

3次元画像解析法で用いるスポーク型較正器の製作法

宮西 智久

Tomohisa Miyanishi: Construction of a Spoke Type Control Object for use in three-dimensional motion video analysis. Bulletin of Sendai University, 48 (2) : 59-67, March, 2017.

Abstract: In three-dimensional (3D) motion video analysis using the DLT method, we have to calculate eleven DLT parameters, which indicate the relationship between the real-life 3D coordinates of a measured point and the 2D coordinates of the point on the video image. For calculating these parameters, we must record on the video image more than six control points using at least two video cameras. The control points constitute a “control object”. The purpose of the present study was to describe a method for the construction of a convenient control object (called a “Spoke Type Control Object”) for use in 3D motion video analysis. This object consisted of an 18-sided polyhedron, 17 pipe rods and a tripod. Both the polyhedron and the pipe rods were made of stainless steel. Four ping-pong balls that constituted the control points of the DLT algorithm were attached to each pipe rod. The real-life 3D coordinates of the 68 ping-pong balls were measured three times by using a theodolite. The control object made in the present study could be a useful tool in terms of both convenience and versatility for 3D motion video analysis related to sport biomechanics study.

Key words: convenience, versatility, DLT method, control point, sport biomechanics

キーワード: 利便性, 汎用性, DLT法, コントロールポイント, スポーツバイオメカニクス

1. はじめに

画像を用いて身体運動の3次元画像解析を行うためには、身体各標点の3次元位置座標を求めなければならない。このために、一般にDLT法(Direct Linear Transformation method)^{1,4)}と呼ばれる手法が用いられることが多い。DLT法は、2台以上のカメラを使い、実空間座標が既知な6個の点(コントロールポイント等と呼ぶ)とその点のビデオ画面上の2次元座標から、実空間の点とビデオ画面上の点との関係を表す11個のカメラ定数(DLTパラメータとも呼ぶ)を求める方法である。ただし、コントロールポイントは、実際には測定誤

差等の影響を抑えるため6個以上の点を用いられる。

このように、DLT法を用いて3次元画像解析を行うためには、実空間座標が既知な6個以上のコントロールポイントを各カメラで撮影しなければならない。通常、スポーツの動作は広範囲に及ぶため、コントロールポイントの撮影は、屋外競技場のタータンや体育館の床面など水平であると想定される面にあらかじめ各点の距離が既知の目印を複数箇所付け、その目印上にコントロールポイント(例、白球)を取り付けたポールなどを順次垂直に立てて各カメラで撮影する方法を採ることが多い^{5,6)}。しかしながら、この較正法は、経験上、①長時間を要す

る、②測定誤差が比較的大きい、③不整地では使用できない、などの難点があると考えられる。これらの難点を解決する較正法として、複数点のコントロールポイントを取り付けたオブジェクト（コントロールオブジェクト）を撮影場所に設置してカメラで全ポイントを同時一括撮影する方法がある。しかし、この較正器は利便性が高いものの、広範囲に及ぶスポーツ動作の解析のため、オブジェクト自体が大規模になることに加え、収納場所も確保せねばならず、また品質の精度保証や耐久性も要求されるなどのため、費用対需要の関係により市販化・量産化されていないのが現状である。

本研究では、簡便で汎用性の高い組立式のスポーク型コントロールオブジェクト（「スポーク型較正器」と呼称する）^{注1}の製作の一例について詳述することを目的とした。

2. 方法

2.1 スポーク型較正器の製作

スポーク型較正器（以下、「較正器」と記す）は、18面から成る多面体（三脚連結金具含む）1個、パイプロッド部材17本と三脚1台から構成されている（写真1：実物写真）。写真1に示すように、本較正器はパイプロッド1本につき4個の卓球ボール（以下、「白球」とも呼ぶ）が取り付けられているため、合計68個の白球をもつ放射状のフレームである。図1に較正器の組立図面（注意：パイプロッド1本のみ

の連結図）を示す。多面体（三脚連結金具含む）の重量は1.81 kg、パイプロッド17本の重量は7.14 kg (0.42 kg/本)、白球68個の重量は約0.18 kg (2.7 g/個)であり、較正器全体の総重量は約9.13 kgであった。

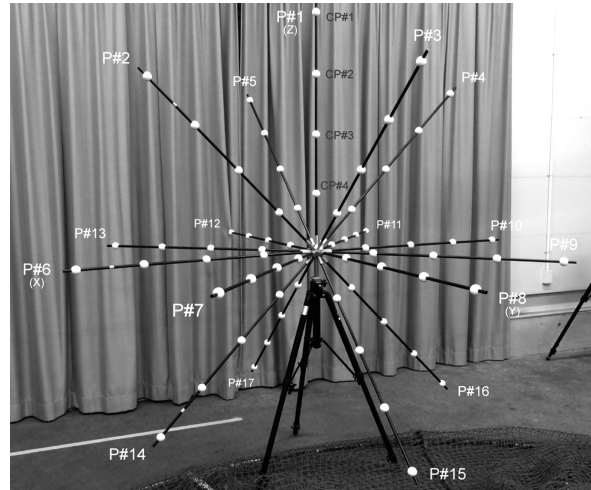


写真1 スポーク型較正器

2.1.1 多面体

多面体と三脚連結金具の図面をそれぞれ図2と図3に、実物外形写真を写真2に示す。多面体（(株) ディケイエイチ）はそれ自体の強度保証とパイプロッド取り付け時のねじ部の摩耗を抑えるためにステンレス鋼（材質 SUS303）を使用し製作した。具体的には、多面体は70 mmの角材からマニシングセンサ（ヤマザキマザック（株））を使用して18面体に削り出

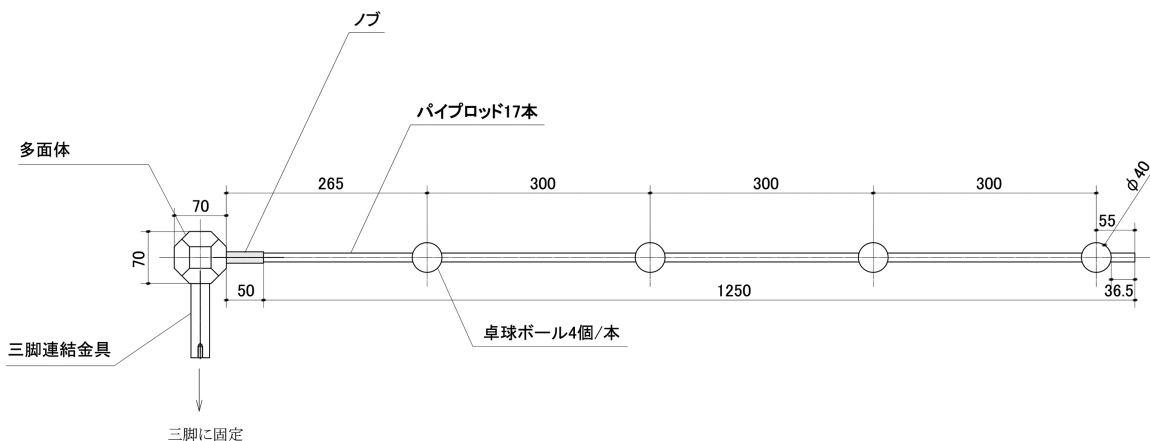


図1 スポーク型較正器の組立図面

し、その後各面の中心部に M12 (P=1.75) で深さ 18 mm のタップを 18 個切って加工した。加工の際、特に水平面から 45° の角度に削り出した上下斜め方向の 8 面と各面中心部のねじ穴角度精度が重要である。三脚連結金具は旋盤 (SL100, DMG 森精機 (株)) を用いて切削加工した。

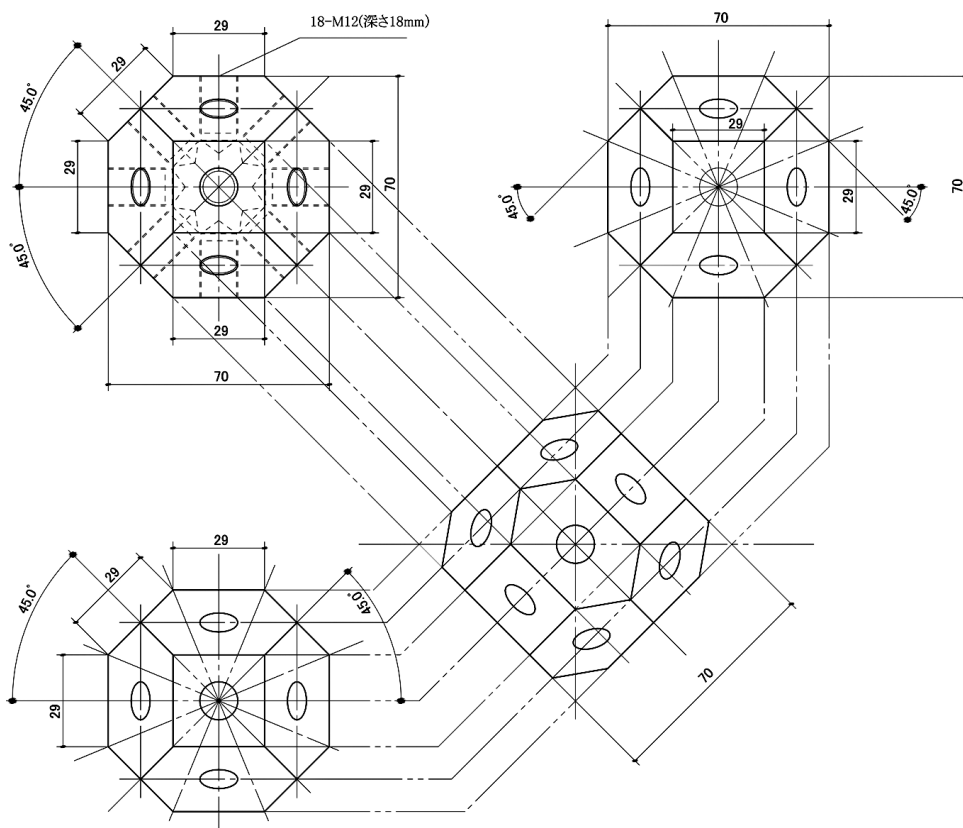


図2 多面体図面

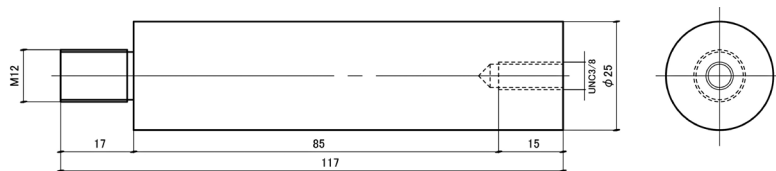


図3 三脚連結金具図面

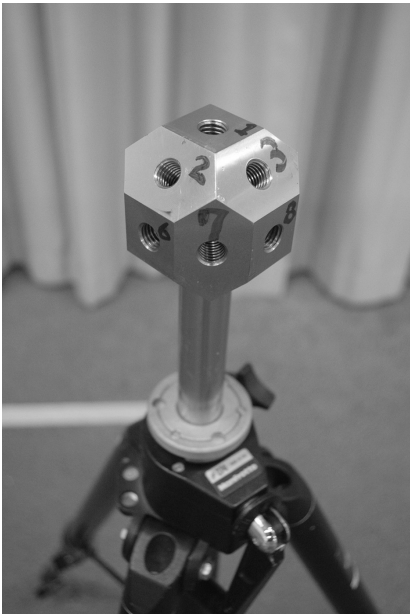


写真2 多面体と三脚連結金具（実物）

(1) 卓球ボールの穴あけとパイプロッドへの取り付け

コントロールポイントとなる白球はニッタク社の練習用卓球ボール（NB1367：直径 40 mm, 重量 2.7 g）を使用した（写真4）。卓球ボールの穴あけとパイプロッドへの取り付け方を、以下順を追って説明する。



写真4 卓球ボール

2.1.2 パイプロッド

パイプロッドの図面を図4に、実物外形写真を写真3に示す。パイプロッド部材（工製作所（株））は多面体と同様にステンレス鋼（材質 SUS303）を使用した。パイプロッド長は1220 mm（ねじ部除く）、直径（外径）13 mm、内径11 mmである。多面体に取り付けるパイプロッド端は長さ50 mm、直径18 mmの菱目ローレット加工を施したノブをロックタイトで圧入固定した。多面体に取り付けるねじ部（インチねじ使用：3/8w16）の長さは17 mmであり、M12（P=1.75）で15 mmのタップを切った。

- ①木工用ドリルで30 mmの穴をあけた木片を卓上ボール盤（リョービ社 TB-2131）のバイスセットに固定し、その上に卓球ボールを置き、卓球ボールの頂点にドリルの先端が落ちるように微調整し固定した（写真5）。

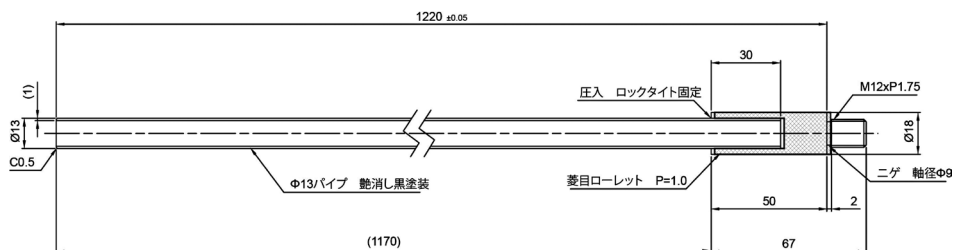


図4 パイプロッド図面

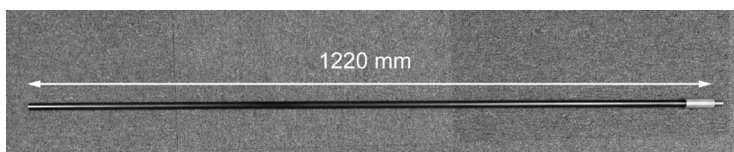


写真3 パイプロッド（実物）



写真5 卓上ボール盤に固定された穴あけ用の木片台

- ②卓上ボール盤の回転数を 3000 min^{-1} に設定し、ドリルの刃を 12 mm の木工用ドリルに取り替え、左手でボールを保持しながら右手を使い手動で穴をあけた。
- ③穴の直径をパイロッドの直径 13 mm にするためにリーマーを使い微調整した(写真6)。
- ④パイロッド1本に取り付ける卓球ボール数は4個であり、多面体の中心からそれぞれ 300 mm, 600 mm, 900 mm, 1200 mm の間隔で取り付けた。このためにまずパイロッドよりもやや長いLアングルを用意した。ドリルで穴をあけた卓球ボールの直径は 37 mm であり、半径は 18.5 mm であったため、写真7に示すように、パイロッドノブ端 (50 mm の位置) から各卓球ボールの多面体側の縁までの距離はそ

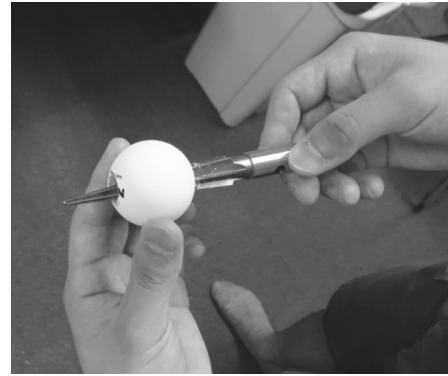


写真6 リーマーを使った穴の直径の微調整

れぞれ 196.5 mm, 496.5 mm, 796.5 mm, 1096.5 mm であった。Lアングルの端にパイロッドノブ端 (50 mm の位置) を引っ掛け固定し、Lアングルの端からそれぞれの距離を定規で測りマジックでその位置に印を付けた後、その印を基準にパイロッド上にマジックで印を付けた。最後に、パイロッドに穴をあけた卓球ボールを通し、多面体に近い卓球ボールからそれぞれマジックで印を付けた位置に卓球ボールの縁を順番に合わせ、接着剤 (CA-186, セメダイン (株)) を用いて固定した。

2.2 コントロールポイントの3次元座標の測量および誤差算出

2.2.1 3次元座標の測量

較正器の製作の完成後、較正器を組み立て、17本のパイロッドに取り付けた計68個の白球中心点の3次元座標を、セオドライト (レーザー測量器) を用いて測量した。なお、本研究

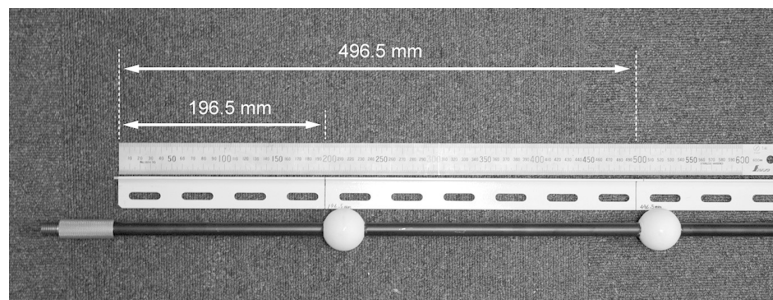


写真7 Lアングルを使ったパイロッドへの卓球ボールの取り付け方

で使用したセオドライト (GPT-3005WF, (株) トプコン) (写真 8) はパルス方式を採用し, 望遠鏡倍率 30 倍, 測距角精度 5 秒, 測距範囲 3000 m, 測距精度 $\pm (2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm} \times D)$ m.s.e. (D は測定距離, 単位は m である) の性能を有する.



写真 8 コントロールポイントの 3 次元座標値の測
量のために使用したセオドライト (GPT-
3005WF, (株) トプコン)

具体的には, 較正器およびセオドライトを三脚に取り付け, 約 5 m の距離をあけて 2 台を設置した後, セオドライトから 14 本のパイプロッドに取り付けた 56 個の白球が重複せず全て見えるように較正器の位置や向きを調整した. 次に, これらの白球の表面に粘着式反射シート (TT-S20, (株) マイゾックス) を貼付した. また, 後方交会法 (backward intersection)⁷⁾ を使用するため, 側壁の任意の箇所に基準点として反射シートを複数貼り付けた. 貼付終了後, セオドライトの設置ならびに設定 (プリズムモード, プリズム定数 20 mm 等) を完了し, 白球中心点を視準しその 3 次元座標の測量を行った^{注 2)}. 測量終了後, 同様の手順により, 残りのパイプロッド 3 本に取り付けた 12 個の白球が重複せず全て見える別の箇所にセオドライトを移動・設置し, 白球中心点を視準しその

3 次元座標の測量を行った. なお, 較正器のコントロールポイントの測量は日と設置場所を変えて 3 回実施した.

2.2.2 3次元座標の誤差算出

較正器座標系の原点を基準とした 68 個の白球中心点の 3 次元座標 (図面值) に対する測量された全白球中心点の 3 次元座標の実測値との差分 (誤差) を算出した. 本研究では以下の手順により行った.

- ①較正器の多面体中心座標 (原点: X_0, Y_0, Z_0) を算出した. 具体的には, 原点となる多面体中心座標は直接測定できないため, 各パイプロッドの最外側点 (CP#1:写真 1) の座標から最内側点 (CP#4) の座標を結ぶベクトルを中心への長さ分 (35 mm) 延長した座標点を求め, これを 17 本分平均して算出した.
- ②測量された全 68 点の座標から多面体中心座標 (原点座標) を引き, 多面体中心を原点とした座標系へ変換した.
- ③さらにこれらの座標を, 以下の式 (1) を用いて各軸まわりに順次回転させ, 写真 1 に示すように, 水平方向の 8 本のうち P#6 と P#8 のパイプロッドをそれぞれ X 軸と Y 軸, 鉛直方向を示す P#1 のパイプロッドを Z 軸となるように一致させた.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R(\theta) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで, $R=(\theta)$ は回転行列³⁾ であり, 各軸につきそれぞれ以下の行列式を示す.

$$R_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}$$

$$R_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}$$

$$R_z(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- ④図面值から回転後の全68点の座標値を引くことで差分を求めた。

3. 結果

3.1 コントロールポイントの3次元座標の実測値

表1は、68個のコントロールポイント（卓球ボール中心座標）の図面值、測量3回の実測値、そして平均値±標準偏差を座標成分毎に示したものである。

4. 考察

4.1 コントロールポイントの3次元座標の誤差と較正作業の付記事項

表1に示したように、68個のコントロールポイントの図面值と測量3回の実測値は一致していない。この理由は、較正器自体（多面体およびパイプロッド）の製作精度によるものだが、その他に以下の取り付け誤差、測量時の器械誤差ならびに個人誤差、計算誤差、測量器の性能などの影響を受けているからである。

- ①パイプロッドへの卓球ボールの取り付け誤差
- ②器械誤差（視準軸誤差、偏心誤差など）
- ③個人誤差（据え付け誤差、視準誤差など）
- ④多面体中心座標（原点座標）の計算誤差
- ⑤セオドライトの性能（測量精度）

本較正器の使用（実験時の較正作業）にあたって、較正器の座標系を、例えば、地面などの解析の基準となる面に設定された静止座標系に一致させる方法について付記しておく。較正器の座標系を各実験においてその都度地面等に設定される静止座標系に一致させることは不可能に近く、現実的ではない。このため、較正器の設置はカメラの設置に依存させることなく自由に設置し、複数のカメラから多くのコントロールポイント（測定誤差を抑えるため40点以上）が画像から確認できるように較正器の向きや傾きを調整する。この状態では、較正器の座標系が設定しようとする静止座標系に一致していな

いため、基準となる面（地面や体育館の床面など）にリファレンスマーカーを最低3点（原点となる1点含む）設置する。このマーカーを利用して、静止座標系（較正器の座標系から求められた座標系）を設定した後、この静止座標系に較正器の座標系を回転行列により一致させるという方法を採用することになる。

5. まとめ

本研究では、スポーツにおける3次元画像解析に伴う較正作業を簡便かつ迅速に実施するために、利便性および汎用性の高いスポーク型較正器の製作の一例について記載した。本研究の方法において製作されたスポーク型較正器はスポーツ動作の3次元画像解析における較正作業を簡便かつ迅速に行うために有用なツールとなるものであろう。

表1 スポーク型較正器に取り付けた68個のコントロールポイントの3次元座標の図面值(Planned), 実測値(Measured: 3回) および平均値±標準偏差

P#-CP#	Planned values			Measured values at 1st			Measured values at 2nd			Measured values at 3rd			M±SD		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
P1-1	0.0000	0.0000	1.2000	0.0000	0.0000	1.2007	0.0000	0.0000	1.2000	0.0000	0.0000	1.2010	0.0000±0.0000	0.0000±0.0000	1.2006±0.0005
P1-2	0.0000	0.0000	0.9000	0.0001	0.0007	0.9007	-0.0008	0.0007	0.9000	-0.0006	0.0014	0.8990	-0.0004±0.0005	0.0009±0.0004	0.8999±0.0009
P1-3	0.0000	0.0000	0.6000	-0.0002	0.0000	0.5997	-0.0002	0.0012	0.6000	-0.0001	0.0011	0.5990	-0.0002±0.0001	0.0008±0.0007	0.5996±0.0005
P1-4	0.0000	0.0000	0.3000	0.0003	-0.0002	0.2987	-0.0004	0.0011	0.2980	-0.0004	0.0003	0.2980	-0.0002±0.0004	0.0004±0.0006	0.2982±0.0004
P2-1	0.8485	0.0000	0.8485	0.8583	0.0000	0.8392	0.8572	0.0000	0.8384	0.8569	0.0000	0.8390	0.8575±0.0008	0.0000±0.0000	0.8389±0.0004
P2-2	0.6364	0.0000	0.6364	0.6426	-0.0003	0.6291	0.6412	0.0007	0.6286	0.6419	0.0003	0.6293	0.6419±0.0007	0.0003±0.0005	0.6290±0.0004
P2-3	0.4243	0.0000	0.4243	0.4287	0.0005	0.4190	0.4272	0.0003	0.4187	0.4266	-0.0007	0.4195	0.4275±0.0011	0.0000±0.0006	0.4191±0.0004
P2-4	0.2121	0.0000	0.2121	0.2130	0.0002	0.2099	0.2126	0.0008	0.2098	0.2121	-0.0012	0.2097	0.2126±0.0005	-0.0001±0.0010	0.2098±0.0001
P3-1	0.0000	0.8485	0.8485	0.0060	0.8549	0.8444	0.0058	0.8538	0.8431	0.0051	0.8556	0.8432	0.0057±0.0005	0.8548±0.0009	0.8435±0.0007
P3-2	0.0000	0.6364	0.6364	0.0047	0.6411	0.6354	0.0050	0.6412	0.6323	0.0037	0.6415	0.6334	0.0045±0.0007	0.6413±0.0002	0.6337±0.0016
P3-3	0.0000	0.4243	0.4243	0.0030	0.4281	0.4225	0.0040	0.4272	0.4216	0.0033	0.4259	0.4216	0.0034±0.0005	0.4271±0.0012	0.4213±0.0006
P3-4	0.0000	0.2121	0.2121	0.0017	0.2143	0.2116	0.0016	0.2134	0.2108	0.0018	0.2118	0.2108	0.0017±0.0001	0.2132±0.0013	0.2111±0.0005
P4-1	-0.8485	0.0000	0.8485	-0.8535	0.0068	0.8442	-0.8526	0.0054	0.8436	-0.8544	0.0096	0.8431	-0.8535±0.0009	0.0073±0.0021	-0.8445±0.0005
P4-2	-0.6364	0.0000	0.6364	-0.6398	0.0048	0.6343	-0.6391	0.0048	0.6335	-0.6404	0.0075	0.6338	-0.6398±0.0006	0.0057±0.0015	-0.6339±0.0004
P4-3	-0.4243	0.0000	0.4243	-0.4257	0.0042	0.4225	-0.4259	0.0031	0.4213	-0.4258	0.0045	0.4216	-0.4258±0.0001	0.0039±0.0008	-0.4218±0.0006
P4-4	-0.2121	0.0000	0.2121	-0.2119	0.0022	0.2116	-0.2118	0.0018	0.2112	-0.2131	0.0027	0.2113	-0.2123±0.0007	-0.0023±0.0004	-0.2113±0.0002
P5-1	0.0000	-0.8485	0.8485	0.0007	-0.8493	0.8471	0.0009	-0.8481	0.8479	-0.0001	-0.8480	0.8470	0.0005±0.0006	-0.8485±0.0007	0.8473±0.0005
P5-2	0.0000	-0.6364	0.6364	0.0009	-0.6373	0.6340	0.0004	-0.6369	0.6347	-0.0011	-0.6354	0.6347	0.0001±0.0010	-0.6365±0.0010	0.6345±0.0004
P5-3	0.0000	-0.4243	0.4243	0.0009	-0.4230	0.4229	0.0003	-0.4229	0.4225	0.0000	-0.4240	0.4235	0.0004±0.0005	-0.4233±0.0006	0.4229±0.0005
P5-4	0.0000	-0.2121	0.2121	-0.0006	-0.2120	0.2108	-0.0003	-0.2116	0.2102	-0.0001	-0.2109	0.2112	-0.0003±0.0003	-0.2115±0.0006	0.2108±0.0005
P6-1	1.2000	0.0000	0.0000	1.2009	-0.0056	-0.0105	1.2007	-0.0050	-0.0102	1.2005	-0.0053	-0.0108	1.2007±0.0002	-0.0053±0.0003	-0.0105±0.0003
P6-2	0.9000	0.0000	0.0000	0.9009	-0.0037	-0.0067	0.9003	-0.0030	-0.0074	0.9010	-0.0039	-0.0079	0.9007±0.0004	-0.0036±0.0005	-0.0073±0.0006
P6-3	0.6000	0.0000	0.0000	0.5996	-0.0037	-0.0049	0.5997	-0.0023	-0.0046	0.5992	-0.0028	-0.0039	0.5995±0.0003	-0.0029±0.0007	-0.0045±0.0005
P6-4	0.3000	0.0000	0.0000	0.2991	-0.0010	-0.0041	0.2998	-0.0011	-0.0038	0.2996	-0.0014	-0.0030	0.2995±0.0004	-0.0011±0.0002	-0.0036±0.0006
P7-1	0.8485	0.8485	0.0000	0.8553	0.8425	-0.0121	0.8548	0.8435	-0.0115	0.8552	0.8419	-0.0120	0.8551±0.0003	0.8426±0.0008	-0.0119±0.0003
P7-2	0.6364	0.6364	0.0000	0.6415	0.6326	-0.0081	0.6407	0.6327	-0.0071	0.6416	0.6325	-0.0085	0.6413±0.0005	0.6329±0.0001	-0.0079±0.0007
P7-3	0.4243	0.4243	0.0000	0.4274	0.4213	-0.0062	0.4281	0.4217	-0.0058	0.4278	0.4217	-0.0060	0.4278±0.0003	0.4215±0.0002	-0.0060±0.0002
P7-4	0.2121	0.2121	0.0000	0.2137	0.2114	-0.0022	0.2140	0.2109	-0.0024	0.2139	0.2108	-0.0025	0.2139±0.0002	0.2110±0.0003	-0.0024±0.0001
P8-1	0.0000	1.2000	0.0000	0.0029	1.2013	-0.0124	0.0030	1.2005	-0.0103	0.0056	1.2005	-0.0120	0.0038±0.0015	1.2008±0.0005	-0.0116±0.0011
P8-2	0.0000	0.9000	0.0000	0.0029	0.9000	-0.0089	0.0032	0.9004	-0.0070	0.0041	0.9009	-0.0075	0.0034±0.0006	0.9005±0.0005	-0.0078±0.0010
P8-3	0.0000	0.6000	0.0000	0.0006	0.6009	-0.0054	-0.0001	0.6016	-0.0027	0.0024	0.6000	-0.0050	0.0010±0.0013	0.6008±0.0008	-0.0043±0.0015
P8-4	0.0000	0.3000	0.0000	0.0019	0.2992	-0.0028	0.0007	0.3008	-0.0013	0.0018	0.3010	-0.0035	0.0015±0.0007	0.3003±0.0010	-0.0025±0.0011
P9-1	-0.8485	0.8485	0.0000	-0.8515	0.8464	-0.0081	-0.8518	0.8462	-0.0073	-0.8516	0.8485	-0.0079	-0.8517±0.0002	0.8470±0.0013	-0.0078±0.0004
P9-2	-0.6364	0.6364	0.0000	-0.6376	0.6338	-0.0059	-0.6367	0.6329	-0.0052	-0.6364	0.6352	-0.0060	-0.6369±0.0006	0.6340±0.0012	-0.0057±0.0004
P9-3	-0.4243	0.4243	0.0000	-0.4251	0.4237	-0.0037	-0.4252	0.4231	-0.0042	-0.4245	0.4233	-0.0040	-0.4250±0.0004	0.4234±0.0003	-0.0039±0.0002
P9-4	-0.2121	0.2121	0.0000	-0.2130	0.2123	-0.0025	-0.2112	0.2114	-0.0021	-0.2118	0.2119	-0.0030	-0.2120±0.0009	0.2119±0.0005	-0.0043±0.0003
P10-1	-1.2000	0.0000	0.0000	-1.2018	0.0035	-0.0030	-1.1997	0.0023	-0.0028	-1.1998	0.0046	-0.0032	-1.2004±0.0012	0.0035±0.0012	-0.0030±0.0002
P10-2	-0.9000	0.0000	0.0000	-0.9017	0.0016	-0.0018	-0.8999	0.0011	-0.0016	-0.9005	0.0018	-0.0021	-0.9007±0.0009	0.0015±0.0004	-0.0019±0.0003
P10-3	-0.6000	0.0000	0.0000	-0.6013	0.0011	0.0004	-0.5993	0.0004	-0.0004	-0.6007	0.0018	-0.0011	-0.6004±0.0010	0.0011±0.0007	-0.0004±0.0007
P10-4	-0.3000	0.0000	0.0000	-0.3004	-0.0003	-0.0005	-0.2989	-0.0016	-0.0002	-0.3003	0.0009	-0.0011	-0.2999±0.0009	-0.0003±0.0012	-0.0006±0.0004
P11-1	-0.8485	-0.8485	0.0000	-0.8540	-0.8424	-0.0005	-0.8535	-0.8448	-0.0005	-0.8540	-0.8418	-0.0010	-0.8542±0.0008	-0.8430±0.0016	-0.0003±0.0008
P11-2	-0.6364	-0.6364	0.0000	-0.6398	-0.6310	-0.0004	-0.6407	-0.6324	0.0001	-0.6412	-0.6310	-0.0005	-0.6406±0.0007	-0.6315±0.0008	-0.0003±0.0004
P11-3	-0.4243	-0.4243	0.0000	-0.4261	-0.4211	-0.0004	-0.4267	-0.4216	0.0008	-0.4260	-0.4205	0.0010	-0.4262±0.0004	-0.4211±0.0006	-0.0005±0.0007
P11-4	-0.2121	-0.2121	0.0000	-0.2124	-0.2111	-0.0003	-0.2126	-0.2108	0.0014	-0.2129	-0.2103	0.0005	-0.2126±0.0003	-0.2107±0.0005	0.0005±0.0009
P12-1	0.0000	-1.2000	0.0000	-0.0044	-1.2004	0.0019	-0.0044	-1.1999	0.0013	-0.0040	-1.2007	0.0010	-0.0042±0.0002	-1.2003±0.0004	0.0014±0.0005
P12-2	0.0000	-0.9000	0.0000	-0.0025	-0.9003	0.0003	-0.0045	-0.8999	0.0010	-0.0037	-0.8995	-0.0005	-0.0036±0.0010	-0.8999±0.0004	0.0003±0.0007
P12-3	0.0000	-0.6000	0.0000	-0.0015	-0.6008	-0.0002	-0.0033	-0.6001	0.0016	-0.0017	-0.6008	0.0000	-0.0022±0.0010	-0.6005±0.0004	0.0005±0.0010
P12-4	0.0000	-0.3000	0.0000	-0.0023	-0.3000	-0.0007	-0.0012	-0.2997	0.0003	0.0000	-0.2998	-0.0005	-0.0012±0.0012	-0.2998±0.0002	-0.0003±0.0006
P13-1	0.8485	-0.8485	0.0000	0.8484	-0.8487	-0.0074	0.8495	-0.8477	-0.0067	0.8474	-0.8489	-0.0071	0.8484±0.0010	-0.8484±0.0007	-0.0071±0.0004
P13-2	0.6364	-0.6364	0.0000	0.6364	-0.6373	-0.0056	0.6377	-0.6356	-0.0048	0.6377	-0.6368	-0.0051	0.6372±0.0008	-0.6366±0.0009	-0.0052±0.0004
P13-3	0.4243	-0.4243	0.0000	0.4243	-0.4259	-0.0038	0.4250	-0.4242	-0.0028	0.4244	-0.4246	-0.0031	0.4246±0.0004	-0.4249±0.0009	-0.0032±0.0005
P13-4	0.2121	-0.2121	0.0000	0.2117	-0.2136	-0.0021	0.2124	-0.2127	-0.0019	0.2117	-0.2133	-0.0020	0.2119±0.0004	-0.2132±0.0005	-0.0020±0.0001
P14-1	0.8485	0.0000	-0.8485	0.8516	-0.0050	-0.8478	0.8506	-0.0040	-0.8466	0.8509	-0.0005	-0.8481	0.8511±0.0005	-0.0050±0.0010	-0.8475±0.0008
P14-2	0.6364	0.0000	-0.6364	0.6402	-0.0051	-0.6349	0.6393	-0.0052	-0.6345	0.6389	-0.0050	-0.6358	0.6391±0.0010	-0.0051±0.0001	-0.6351±0.0007
P14-3	0.4243	0.0000	-0.4243	0.4265	-0.0031	-0.4250	0.4265	-0.0036	-0.4233	0.4265	-0.0017	-0.4235	0.4265±0.0000	-0.0028±0.0009	-0.4240±0.0009
P14-4	0.2121	0.0000	-0.2121	0.2141	-0.0015	-0.2131	0.2147	-0.0019	-0.2121	0.2152	-0.0002	-0.2133	0.2147±0.0005	-0.0012±0.0009	-0.2129±0.0006
P15-1	0.0000	0.8485	-0.8485	-0.0016	0.8390	-0.8586	-0.0014	0.8406	-0.8579	-0.0005	0.8403	-0.8591	-0.0012±0.0006	0.8400±0.0008	-0.8585±0.0006
P15-2	0.0000	0.6364	-0.6364	-0.0019	0.6293	-0.6435	-0.0007	0.6308	-0.6417	0.0007	0.6291	-0.6448	-0.0006±0.0013	0.6297±0.0009	-0.6433±0.0016
P15-3	0.0000	0.4243	-0.4243	-0.0013	0.4200	-0.4294	-0.0019	0.4220	-0.4285	0.0002	0.4204	-0.4295	-0.0010±0.0011	0.4208±0.0011	-0.4291±0.0006
P15-4	0.0000	0.2121	-0.2121	0.0003	0.2090	-0.2154	0.0001	0.2106	-0.2142	0.0003	0.2109	-0.2163	0.0002±0.0001	0.2101±0.0011	-0.2153±0.0010
P16-1	-0.8485	0.0000	-0.8485	-0.8511											

謝辞

スポーク型較正器の製作ならびに測量作業にあたり、本学の戸来敦大さん、小坂寛人さんをはじめスポーツバイオメカニクス研究室所属の学生の皆さんにご協力頂きました。また、測量法の技術的アドバイスについて、鹿島建設株式会社仙台営業所の森憲康氏ならびに株式会社センソクの鈴木拓真氏にご指導を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

本研究はJSPS 科研費（課題番号 16H03235, 研究代表者 宮西智久）の助成を受けたものです。

文献

- 1) Abdel-Aziz, Y.I., and Karara, H.M. (1971) Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. In: ASP UI Symposium on Close-Range Photogrammetry, Am. Soc. Photogram.: Falls Church, VA, pp.1 - 19.
- 2) Dapena, J. (2016) Personal communication.
- 3) 広瀬茂男 (2001) ロボット工学 (改訂版). 裳華房, 東京.
- 4) 池上康男 (1983) 写真撮影による運動の3次元解析法. J.J.Sports Sci., 2: 163-170.
- 5) 株式会社ディケイエイチ (2015) Frame-DIAS V 取扱説明書 (1.36) & 補足説明書.
- 6) 宮西智久・藤井範久・阿江通良・功力靖雄・岡田守彦 (1995) 大学野球選手における速投および遠投動作の3次元比較研究. 体育学研究, 40: 89 - 103.
- 7) 大木正喜 (2015) 測量学 (第2版). 森北出版, 東京.

(2016年11月25日受付)
(2017年2月1日受理)

