

令和 3 年 6 月 6 日現在

機関番号：34315

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K20056

研究課題名（和文）スポーツ競技用コートの描写に用いられているラインを利用した新たな動作分析法の開発

研究課題名（英文）Development of a calculation method for camera parameters using the geometric property of lines inside the control volume

研究代表者

大島 雄治 (Ohshima, Yuji)

立命館大学・共通教育推進機構・嘱託講師

研究者番号：20805171

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、陸上競技場の走路について、レーンを区切るために塗布されているラインの幾何学的特性を用いて、カメラパラメータを推定する手法を開発することであった。そこで、カメラを取り付けるために用いた雲台をモデリングし、計測範囲外の既知点を撮影した画像と計測範囲内を撮影した画像に写っている既知点1点とラインから、計測範囲撮影時のカメラパラメータを推定した。再構築した精度検証マーカー135点の二乗平均平方根誤差について、提案手法と従来用いられている手法は、それぞれ、11.1mmと7.9mmであった。以上のことから、提案手法を用いることで、競技会を対象とした動作分析がより簡便になるだろう。

研究成果の学術的意義や社会的意義

選手が最大パフォーマンスを発揮している競技会における3次元動作分析は競技パフォーマンス向上のための示唆を導くために重要である、また、動作分析のための手順をより簡便にすることは、データ収集の可能性を広げる。本研究では、競技会場に記されている特徴点とラインを用いることでカメラを較正する手法を開発し、精度検証を行った。その結果、従来の手法と同程度の精度で動作分析が可能であることが確認できたため、提案手法を用いることで、競技会を対象とした動作分析がより簡便になるだろう。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study was to develop the calculation method (CL method) of camera parameters using feature points (the point known three-dimensional coordinates) outside control volume, one feature point and geometric property of lines inside control volume. Focal length, tripod parameter (tripod position, tripod lean etc.) and joint angle of tripod were estimated with optimization method. RMS errors of accuracy verification markers in CL method and a method developed in a previous study were 11.1 and 7.9 mm, respectively. This result reveals that CL method can be adapted for the collection of three-dimensional coordinates data.

研究分野：スポーツバイオメカニクス

キーワード：雲台パラメータ 最適化計算 ライン カメラのキャリブレーション

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

スポーツバイオメカニクスの研究分野では、競技パフォーマンス向上や障害予防などへの示唆を得るために、身体運動の分析がよく行われている。その中でも、ビデオカメラを用いた画像分析法は、身体に計測機器を取り付ける必要がないため、競技会での身体運動の分析が可能である。また、競技会における動作分析では、カメラ位置の制約が少ない Direct Linear Transformation Method (Aziz and Karara, 1971; 以下、「DLT法」と略す)が多く用いられている(阿江ほか, 2008)。DLT法を用いるには、計測範囲内で較正作業を行い、同一平面上に無く、かつ、実空間の座標値が既知の較正点(以下、「既知点」と略す)を6点以上撮影し、11個の較正係数(以下、「DLTパラメータ」と略す)を算出する必要がある。しかし、競技会を対象とする場合、較正作業を行うための時間が制限され、DLTパラメータの取得が困難である場合が多い。計測範囲内に用意できる既知点の数が少ない場合でも、画像分析法により3次元動作分析を行うための手法が提案されており、鈴木ほか(2016)は、同一直線上に無い3点の既知点からカメラパラメータを推定する手法(Camera-parameter Calculation法; 以下「CC法」)を開発している。CC法により撮影した画像内に3点以上の既知点を撮影することができれば、カメラパラメータの推定が可能となり、3次元動作分析を行える。しかし、計測範囲に3点以上の既知点を用意できない場合では、カメラパラメータを推定することができない。このような場合でも、陸上競技場の走路にはルールで定められたラインが塗布されており、計測範囲外には既知点が複数記されている。そこで、計測範囲外の複数の既知点、計測範囲内に塗布されているラインと原点を定めるための1つの既知点から精度の高いカメラパラメータを推定することができれば、CC法が適用できない場合でも、較正作業を行うことなく、競技会での3次元動作分析が可能になる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、陸上競技場の走路を例として、競技場のラインの幾何学的特性を用いて、カメラパラメータの算出手法を提案し、その妥当性を検証することとする。なお、本研究での提案手法は、ラインの特性を用いてカメラの較正を行うため、Camera-parameter Calculation using Line法と呼ぶ(以下、「CL法」と略す)。

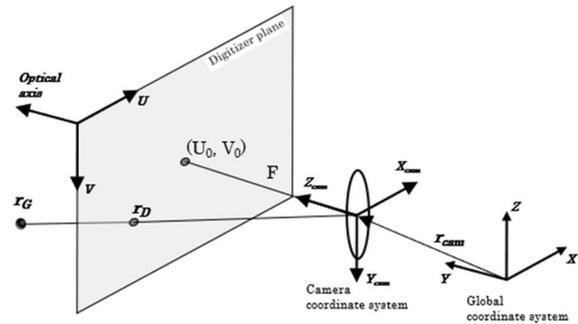


Fig. 1 Relationship between global coordinate system and digitizer coordinate system

3. 研究の方法

(1) カメラのモデリング

本研究では、ある測定点におけるグローバル座標系の座標値(以下「3次元座標」と略す)とデジタイズ座標系の座標値(以下「デジタイズ座標」と略す)の関係を透視投影モデルにより導いた(Fig. 1; 式(1))。

$$hr_D = \begin{bmatrix} F & 0 & U_0 \\ 0 & F & V_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} R \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -X_{cam} \\ 0 & 1 & 0 & -Y_{cam} \\ 0 & 0 & 1 & -Z_{cam} \end{bmatrix} r_G$$

(1)

ただし、

$$r_D = \begin{bmatrix} U_i \\ V_i \\ 1 \end{bmatrix}, r_G = \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix}$$

ここで、 $r_D$ と $r_G$ は、測定点*i*について、デジタイズ座標と3次元座標、 $U_0$ および $V_0$ は光軸とセンサの交点についてのデジタイズ座標を示している。 $F$ は撮影時の画素(アスペクト比は1)の1辺の長さで規格化した焦点距離である(単位はpixel)。 $R$ はカメラの姿勢で決定する座標変換行列、 $X_{cam}$ 、 $Y_{cam}$ 、 $Z_{cam}$ はグローバル座標系におけるカメラのレンズ中心の位置(以下「カメラの位置」と略す)を示している。また、 $h$ は $r_D$ の3行目を1にするスケールファクタである。なお、本研究では、光軸とセンサ

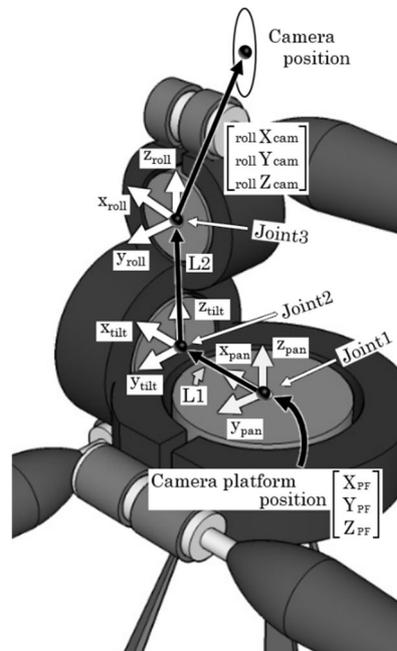


Fig. 2 Camera platform model

の交点 ( $U_0, V_0$ ) は、撮影した画像の中心とし、レンズ歪みによる影響を考慮しない。

## (2) 雲台のモデリング

本研究では、カメラを取り付けた雲台を Fig. 2 のようにモデリングした。以下に説明する雲台パラメータを用いることで、カメラパラメータを求めることができる。雲台パラメータに含まれる変数は、雲台の 3 次元座標 ( $X_{PF}, Y_{PF}, Z_{PF}$ )、地面に対する雲台の傾きを表す角度 ( $\alpha, \beta$ )、雲台にある 3 つの Joint の回転角度 ( $\theta, \psi, \varphi$ )、パンニング (以下「パン」と略す) を行うための Joint からティルト (以下「ティルト」と略す) を行うための Joint までの距離 ( $L_1$ )、ティルトの Joint からロールの Joint までの距離 ( $L_2$ )、ロール座標系におけるカメラの位置 ( $rollX_{cam}, rollY_{cam}, rollZ_{cam}$ ) である。

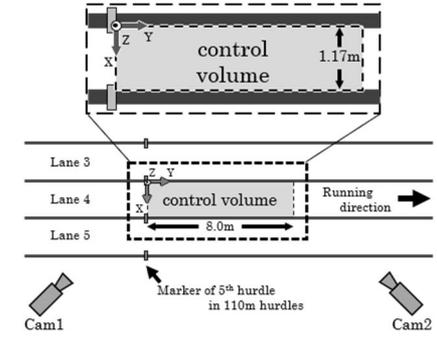


Fig. 3 Overhead view of the experimental set-up

## (3) 精度検証実験

陸上競技場の直走路について、Fig. 3 に示した範囲を計測範囲 ( $1.17 \text{ m} \times 8.00 \text{ m} \times 2.20 \text{ m}$ ) として、実験を行った。2 台のビデオカメラを観客席に設置し、計測範囲に塗布されているレーンを区切るラインと既知点 1 点、カメラパラメータ推定精度を検証するための既知点 135 点 (以下「制度検証マーカ-135 点」と略す) を撮影した。加えて、計測範囲外にある既知点を 5 枚の静止画で撮影した (静止画 5 枚)。撮影した画像を用いて、計測範囲内の既知点 1 点とラインのデジタル座標、計測範囲外の複数の既知点のデジタル座標を収集した。

## (4) カメラパラメータ推定のための最適化計算

デジタル作業により、既知点についてのデジタル座標を取得できる。また、式 (1) を用いることで、あるカメラパラメータについて、既知点の 3 次元座標値からデジタル座標を算出できる (以下、「再投影」と略す)。つまり、ある既知点について、デジタル作業にミスがなく、正確なカメラパラメータが既知であれば、デジタル作業によって得られた座標値と再投影した座標値の差 (以下、「再投影誤差」と略す) はゼロになる。また、計測範囲外および計測範囲の静止画撮影時のカメラパラメータは、焦点距離、雲台パラメータから求めることができる。そのため、式 (2) の目的関数  $J$  を最小にする焦点距離、雲台パラメータを探索することで、計測範囲撮影時のカメラパラメータを推定できると考えられる。

$$J = T_1 + T_2 + T_3 \quad (8)$$

ただし

$$T_1 = \frac{\sum_{i=1}^{nPoint} (U_i^D - U_i^P)^2 + (V_i^D - V_i^P)^2}{nPoint}$$

$$T_2 = (U_{Ori}^D - U_{Ori}^P)^2 + (V_{Ori}^D - V_{Ori}^P)^2$$

$$T_3 = \left( \frac{\sum_{i=1}^{nInLine} InDiff_i^2}{nInLine} + \frac{\sum_{i=1}^{nOutLine} OutDiff_i^2}{nOutLine} \right) / 2$$

ここで、 $U_i^D$  と  $V_i^D$  は計測範囲外の既知点  $i$  について、デジタル作業で得られた座標値の  $U$  成分と  $V$  成分を示しており、 $U_i^P$  と  $V_i^P$  は計測範囲外の既知点  $i$  を再投影することで得られた座標値の  $U$  成分と  $V$  成分である。また、 $nPoint$  は計測範囲外の既知点の数である。 $U_{Ori}^D, V_{Ori}^D$  は、計測範囲のグローバル座標系の原点について、デジタル作業により得られた座標値の  $U$  成分と  $V$  成分であり、 $U_{Ori}^P, V_{Ori}^P$  は、グローバル座標系の原点を再投影することで得られた座標値の  $U$  成分と  $V$  成分である。 $InDiff_i$  と  $OutDiff_i$  は、計測範囲を撮影した画像について、実空間におけるレーンを区切る内側 ( $X = 0 \text{ m}$ ) と外側 ( $X = 1.17 \text{ m}$ ) のラインを画像に再投影した直線と撮影された画像におけるタータンとラインの境目の座標値  $i$  の垂直距離であり (Fig. 6)、 $nInLine$  と  $nOutLine$  は内側と外側ラインについて、デジタル作業により取得した座標値の数である。計測範囲外および計測範囲の撮影は、焦点距離と雲台の位置を変更せずに、パンニングおよびティルトしながら行っているため、パンおよびティルト角度を除いた雲台パラメータ、焦点距離は全ての画像で同じ値を用いることができる。したがって、最適化計算で探索する変数は 24 になる。なお、最適化計算には、粒子群最適化 (Particle Swarm Optimization) を用いた。

## 4. 研究成果

精度検証マーカ-135 点について、再構築した 3 次元座標値の最大誤差の各成分は、CL 法が 6.1 から 28.5 mm、CC 法が 5.7 から 17.8 mm、DLT 法が 5.3 から 14.3 mm であり、正味の最大誤差について、CL 法は CC 法および DLT 法と比較して、およそ 10 mm と 15mm 大きか

った (Table 1)。

Table 1 Reconstructive errors of calculated accuracy verification points

	CL Method		CC method		DLT method	
	RMSE (mm)	Max (mm)	RMSE (mm)	Max (mm)	RMSE (mm)	Max (mm)
X axis	9.5	28.5	5.7	17.8	2.4	7.8
Y axis	5.3	18.5	5.2	17.7	3.5	14.3
Z axis	2.1	6.1	1.8	5.7	1.5	5.3
Resultant	11.1	30.6	7.9	21.1	4.6	15.7

競技会における世界一流短距離走者の最大疾走速度局面の動作分析を行った矢田ほか(2011)は、ストライド頻度(1歩に要した時間の逆数)の平均値は、4.79 Hzであったことを報告している。このストライド頻度の値を参考にして、CL法、CC法およびDLT法の正味の最大誤差の大きさが疾走速度に与える影響は、0.14 m/s、0.10 m/s および 0.07 m/s であり、100 m 走を 11.00 sec で走りきるために必要な平均速度(9.09 m/s)に対して、誤差によるタイムの影響はおおよそ 0.17 sec、0.12 sec および 0.09 sec である。また、競技会における 100m 走の走動作の特徴について検討した福田ほか(2008)は、回復期前半において最も膝が屈曲した時点の角度(以下、「膝の引き付け角度」と略す)のデータを示し、最も角度が小さい選手と最も角度が大きい選手の値の差は約 30° であることを報告している。連結した長さ 0.4 m の 2 つのセグメント(大腿と下腿を想定している)について、片方のセグメントの遠位端の座標値が 0.01 m 変わると、2 つのセグメントがなす角度はおおよそ 1.5 deg 変化する。走速度や膝の引き付け角度は、短距離走を分析するためにある様々な算出項目の中の 2 つであり、許容できる測定誤差の大きさは、研究の目的を達成するために算出するデータに依存するが、競技会を対象にして短距離走の分析を行った上述の先行研究について、3 次元座標を再構築する手法を DLT 法から CL 法に変更した場合でも、得られる結果が大きく異なる可能性は低いと思われる。

以上のことから、本研究の提案手法である CC 法は、競技会における動作分析を行う上で十分な制度のカメラパラメータを推定可能であるといえる。

#### <引用文献>

Abdel-Aziz, Y.I. and Karara, H.M. (1971) Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. ASP symposium on close-range Photogrammetry, American society of photogrammetry, Falls Church, VA: 1-19.

阿江通良・永原隆・大島雄治・小山宏之・高本恵美・柴山一仁(2008)世界選手権男子走高跳上位入賞者の跳躍動作のバイオメカニクスの分析 トーマス選手の跳躍は新しい技術のヒントとなるか。バイオメカニクス研究, 12(2): 134-140.

福田厚治・伊藤章・貴嶋孝太(2008)男子一流スプリンターの疾走動作の特徴 世界陸上東京大会との比較から。バイオメカニクス研究, 12(2): 91-98.

鈴木雄太・竹中俊輔・榎本靖士・田内健二(2016)競技場の特徴点を利用したカメラパラメータ算出法に関する研究. バイオメカニクス研究, 20(1): 2-9.

矢田恵大・阿江通良・谷川聡・伊藤章・福田厚治・貴嶋孝太(2011)標準動作モデルによる世界一流および学生短距離選手の疾走動作の比較. 陸上競技研究, 87(4): 10-16.



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 大島雄治	4. 巻 66
2. 論文標題 競技会場に塗布されているラインの幾何学的特性と計測範囲外の既知点を利用したカメラパラメータ算出法の開発	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 体育学研究	6. 最初と最後の頁 91-107
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5432/jjpehss.20078	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大島雄治
2. 発表標題 競技場に描写されているラインの幾何学的特性と計測範囲外の既知点を利用したカメラパラメータ算出法の開発
3. 学会等名 第26回日本バイオメカニクス学会大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------