

バレーボールコート内の既知点を用いた3次元座標空間の再構築方法の精度とその特徴

中井 聖¹⁾, 村本 名史²⁾, 栗田 泰成²⁾, 高根 信吾²⁾, 瀧澤 寛路²⁾, 塚本 博之³⁾, 河合 学⁴⁾

Accuracy and characteristics of the method for three-dimensional space reconstruction using already-known points in a volleyball court

Akira Nakai¹⁾, Morifumi Muramoto²⁾, Yasunari Kurita²⁾, Shingo Takane²⁾, Hiromitsu Takizawa²⁾, Hiroyuki Tsukamoto³⁾, Manabu Kawai⁴⁾

Abstract

The aims of the present investigation were: (a) to develop the method for three-dimensional space reconstruction using the simplified calibration in which already-known points like intersections of lines on a volleyball court and points on antennae are utilized as control points for calibration and (b) to investigate the accuracy and characteristics of the three-dimensional coordinates estimated by this method. Consequently, this method has characteristics as follows: (1) the method obtains less or equal accurate estimation in three-dimensional coordinates compared to a general calibration, (2) the accuracy of estimated X or Y coordinates in the position close to the outer border of the court is relatively lower than that in the center of the court, (3) the lower position close to the outer border of the court and the higher position in the center of the court indicate higher accurate estimated coordinates and (4) the position in an analytical area has an influence on the accuracy of estimated coordinates. Along with an understanding of the above characteristics in this method, the method using already-known points is useful as a substitution of a general calibration without utilizing the positions in an analytical area where three-dimensional coordinates are over- or underestimated.

Key Words: motion analysis, direct linear transformation technique, simplified calibration, control point

キーワード: 動作分析, DLT法, キャリブレーションの簡略化, コントロールポイント

1. 緒 言

バレーボール競技中のベストパフォーマンスや傷害は、どのタイミングでコート内のどの位置で発生するかを予測することは困難である(図1(a))。競技中に偶発的に発生するこのような事象時の動作を分析しようとする、プレイが行われるコート全面を分析範囲とすることが求められる。

一般的にヒトの動作を3次元的に分析する際には、実空間上に3次元座標系を設定し、実空間中に規定した分析範囲内での対象者の動作を、時間同期させた複数台のカメラで同時撮影した後、撮影した映像を基にPC上で3次元座標空間を再構築し、立体として対象を復元して解析する方法が用いられる⁶⁾。複数台のカメラで分析範囲内に位置する同一の物体を撮影すると、実空間における物体の位置(実空間での座標)が同じであっても、各々のカメラでは、カメラ画面上での物体の見え方(いわゆるフィルム面上での座標)が異なる。そのため、予め実空間での座標が分かっ

ている計測点(以下、コントロールポイント)を分析範囲内に複数個設置して、撮影に使用する全てのカメラでそれらを撮影し、各カメラのフィルム面上での座標と実空間での座標を対応させるキャリブレーション作業が必須となる。通常のキャリブレーション作業(図1(b))では、コントロールポイントを複数含んだ箱状や棒状のコントロールオブジェクトを分析範囲内に等間隔にまんべんなく設置して、撮影に使用する全てのカメラで撮影する。しかし、対象者が試技中は分析範囲内にコントロールオブジェクトを置いておくことはできず、対象者が試技していない間にキャリブレーション作業を実施することになる。バレーボールの競技場面、特にトップレベルの選手が競うような試合において、コート全面を分析範囲として選手の動作を3次元的に分析しようとした場合、競技の実施時間などの制約により、このような煩雑なキャリブレーション作業が行えないこともある。

多くの競技スポーツでは、競技を実施する競技場やコート、ゴール、支柱やネットなどの備品の大きさや高さがルールで明確に規定されており、分析範囲内に実空間での座標が既知である点(以下、既知点)が含まれている。これまでも、コントロールオブジェクトを用いることなく、既知点をコントロールポイントとして用いた簡略化したキャリブレーション方法によって3次元座標空間を再構築する

1) 京都光華女子大学 Kyoto Koka Women's University

2) 常葉大学 Tokoha University

3) 静岡産業大学 Shizuoka Sangyo University

4) 静岡大学 Shizuoka University

(受付日:2018年8月29日, 受理日:2017年2月3日)

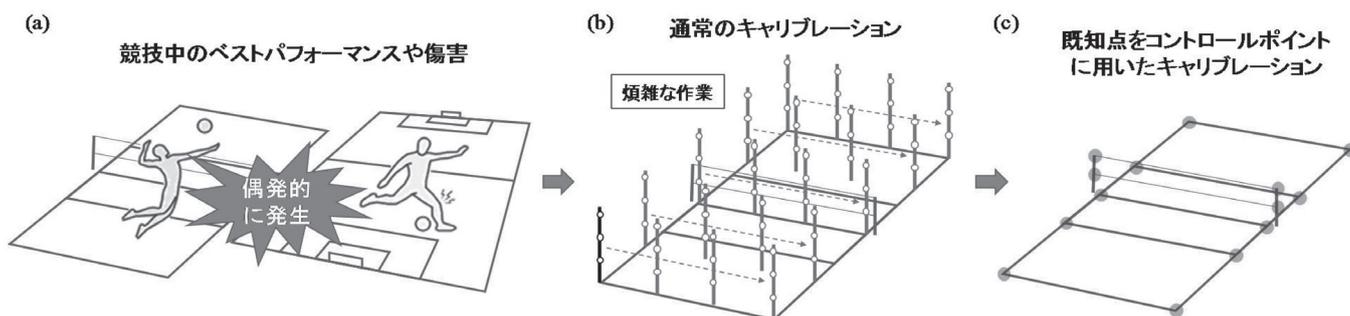


図1 本研究が対象とする動作と2種類のキャリブレーション方法の違い

ことが提案されてきた⁴⁾。近年になり、技術的に大きく進歩したコンピュータビジョンを用いて対象者やボールの位置をリアルタイムで計測する方法が、サッカー^{2,3,13)}やハンドボール^{8,9)}を対象として開発されるようになり、既知点を用いたキャリブレーションによる3次元座標空間の再構築方法が再び注目されるようになってきた。しかしながら、それらによって得られた3次元座標値の再現精度やその特徴についてはこれまで明らかになっていない。

バレーボール競技では、試合で使用するコート大きさ、コート上のラインの間隔や幅、ネットの高さやアンテナの長さなど付属品の規格が、公益財団法人日本バレーボール協会バレーボール6人制競技規則(以下、JVA 競技規則)で厳密に規定され⁷⁾、図2に示したとおり、コート全面内に既知点が複数存在する。そこで、本研究では、バレーボールコート内に含まれる既知点をコントロールポイントとして用いた簡略化したキャリブレーション方法(図1(c))によって、分析範囲とするコート全面の3次元座標空間を再構築し、コート全面に多数配する計測点(以下、基準点)の3次元座標値の再現精度を検証するとともに、その特徴を明らかにすることを目的とした。

2. 方法

(1) 測定方法

本研究では、バレーボールコート全面を分析範囲とした。まず、S 大学体育館のバレーボールコートに、一般女子の試合を想定してネットおよび付属品を設置した。図2に示したとおり、コートのエンドラインとサイドラインの交点を原点とし、エンドラインを X 軸、サイドラインを Y 軸、鉛直上方向を Z 軸とした右手系のグローバル座標系を設定した。コントロールポイントとして用いるコート内の既知点 14 点(ライン交点 10 点、アンテナ上の点 4 点、図2)のグローバル座標系における座標値を、鋼製巻尺(PKM-20, トラスコ中山社製)で実測した。各既知点の位置は JVA 競技規則⁷⁾で規定されているが、実測した各既知点の座標値は、その規定値に対して、コート上の既知点(図2の1から10)で最大0.004 m、アンテナ上の既知点(図2の11から14)で最大0.007 mの差異があった(表1)。そこで、本研究では、各既知点の座標値の仮の真値として、JVA 競技規則の規定値ではなく、実測した各既知点の座標値(以下、実空間座標値)を用いることとした。

高精度高速度撮影カメラ(GC-LJ20B, スポーツセンシング社製)2台を、コートに対して左右対称となるよ

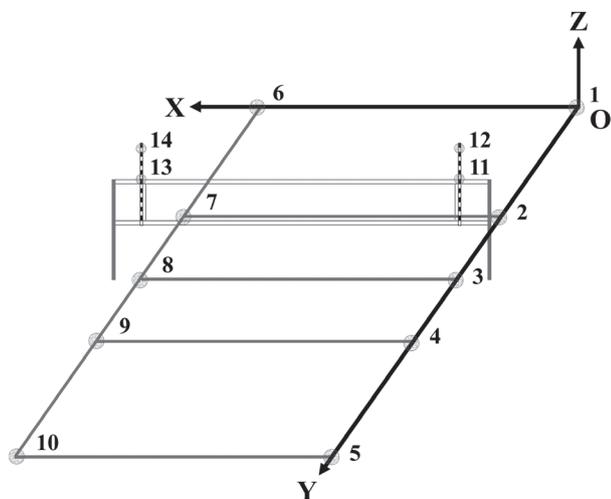


図2 本研究で用いた右手系のグローバル座標系と既知点14点

表1 既知点の実空間座標値、JVA競技規則の規定値および両者の差異

既知点	実空間座標値(a) (m)			JVA競技規則規定値(b) (m)			(a)-(b)の絶対値 (m)		
	X座標	Y座標	Z座標	X座標	Y座標	Z座標	X座標	Y座標	Z座標
1	0.050	0.051	0.000	0.050	0.050	0.000	0.000	0.001	0.000
2	0.049	6.047	0.000	0.050	6.050	0.000	0.001	0.003	0.000
3	0.050	9.021	0.000	0.050	9.025	0.000	0.000	0.004	0.000
4	0.052	11.996	0.000	0.050	12.000	0.000	0.002	0.004	0.000
5	0.050	17.948	0.000	0.050	17.950	0.000	0.000	0.002	0.000
6	8.950	0.050	0.000	8.950	0.050	0.000	0.000	0.000	0.000
7	8.950	6.051	0.000	8.950	6.050	0.000	0.000	0.001	0.000
8	8.950	9.027	0.000	8.950	9.025	0.000	0.000	0.002	0.000
9	8.950	12.000	0.000	8.950	12.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	8.951	17.949	0.000	8.950	17.950	0.000	0.001	0.001	0.000
11	0.000	8.997	2.240	0.000	9.000	2.240	0.000	0.003	0.000
12	0.000	8.997	2.940	0.000	9.000	2.940	0.000	0.003	0.000
13	9.000	9.001	2.233	9.000	9.000	2.240	0.000	0.001	0.007
14	9.000	9.001	2.933	9.000	9.000	2.940	0.000	0.001	0.007

う設置し、全ての既知点が撮影できる画角かつレンズディストーションの影響ができるだけ及ばないように焦点距離となるよう設定した。それぞれのカメラは、撮影映像の中心位置となる地点から水平距離が17.7 m、鉛直距離が5.0 mの位置、撮影映像の中心位置となる地点を通るサイドラインの平行線に対して40.2度、水平面に対して16.4度の位置にあった(図3)。そして、キャリブレーションに用いる映像を取得するため、設置し

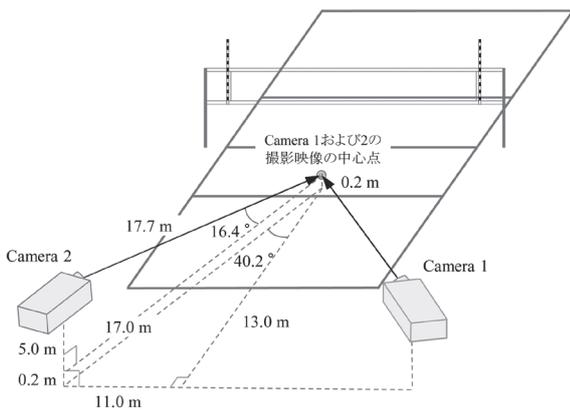


図3 2台のカメラの設置位置、光軸の交差角および撮影映像の中心点に対する俯角

た2台のカメラで、図2に示した全ての既知点が視認できる状態のコート全面をフルHD(1080/60p、解像度1920×1080ピクセル、撮影速度60 fps)、シャッター速度1/120 sで撮影した(図4)。次に、コート全面にわたって基準点の3次元座標値の再現精度を検証するため、コート全面内に1 m、2 m、3 mの鉛直位置に3点の計測点を配した金属製ポール(MTPL-33、マイゾックス社製、長さ3.045 m、直径0.024 m)を吊り下げ式

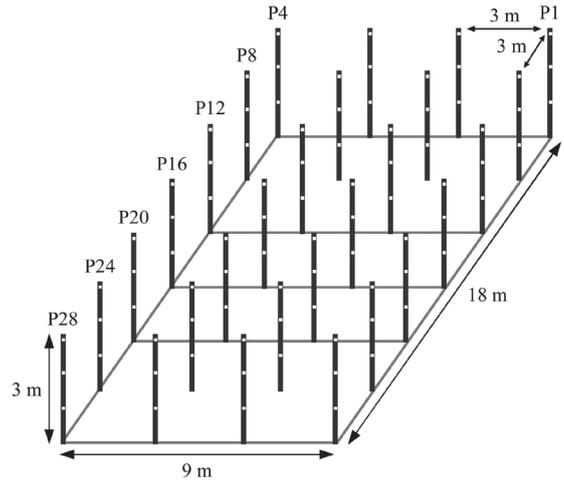


図5 本研究の分析範囲と基準点84点



図4 (a) カメラ2の画角, (b) カメラ1の画角

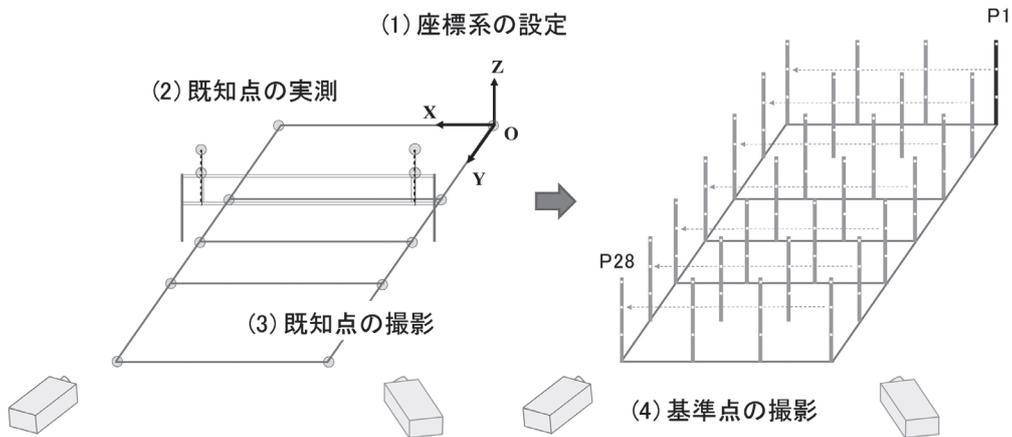


図6 本研究の測定方法の手順

較正装置によって 3 m 間隔で 28 か所に直立させ、84 点 (3 点 × 28 か所) の基準点を規定し、先に設置した 2 台のカメラで撮影した (図 5)。本研究の測定方法の手順全体は、図 6 で示したとおりであった。

(2) 分析方法

3次元座標空間を再構築して座標値を算出するには、カメラのレンズの中心位置、フィルム面の中心位置、それらから求められるレンズの焦点距離や回転行列を含むカメラ定数を正確に取得する必要があるが⁶⁾、実際には設置されたカメラのカメラ定数を直接測定することは技術的に困難である。そこで、カメラ定数を求める代わりに、予め実際の空間における位置が分かっている計測点 (すなわち先述のコントロールポイント) を撮影してカメラ定数を内包した変数を求める、DLT (Direct Linear Transformation) 法が有効となる。DLT 法は、カメラ位置に制約が少なく、コントロールポイントと分析範囲を適切に規定すれば、精度よく 3次元座標空間を再構築できるとされており¹⁾、カメラの設置場所が限定されるようなスポーツ競技場面では、DLT 法が好まれて用いられている。よって、本研究では、3次元座標空間を再構築して座標値を算出する方法として、DLT 法を採用した。

3次元 DLT 法では、各カメラのフィルム面上の座標 (U, V) は、実空間における座標 (X, Y, Z) を用いて式 (1) かつ式 (2) で表される¹¹⁾。

$$U = \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \quad (1)$$

$$V = \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \quad (2)$$

ここで、 L_1 から L_{11} は 3次元 DLT 法におけるカメラ定数を内包する変数 (以下、DLT パラメータ) を示す。

DLT パラメータを算出するには、11 個の未知数 L_1 から L_{11} に関する連立方程式を解くこととなるが、実空間座標が既知である点が 6 点以上、すなわち 6 点以上のコントロールポイントが 2 台以上のカメラで撮影されていれば、6 組以上の U, V から 12 個以上の連立 1 次方程式が得られ、そのうち 11 個の方程式を解けば全ての DLT パラメータを求めることができる。本研究では、前述のコート上およびアンテナ上の既知点 14 点 (図 2) をコントロールポイントとして選択しており、理論上全ての DLT パラメータの算出が可能である。

本研究で用いた分析方法の手順全体を図 7 に示した。まず、3次元動作解析プログラム (FrameDIAS V, DKH 社製) を用いて、撮影した映像から既知点のフィルム面上の座標値 (いわゆる 2次元計測座標値) を手動で 10 回反復して取得した。そして、得られた既知点の 2次元計測座標値とそれらに対応する実空間座標値から、方程式数が未知数より多い場合の最小二乗法による連立 1 次方程式の解法によって、計 10 組の DLT パラメータを算出した。式 (1) および式 (2) を X, Y, Z について整理すると、式 (3) かつ式 (4) となる¹¹⁾。

$$(L_1 - L_9 U) X + (L_2 - L_{10} U) Y + (L_3 - L_{11} U) Z = U - L_4 \quad (3)$$

$$(L_5 - L_9 V) X + (L_6 - L_{10} V) Y + (L_7 - L_{11} V) Z = V - L_8 \quad (4)$$

本研究では、カメラ 2 台での撮影によって、各既知点のフィルム面上の座標 U, V が 2 組計測されており、式 (3) および式 (4) から 3 つの未知数 X, Y, Z を含む方程式が 4 つ得られる。このうち 3 つの方程式を解くことにより、各既知点の 3次元座標値が求められる。先に求めた 10 組の DLT パラメータと既知点の 2次元計測座標値から、方程式数が未知数より多い場合の最小二乗法による連立 1 次方程式の解法を用いて、10 組の既知点の 3次元推定座標値を算出した。そして、求め

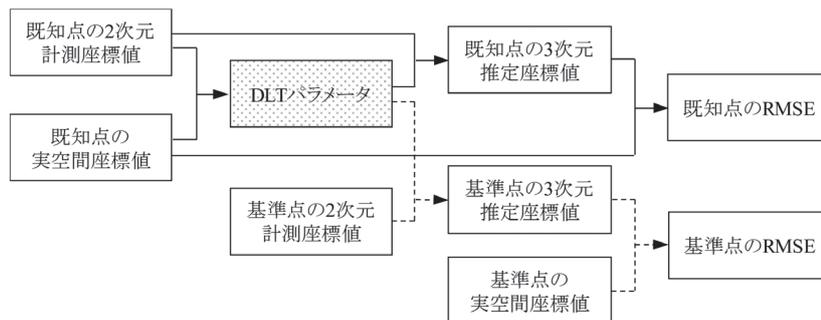


図 7 既知点と基準点の3次元推定座標値およびRMSEの算出手順

られた10組の既知点の3次元推定座標値と対応する実空間座標値から、式(5)により、RMSE (Root Mean Squared Error, 二乗平均平方根誤差) を求めた(図7参照)。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - x_i)^2} \quad (5)$$

ここで、 n は DLT パラメータの組数、 X_i は実空間座標値、 x_i は3次元推定座標値を示す。

次に、3次元動作解析プログラムを用いて、撮影映像から28か所に直立させたポールの基準点84点の2次元計測座標値を手動で1度取得した。これまでの手順で得られた10組のDLTパラメータ、式(3)および式(4)を用いて、方程式数が未知数より多い場合の最小二乗法による連立1次方程式の解法により、基準点の3次元推定座標値を10組算出した。求められた各基準点の3次元推定座標値と対応する実空間座標値から、式(5)によりRMSEを求めた。RMSEは、数値予測問題における精度評価指標の1つであり、予測値が真値からどの程度乖離しているかを示すものである。本研究では、得られたRMSEによって、既知点および基準点の3次元推定座標値が仮の真値である実空間座標値とどの程度乖離しているかを評価し、本研究のキャリブレーションによって3次元座標空間を再構築した場合の既知点および基準点の3次元座標値の再現精度を検証した。

表2 既知点の各座標のRMSEとその平均、各座標の全既知点での平均、最大値および最小値

既知点	RMSE (m)			平均
	X座標	Y座標	Z座標	
1	0.045	0.031	0.013	0.030
2	0.012	0.005	0.007	0.008
3	0.031	0.013	0.008	0.017
4	0.041	0.037	0.014	0.031
5	0.040	0.017	0.015	0.024
6	0.048	0.011	0.009	0.023
7	0.012	0.012	0.006	0.010
8	0.034	0.015	0.004	0.018
9	0.039	0.026	0.004	0.023
10	0.040	0.016	0.010	0.022
11	0.002	0.002	0.009	0.005
12	0.002	0.002	0.010	0.005
13	0.007	0.002	0.007	0.005
14	0.004	0.002	0.003	0.003
平均	0.026	0.014	0.009	
最大値	0.048	0.037	0.015	
最小値	0.002	0.002	0.003	

3. 結果および考察

(1) 既知点の3次元座標値の再現精度

既知点の各座標のRMSEとその平均、各座標の全既知点での平均、最大値および最小値を表2に示した。既知点のRMSEは、全既知点平均でX座標が0.026 m (0.002から0.048 m)、Y座標が0.014 m (0.002から0.037 m)、Z座標が0.009 m (0.003から0.015 m)、既知点のRMSEの全平均は0.016 mであった。既知点全体としては、Z座標の再現精度は非常に良好であり、X座標の再現精度はY座標、Z座標と比べて低いという傾向が見られた。既知点ごとにRMSEの平均を検討してみると、既知点1, 4, 5, 6, 9および10は全既知点の平均を大きく上回ったのに対して、既知点11から14は平均よりもかなり低かった。本研究で選択した既知点をコントロールポイントとした3次元座標値の算出方法では、センターライン付近の既知点は高い精度で再現されるが、両エンドラインに近接な既知点ほど再現精度が低い傾向であることが分かった。

なお、本研究では、手動によって複数回取得した既知点の2次元計測座標値を用いて、DLTパラメータ、既知点の3次元推定座標値あるいは後述する基準点の3次元推定座標値を算出したが、各既知点の2次元計測座標値は、カメラ1のX座標では0.5から1.5ピクセル、Y座標では0.5から1.5ピクセルの範囲、カメラ2のX座標では0.5から2.0ピクセル、Y座標では0.5から1.5ピクセルの範囲にあり、カメラの解像度(1920×1080ピクセル)に対して、最大でもX座標が0.10%、Y座標が0.14%と非常に僅少なばらつきであった。よって、手動で取得された既知点の2次元計測座標値はほぼ均質であり、各変数の算出に対して影響を及ぼさなかったと思われる。

(2) 基準点の3次元座標値の再現精度

基準点のRMSEは、全基準点平均でX座標が0.025 m (0.002から0.104 m)、Y座標が0.030 m (0.004から0.095 m)、Z座標が0.012 m (0.001から0.042 m)であり、前述の既知点と基準点ではY座標の再現精度がやや異なった。Wood and Marshall¹²⁾は、撮影映像から3次元座標空間を再構築して解析する場合、推定した3次元座標値の誤差は分析範囲に対して2%以内が許容範囲であるとしている。エンドライン長、サイドライン長、アンテナ上端高をそれぞれX軸方向、Y軸方向、Z軸方向の基準長とすると、基準点のRMSEは、平均でX座標が基準長の0.28%、Y座標が0.16%、Z座標が0.39%、最大でもX座標が1.15%、Y座標が0.53%、Z座標が1.39%であった。橋原ほか⁵⁾は、バレーボールコート内に設

定した分析範囲 (X 軸方向 6 m, Y 軸方向 4 m, Z 軸方向 3 m) に, 11 点のコントロールポイントを取り付けた棒状のコントロールオブジェクトで 55 か所のコントロールポイントを規定して撮影するという一般的なキャリブレーション方法を用い, DLT 法によってコントロールポイントの 3 次元座標値を算出した. その結果, 全コントロールポイント平均で, X 座標では 0.019 m, Y 座標では 0.008 m, Z 座標では 0.011 m の誤差が生じたことを報告している. これらのことから, 本研究の既知点をコントロールポイントとして用いたキャリブレーション方法による 3 次元座標空間の再構築方法は, 先行研究で許容された範囲内の再現精度を有し, 一般的なキャリブレーション方法を用いた場合と, X 座標, Z 座標ではほぼ同等の再現精度, Y 座標ではやや劣る再現精度であることが明らかとなった.

高見ほか¹⁰⁾ は, カメラ位置が撮影対象から 1.2 m と近接な条件ではあるが, 2 台のカメラの光軸の交差角と撮影対象に対する俯角を変えて撮影を行い, DLT 法による 3 次元座標の再現精度がどのように変化するかについて調べた. そして, カメラの光軸の交差角が 60 度以上, かつ撮影対象に対して俯角が 15 度以下であれば, 算出される 3 次元座標は Wood and Marshall¹²⁾ が示した許容範囲内の再現精度となることを報告している. 図 3 に示したとおり, 本研究の 2 台のカメラの光軸の交差角は 80.4 度, 撮影映像の中心点に対する俯角は 16.4 度であった. したがって, 本研究では, 2 台のカメラの設置条件が高見ほかの報告¹⁰⁾ で推奨される条件を概ね満たしていたことから, 再現精度が最も低かった基準点においても, 先行研究¹²⁾ で許容され得る範囲内の精度で 3 次元座標が再現されたと考えられる.

表 3 各基準点の RMSE, ボールごとの各座標の RMSE の平均, 鉛直位置ごとの RMSE の平均, 最大値および最小値

鉛直位置 ボール	RMSE (m)											
	1 m 位置 (m)			2 m 位置 (m)			3 m 位置 (m)			平均 (m)		
	X座標	Y座標	Z座標	X座標	Y座標	Z座標	X座標	Y座標	Z座標	X座標	Y座標	Z座標
1	0.061	0.008	0.002	0.074	0.031	0.017	0.087	0.070	0.034	0.074	0.036	0.018
2	0.020	0.075	0.009	0.024	0.057	0.016	0.033	0.013	0.032	0.026	0.048	0.019
3	0.005	0.064	0.008	0.007	0.029	0.013	0.015	0.011	0.031	0.009	0.035	0.017
4	0.050	0.037	0.005	0.059	0.058	0.009	0.075	0.078	0.028	0.061	0.057	0.014
5	0.030	0.005	0.004	0.045	0.018	0.007	0.059	0.032	0.023	0.045	0.018	0.011
6	0.008	0.077	0.002	0.016	0.057	0.007	0.018	0.034	0.017	0.014	0.056	0.009
7	0.006	0.073	0.005	0.004	0.053	0.008	0.004	0.037	0.016	0.005	0.054	0.010
8	0.024	0.011	0.013	0.034	0.016	0.002	0.049	0.043	0.017	0.036	0.023	0.011
9	0.002	0.014	0.017	0.015	0.014	0.003	0.029	0.020	0.008	0.015	0.016	0.009
10	0.004	0.054	0.010	0.005	0.050	0.002	0.011	0.037	0.005	0.007	0.047	0.006
11	0.018	0.055	0.003	0.013	0.051	0.003	0.010	0.039	0.004	0.014	0.048	0.004
12	0.005	0.010	0.017	0.006	0.013	0.007	0.020	0.023	0.006	0.010	0.015	0.010
13	0.025	0.023	0.019	0.011	0.012	0.010	0.004	0.007	0.005	0.013	0.014	0.011
14	0.013	0.020	0.012	0.006	0.026	0.014	0.003	0.026	0.004	0.008	0.024	0.010
15	0.025	0.021	0.011	0.022	0.031	0.009	0.017	0.028	0.004	0.021	0.027	0.008
16	0.026	0.011	0.011	0.017	0.010	0.011	0.004	0.005	0.003	0.016	0.009	0.008
17	0.030	0.030	0.014	0.021	0.014	0.012	0.008	0.005	0.001	0.020	0.016	0.009
18	0.017	0.022	0.018	0.008	0.010	0.018	0.003	0.007	0.010	0.009	0.013	0.016
19	0.021	0.018	0.017	0.020	0.006	0.015	0.012	0.008	0.006	0.018	0.011	0.013
20	0.036	0.017	0.010	0.029	0.005	0.007	0.015	0.013	0.007	0.027	0.012	0.008
21	0.011	0.014	0.003	0.004	0.009	0.005	0.015	0.029	0.013	0.010	0.018	0.007
22	0.003	0.047	0.012	0.003	0.025	0.008	0.009	0.005	0.001	0.005	0.026	0.007
23	0.004	0.045	0.011	0.006	0.027	0.006	0.004	0.006	0.002	0.005	0.026	0.006
24	0.010	0.008	0.002	0.004	0.019	0.008	0.012	0.042	0.020	0.009	0.023	0.010
25	0.061	0.036	0.022	0.084	0.062	0.030	0.104	0.095	0.042	0.083	0.064	0.031
26	0.024	0.019	0.005	0.038	0.006	0.008	0.053	0.031	0.019	0.038	0.019	0.011
27	0.027	0.018	0.006	0.030	0.004	0.004	0.041	0.030	0.022	0.033	0.017	0.010
28	0.051	0.031	0.015	0.062	0.056	0.030	0.081	0.084	0.041	0.065	0.057	0.029
平均	0.022	0.031	0.010	0.024	0.027	0.010	0.028	0.031	0.015			
最大	0.061	0.077	0.022	0.084	0.062	0.030	0.104	0.095	0.042			
最小	0.002	0.005	0.002	0.003	0.004	0.002	0.003	0.005	0.001			

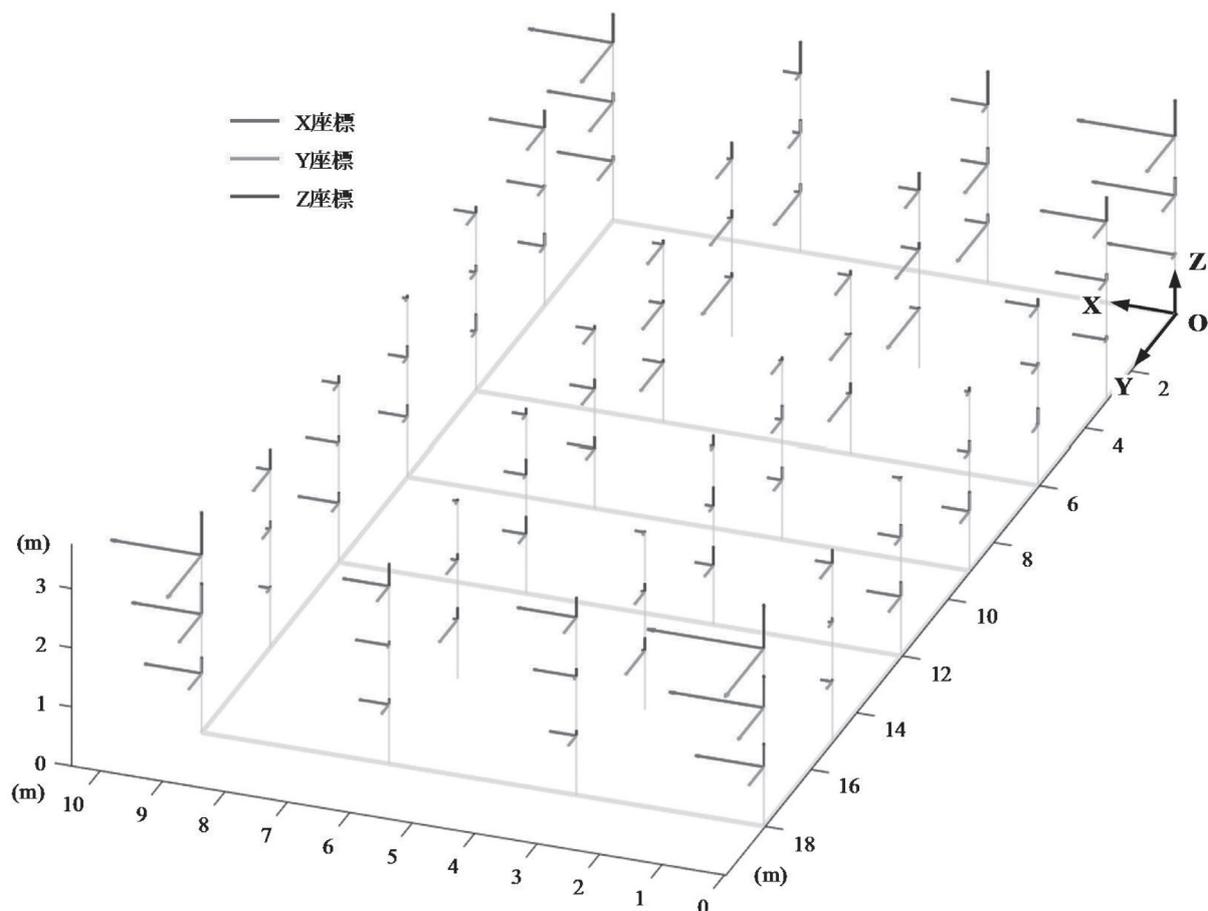


図8 基準点のRMSE. RMSEは実寸の20倍で表示した.

次に、分析範囲における位置によって、基準点の3次元座標値の再現精度にどのような特徴があるのかについて検討する。表3に各基準点のRMSE、ポールごとの各座標のRMSEの平均、鉛直位置ごとのRMSEの平均、最大値および最小値を示し、図8に基準点のRMSEを分析範囲としたコート全面上に実寸の20倍で3次元的に図示した。図8に示したとおり、基準点のRMSEはX座標、Y座標、Z座標ともに分析範囲内では一様でなく、本研究の方法で得られた基準点の3次元座標値は、分析範囲内で均一した再現精度ではないことが明らかとなった。

基準点の水平位置による3次元座標値の再現精度の違いを検討するため、ポールごとのRMSEの平均を見ると、X座標ではポール1、4、5、8および25から28、Y座標ではポール1から4、6、7、10、11、25および28、Z座標ではポール25および28で、基準点のRMSEの全平均(0.022 m)を大きく上回る値であった(表3)。よって、本研究のキャリブレーション方法の場合、概ねエンドラインあるいはサイドラインに近接な基準点ほどX座標およびY座標の再現精度が相対的に低

いに対して、コート中央部では、Y座標の再現精度がやや低いいくつかの基準点を除き、全体的には良好な再現精度であることが分かった。また、カメラ位置に近い手前側のエンドライン付近では、各座標とも再現精度が相対的に低い傾向であった。

各基準点のRMSEを鉛直位置から検討してみると、図8に示したとおり、X座標ではポール1から6、8から10、12および25から28、Y座標ではポール1、4、5、8、9、12、14、24、25および28、Z座標ではポール1から7、21、24から26および28で、鉛直位置が上方になるほどRMSEは高くなった。一方、X座標ではポール11および13から20、Y座標ではポール2、3、6、7、10、11、13、16から18、22および23、Z座標ではポール12、13、15から20、22、23で、鉛直位置が上方になるにつれてRMSEは低くなった。これらは、エンドラインあるいはサイドライン付近では鉛直位置が下方の基準点ほど、コート中央部では鉛直位置が上方の基準点ほど再現精度が高くなることを示している。これらのことから、本研究のキャリブレーションによって得られる基準点の3次元座標値の再現精度は、分析範囲内の水平位

置あるいは鉛直位置によって、一定の偏向が見られると考えられた。また、本研究でコントロールポイントとして用いた既知点は、コート上あるいはアンテナ上に位置しており、既知点からの鉛直距離が近い基準点ほど3次元座標値の再現精度が高くなったが、基準点の既知点からの水平距離は3次元座標値の再現精度を左右する直接的な原因とはならなかった。

本研究のキャリブレーション方法によって得られた3次元座標値の再現精度がこのような特徴を有した理由としては、カメラのレンズディストーションの影響の残存、高見ほか¹⁰⁾の指摘にもあるコートとカメラ、およびカメラ同士の位置関係、DLT法による3次元座標値算出時の数学的処理の問題などが想定されるが、いずれも憶測の域を出ない。これらについては、今後、カメラキャリブレーションによる映像補正を用いた場合や、カメラの設置条件を変えた場合の3次元座標値の再現精度と比較することで、その詳細を検討していく必要がある。

以上のことから、本研究の既知点を用いた簡略化したキャリブレーション方法による3次元座標空間の再構築方法は、3次元座標値の十分な再現精度を有しており、分析範囲内での3次元座標値の再現精度の特徴を理解した上で、再現精度が比較的低い範囲を対象としなければ、一般的なキャリブレーション方法の代用として利用が可能だと判断される。

4. ま と め

本研究のバレーボールコートのライン交点やアンテナ上の点などの既知点をコントロールポイントとして用いてキャリブレーション作業を簡略化した3次元座標空間の再構築方法は、

- 1) 先行研究で許容された範囲内の再現精度を有し、一般的なキャリブレーション方法を用いた場合と、X座標、Z座標ではほぼ同等の再現精度、Y座標ではやや劣る再現精度である
- 2) コート中央部の基準点の再現精度は良好であるが、エンドラインまたはサイドラインに近接な基準点はX座標およびY座標の再現精度が相対的に低い
- 3) エンドラインあるいはサイドライン付近では鉛直位置が下方な基準点ほど、コート中央部では鉛直位置が上方の基準点ほど再現精度が高い
- 4) 分析範囲における基準点の位置により、3次元座標値の再現精度には一定の偏向が見られる

という特徴を有した。本研究のキャリブレーション方法を用いて3次元座標空間を再構築すれば、エンドライン付近やサイドライン付近のような3次元座標値の再現精度が相対的に低い範囲を除く、ほぼコート全面において、バレーボールの競技中に偶発的に起こるベストパフォーマンスや

傷害発生時の動作が分析可能となる。

謝辞

本研究は日本バレーボール学会 2015 年度調査研究費「バレーボールコートにおける特徴点を利用した3次元動作解析方法の開発（代表者：村本名史）」の助成を受けて行われた。ここに記して謝意を表する。

文 献

- 1) 阿江通良：スポーツにおける運動計測，BME, 5 (1), pp.25-32, 1991
- 2) Alcock, A., Hunter, A., & Brown, N.: Determination of football pitch locations from video footage and official pitch markings, Sports Biomech., 8 (2), pp.129-140, 2009
- 3) Battikh, T., & Jabri, I.: Camera calibration using court models for real-time augmenting soccer scenes, Multimedia Tools and Applications, 51 (3), pp.997-1011, 2011
- 4) Farin, D., Krabbe, S., de With, P. H. N., et al.: Robust camera calibration for sport videos using court models, Storage and Retrieval Methods and Applications for Multimedia 2004 Proc. SPIE 5307, p.80, 2003
- 5) 橋原孝博・小村堯・宮原満男：3次元映画撮影法の導入に伴う 16 mm 動作解析システムの確立に関する研究，広島大学総合科学部紀要 VI 保健体育学研究，6, pp.33-41, 1988
- 6) 池上康男：写真撮影による運動の3次元解析法，Jpn. J. Sports Sci., 2 (3), pp.163-170, 1983
- 7) 公益財団法人日本バレーボール協会審判規則委員会：バレーボール6人制競技規則，公益財団法人日本バレーボール協会，2016, pp.18-26
- 8) 小笠原一生・古賀英之・中前敦雄ほか：ビデオ解析による非接触型前十字靭帯および内側側副靭帯損傷時の膝モーメント推定と受傷メカニズムの物理的考察，日本臨床スポーツ医学会誌，21 (1), pp.131-142, 2013
- 9) Ogasawara, I., & Koyanagi, Y.: Sports court-based camera calibration technique for three-dimensional reconstruction of knee joint kinematics, Mukogawa J. Health Exerc. Sci., 5 (1), pp.1-11, 2015
- 10) 高見涼太郎・高戸仁郎・田内雅規：DLT法を用いた動作計測・解析システムの応用と評価，岡山県立大学保健福祉学部紀要，6 (1), pp.45-50, 1999
- 11) Walton, J. S.: Close-range cine-photogrammetry: Another approach to motion analysis, Science in

- Biomechanics Cinematography, Academic Publishers, 1979, pp.69-97
- 12) Wood, G. A., & Marshall, R. N.: The accuracy of DLT extrapolation in three-dimensional film analysis, J. Biomech., 19 (9) , pp.781-785, 1986
- 13) Yamada, A., Shirai, Y., & Miura, J.: Tracking players and a ball in video image sequence and estimating camera parameters for 3D interpretation of soccer games, Proc. 16th Int. Conf. on Pattern Recognition, pp.303-306, 2002
-