兵庫教育大学大学院 博士前期課程 (Hyogo University of Teacher Education graduate school of the master's program) 〒673-1494 兵庫県加東市下久米942-1

1. 緒言

動作分析は、1971年に Abdel & Karara により報告された DLT 法¹⁾により、それまで2次元で行なわれてきた分析を3次元で分析することができるようになった。技術の進歩により、ビデオカメラの fps や解像度が向上したことで、現在ではゴルフスイングや野球のバッティング動作のような150~200 km/h を超える高速度な動作も分析できるようになっている。さらにモーションキャプチャシステムにより誤差0.017mm 以内の精度での測定が可能になった²⁾。皮膚上に貼付する反射マーカの最適な位置を報告する先行研究^{3, 4)}も含めると、手動デジタイジングでの分析と比較すると精度の高い分析が可能である。一方で、モーションキャプチャシステムのような装置がなければ、デジタルビデオカメラで撮影した映像データを用いて手動でのデジタイジングを行なう方法が利用される。現在でも反射マーカを貼付しない研究では用いられ⁵⁻⁷⁾、小学生などの児童を多人数対象とした研究⁷⁾でも利用されている。しかしながら、この手動でのデジタイジングは、多くの対象者を分析するためには多くの時間がかかる。

現在、AI を用いた簡易的な動作分析の研究が国内外で行われており、その精度が検証されている⁸⁻¹¹⁾。このような技術は、反射マーカを貼付できない屋外における多人数での測定などでは、有効であると考えられる。この技術を用いることで多くの時間を要していた多人数を対象とする研究も時間短縮が期待できる。現在、モーションキャプチャシステムのような高い精度を求めることは難しいが、マーカレスの骨格検出ソフトウェア (Pose-Cap、株式会社フォーアシスト社製) が市販されている。このソフトウェアを利用

し、デジタイジングにかかる時間を短縮できれば、500人を超える人数を対象とした動作分析もこれまでよりも短い時間で可能となる。

マーカを貼付せずに手動デジタイズと同様の精度を得られることができれば、時間短縮にもなり、より多くの対象者を測定することも可能であるため、これまで動作分析ではあまりされていなかった500を超えるデータを用いた解析も可能となる。しかしながら、このソフトウェアの精度は公開されていないため、自動デジタイジングされたデータの座標値が実際のどの程度の精度であるのか検証されていない。

そこで本研究の目的は、動作分析を5年以上経験した研究者 (以下、「熟練分析者」とする) による手動デジタイジングデータとマーカレスの骨格検出ソフトウェアの自動デジタイジングデータを比較することで、その精度を検証することとした。

2. 方法

2.1. 分析映像の撮影手順

本研究は、右利きの一般成人男性1名 (身長: 173.5 cm、体質量: 74.0 kg) を対象者として分析するための映像を撮影した。対象者には、最大努力による a) 跳躍動作 (立ち幅跳び)、b) 走動作 (50 m 走) および c) 投動作を2回ずつ行わせ、各動作時にそれぞれ跳躍方向、疾走方向および投球方向に対して15 m 以上離れた右側面からデジタルビデオカメラ (DMC-FZ300、Panasonic 社製) を用いて撮影した (120 fps)。なお、撮影した映像の画角は5 m に設定し、撮影した動画の画素は640×480 pixel であった。

2.2. 分析の手順

撮影した映像を基に2名の熟練分析者による手動デジタイズ(分析1)、マーカレス骨格検出ソフトウェア(Pose-Cap、株式会社フォーアシスト社製)を用いた自動デジタイズ(分析2)および分析2によって得られたデータを熟練分析者による修正デジタイズ(分析3)を行なった。デジタイズを行なったポイント(関節点)は、跳躍動作では、左右の上肢及び下肢の動きが同じだと仮定して、「頭頂」、「頭部中央」、「右肩関節中心(以下、『右肩』とする)」、「右肘関節中心(以下、『右肘』とする)」、「右手関節中心(以下、『右手首』とする)」、「右股関節中心(以下、『右大転子』とする)」、「右膝関節中心(以下、『右膝』とする)」、「右足関節中心(以下、『右足首』とする)」および「右つま先」の9点とした。走動作および投動作では、前述した9点以外に「左肩関節中心(以下、『左肩』とする)」、「左肘関節中心(以下、『左肘』とする)」、「左手関節中心(以下、『左手首』とする)」、「左股関節中心(以下、『左大転子』とする)」、「左膝関節中心(以下、『左膝』とする)」、「左足関節中心(以下、『左足首』とする)」および「左つま先」の7点を追加して計16点をデジタイズポイントとした。

本来、動作分析法を用いた研究では、実長換算をし、最適遮断周波数を決定後に平滑処理を行うため、分析範囲(主動作)の前後15~20コマほど余分にデジタイズを行ない、平滑処理による影響を出来るだけ除去する。本研究においても、分析範囲+前後15コマ余分にデジタイズ処理を行なった。しかしながら、本研究では、ソフトウェアの精度を検討するため、分析1から3で得られたデータは実長換算および平滑処理を行なわないデータのままで分析を行うこととした。その上で、分析1で得られたデータ(以下、それぞれ「d01デー

タ」および「d02データ」とする)から2名の熟練分析者による精度を確かめるために比較した(検証1)。次に分析1のデータを平均化したデータ(以下、「d-aveデータ」とする)と分析2で得られたデータ(以下、「P-Capデータ」とする)を比較することで、手動デジタイジングデータと修正なしの自動デジタイジングデータの精度を検討した(検証2)。そして、d-aveデータとP-Capデータを修正したデータ(以下、「修正P-Capデータ」とする)を比較することで手動デジタイジングデータと修正ありの自動デジタイジングデータの精度を検討した(検証3)。また全ての検証において、データ間の差(単位はpixel)を算出し、その平均値、標準偏差、最大値および最小値を示した。

2.3. 統計処理

検証1から3におけるa)跳躍動作(立ち幅跳び)では18項目、b)走動作(50m走)およびc)投動作では32項目について、データを比較するために、級内相関係数(以下、「ICC」とする)および変動係数(以下、「C.V.」とする)を用いて、2つの基準により一致度を検証し、検証1-3において、ICCとC.V.の値を示した。全ての統計処理は有意水準5%以下として検定を行なった。また各試技において、デジタイズ範囲のコマ数分、C.V.が算出されるがその平均値をC.V.の代表値として採用することとした。なおICCにおいて、先行研究¹²⁾ではICC:0.700以上を示すと高い信頼性を示すとされているが、本研究では先行研究の信頼性では数値的に低いと判断し、ICC:0.850以上を高い信頼性と判断した。また、C.V.では、0.030(1 S.D.)未満で高い一致度を示すことが多いが、本研究において、C.V.:0.025未満で一致度が高いと判断することとした。

統計処理をする際に、比較する2つのデータ間の等分散性を調べるためにF検定を行なう必要があるが、本研究で扱ったデータは座標データであるため、必ずしも正規分布しているとは限らない。F検定を行なうための条件は、比較するデータが正規分布していることであるため、本研究ではF検定を行なわずに上記2つの基準を用いて統計処理を行なった。

P-Cap データは各試技で自動デジタイジングが行われなかったコマがあり、跳躍動作では全体の1.02%と0.33%、走動作ではそれぞれ0.16%、そして投動作では0.00%と0.14%であった。なお、デジタイズが行われなかったコマはデータがないものとして処理した。

3. 結果

3.1. 熟練分析者による手動デジタイズの一致度（検証1）

2名の熟練分析者による手動デジタイズのd01データとd02データにおける差の平均値(AVE.)、標準偏差(S.D.)、最大値(MAX)および最小値(MIN)をTable01~03に示した。まず跳躍動作(Table 01)では、右膝や右つま先のx座標で差の平均値が大きく、最大値および最小値は右肩のx・y座標、右膝および右つま先のx座標で大きかった。次に走動作(Table 02)では、左肘、左大転子および左つま先のx座標において、最大値で10 pixelを超える差が見られた。そして投動作(Table 03)では、頭頂および頭部中央のy座標(1試技目)、左肩および左つま先のx座標(2試技目)において、最大値で10 pixelを超える差が見られた。

d01データとd02データをICC(2, 1)とC.V.を用いて、デジタイズ精度の検証を行なった(Table 04)。その結果、跳躍動作の2試技では、ICC(2, 1)が右つま先のx座標で1試技目:0.795、2試技目:0.866と最も低かつ

表1 2名の熟練分析者による手動デジタイジングデータの差（跳躍動作）（横幅14.2cm）

Table 01 Difference between manual digitizing data by two skilled analysts (jumping)

Jump 01		AVE.	S.D.	MAX	MIN	Jump 02		AVE.	S.D.	MAX	MIN
01 頭頂	x	0.76	1.68	4.88	-3.00	01 頭頂	x	-0.78	3.26	6.00	-6.25
	y	3.07	1.34	6.75	0.00		y	2.19	1.86	6.00	-0.75
02 頭部中央	x	0.47	0.94	2.67	-2.17	02 頭部中央	x	-0.16	0.76	2.83	-1.67
	y	-0.33	0.66	1.50	-1.83		y	0.01	0.91	2.33	-1.83
03 右肩	x	-0.75	2.45	6.17	-3.67	03 右肩	x	0.19	2.30	6.17	-3.83
	y	1.53	3.02	7.17	-3.50		y	2.11	2.25	7.33	-2.00
04 右肘	x	0.26	0.49	1.50	-0.75	04 右肘	x	0.57	0.46	1.83	-0.50
	y	0.35	0.55	2.00	-1.00		y	0.42	0.45	1.33	-0.83
05 右手首	x	0.17	0.99	2.50	-2.50	05 右手首	x	0.10	0.75	2.50	-1.33
	y	0.20	1.08	2.50	-3.00		y	0.51	0.93	2.50	-1.17
06 右大転子	x	0.74	0.81	3.00	-1.25	06 右大転子	x	1.93	0.98	4.50	-0.50
	y	0.53	0.58	1.75	-0.75		y	1.10	1.18	3.67	-1.33
07 右膝	x	4.53	1.95	8.25	0.50	07 右膝	x	3.88	1.34	5.75	0.00
	y	0.50	1.43	3.50	-2.75		y	0.68	2.09	4.50	-2.75
08 右足首	x	1.61	1.07	3.50	-1.25	08 右足首	x	1.62	1.04	4.50	-0.50
	y	1.19	0.73	3.75	-0.50		y	0.62	0.81	2.25	-1.50
09 右つま先	x	5.11	1.66	7.75	-0.25	09 右つま先	x	4.76	2.40	6.50	-2.75
	y	2.63	1.92	7.00	0.50		y	2.38	2.34	7.50	0.50

表2 2名の熟練分析者による手動デジタイジングデータの差（走動作）（横幅14.2cm）

Table 02 Difference between manual digitizing data by two skilled analysts (running)

Run 01		AVE.	S.D.	MAX	MIN	Run 02		AVE.	S.D.	MAX	MIN
01 頭頂	x	3.08	1.32	6.25	0.00	01 頭頂	x	1.19	1.50	6.50	-2.25
	y	2.87	0.85	4.67	0.67		y	3.09	0.95	5.50	1.00
02 頭部中央	x	-0.02	1.02	2.83	-1.88	02 頭部中央	x	-0.07	0.71	1.50	-1.67
	y	0.00	0.55	1.00	-2.00		y	0.24	0.50	1.17	-1.00
03 右肩	x	0.80	1.23	3.83	-1.67	03 右肩	x	1.39	1.56	5.33	-2.17
	y	4.12	0.60	5.67	2.83		y	2.11	2.81	5.67	-3.67
04 右肘	x	0.52	0.40	1.50	-0.38	04 右肘	x	0.50	0.39	1.33	-0.33
	y	0.60	0.40	1.50	-0.17		y	0.67	0.32	1.33	0.00
05 右手首	x	0.92	0.67	2.33	-0.33	05 右手首	x	0.81	0.86	2.50	-1.00
	y	0.61	0.85	2.83	-0.83		y	0.53	0.55	1.88	-0.67
06 左肩	x	0.78	2.30	5.75	-4.25	06 左肩	x	1.87	3.10	8.17	-3.25
	y	3.49	1.86	6.75	-0.50		y	1.03	1.20	3.67	-1.83
07 左肘	x	0.14	3.81	12.33	-5.25	07 左肘	x	1.03	4.49	14.00	-8.25
	y	1.59	2.36	7.00	-2.67		y	1.75	2.92	8.00	-2.50
08 左手首	x	0.82	1.51	5.00	-3.75	08 左手首	x	0.97	1.23	4.00	-4.50
	y	0.02	1.60	2.50	-6.50		y	0.82	1.29	4.83	-1.50
09 右大転子	x	2.97	1.70	6.17	-0.17	09 右大転子	x	2.07	3.75	8.00	-5.67
	y	1.62	1.03	3.50	-0.50		y	0.33	1.21	2.33	-3.00
10 右膝	x	3.04	1.65	7.33	0.25	10 右膝	x	3.66	1.65	7.75	1.00
	y	0.15	2.88	4.75	-6.25		y	-0.57	2.17	2.83	-7.75
11 右足首	x	0.76	1.19	3.00	-1.50	11 右足首	x	0.93	1.27	3.50	-1.50
	y	0.42	0.63	1.75	-1.17		y	0.75	0.78	2.33	-1.75
12 右つま先	x	1.77	4.61	8.00	-6.83	12 右つま先	x	2.59	4.24	7.25	-6.25
	y	3.22	3.45	8.33	-4.50		y	2.27	3.38	9.00	-4.67
13 左大転子	x	1.39	4.87	10.33	-6.83	13 左大転子	x	0.55	2.98	6.75	-5.25
	y	1.05	1.62	4.17	-2.83		y	-0.01	1.49	3.00	-3.00
14 左膝	x	3.84	1.59	8.50	0.75	14 左膝	x	3.93	1.67	7.75	0.00
	y	-1.06	3.78	5.67	-9.25		y	0.27	3.24	5.75	-6.75
15 左足首	x	0.50	0.87	2.25	-1.25	15 左足首	x	0.35	0.93	2.67	-1.67
	y	0.52	0.73	2.75	-1.00		y	0.63	0.59	2.25	-0.50
16 左つま先	x	2.74	4.02	10.17	-5.50	16 左つま先	x	1.67	4.53	7.75	-6.67
	y	1.52	3.09	7.50	-4.83		y	2.88	2.73	7.25	-3.50

たが、その他のデジタイズポイントは0.952以上であり、ほとんどのポイントにおいて、信頼性の高い一致度であった。またC.V.の平均値においても、ICCと同様に右つま先のx座標で1試技目：0.024、2試技目：0.023と最も高かったが、それ以外のポイントはC.V.：0.01未満であり、すべてのポイントにおいて、信頼性の高い一致度であった。

2次元的な移動運動である走動作を見ると（Table 05）、ICC（2, 1）が頭頂のy座標で

1試技目：0.370、2試技目：0.188と最も低く、次に両試技の右肩、右大転子、左肩および左大転子のy座標において0.481-0.813の範囲で低かった。それ以外のポイントは、0.875以上であり、信頼性の高い一致度であった。C.V.の平均値では、1試技目において、右肩・左肩のy座標および右つま先・左大転子・左つま先のx座標で0.010-0.014の範囲であり、2試技目において、頭頂のy座標および右つま先・左つま先のx座標で0.010-0.011の範

表3 2名の熟練分析者による手動デジタイジングデータの差（投動作）（横幅14.2cm）

Table 03 Difference between manual digitizing data by two skilled analysts (throwing)

Throw 01		AVE.	S.D.	MAX	MIN	Throw 02		AVE.	S.D.	MAX	MIN
01 頭頂	x	4.70	1.50	9.08	0.92	01 頭頂	x	-0.01	1.62	3.00	-3.75
	y	6.79	1.02	10.25	4.75		y	3.64	1.15	6.25	1.50
02 頭部中央	x	1.70	2.42	7.42	-3.08	02 頭部中央	x	2.75	2.77	6.25	-3.00
	y	5.51	1.49	13.33	2.83		y	-0.30	0.78	1.50	-2.25
03 右肩	x	-0.65	2.20	6.63	-5.63	03 右肩	x	4.37	2.29	9.00	-0.50
	y	0.90	1.53	3.45	-2.00		y	3.04	3.74	9.75	-3.50
04 右肘	x	-0.50	2.69	9.75	-4.50	04 右肘	x	1.09	2.83	6.33	-4.17
	y	0.04	2.25	9.63	-4.63		y	0.75	2.04	4.67	-4.00
05 右手首	x	-0.78	2.00	6.00	-4.75	05 右手首	x	1.13	0.86	3.00	-0.67
	y	-0.14	2.05	3.25	-5.50		y	-0.05	0.98	2.00	-3.00
06 左肩	x	-1.98	2.53	4.38	-8.13	06 左肩	x	0.81	3.46	10.00	-5.75
	y	-1.36	2.06	7.13	-6.00		y	3.81	1.93	7.50	0.25
07 左肘	x	-0.54	2.39	4.25	-7.01	07 左肘	x	1.90	1.70	4.50	-4.33
	y	-2.27	1.86	1.71	-5.44		y	1.32	1.63	4.67	-1.83
08 左手首	x	-0.24	2.15	5.00	-6.50	08 左手首	x	0.58	0.91	2.67	-1.50
	y	0.18	1.58	4.08	-5.08		y	1.58	1.14	4.00	-1.17
09 右大転子	x	1.37	1.88	7.75	-2.25	09 右大転子	x	4.53	3.45	9.83	-1.50
	y	-1.82	2.54	2.25	-6.92		y	3.36	2.61	7.67	-0.17
10 右膝	x	0.87	1.05	4.00	-1.38	10 右膝	x	3.71	1.36	6.17	0.83
	y	-2.39	1.29	0.55	-5.00		y	0.13	1.97	3.83	-3.00
11 右足首	x	-0.24	0.96	2.88	-2.38	11 右足首	x	2.63	1.12	5.33	0.17
	y	-0.54	1.41	3.38	-3.38		y	1.49	1.00	3.33	-0.83
12 右つま先	x	3.98	1.24	6.75	1.25	12 右つま先	x	2.36	1.14	4.83	-1.00
	y	-3.38	1.91	0.47	-8.13		y	5.00	2.11	9.33	2.67
13 左大転子	x	-1.51	3.09	4.33	-7.58	13 左大転子	x	-3.03	2.57	1.00	-8.50
	y	-2.22	1.69	1.33	-7.00		y	2.12	4.22	8.67	-3.83
14 左膝	x	-2.85	1.93	-0.50	-8.75	14 左膝	x	0.92	3.30	4.83	-6.83
	y	-4.65	2.40	-1.15	-10.50		y	-6.25	0.97	-4.33	-8.83
15 左足首	x	-0.53	1.21	1.58	-3.50	15 左足首	x	2.39	1.67	6.17	0.33
	y	-1.24	0.86	1.00	-2.75		y	2.37	0.95	5.00	0.83
16 左つま先	x	-1.08	2.65	6.13	-6.75	16 左つま先	x	6.89	3.48	11.00	-2.50
	y	-2.53	1.22	0.24	-4.50		y	-0.19	2.14	1.50	-5.33

囲であった。それ以外のポイントは、0.01未満であり、信頼性の高い一致度であった。

3次元的な関節運動を含む投動作を見ると (Table 06)、ICC (2, 1) が1試技目では右つま先の y 座標 (-0.166) および左膝の y 座標 (0.187) で一致しておらず、頭頂・右肩・左肩・右大転子・左大転子・右足首・左足首の y 座標で0.561-0.844の範囲であり、2試技目では右肩の y 座標 (0.378)、右つま先の y 座標 (0.024) および左膝の y 座標 (0.120)

で一致しておらず、頭頂・左肩・右大転子・左大転子・左足首の y 座標で0.480-0.804の範囲であった。それ以外のポイントは、1、2試技目ともに0.856以上と、高い一致度を示した。C.V. の平均値では、1試技目の右膝 (0.017)・右つま先 (0.019) の x 座標や左肩の y 座標 (0.015)、2試技目の左つま先の x 座標 (0.017) が少し高かったが、すべてのポイントにおいて、0.025未満であり、高い一致度を示した。

自動デジタイジングの精度

表4 2名の熟練分析者による手動デジタイジングデータのICCとC.V. (跳躍動作) (横幅6.8cm)

Table 04 ICC and C.V. for Verification 1 (jumping)

		Jump 01		Jump 02	
		ICC	C.V.	ICC	C.V.
01 頭頂	x	0.998	0.005	0.994	0.009
	y	0.994	0.009	0.995	0.007
02 頭部中央	x	0.999	0.003	1.000	0.002
	y	1.000	0.002	0.999	0.002
03 右肩	x	0.997	0.009	0.998	0.006
	y	0.993	0.007	0.993	0.006
04 右肘	x	1.000	0.002	1.000	0.002
	y	1.000	0.001	1.000	0.001
05 右手首	x	1.000	0.004	1.000	0.002
	y	1.000	0.002	1.000	0.002
06 右大転子	x	1.000	0.004	0.999	0.009
	y	0.998	0.001	0.992	0.003
07 右膝	x	0.978	0.020	0.986	0.016
	y	0.990	0.003	0.970	0.004
08 右足首	x	0.992	0.009	0.995	0.008
	y	0.996	0.002	0.998	0.002
09 右つま先	x	0.795	0.024	0.866	0.023
	y	0.952	0.005	0.972	0.004

表5 2名の熟練分析者による手動デジタイジングデータのICCとC.V. (走動作) (横幅6.8cm)

Table 05 ICC and C.V. for Verification 1 (running)

		Run 01		Run 02	
		ICC	C.V.	ICC	C.V.
01 頭頂	x	1.000	0.007	1.000	0.004
	y	0.370	0.009	0.188	0.010
02 頭部中央	x	1.000	0.002	1.000	0.001
	y	0.948	0.001	0.893	0.001
03 右肩	x	1.000	0.003	1.000	0.003
	y	0.617	0.012	0.657	0.009
04 右肘	x	1.000	0.001	1.000	0.001
	y	0.996	0.002	0.997	0.002
05 右手首	x	1.000	0.002	1.000	0.002
	y	0.998	0.002	0.999	0.002
06 左肩	x	1.000	0.006	1.000	0.007
	y	0.521	0.010	0.813	0.004
07 左肘	x	1.000	0.006	1.000	0.009
	y	0.925	0.006	0.875	0.007
08 左手首	x	1.000	0.004	1.000	0.003
	y	0.995	0.003	0.996	0.003
09 右大転子	x	1.000	0.006	1.000	0.010
	y	0.697	0.004	0.751	0.002
10 右膝	x	1.000	0.007	1.000	0.009
	y	0.922	0.005	0.943	0.004

11 右足首	x	1.000	0.003	1.000	0.003
	y	1.000	0.001	0.999	0.002
12 右つま先	x	0.999	0.014	1.000	0.010
	y	0.983	0.008	0.987	0.007
13 左大転子	x	0.999	0.011	1.000	0.005
	y	0.481	0.004	0.640	0.003
14 左膝	x	1.000	0.010	0.999	0.008
	y	0.885	0.007	0.905	0.006
15 左足首	x	1.000	0.002	1.000	0.002
	y	0.999	0.001	0.999	0.001
16 左つま先	x	1.000	0.010	0.999	0.011
	y	0.987	0.006	0.989	0.007

表6 2名の熟練分析者による手動デジタイジングデータのICCとC.V. (投動作) (横幅6.8cm)

Table 06 ICC and C.V. for Verification 1 (throwing)

		Throw 01		Throw 02	
		ICC	C.V.	ICC	C.V.
01 頭頂	x	0.999	0.004	0.999	0.004
	y	0.824	0.008	0.687	0.011
02 頭部中央	x	0.996	0.010	0.994	0.012
	y	0.988	0.002	0.980	0.002
03 右肩	x	0.998	0.009	0.994	0.014
	y	0.502	0.010	0.378	0.011
04 右肘	x	0.999	0.010	0.999	0.009
	y	0.995	0.003	0.987	0.005
05 右手首	x	1.000	0.003	1.000	0.005
	y	0.999	0.003	0.999	0.002
06 左肩	x	0.985	0.012	0.990	0.007
	y	0.561	0.015	0.804	0.010
07 左肘	x	0.997	0.004	0.994	0.007
	y	0.995	0.004	0.994	0.004
08 左手首	x	0.999	0.003	0.999	0.002
	y	0.998	0.002	0.994	0.004
09 右大転子	x	0.983	0.014	0.977	0.017
	y	0.774	0.003	0.480	0.007
10 右膝	x	0.984	0.017	0.992	0.014
	y	0.958	0.003	0.890	0.003
11 右足首	x	0.995	0.006	0.986	0.011
	y	0.844	0.005	0.896	0.003
12 右つま先	x	0.969	0.019	0.990	0.011
	y	-0.166	0.008	0.024	0.009
13 左大転子	x	0.993	0.006	0.978	0.010
	y	0.764	0.008	0.603	0.008
14 左膝	x	0.995	0.008	0.992	0.008
	y	0.187	0.014	0.120	0.013
15 左足首	x	0.996	0.004	0.987	0.006
	y	0.712	0.004	0.550	0.004
16 左つま先	x	0.990	0.014	0.961	0.017
	y	0.939	0.003	0.856	0.003

3.2. 手動デジタイズデータと自動デジタイズデータの一貫性 (検証2)

手動デジタイズの d01データと d02データを平均した d-ave データとマーカレス骨格検出ソフトウェアで自動デジタイズした P-Cap データの差を算出し、検証1と同様に Table07~09に示した。まず跳躍動作 (Table 07) では、1試技目では検証1の走動作および投動作 (Table 02&03) と同程度の差の最大値および最小値であったが、2試技目では右手首・右つま先の x 座標および右膝・右足首・右つま先の y 座標において、差の平均値が8pixel より大きく、右手首・右つま先の x 座標の差の最大値は80 pixel より大きく、右膝・右足首・右つま先の y 座標の差の最小値は -100 pixel よりも小さかった。次に走動作 (Table 08) では、右つま先、左足首および左つま先の x 座標における差の平均値で 10 pixel を超えており、さらに最大値および最小値では、右足首・右つま先・左足首・左

つま先の x 座標で100 pixel を超える値であった。そして投動作 (Table 09) では、左右のつま先の x 座標における差の平均値で15 pixel を超えており、走動作と同様に、右足首・右つま先・左足首・左つま先の x 座標で100 pixel を超える値であった。

d-ave データと P-Cap データを ICC (2, 1) と C.V. を用いて、デジタイズ精度の検証を行なった (Table 10)。その結果を以下に示す。跳躍動作を見ると、ICC (2, 1) において、1試技目では右つま先の x 座標 (0.836)、2試技目では右膝の y 座標 (0.690)、右足首の y 座標 (0.826)、右つま先の x 座標 (0.653) および右つま先の y 座標 (0.707) で一貫性が低かった。それ以外のポイントは、0.928 以上であり、信頼性の高い一貫性であった。C.V. の平均値において、1試技目では頭頂の y 座標が0.025、さらに2試技目では右つま先の x 座標が0.033と高かった。それ以外のポイントでは、1試技目の頭部中央の x 座標

表7 手動デジタイズデータの平均データと自動デジタイズデータとの差 (跳躍動作) (横幅14.2cm)

Table 07 Difference between average manual digitizing data and automatic digitizing data (jumping)

Jump 01		AVE.	S.D.	MAX	MIN	Jump 02		AVE.	S.D.	MAX	MIN
01 頭頂	x	2.97	2.77	7.63	-5.81	01 頭頂	x	2.55	2.53	9.38	-4.88
	y	9.09	1.92	13.44	3.88		y	8.04	1.93	14.13	3.13
02 頭部中央	x	-4.75	1.36	-2.08	-8.33	02 頭部中央	x	-4.57	1.54	-1.08	-7.58
	y	2.55	2.80	7.50	-3.58		y	2.91	2.02	7.00	-1.42
03 右肩	x	-2.32	1.93	1.00	-6.33	03 右肩	x	-2.98	1.93	0.50	-8.33
	y	1.43	1.90	6.17	-2.83		y	1.02	1.57	4.58	-2.83
04 右肘	x	-0.67	2.11	5.13	-7.50	04 右肘	x	0.45	2.65	7.33	-4.17
	y	-0.11	3.11	14.50	-9.13		y	0.18	2.76	10.92	-6.92
05 右手首	x	0.55	2.45	7.50	-4.00	05 右手首	x	1.59	5.58	49.00	-3.92
	y	-1.11	2.70	13.83	-10.00		y	-2.15	4.11	7.33	-21.92
06 右大転子	x	2.34	2.09	8.00	-2.50	06 右大転子	x	2.28	2.06	7.67	-2.17
	y	-1.53	2.90	6.00	-7.13		y	-1.34	2.55	5.08	-9.17
07 右膝	x	0.61	1.67	3.88	-4.00	07 右膝	x	0.55	3.88	33.13	-5.63
	y	-1.98	1.37	1.75	-4.25		y	-2.96	8.75	2.63	-88.50
08 右足首	x	-0.39	0.89	1.63	-2.88	08 右足首	x	0.63	8.12	80.25	-2.50
	y	0.18	1.52	4.25	-2.63		y	-1.97	11.73	3.13	-116.00
09 右つま先	x	-4.58	2.65	3.50	-6.38	09 右つま先	x	-3.89	11.38	100.13	-9.25
	y	-4.14	2.60	-2.50	-22.38		y	-5.92	13.51	-2.63	-137.25

表8 手動デジタイジングの平均データと自動デジタイジングデータとの差（走動作）（横幅14.2cm）

Table 08 Difference between average manual digitizing data and automatic digitizing data (running)

Run 01		AVE.	S.D.	MAX	MIN	Run 02		AVE.	S.D.	MAX	MIN
01 頭頂	x	6.48	1.07	9.33	3.75	01 頭頂	x	6.65	1.27	10.75	4.25
	y	5.78	0.91	8.13	3.08		y	4.88	1.06	7.13	2.88
02 頭部中央	x	-1.58	0.88	0.50	-3.56	02 頭部中央	x	-0.88	0.93	2.92	-2.92
	y	5.80	1.00	8.63	3.33		y	5.89	1.14	8.17	3.83
03 右肩	x	-1.08	1.67	2.42	-6.00	03 右肩	x	-1.54	1.70	4.00	-6.50
	y	2.20	1.15	4.50	-0.50		y	2.87	1.28	6.00	0.25
04 右肘	x	-0.22	1.97	4.83	-5.00	04 右肘	x	-0.44	2.64	10.42	-5.83
	y	0.57	4.32	12.88	-8.17		y	0.30	4.54	8.92	-7.42
05 右手首	x	-1.80	1.54	1.83	-7.33	05 右手首	x	-1.25	1.93	8.50	-4.75
	y	-0.98	1.46	2.67	-6.17		y	-1.50	1.90	2.00	-7.08
06 左肩	x	0.82	4.32	12.88	-7.63	06 左肩	x	-1.06	2.78	5.75	-5.75
	y	2.74	1.42	6.63	-0.63		y	2.31	1.29	5.25	-0.75
07 左肘	x	2.16	7.21	26.42	-7.50	07 左肘	x	2.26	5.65	20.50	-5.33
	y	0.23	2.42	8.17	-3.75		y	-0.15	3.44	9.13	-6.00
08 左手首	x	3.24	12.47	46.75	-7.75	08 左手首	x	1.89	10.26	49.17	-7.08
	y	-3.10	7.09	6.83	-47.25		y	-1.78	3.84	3.88	-16.33
09 右大転子	x	0.19	3.50	10.17	-8.08	09 右大転子	x	-0.75	2.52	4.08	-6.00
	y	-2.01	2.32	2.58	-7.75		y	-0.73	1.93	3.69	-4.88
10 右膝	x	3.08	16.66	67.75	-6.25	10 右膝	x	-0.98	7.67	60.88	-5.25
	y	-3.29	3.33	0.75	-16.33		y	-3.13	2.03	-0.25	-17.50
11 右足首	x	7.69	30.27	119.92	-10.33	11 右足首	x	2.08	16.03	105.88	-5.38
	y	2.18	13.81	58.25	-53.92		y	1.38	11.45	65.83	-3.88
12 右つま先	x	13.38	44.07	153.75	-10.08	12 右つま先	x	7.68	36.87	146.00	-13.75
	y	1.58	14.04	70.75	-11.50		y	1.04	15.34	67.13	-18.75
13 左大転子	x	-0.63	3.74	6.42	-9.83	13 左大転子	x	0.25	4.02	9.25	-8.13
	y	-2.30	1.85	0.92	-6.83		y	-2.21	2.10	2.00	-6.75
14 左膝	x	-6.50	16.40	3.00	-70.25	14 左膝	x	-2.29	7.65	7.13	-55.42
	y	-2.12	3.13	10.38	-8.75		y	-2.96	1.84	3.38	-6.13
15 左足首	x	-10.34	30.29	22.88	-122.50	15 左足首	x	-1.26	15.65	42.42	-109.00
	y	-4.38	14.41	54.25	-59.75		y	2.38	16.72	59.83	-49.17
16 左つま先	x	-11.55	41.37	65.75	-160.25	16 左つま先	x	-0.06	28.13	75.75	-145.38
	y	-4.61	12.81	57.17	-63.56		y	-0.62	14.53	59.50	-22.88

(0.017) および右つま先の x 座標 (0.024)、2 試技目の頭頂の y 座標 (0.022) および頭部中央の x 座標 (0.016) で高かったことを除くと、高い一致度であった。

次に走動作を見ると (Table 11)、ICC (2, 1) において、1試技目では頭頂 (0.087)・頭部中央 (0.131)・右大転子 (0.370)・左大転子 (0.397) の y 座標で低く、2試技目でも同様に頭頂 (0.064)・頭部中央 (0.105)・右大転子 (0.447)・左大転子 (0.227) の y 座標で

低かった。次に両試技において、右肩・左肩・右膝・右足首・右つま先・左足首・左つま先の y 座標で0.614-0.841の範囲で一致度が低かった。それ以外のポイントでは、高い一致度が見られた。C.V. の平均値は、1試技目において、右つま先 (0.062)・左足首 (0.030)・左つま先 (0.045) の x 座標で高く、2試技目においても右つま先の x 座標 (0.038) で高かった。また1試技目における頭頂・左肘・左手首・右膝・右足首・左膝の x 座標および頭頂・

表9 手動デジタイジングの平均データと自動デジタイジングデータとの差（投動作）（横幅14.2cm）

Table 09 Difference between average manual digitizing data and automatic digitizing data (throwing)

Throw 01		AVE.	S.D.	MAX	MIN	Throw 02		AVE.	S.D.	MAX	MIN
01 頭頂	x	5.02	3.04	29.17	0.92	01 頭頂	x	5.33	1.67	9.88	1.88
	y	7.53	6.26	63.33	4.75		y	6.77	2.46	18.75	3.63
02 頭部中央	x	1.84	2.71	12.75	-3.08	02 頭部中央	x	1.66	2.58	9.63	-3.88
	y	5.90	3.58	35.17	2.83		y	6.16	3.30	23.88	2.75
03 右肩	x	-0.52	2.43	7.38	-5.63	03 右肩	x	0.42	2.99	12.25	-4.88
	y	1.18	2.33	12.50	-2.00		y	1.86	3.75	20.88	-2.25
04 右肘	x	-0.50	2.69	9.75	-4.50	04 右肘	x	-0.93	3.51	10.75	-5.75
	y	0.04	2.25	9.63	-4.63		y	0.58	3.41	17.75	-3.75
05 右手首	x	-0.78	2.00	6.00	-4.75	05 右手首	x	-0.45	3.47	17.33	-6.92
	y	-0.14	2.05	3.25	-5.50		y	-0.10	1.93	3.58	-4.75
06 左肩	x	-1.98	2.53	4.38	-8.13	06 左肩	x	0.98	4.18	11.00	-4.13
	y	-1.36	2.06	7.13	-6.00		y	0.90	3.81	21.13	-3.38
07 左肘	x	-1.39	5.34	4.25	-39.33	07 左肘	x	-0.09	4.08	8.25	-7.83
	y	-5.73	6.39	1.25	-46.67		y	-4.89	4.02	1.83	-13.08
08 左手首	x	-2.79	4.93	5.00	-12.42	08 左手首	x	-4.03	5.74	5.92	-22.25
	y	-0.47	3.17	16.08	-7.08		y	0.88	8.35	17.92	-46.00
09 右大転子	x	1.37	1.88	7.75	-2.25	09 右大転子	x	1.11	2.11	9.42	-2.17
	y	-1.82	2.54	2.25	-6.92		y	-0.28	2.38	4.67	-4.67
10 右膝	x	5.79	18.68	79.38	-1.38	10 右膝	x	3.14	12.07	77.50	-3.33
	y	-3.75	4.51	0.13	-20.13		y	-3.25	3.24	1.42	-19.42
11 右足首	x	9.38	30.85	113.75	-2.38	11 右足首	x	2.85	18.51	117.25	-2.83
	y	0.27	3.12	13.38	-3.38		y	0.14	1.76	9.67	-2.50
12 右つま先	x	16.19	38.28	145.38	0.88	12 右つま先	x	7.65	22.55	149.83	-0.08
	y	-4.88	1.67	-3.00	-8.13		y	-5.24	1.30	-0.83	-7.75
13 左大転子	x	-2.16	3.29	4.33	-9.42	13 左大転子	x	-0.22	3.28	6.00	-6.08
	y	-2.42	1.93	1.33	-7.17		y	-2.20	2.23	1.58	-7.58
14 左膝	x	-9.18	20.43	-0.50	-81.38	14 左膝	x	-4.06	11.84	0.42	-76.92
	y	-3.04	5.90	14.38	-10.50		y	-3.74	3.10	13.33	-7.33
15 左足首	x	-9.60	30.23	1.50	-115.88	15 左足首	x	-3.47	18.40	1.67	-119.83
	y	-1.79	2.45	1.00	-15.13		y	-1.00	1.66	0.92	-11.08
16 左つま先	x	-15.70	39.53	13.75	-143.00	16 左つま先	x	-7.00	22.43	9.83	-145.75
	y	-2.64	2.64	7.00	-9.13		y	-2.56	1.16	-0.50	-6.25

頭部中央の y 座標で、2試技目における頭頂・左つま先の x 座標および頭頂・頭部中央の y 座標で0.015-0.029の範囲で高かった。それ以外のポイントは、一致度が高く、特に右肩や右手首の x 座標は0.005以下であり、一致度が高かった。

そして投動作を見ると（Table 12）、ICC (2, 1) では、1試技目において、右つま先の x 座標 (0.260)、同 y 座標 (0.009) および左膝の y 座標 (0.043) は全く一致しておらず、

2試技目においても右つま先の y 座標 (0.076) および左膝の y 座標 (0.064) は全く一致していなかった。次に両試技において、頭頂・頭部中央の y 座標は0.289-0.462の範囲で低く、2試技目の右足首の x 座標 (0.378) も低かった。そして、1試技目では右肩・右大転子・右膝・右足首の y 座標、左膝の x 座標および左足首・左つま先の x 座標・y 座標において0.537-0.794の範囲で、2試技目では右肩・左肩、右大転子・右膝の y 座標、右足首・

自動デジタイジングの精度

表10 手動デジタイジングの平均データと自動デジタイジングデータの ICC と C.V. (跳躍動作) (横幅 6.8cm)

Table 10 ICC and C.V. for Verification 2 (jumping)

		Jump 01		Jump 02	
		ICC	C.V.	ICC	C.V.
01 頭頂	x	0.989	0.013	0.992	0.010
	y	0.957	0.025	0.962	0.022
02 頭部中央	x	0.986	0.017	0.987	0.016
	y	0.992	0.009	0.992	0.008
03 右肩	x	0.996	0.010	0.995	0.011
	y	0.996	0.005	0.997	0.004
04 右肘	x	0.999	0.007	0.999	0.009
	y	0.996	0.006	0.997	0.005
05 右手首	x	0.999	0.009	0.996	0.012
	y	0.998	0.005	0.996	0.007
06 右大転子	x	0.997	0.012	0.998	0.010
	y	0.975	0.006	0.978	0.005
07 右膝	x	0.997	0.006	0.988	0.007
	y	0.974	0.004	0.690	0.007
08 右足首	x	0.998	0.004	0.928	0.007
	y	0.994	0.002	0.826	0.006
09 右つま先	x	0.836	0.024	0.653	0.033
	y	0.909	0.008	0.707	0.012

表11 手動デジタイジングの平均データと自動デジタイジングデータの ICC と C.V. (走動作) (横幅6.8 cm)

Table 11 ICC and C.V. for Verification 2 (running)

		Run 01		Run 02	
		ICC	C.V.	ICC	C.V.
01 頭頂	x	0.999	0.016	0.999	0.015
	y	0.087	0.019	0.064	0.016
02 頭部中央	x	1.000	0.003	1.000	0.002
	y	0.131	0.018	0.105	0.018
03 右肩	x	1.000	0.005	1.000	0.004
	y	0.804	0.006	0.752	0.008
04 右肘	x	1.000	0.004	1.000	0.005
	y	0.883	0.009	0.896	0.010
05 右手首	x	1.000	0.005	1.000	0.004
	y	0.994	0.003	0.992	0.005
06 左肩	x	0.999	0.007	1.000	0.006
	y	0.627	0.008	0.614	0.007
07 左肘	x	0.998	0.015	0.999	0.012
	y	0.950	0.005	0.894	0.007
08 左手首	x	0.995	0.017	0.998	0.012
	y	0.875	0.011	0.967	0.007
09 右大転子	x	1.000	0.007	1.000	0.004
	y	0.370	0.006	0.447	0.004
10 右膝	x	0.991	0.015	0.999	0.006
	y	0.820	0.007	0.855	0.007

11 右足首	x	0.972	0.029	0.995	0.010
	y	0.840	0.011	0.890	0.007
12 右つま先	x	0.942	0.062	0.973	0.038
	y	0.832	0.013	0.773	0.014
13 左大転子	x	1.000	0.008	1.000	0.007
	y	0.397	0.006	0.227	0.006
14 左膝	x	0.993	0.016	0.998	0.007
	y	0.890	0.007	0.899	0.007
15 左足首	x	0.980	0.030	0.992	0.014
	y	0.775	0.012	0.743	0.012
16 左つま先	x	0.967	0.045	0.977	0.029
	y	0.800	0.013	0.841	0.014

表12 手動デジタイジングの平均データと自動デジタイジングデータの ICC と C.V. (投動作) (横幅6.8 cm)

Table 12 ICC and C.V. for Verification 2 (throwing)

		Throw 01		Throw 02	
		ICC	C.V.	ICC	C.V.
01 頭頂	x	0.987	0.016	0.999	0.004
	y	0.289	0.022	0.687	0.011
02 頭部中央	x	0.996	0.009	0.994	0.012
	y	0.462	0.017	0.980	0.002
03 右肩	x	0.998	0.006	0.994	0.014
	y	0.702	0.005	0.378	0.011
04 右肘	x	0.999	0.007	0.999	0.009
	y	0.989	0.004	0.987	0.005
05 右手首	x	1.000	0.006	1.000	0.005
	y	0.998	0.005	0.999	0.002
06 左肩	x	0.993	0.009	0.990	0.007
	y	0.917	0.005	0.804	0.010
07 左肘	x	0.971	0.008	0.994	0.007
	y	0.889	0.014	0.994	0.004
08 左手首	x	0.983	0.011	0.999	0.002
	y	0.980	0.005	0.994	0.004
09 右大転子	x	0.997	0.005	0.977	0.017
	y	0.719	0.005	0.480	0.007
10 右膝	x	0.851	0.018	0.992	0.014
	y	0.647	0.008	0.890	0.003
11 右足首	x	0.378	0.032	0.986	0.011
	y	0.772	0.004	0.896	0.003
12 右つま先	x	0.260	0.055	0.990	0.011
	y	0.009	0.009	0.024	0.009
13 左大転子	x	0.983	0.011	0.978	0.010
	y	0.883	0.006	0.603	0.008
14 左膝	x	0.794	0.026	0.992	0.008
	y	0.043	0.012	0.120	0.013
15 左足首	x	0.537	0.031	0.987	0.006
	y	0.606	0.004	0.550	0.004
16 左つま先	x	0.542	0.054	0.961	0.017
	y	0.723	0.006	0.856	0.003

右つま先の x 座標および左足首・左つま先の x 座標・y 座標において0.501-0.849の範囲で低い ICC であった。C.V. の平均値では、1試技目における右足首 (0.032)・右つま先 (0.055)・左足首 (0.031)・左つま先 (0.054) の x 座標と2試技目における右つま先の x 座標 (0.029) で0.025を超える値であった。また両試技において、頭頂の x 座標・y 座標および頭部中央の y 座標において、0.015-0.018の範囲で C.V. の平均値が高かった。それ以外のポイントは、C.V. の平均値が0.015未満であり、一致度が高かった。

3.3. 手動デジタイズデータと修正した自動デジタイズデータの一致度 (検証3)

手動デジタイズの d01データと d02データを平均した d-ave データと P-Cap データを1名の熟練分析者が修正した修正 P-Cap データの差を検証1および2と同様に Table13~15に示した。まず跳躍動作 (Table 13) で

は、差の平均値はすべて5 pixel 以下であり、差の最大値は15 pixel 以下、差の最小値 -23 pixel 以上であった。次に走動作 (Table 14) では、頭頂および頭部中央において、差の平均値が5 pixel よりも大きかったが、全ポイントを見ると、差の最大値は13 pixel 以下、最小値は -12 pixel 以上であった。そして投動作 (Table 15) でも、差の平均値が5 pixel よりも大きかったが、全ポイントを見ると、差の最大値および最小値が±14 pixel よりも小さかった。修正したことによって修正前±100pixel 以上あった差が、±15 pixel 以下になった。

d-ave データと修正 P-Cap データとのデジタイズ精度の検証を ICC (2, 1) と C.V. を用いて行なった (Table 16-18)。なお、修正 P-Cap データは、自動デジタイズが行われなかったコマの修正とその修正と大幅にデジタイズポイントからズレていると考えられたポイントの修正を行なった。まず跳躍動作で

表13 手動デジタイジングの平均データと自動デジタイジングの修正データとの差 (跳躍動作) (横幅14.2cm)

Jump 01		AVE.	S.D.	MAX	MIN	Jump 02		AVE.	S.D.	MAX	MIN
01 頭頂	x	2.93	2.77	7.63	-5.81	01 頭頂	x	2.55	2.53	9.38	-4.88
	y	8.95	2.19	13.44	0.18		y	8.04	1.93	14.13	3.13
02 頭部中央	x	-4.70	1.40	-1.47	-8.33	02 頭部中央	x	-4.58	1.54	-1.08	-7.58
	y	2.64	2.85	7.90	-3.58		y	2.98	2.12	9.55	-1.42
03 右肩	x	-2.28	1.98	2.86	-6.33	03 右肩	x	-2.97	1.92	0.50	-8.33
	y	1.43	1.90	6.17	-2.83		y	1.05	1.59	4.58	-2.83
04 右肘	x	-0.65	2.11	5.13	-7.50	04 右肘	x	0.44	2.64	7.33	-4.17
	y	-0.11	3.09	14.50	-9.13		y	0.26	2.85	10.92	-6.92
05 右手首	x	0.56	2.44	7.50	-4.00	05 右手首	x	0.98	2.42	9.83	-3.92
	y	-1.10	2.69	13.83	-10.00		y	-1.94	3.55	7.33	-14.67
06 右大転子	x	2.31	2.10	8.00	-2.50	06 右大転子	x	2.28	2.06	7.67	-2.17
	y	-1.52	2.89	6.00	-7.13		y	-1.34	2.55	5.08	-9.17
07 右膝	x	0.61	1.67	3.88	-4.00	07 右膝	x	0.25	2.08	4.25	-5.63
	y	-1.94	1.41	1.93	-4.25		y	-2.09	1.38	2.63	-5.00
08 右足首	x	-0.39	0.89	1.63	-2.88	08 右足首	x	-0.15	1.13	2.25	-2.50
	y	0.20	1.53	4.25	-2.63		y	-0.88	2.29	3.13	-10.88
09 右つま先	x	-4.54	2.69	3.50	-6.38	09 右つま先	x	-4.89	4.41	6.88	-9.25
	y	-4.08	2.67	2.87	-22.38		y	-4.62	2.57	-2.63	-16.38

表14 手動デジタイジングの平均データと自動デジタイジングの修正データとの差（走動作）（横幅14.2cm）

Table 14 Difference between average manual digitizing data and corrected automatic digitizing data (running)

Run 01		AVE.	S.D.	MAX	MIN	Run 02		AVE.	S.D.	MAX	MIN
01 頭頂	x	6.48	1.07	9.33	3.75	01 頭頂	x	6.65	1.27	10.75	4.25
	y	5.78	0.91	8.13	3.08		y	4.88	1.06	7.13	2.88
02 頭部中央	x	-1.58	0.88	0.50	-3.56	02 頭部中央	x	-0.88	0.93	2.92	-2.92
	y	5.80	1.00	8.63	3.33		y	5.89	1.14	8.17	3.83
03 右肩	x	-1.08	1.67	2.42	-6.00	03 右肩	x	-1.54	1.70	4.00	-6.50
	y	2.20	1.15	4.50	-0.50		y	2.87	1.28	6.00	0.25
04 右肘	x	0.14	1.55	4.83	-2.92	04 右肘	x	0.45	1.46	5.17	-4.50
	y	0.31	1.89	5.92	-3.92		y	0.76	1.71	4.33	-4.17
05 右手首	x	-1.77	1.32	1.42	-4.83	05 右手首	x	-1.29	1.53	1.75	-4.75
	y	-0.85	1.23	2.67	-3.25		y	-1.28	1.58	2.00	-5.00
06 左肩	x	0.82	4.32	12.88	-7.63	06 左肩	x	-1.06	2.78	5.75	-5.75
	y	2.74	1.42	6.63	-0.63		y	2.31	1.29	5.25	-0.75
07 左肘	x	-0.53	3.43	7.83	-7.50	07 左肘	x	0.89	3.81	9.38	-5.33
	y	-0.81	1.75	3.25	-5.10		y	-0.40	3.08	7.59	-6.00
08 左手首	x	-0.91	2.06	4.88	-6.44	08 左手首	x	-0.71	2.71	11.13	-7.08
	y	-1.93	2.56	3.42	-8.81		y	-0.84	2.63	3.88	-9.92
09 右大転子	x	-0.22	3.09	6.83	-8.08	09 右大転子	x	-0.75	2.52	4.08	-6.00
	y	-2.04	2.33	2.58	-7.75		y	-0.73	1.93	3.69	-4.88
10 右膝	x	-1.53	1.91	3.33	-6.25	10 右膝	x	-1.73	1.80	3.60	-5.25
	y	-2.40	1.68	1.16	-6.63		y	-2.87	1.01	-0.25	-5.50
11 右足首	x	-0.88	1.65	2.33	-5.25	11 右足首	x	-1.04	1.38	1.33	-5.38
	y	-0.53	1.78	3.75	-4.92		y	-0.76	1.61	3.38	-3.88
12 右つま先	x	-1.35	5.49	9.08	-10.08	12 右つま先	x	-2.61	5.00	5.93	-10.25
	y	-2.72	2.35	1.92	-9.33		y	-2.38	2.84	3.06	-11.31
13 左大転子	x	-0.21	3.29	6.42	-7.33	13 左大転子	x	0.25	4.02	9.25	-8.13
	y	-2.27	1.86	0.92	-6.83		y	-2.21	2.10	2.00	-6.75
14 左膝	x	-1.45	2.16	3.46	-10.08	14 左膝	x	-1.09	2.08	7.13	-4.63
	y	-2.92	1.42	1.08	-6.25		y	-3.19	1.53	-0.38	-6.13
15 左足首	x	-1.82	1.64	4.13	-7.38	15 左足首	x	-1.63	1.48	2.17	-4.33
	y	-1.61	1.61	2.63	-5.38		y	-1.14	1.28	1.50	-3.67
16 左つま先	x	-1.61	4.29	7.08	-10.33	16 左つま先	x	0.35	3.61	6.75	-8.58
	y	-2.33	2.50	2.67	-7.28		y	-3.07	2.07	0.83	-8.63

修正した部分では修正した部分は、1試技目では自動デジタイズが行われなかったコマのみ11ポイントであり（修正率：1.22%）、2試技目では自動デジタイズが行われなかったコマも含めて7ポイントであった（修正率：0.78%）。この跳躍動作では、ICC (2, 1) が1試技目の右つま先の x 座標 (0.842) のみで低かったが、それ以外のポイントは、0.913以上で高い一致度であった。しかし、C.V. の平均値を見ると、両試技において、頭頂の y

座標、頭部中央の x 座標および右つま先の x 座標で高かった。特に1試技目の頭頂の y 座標および2試技目の右つま先の x 座標でそれぞれ0.025と0.030を示し、一致度が低かった。

次に走動作で修正した部分は、1試技目では自動デジタイズが行われなかったコマも含めて97ポイントであり（修正率：8.66%）、2試技目では自動デジタイズが行われなかったコマも含めて98ポイントであった（修正率：8.75%）。この走動作では、ICC (2, 1) が両

表15 手動デジタイジングの平均データと自動デジタイジングの修正データとの差（投動作）（横幅14.2cm）

Table 15 Difference between average manual digitizing data and corrected automatic digitizing data (throwing)

Throw 01		AVE.	S.D.	MAX	MIN	Throw 02		AVE.	S.D.	MAX	MIN
01 頭頂	x	4.70	1.50	9.08	0.92	01 頭頂	x	5.42	1.50	8.88	1.88
	y	6.79	1.02	10.25	4.75		y	5.77	1.38	8.13	2.80
02 頭部中央	x	1.70	2.42	7.42	-3.08	02 頭部中央	x	1.40	2.31	5.25	-3.88
	y	5.51	1.49	13.33	2.83		y	5.39	1.02	7.25	2.75
03 右肩	x	-0.65	2.20	6.63	-5.63	03 右肩	x	-0.09	1.76	5.13	-4.88
	y	0.90	1.53	3.45	-2.00		y	1.18	1.18	3.75	-1.38
04 右肘	x	-0.50	2.69	9.75	-4.50	04 右肘	x	-1.19	2.89	7.76	-5.75
	y	0.04	2.25	9.63	-4.63		y	-0.18	1.75	3.25	-3.75
05 右手首	x	-0.78	2.00	6.00	-4.75	05 右手首	x	-0.83	1.62	4.58	-4.50
	y	-0.14	2.05	3.25	-5.50		y	0.03	1.81	3.58	-4.75
06 左肩	x	-1.98	2.53	4.38	-8.13	06 左肩	x	0.52	3.61	10.00	-4.13
	y	-1.36	2.06	7.13	-6.00		y	-0.08	1.79	4.06	-3.77
07 左肘	x	-0.54	2.39	4.25	-7.01	07 左肘	x	-1.09	1.52	2.92	-4.75
	y	-2.27	1.86	1.71	-5.44		y	-2.53	1.58	0.75	-5.42
08 左手首	x	-0.24	2.15	5.00	-6.50	08 左手首	x	0.34	1.99	5.92	-5.58
	y	0.18	1.58	4.08	-5.08		y	1.32	1.61	4.67	-2.42
09 右大転子	x	1.37	1.88	7.75	-2.25	09 右大転子	x	1.03	1.89	7.33	-2.17
	y	-1.82	2.54	2.25	-6.92		y	-0.30	2.36	4.67	-4.67
10 右膝	x	0.87	1.05	4.00	-1.38	10 右膝	x	1.26	2.04	5.58	-3.33
	y	-2.39	1.29	0.55	-5.00		y	-2.81	1.93	1.42	-6.58
11 右足首	x	-0.24	0.96	2.88	-2.38	11 右足首	x	-0.09	1.01	2.42	-2.83
	y	-0.54	1.41	3.38	-3.38		y	-0.09	1.16	2.50	-2.50
12 右つま先	x	3.98	1.24	6.75	1.25	12 右つま先	x	3.33	1.11	5.83	0.90
	y	-3.38	1.91	0.47	-8.13		y	-2.11	2.55	1.92	-6.17
13 左大転子	x	-1.51	3.09	4.33	-7.58	13 左大転子	x	-0.49	2.57	5.83	-5.92
	y	-2.22	1.69	1.33	-7.00		y	-1.63	1.78	1.58	-5.28
14 左膝	x	-2.85	1.93	-0.50	-8.75	14 左膝	x	-2.18	1.70	0.42	-5.83
	y	-4.65	2.40	-1.15	-10.50		y	-4.17	1.40	-1.08	-7.33
15 左足首	x	-0.53	1.21	1.58	-3.50	15 左足首	x	-0.49	1.02	1.67	-2.92
	y	-1.24	0.86	1.00	-2.75		y	-0.79	0.87	0.92	-3.58
16 左つま先	x	-1.08	2.65	6.13	-6.75	16 左つま先	x	0.17	2.14	9.83	-4.92
	y	-2.53	1.22	0.24	-4.50		y	-1.84	0.62	-0.50	-4.08

試技において、頭頂(それぞれ、0.087と0.064)、頭部中央(それぞれ、0.131と0.105)、右大転子(それぞれ、0.368と0.447)および左大転子(それぞれ、0.398と0.227)のy座標で低かった。また両試技における右肩(それぞれ、0.804と0.752)および左肩(それぞれ、0.627と0.614)のy座標で低かった。それ以外のポイントでは、ICC(2, 1)は0.898以上と高い一致度であった。C.V.の平均値を見ると、両試技における頭頂のx座標(それぞれ、0.016と

0.015)、頭頂のy座標(それぞれ、0.019と0.016)および頭部中央のy座標(両試技とも、0.018)は高かった。

そして投動作で修正した部分は、本研究で用いた動作の中で最も多かった。1試技目では自動デジタイズが行われなかったコマはなかったが、183ポイントを修正し(修正率:13.62%)、2試技目では自動デジタイズが行われなかったコマも含めて267ポイントを修正した(修正率:21.39%)。この投動作を見

自動デジタイジングの精度

表16 手動デジタイジングの平均データと自動デジタイジングの修正データのICCとC.V.(跳躍動作)(横幅6.8cm)

Table 16 ICC and C.V. for Verification 3 (jumping)

		Jump 01		Jump 02	
		ICC	C.V.	ICC	C.V.
01 頭頂	x	0.990	0.012	0.992	0.010
	y	0.960	0.025	0.962	0.022
02 頭部中央	x	0.987	0.017	0.988	0.016
	y	0.992	0.009	0.991	0.009
03 右肩	x	0.996	0.010	0.995	0.011
	y	0.996	0.005	0.997	0.004
04 右肘	x	0.999	0.007	0.999	0.009
	y	0.996	0.006	0.997	0.005
05 右手首	x	0.999	0.009	0.996	0.011
	y	0.998	0.005	0.996	0.007
06 右大転子	x	0.997	0.012	0.998	0.010
	y	0.976	0.006	0.978	0.005
07 右膝	x	0.997	0.006	0.996	0.007
	y	0.974	0.004	0.962	0.004
08 右足首	x	0.998	0.004	0.998	0.005
	y	0.995	0.002	0.990	0.003
09 右つま先	x	0.842	0.024	0.854	0.030
	y	0.913	0.008	0.942	0.009

表17 手動デジタイジングの平均データと自動デジタイジングの修正データのICCとC.V.(走動作)(横幅6.8cm)

Table 17 ICC and C.V. for Verification 3 (running)

		Run 01		Run 02	
		ICC	C.V.	ICC	C.V.
01 頭頂	x	0.999	0.016	0.999	0.015
	y	0.087	0.019	0.064	0.016
02 頭部中央	x	1.000	0.003	1.000	0.002
	y	0.131	0.018	0.105	0.018
03 右肩	x	1.000	0.005	1.000	0.004
	y	0.804	0.006	0.752	0.008
04 右肘	x	1.000	0.003	1.000	0.003
	y	0.974	0.004	0.981	0.004
05 右手首	x	1.000	0.005	1.000	0.003
	y	0.996	0.003	0.994	0.004
06 左肩	x	0.999	0.007	1.000	0.006
	y	0.627	0.008	0.614	0.007
07 左肘	x	1.000	0.007	1.000	0.008
	y	0.965	0.004	0.910	0.006
08 左手首	x	1.000	0.005	1.000	0.004
	y	0.980	0.006	0.986	0.005
09 右大転子	x	1.000	0.006	1.000	0.004
	y	0.368	0.006	0.447	0.004
10 右膝	x	1.000	0.005	1.000	0.004
	y	0.921	0.005	0.898	0.006

11 右足首	x	1.000	0.005	1.000	0.003
	y	0.997	0.003	0.997	0.003
12 右つま先	x	0.999	0.017	0.999	0.012
	y	0.990	0.006	0.988	0.006
13 左大転子	x	1.000	0.007	1.000	0.007
	y	0.398	0.006	0.227	0.006
14 左膝	x	1.000	0.005	1.000	0.004
	y	0.925	0.006	0.898	0.007
15 左足首	x	1.000	0.005	1.000	0.005
	y	0.995	0.004	0.997	0.003
16 左つま先	x	1.000	0.011	1.000	0.009
	y	0.987	0.005	0.990	0.006

表18 手動デジタイジングの平均データと自動デジタイジングの修正データのICCとC.V.(投動作)(横幅6.8cm)

Table 18 ICC and C.V. for Verification 3 (throwing)

		Throw 01		Throw 02	
		ICC	C.V.	ICC	C.V.
01 頭頂	x	0.991	0.015	0.987	0.016
	y	0.408	0.020	0.411	0.017
02 頭部中央	x	0.997	0.009	0.997	0.008
	y	0.534	0.016	0.497	0.015
03 右肩	x	0.999	0.006	0.999	0.004
	y	0.838	0.004	0.846	0.004
04 右肘	x	0.999	0.007	0.999	0.009
	y	0.989	0.004	0.992	0.004
05 右手首	x	1.000	0.006	1.000	0.005
	y	0.998	0.005	0.997	0.004
06 左肩	x	0.993	0.009	0.991	0.008
	y	0.917	0.005	0.953	0.004
07 左肘	x	0.994	0.005	0.997	0.004
	y	0.988	0.006	0.988	0.006
08 左手首	x	0.998	0.005	0.998	0.004
	y	0.995	0.003	0.993	0.005
09 右大転子	x	0.997	0.005	0.997	0.005
	y	0.719	0.005	0.812	0.004
10 右膝	x	0.999	0.004	0.997	0.008
	y	0.904	0.005	0.764	0.006
11 右足首	x	0.998	0.003	0.998	0.003
	y	0.949	0.002	0.960	0.002
12 右つま先	x	0.975	0.017	0.981	0.015
	y	0.002	0.006	-0.179	0.005
13 左大転子	x	0.987	0.009	0.991	0.007
	y	0.903	0.005	0.894	0.004
14 左膝	x	0.995	0.008	0.995	0.006
	y	0.201	0.010	0.116	0.009
15 左足首	x	0.999	0.003	0.998	0.002
	y	0.877	0.002	0.873	0.002
16 左つま先	x	0.997	0.006	0.997	0.003
	y	0.868	0.005	0.884	0.003

ると、両試技における右つま先の y 座標（それぞれ、0.002と -0.179）で全く一致しなかった。また1試技目の頭頂（0.408）および左膝（0.201）の y 座標で、2試技目の頭頂（0.411）、頭部中央（0.497）および左膝（0.116）の y 座標で、ICC (2, 1) が低かった。そして1試技目の頭部中央、右肩および右大転子の y 座標、2試技目の右肩、右大転子および右膝の y 座標において、0.534-0.846の範囲で低い ICC (2, 1) を示した。C.V. の平均値では、両試技ともに頭頂の x 座標（それぞれ、0.015と0.016）、頭頂の y 座標（それぞれ、0.020と0.017）、頭部中央の y 座標（それぞれ、0.016と0.015）および右つま先の y 座標（それぞれ、0.017と0.015）で高い値を示した。それ以外のポイントでは、両試技ともに0.010以下の値を示した。

4. 考察

本研究は、自動デジタイジング機能を利用したデジタイジング座標値と、熟練分析者のデジタイジング座標値を級内相関係数および変動係数を用いて比較することによって、これらの精度について検証した。

検証1として行なった2名の熟練分析者によるデジタイジング座標値の比較を見ると、跳躍動作、走動作、そして投動作の順に一致度が低くなった。それに伴い、データ間の差は平均値で ± 7 pixel より小さく、差の最大値および最小値を ± 10 pixel を超えるデジタイズ項目も多くなった。跳躍動作では、右つま先の x 座標で ICC (2, 1) : 0.795 を示した以外では、0.850 を超えており、C.V. の平均値も0.025未満であったため、このような動作では5年以上経験した動作分析の研究者であれば、同じようなデジタイジングを行なうことが出来ると考えられる。次に左右の上下肢

がサイクリックな動きを行なう走動作では、C.V. の平均値では、全ポイントで0.015未満であり、一致度が高いと考えられるが、ICC で考えると、頭頂の y 座標の一致度が低く、左右の肩関節や股関節の y 座標値が0.85未満であったため、一致度が低かった。これらの4点は、体幹と四肢が繋がっている部分であるため、熟練分析者でもデジタイジングをする人によって上下方向（y 座標）で誤差が生じるポイントであると考えられた。そして、骨盤や体幹の回旋動作を伴う3次元的な動きの投動作を見ると、C.V. の平均値では0.025未満であり、全体的に低く一致度が高かったが、ICC では右つま先や右膝の y 座標で低く、走動作と同様に体幹と四肢が繋がっている左右の肩関節や股関節の y 座標で低い値を示した。それに加えて、頭頂および左足首の y 座標で低い値を示した。頭部も骨盤や体幹と同様に回転しており、頭頂は首の傾きなどを考慮すると頭部の一番高いポイントをデジタイジングするのではなく、一番高いポイントよりも低くデジタイジングする必要があるため、分析者によって異なると考えられる。また左足首の y 座標に違いが見られたことは左脚の動きが3次元的な動きかつシューズなどで隠れる局面もあったため、誤差が生じたと考えられた。これらのことから、投動作においては、多少の誤差はあるが、2名の熟練分析者のデジタイジング精度は一致度が高かったと考えられる。

次に検証2として、検証1の熟練分析者2名のデジタイジングデータを平均した d-ave データとマーカレス骨格検出ソフトウェアで自動デジタイズした P-Cap データの差（平均値、標準偏差、最大値および最小値）、ICC (2, 1) および C.V. を用いて、比較した。まず P-Cap データは、約1%以下でデジタイジングを行なわないポイントが出てくる。検

証2では、これらのポイントを除いて検証を行なった。まず跳躍動作では、2回の分析データにおける右つま先の x 座標で、データ間の差の最大値および最小値が ± 100 pixel 以上と大きく、ICC が低く (1試技目: 0.836、2試技目: 0.653)、そして C.V. の平均値も高かった (1試技目: 0.025、2試技目: 0.033)。次に走動作では、右つま先・左足首・左つま先の x 座標において、差の平均値で ± 10 pixel であり、同ポイントで C.V. の平均値も 0.030 以上と低い一致度であったが、これらの ICC は 0.942 以上と高い一致度を示した。この理由として、ICC は一致するデータが多いと高い値を示すが、差や C.V. の平均値は、70 フレームのデータを平均化したものであるため、たった 1 フレームでも誤差が大きいとこの平均値も大きな値を示すことになる。つまり、これらの 3 つのポイントにおいて、自動デジタイジングが数フレームで大きく外れたデジタイジングをしていたと考えられる。そして投動作では、走動作よりもさらに誤差が大きかった。右つま先および左つま先の x 座標において、差の平均値では ± 15 pixel よりも大きく、C.V. の平均値も 0.05 以上であり、ICC も低かった。走動作のような反対の結果は示さなかった。前述したように C.V. の平均値は 1 フレームでも差が大きいと大きな値を示すが、ICC は全体的な一致度を検証できるため、ICC において、一致度が低いと判定する 0.850 未満の項目を見ると、x・y 座標併せて、跳躍動作では 18 項目中 4 項目、走動作では 32 項目中 11 項目、そして投動作では 32 項目中 19 項目であった。x 座標よりも y 座標で一致しない項目が多かったから、このマーカレスの骨格検出ソフトウェアは、左右のズレよりも上下のズレの方が大きくなる傾向であると考えられる。また跳躍動作や走動作よりも投動作において (Table 13-15)、特に下肢

の関節運動の一致度が低かったことは、3次元的な動きのため、関節をうまく認識できないと考えられる。

最後に検証3として、P-Cap データを修正する場合、跳躍動作や走動作の2次元的な動作は修正率を見ると、走動作で 1 試技目: 8.66%、2 試技目: 8.75% であり、全体の最大 10% ほどのデータを修正する必要がある。の修正 P-Cap データと d-ave データの差 (平均値、標準偏差、最大値および最小値)、ICC (2, 1) および C.V. の平均値を用いて、比較した。まず跳躍動作において、頭頂の y 座標で、差の平均値が 8 pixel と大きく、C.V. の平均値も高かったが、ICC は両試技とも 0.960 以上であったため、全体的な一致度は高いにも関わらず、差の大きなポイントがあったと考えられる。また右つま先の x 座標で、差の平均値が ± 5 pixel 未満であったが、C.V. の平均値は高く、ICC も低かったことから、頭頂の y 座標や右つま先の x 座標では、2次元の動作であっても、精度が低くなる可能性が高いと考えられる。次に走動作では、頭頂の x・y 座標および頭部中央の y 座標で、差の平均値が 5 pixel 以上と大きく、C.V. の平均値は 0.015 以上で高かった。ICC は頭頂および頭部中央の y 座標で低かったが、頭頂の x 座標では 2 試技とも 0.999 と高かったことから、頭頂の x 座標では局所的に一致度が低く、頭頂および頭部中央の y 座標では全体的に一致度が低いと考えられる。その他のデジタイズポイントにおける C.V. の平均値はすべて 0.015 未満であったが、ICC では右肩・左肩の y 座標で 0.850 未満、右大転子・左大転子の y 座標で 0.500 未満と低い値であった。一方で、同ポイントの x 座標は ICC: 0.999 以上と高い一致度であった。つまり、これらのポイントにおいて、左右のズレは小さいにも関わらず、上下のズレは大きいことが明らか

となった。検証1において、2名の分析者間でこれらのポイントには差が見られていることから四肢が体幹につながる肩関節や股関節においては、誤差が生じやすいポイントであるため、修正する際に左右ではなく、特に上下のズレを確認しながら修正を行なう必要があると考えられる。最後に投動作では、走動作と同様に頭頂の x・y 座標および頭部中央の y 座標で、差の平均値が5 pixel 以上と大きく、C.V. の平均値は0.015以上で高かった。さらに ICC は頭頂および頭部中央の y 座標で、低かったが、頭頂の x 座標では2試技とも0.987と高かったことから、頭頂の x 座標では局所的に一致度が低く、頭頂および頭部中央の y 座標では全体的に一致度が低いと考えられる。また両試技の右つま先の y 座標で C.V. の平均値が0.005未満と低いにも関わらず、ICC は -0.064と -0.017で一致していなかった。そしてデータ間の差を見ても、最大および最小値において、 ± 10 pixel 以下であった。このことは、座標データのばらつき度の差が大きく、これらのデータが等分散になっていないことが原因と考えられる¹²⁾。また左膝の y 座標においても、C.V. の平均値が0.010以下にも関わらず、ICC は0.201 (1試技目)と0.116 (2試技目)と低かった。データ間の差の平均値 \pm 標準偏差を見ると、 -4.65 ± 2.40 pixel (1試技目)と -4.17 ± 1.40 pixel (2試技目)であり、最小値が -10.50 pixel (1試技目)と -7.33 pixel (2試技目)と高い差であった。この理由として、右投げの投動作における左膝は基本的に骨盤の回旋に伴って前額面での伸展位から屈曲しながら矢状面での動きに変化するため、関節中心の同定が難しいと考えられる。そのため本研究においても、同様の理由により、一致度が低かったと考えた。右肩および右大転子の y 座標における ICC が0.719-0.846の範囲で見られたことから、投

球側における肩関節および股関節の上下方向のズレを考慮して修正デジタイジングすることが必要である。

以上のことをまとめると、マーカレスの骨格検出ソフトウェアから得られた修正前のデジタイジングデータの精度としては低いが、走動作では10%程度、投動作では20%程度修正することで、一致するデータが得られると考えられた。手動デジタイジングのみで分析時間を考えると非効率であり、モーションキャプチャシステムのような0.017 mm 以下の精度を求めることはできないので、このようなマーカレスの骨格検出ソフトウェアを利用し、修正に配慮することで、分析可能な有効なデータとして利用できるのではないかと考えられる。

5. まとめ

本研究は、跳躍動作、走動作および投動作を対象動作として、マーカレスの骨格検出ソフトウェアにおける自動デジタイジング機能を利用したデジタイジングデータと熟練分析者による手動デジタイジングデータとを比較することで、デジタイジングデータの精度検証を行なった。その結果、修正前のデータでは分析は難しいが、手動デジタイジングで時間をかけて行うよりも自動デジタイジングにより得られたデータを修正することで、手動デジタイジングと同程度のデータを得られると考えられる。修正する際には四肢と体幹をつなぐ肩関節や股関節など修正に配慮することで、より精度の高いデータを得られることを考えるとこのソフトウェアを使うことは効率的にデータを分析できる可能性が高いと考えられた。

引用文献

- 1) Abdel-Aziz YI, Karara HM: Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. In: Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry. Falls Church, VA: American Society of Photogrammetry : 1-18, 1971.
- 2) Roger V. Bostelman, Tsai Hong Hong, Mili Shah, and Steven Legowik: Dynamic Metrology and ASTM E57.02 Dynamic Measurement Standard, Coordinate Metrology Society Conference (CMSC) 2016, Nashville, TN, [online], (https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=921298, 閲覧日 : 2021年8月27日)
- 3) Letter to the editor: ISB recommendation on definitions of joint coordinate system of various joint for the reporting of human joint motion-part I : ankle hip and spine, Journal of Biomechanics 35, 543-548, 2002.
- 4) Ge Wua, Frans C.T. van der Helmb, H.E.J. Veegerc,d, Mohsen Makhouse, Peter Van Royf, Carolyn Angling, Jochem Nagelsh, Andrew R. Kardunai, Kevin McQuadej, Xuguang Wangk, Frederick W. Wernerl, Bryan Buchholz: ISB recommendation on definitions of joint coordinate system of various joint for the reporting of human joint motion-Part 2_ shoulder, elbow, wrist, Journal of Biomechanics 38, 981-992, 2005.
- 5) 川澄裕一、宮岡伸一郎 : 個人利用を想定した簡易モーションキャプチャシステム、情報処理学会研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM)、99-106、2008.
- 6) 青木麟太郎、大村基将、紅林秀治: 簡易モーションキャプチャを取り入れた技能学習の提案、情報教育シンポジウム論文集、2014 (2)、185-188、2014
- 7) 香村恵介、安藤英俊、山北満哉、宮崎彰吾、安藤大輔、大岡忠生、山田悟史 : AI を活用した子どもの動作発達評価システムの開発、笹川スポーツ研究助成研究成果報告書、143-149、2019
- 8) 佐野典秀 : 簡易モーションキャプチャシステムを用いた人体動作の取込みについて、静岡産業大学情報学部研究紀要 14、231-241、2014
- 9) 紅林秀治、小林健太、兼宗進 : KINECT センサーを用いた簡易動作分析システムの開発、研究報告コンピュータと教育 (CE) 20、1-7、2013
- 10) Berger, K., Ruhl, K., Schroeder, Y., Brummer, C., Scholz, A., & Magnor, M. A. : Markerless motion capture using multiple color-depth sensors. In VMV, 317-324, 2011.
- 11) Knippenberg, E., Verbrugghe, J., Lamers, I., Palmaers, S., Timmermans, A., & Spooren, A. : Markerless motion capture systems as training device in neurological rehabilitation: a systematic review of their use, application, target population and efficacy, Journal of neuroengineering and rehabilitation 14 (1) , 1-11, 2017.
- 12) 対馬栄輝 : 信頼性指標としての級内相関係数、弘前大学医学部保健学科統計学資料、2010 (<https://personal.hs.hirosaki-u.ac.jp/pteiki/research/stat/icc.pdf>, 閲覧日 : 2021年8月30日)

