

### 3次元映画撮影法の導入に伴う16mm動作解折システムの確立に関する研究

橋原 孝博, 小村 堯, 宮原 満男

広島大学総合科学部保健体育講座

(1988.10.31 受理)

#### A study on the automated 16mm motion analysis system for three dimensional cinematography

Yoshihiro HASHIHARA, Takashi KOMURA and Mitsuo MIYAHARA

#### Abstract

The purpose of this study was to establish the automated 16mm motion analysis system for three dimensional cinematography (DLT method). Nac motion analyser equipped with graf-pen digitizer, and NEC personal computer were used for the 16mm film analysis, where the coordinates were automatically transferred into the computer. The position data calculated by DLT method were very accurate. The mean deviations of computed coordinates from the actual coordinates were 0.011m in the vertical direction (Z), 0.019m in the horizontal direction (X), and 0.008m in the horizontal direction (Y).

#### 問 題

運動動作をとらえる方法としては映画撮影法 (Cinematography) がある。映画撮影法では、従来2次元映画撮影法 (Two-Dimensional Cinematography) が多く用いられてきた。しかし2次元映画撮影法では、定量的に精度の高い情報を得るためには運動面が撮影フィルム面に対して平行になっている必要があり、特に選手が複雑に移動方向を変えたり、身体を回転させたりしてプレイするスポーツ競技においては、そのような撮影法では定量的に分析することは不可能である。複数のカメラを使用する3次元映画撮影法 (Three-Dimensional Cinematography) は2次元映画撮影法のそのような欠点を補うものであるが、カメラの位置や方向などの厳密な撮影条件に制限を受けたり、内的カメラ定数 (Internal Camera Parameter<sup>1)</sup>) を知るための特別な計測器を必要とするなど、撮影手順が非常に複雑で、公式試合における選手の動作をとらえるために用いるにはまだ数多くの制約が残されていた。しかしながら、Abdel-Aziz and Karara (1971<sup>4)</sup>) や Walton (1979<sup>5)</sup>) らによって開発されてきた Direct Linear Transformation Method (DLT法) は、後で距離較正に用いられるコントロールポイントさえ撮影範囲全体に分布するように撮影しておれば、カメラの位置や方向などに関する情報は知る必要がなく、精度の良い3次元データが得られるとされている。

映画撮影法の分析手順は、①撮影フィルムの各コマ毎、身体各部位あるいはボールなど物体の座標を読み取る作業過程、②得られた座標をもとに位置、速度、角度など各種力学量を算出する演算過程及びスティックピクチャーなど各種図表の作製過程に分けられる。これらの分析過程は、従来、マニュアル操作で行っていたので分析に多大の労力と時間を費やし、そのために得られた結果は単一の動作試技を典型例として示すのが通例であった。しかしながら最近では、コンピューターの発達やフィルム分析装置の開発により多量のデータを短時間で処理し、しかも信頼性のある結果を得ることが可能となった。すなわち、①ではモーションアナライザー（撮影フィルムをスクリーン部分に投影し、座標の検出を行う機器）にグラフペンシステム（スタイラスペンのペン先をモーションアナライザーのスクリーンに触れることにより超音波のパルスを送信し、音波伝播速度から座標値に変換し、デジタルで出力する機器）を取り付けることにより、座標検出が極めて短時間で処理される。また、②ではモーションアナライザー・グラフペンシステムにコンピューターを接続することにより、座標の検出、各種力学量の演算処理をオンラインで行うことが可能となり分析上の人為的誤差が少なくなる。

そこで本研究の目的は、映画分析装置のオンライン化をはじめとした、3次元映画撮影法（DLT法）による16mm動作解析システムを確立することである。

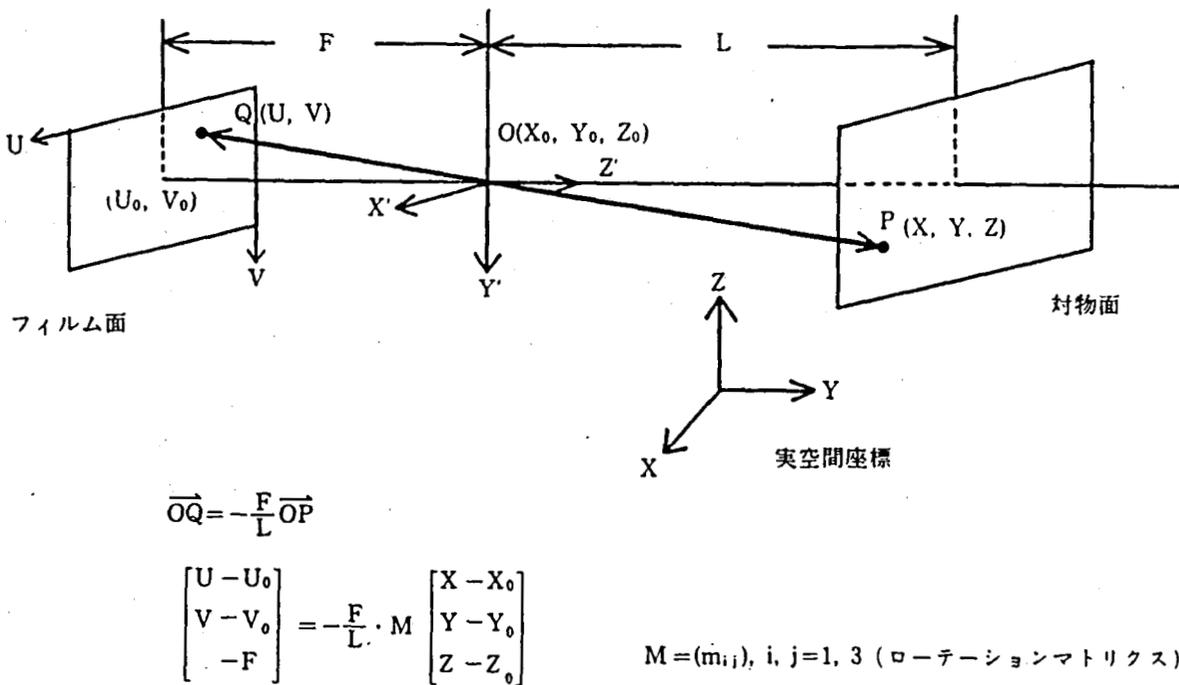


図1 実空間座標とフィルム面上の座標との関係 (池上, 1983)

## 解 析

### 1. DLT法の概説

#### 1) 実空間座標とフィルム面上の座標との関係について

実際の空間（実空間）における3次元位置座標を写真分析により求めるためには、カメラの位置（厳密にはレンズの中心の実空間座標）、方向余弦、レンズの焦点距離（あるいはレンズとフィ

フィルム面との距離)を実際に測定したり、また逆にこれらの定数があらかじめ定められた値になるようにカメラを設置することにより求められるとされている。池上(1983<sup>3)</sup>)は実空間の3次元座標とフィルム画面上の像の2次元座標との関係を模式図(図1参照)で示し説明している。それによれば、フィルム面上のU軸およびV軸にX'軸およびY'軸が平行で、Z'軸方向が光軸に一致するような座標系(X'-Y'-Z'系)を考えると、P点を表わす位置ベクトル $\overrightarrow{OP}$ はX'-Y'-Z'系で、

$$\overrightarrow{OP} = M \cdot \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix}$$

となる。ここでMの成分 $m_{ij}$  ( $i, j = 1, 3$ )は実空間座標の座標軸と光軸の向きの関係により定まる。同様にP点の像Qの位置を表すベクトル $\overrightarrow{OQ}$ はX'-Y'-Z'系で、

$$\overrightarrow{OQ} = \begin{pmatrix} U - U_0 \\ V - V_0 \\ -F \end{pmatrix}$$

となる。ここでベクトル $\overrightarrow{OP}$ と $\overrightarrow{OQ}$ は互いに方向が反対で同一線上にあり、その長さの比がF/Lであるから

$$\overrightarrow{OQ} = -\frac{F}{L} \cdot \overrightarrow{OP}$$

が成り立つ。従って、 $\overrightarrow{OP}$ 、 $\overrightarrow{OQ}$ をそれぞれの成分で表せば、

$$\begin{pmatrix} U - U_0 \\ V - V_0 \\ -F \end{pmatrix} = -\frac{F}{L} \cdot M \cdot \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} \dots\dots(1)$$

となる。式(1)を各成分に分けて書けば、

$$U - U_0 = -F/L \{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)\} \dots\dots(2)$$

$$V - V_0 = -F/L \{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)\} \dots\dots(3)$$

$$-F = -F/L \{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)\} \dots\dots(4)$$

となる。式(4)をLについて解けば、

$$L = m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)$$

となり、これを式(2)、(3)に代入すれば、

$$U - U_0 = -F \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \dots\dots(5)$$

$$V - V_0 = -F \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \dots\dots(6)$$

が得られる。ここで式(5)、(6)は実空間座標とフィルム面上の座標との関係を表しており、方向余弦( $m_{ij}$ ,  $i, j = 1, 3$ )、フィルム面とレンズ中心との距離(F)および2台のカメラより得られたフィルム面上の2次元座標が得られれば、X、Y、Zに関する4つの方程式を得ることができ、この内の3つを3元の連立方程式として解けば実空間の座標が求められると述べている。しかし、前述したカメラに関する定数を知るためには特別な測定装置を必要とするばかりでなく、測定及び分析手順が極めて複雑(特に方向余弦を知ることは最も困難なこと)であり、これまで3次元映画撮影法はあまり用いられていなかった。

$$U = \frac{Ax + By + Cz + D}{Ex + Fy + Gz + 1}$$

$$V = \frac{Hx + Jy + Kz + L}{Ex + Fy + Gz + 1}$$

図2 DLT法における2次元座標と3次元座標との関係 (U, Vはフィルム面上の2次元座標, X, Y, Zは3次元座標, A~LはDLT係数, Walton, 1979)

2) DLT係数の算出について

Walton は図2に示すような実空間における3次元座標とフィルム面上の2次元座標の関係を表す関係式を示している。池上の報告における式(5), (6)も定数をまとめて整理すれば, この関係式と同じ形の式を得ることができ, Walton によるこの関係式のA~Lまでの係数が, 既に述べたカメラに関する定数により決定されることがわかる。DLT法では, このカメラに関する定数を直接測定するかわりに, あらかじめ実空間での座標が知られているいくつかのコントロールポイント (control points<sup>4),5)</sup> を撮影し, この点の3次元座標とフィルム面上における2次元座標から, 代数的に求め, これまでの3次元映画撮影法における測定および分析上の問題点を解消している。すなわち図2に示す関係式をA~Lまでの係数について解けば,

$$AX + BY + CZ + D - EXU - FYU - GZU = U \dots\dots(7)$$

$$HX + JY + KZ + L - EXV - FyV - GZV = V \dots\dots(8)$$

となり, 式(7), (8)はAからLまでの11個の未知数に対する連立方程式とみなすことができる。従って, 既に述べたコントロールポイント6個の2次元および3次元座標がわかれば, U, Vあわせて12組の連立1次方程式が得られ (図3参照), この内の11個の方程式を解けばA~LまでのDLT係数 (Direct Linear Transformation Parameters<sup>4),5)</sup> が求められる。

3) 3次元座標の算出について

このようにしてA~Lまでの11個の係数が求めれば, 未知の実空間座標を持つ点のフィルム面上での像の座標を測定することにより, その実空間座標を求めることができる。つまり, 式(7), (8)をX, Y, Zに関して整理すれば,

$$(A - EU) X + (B - FU) Y + (C - GU) Z = U - D \dots\dots(9)$$

$$(H - EV) X + (J - FV) Y + (K - GV) Z = V - L \dots\dots(10)$$

となる。ここでU, Vの2次元座標が2台のカメラにより2組得られれば式(9), (10)のX, Y, Zに関する方程式が, カメラ2台あわせて4組得られることになり (図4参照), この内の3組を連立1次方程式として解けば, 実空間座標X, Y, Zが得られる。

以上述べてきた3次元映画撮影法は Direct Linear Transformation Method (DLT法) と呼ばれ, 距離較正に用いるコントロールポイント (本研究では以後, 較正点と称する) さえ撮影範囲全体に分布するように撮影しておれば, 方向余弦やレンズ焦点距離などに関する情報は知る必要がなく, これまでの3次元映画撮影法と比べ, 測定が極めて容易な解析法であるとされている。

$$\begin{bmatrix}
 x_1 & y_1 & z_1 & 1 & -U_1x_1 & -U_1y_1 & -U_1z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 x_2 & y_2 & z_2 & 1 & -U_2x_2 & -U_2y_2 & -U_2z_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 x_3 & y_3 & z_3 & 1 & -U_3x_3 & -U_3y_3 & -U_3z_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 x_4 & y_4 & z_4 & 1 & -U_4x_4 & -U_4y_4 & -U_4z_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 x_5 & y_5 & z_5 & 1 & -U_5x_5 & -U_5y_5 & -U_5z_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 x_6 & y_6 & z_6 & 1 & -U_6x_6 & -U_6y_6 & -U_6z_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -V_1x_1 & -V_1y_1 & -V_1z_1 & x_1 & y_1 & z_1 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -V_2x_2 & -V_2y_2 & -V_2z_2 & x_2 & y_2 & z_2 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -V_3x_3 & -V_3y_3 & -V_3z_3 & x_3 & y_3 & z_3 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -V_4x_4 & -V_4y_4 & -V_4z_4 & x_4 & y_4 & z_4 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -V_5x_5 & -V_5y_5 & -V_5z_5 & x_5 & y_5 & z_5 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -V_6x_6 & -V_6y_6 & -V_6z_6 & x_6 & y_6 & z_6 & 1 & 0 & 0 \\
 \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots
 \end{bmatrix}
 \begin{matrix}
 A \\
 B \\
 C \\
 D \\
 E \\
 F \\
 G \\
 H \\
 J \\
 K \\
 L
 \end{matrix}
 =
 \begin{matrix}
 U_1 \\
 U_2 \\
 U_3 \\
 U_4 \\
 U_5 \\
 U_6 \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 V_1 \\
 V_2 \\
 V_3 \\
 V_4 \\
 V_5 \\
 V_6 \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots
 \end{matrix}$$

図3 DLT係数を求めるためのマトリックス (添字は較正点の番号, Walton, 1979)

$$\begin{bmatrix}
 (A^1 - E^1U^1) & (B^1 - F^1U^1) & (C^1 - G^1U^1) \\
 (H^1 - E^1V^1) & (J^1 - F^1V^1) & (K^1 - G^1V^1) \\
 (A^2 - E^2U^2) & (B^2 - F^2U^2) & (C^2 - G^2U^2) \\
 (H^2 - E^2V^2) & (J^2 - F^2V^2) & (K^2 - G^2V^2) \\
 \vdots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 x \\
 y \\
 z
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 (U^1 - D^1) \\
 (V^1 - L^1) \\
 (U^2 - D^2) \\
 (V^2 - L^2) \\
 \vdots \\
 \vdots
 \end{bmatrix}$$

図4 3次元座標を求めるためのマトリックス (添字はカメラの番号, Walton, 1979)

$$\begin{bmatrix}
 x_1 & y_1 & z_1 & 1 & -U_1x_1 & -U_1y_1 & -U_1z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 x_2 & y_2 & z_2 & 1 & -U_2x_2 & -U_2y_2 & -U_2z_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 x_3 & y_3 & z_3 & 1 & -U_3x_3 & -U_3y_3 & -U_3z_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 x_4 & y_4 & z_4 & 1 & -U_4x_4 & -U_4y_4 & -U_4z_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 x_5 & y_5 & z_5 & 1 & -U_5x_5 & -U_5y_5 & -U_5z_5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 x_6 & y_6 & z_6 & 1 & -U_6x_6 & -U_6y_6 & -U_6z_6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -V_1x_1 & -V_1y_1 & -V_1z_1 & x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -V_2x_2 & -V_2y_2 & -V_2z_2 & x_2 & y_2 & z_2 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -V_3x_3 & -V_3y_3 & -V_3z_3 & x_3 & y_3 & z_3 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -V_4x_4 & -V_4y_4 & -V_4z_4 & x_4 & y_4 & z_4 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -V_5x_5 & -V_5y_5 & -V_5z_5 & x_5 & y_5 & z_5 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -V_6x_6 & -V_6y_6 & -V_6z_6 & x_6 & y_6 & z_6 & 1 \\
 \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 A \\
 B \\
 C \\
 D \\
 E \\
 F \\
 G \\
 H \\
 J \\
 K \\
 L
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 U_1 \\
 U_2 \\
 U_3 \\
 U_4 \\
 U_5 \\
 U_6 \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 V_1 \\
 V_2 \\
 V_3 \\
 V_4 \\
 V_5 \\
 V_6 \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots
 \end{bmatrix}$$

図3 DLT係数を求めるためのマトリックス (添字は較正点の番号, Walton, 1979)

$$\begin{bmatrix}
 (A^1 - E^1U^1) & (B^1 - F^1U^1) & (C^1 - G^1U^1) \\
 (H^1 - E^1V^1) & (J^1 - F^1V^1) & (K^1 - G^1V^1) \\
 (A^2 - E^2U^2) & (B^2 - F^2U^2) & (C^2 - G^2U^2) \\
 (H^2 - E^2V^2) & (J^2 - F^2V^2) & (K^2 - G^2V^2) \\
 \vdots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 x \\
 y \\
 z
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 (U^1 - D^1) \\
 (V^1 - L^1) \\
 (U^2 - D^2) \\
 (V^2 - L^2) \\
 \vdots \\
 \vdots
 \end{bmatrix}$$

図4 3次元座標を求めるためのマトリックス (添字はカメラの番号, Walton, 1979)

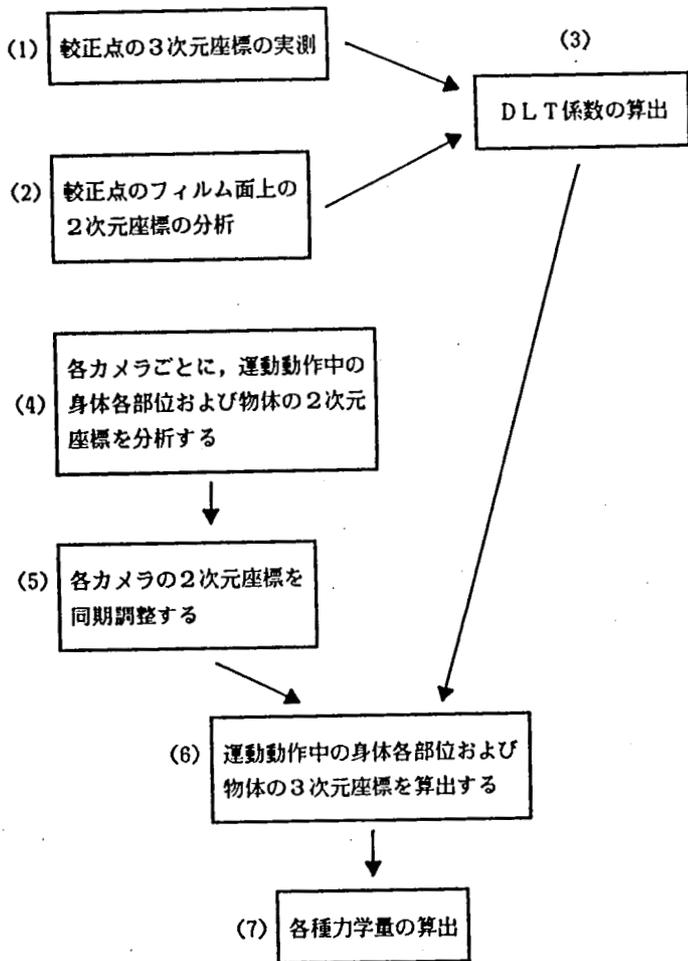


図5 3次元映画撮影法 (DLT法) の分析手順

2. 分析装置のオンライン化とDLT法の導入

図5は16mm高速度カメラによる撮影フィルムから、DLT法により、運動動作中の身体各部位および物体の3次元座標を算出するための分析手順を示したものである。以下、この手順に従って説明していくことにする。なお、座標検出、演算処理上必要とするコンピュータープログラムには既製のアプリケーションプログラムが用意されておらず、自作のプログラムを使用した。

1) 校正点の3次元座標の実測

図6は本研究で用いた自作の校正器を示したものである。この校正器を図7の①で示す位置に設置し、2階席に固定した2台のシネカメラで撮影した。同時にセンターラインとレフトサイドラインの交点を原点(0,0,0)として校正点(校正器の支柱に取り付けた白球の中心)を通る鉛直線が示すコート位置(サイドライン方向をX方向、センターライン方向をY方

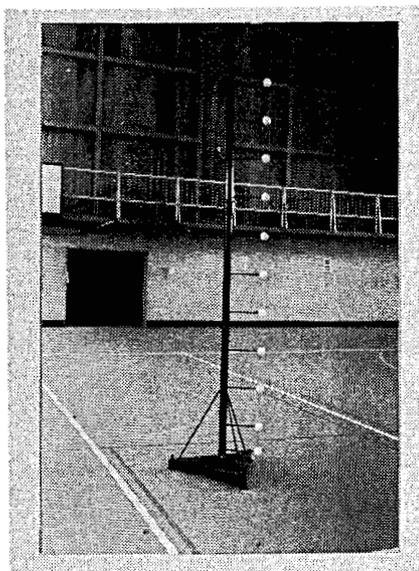


図6 本研究で用いた校正器

(自作、高さ3m、校正点1と床面の距離は17.7cm、校正点1と2の距離は20cm、その他の各校正点間の距離は30cm)

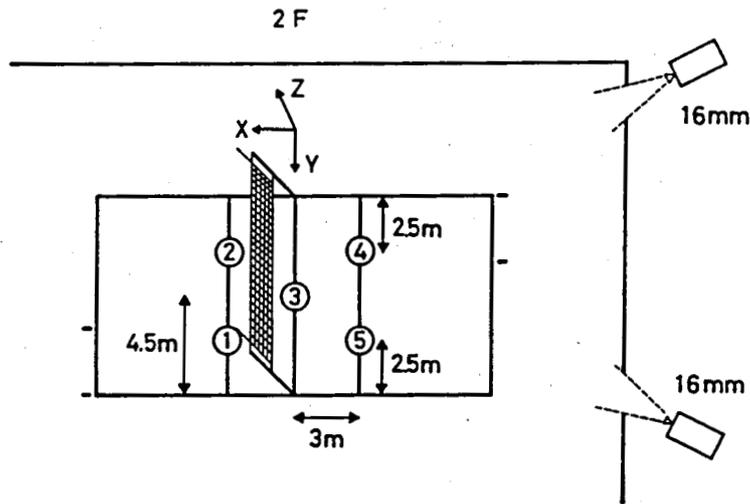


図7 撮影場面におけるカメラ位置と校正器の位置

向とする原点からの距離)を実測した。なお、較正点の鉛直距離は各白球の中心間の距離(設計上既知である)とし、全白球の中心を一鉛直線が通過するよう、較正器の支柱に取り付けてある水準器で調節した。①の地点における撮影と実測が終了した後、較正器を撮影範囲全体に分布するよう、②、③、④、⑤の地点へと順次移動させ撮影と較正点の3次元座標の実測を繰り返した。

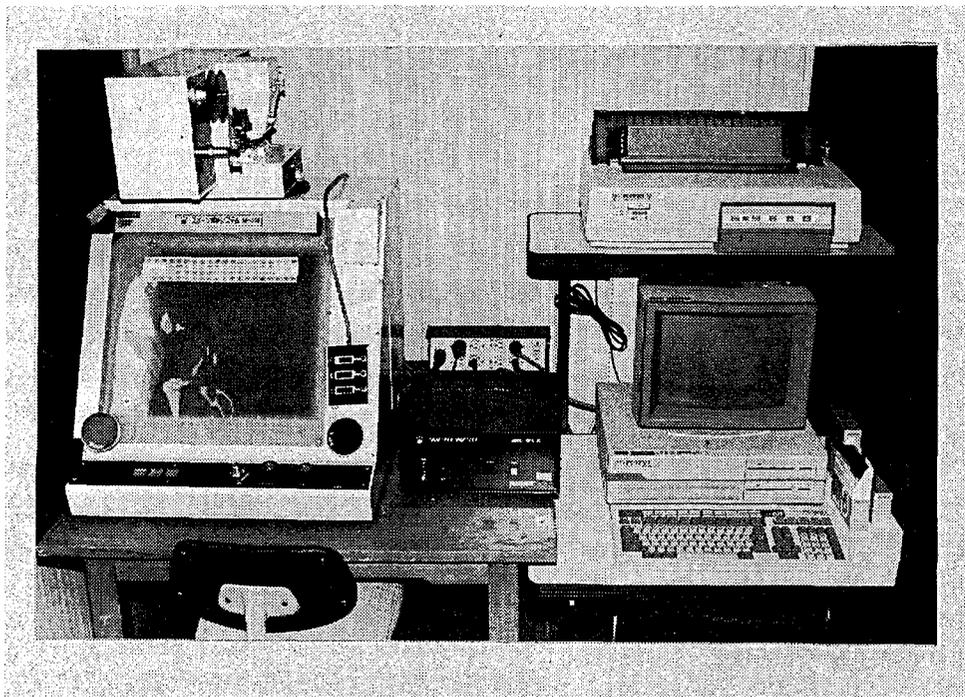


図8 16mmフィルム分析装置(写真左がモーションアナライザー,中央がグラフペンデジタイザー,右がパーソナルコンピューターであり,GPIB I/Oボードを介して各装置を接続し,16mmフィルム分析装置としてオンライン化したものである)

## 2) 較正点のフィルム分析

図8は本研究で用いた16mmフィルム分析装置を示したものである。較正器を撮影した各カメラごとのフィルムをモーションアナライザーにかけ、画像をスクリーン部分に投影した。そして、各較正点の位置及び基準マーク(座標分析における原点)のU、V座標を、グラフペンにより読み取り、得られたデータをパーソナルコンピューターに保存した。①の地点における較正点のフィルム分析が終了したら、モーションアナライザーのフィルムコマを進め、同様の要領で②、③、④、⑤の地点における各較正点のフィルム分析を繰り返した。

## 3) DLT係数の算出

このようにして得られた較正点の2次元及び3次元座標から、図3に示す連立方程式をたて、最小二乗法を使用して正規方程式を求め、これを解くことによりDLT係数を各カメラごとに算出した。しかし、較正点の3次元座標を実測する際の測定ミスのため、求めたDLT係数が運動動作中の身体各部位等の3次元座標を推定するのに充分適切でない場合が生じる可能性がある。そこで、実測による較正点の3次元座標と、得られたDLT係数により推定した較正点の3次元座標との誤差を各較正点ごとに求めて検討した。ここで、もし大きな誤差を持つ較正点がある場合には、その較正点の2次元及び3次元データを取り除き、もう一度各DLT係数を求めなおした。

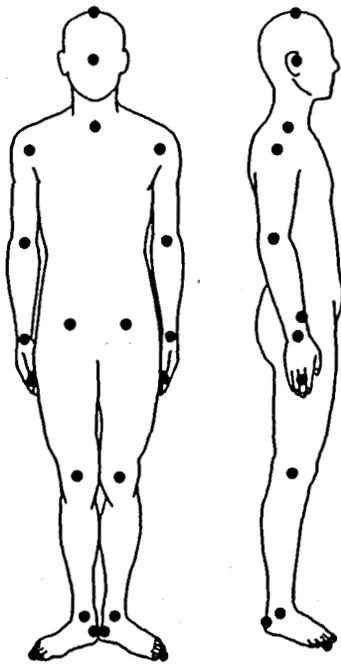


図9 身体各部位21点のデジタイズポイント (デジタイズポイントは身体各部分の端点あるいは各関節中心)

#### 4) 運動動作のフィルム分析

2台のカメラで撮影した運動動作のフィルムを前述したフィルム分析装置にかけ、運動開始10コマ前から運動終了後10コマまで1コマ毎に、図9に示した身体各部位21点等のU、V座標を読み取り、パーソナルコンピュータに保存した。なお、本3次元映画撮影法では運動動作中の3次元座標をDLT係数により推定して求めるので、運動動作のフィルム分析と較正点のフィルム分析における座標検出が同一の条件（モーションアナライザーの投影装置をロックし、スクリーン部分の同じ位置に撮影場面の映像を投影する）で行われる必要がある。もし、運動動作のフィルム分析中に投影装置が動いた場合は、もう一度DLT係数を求めなおした。

#### 5) 各カメラの2次元座標の同期調整

運動動作は2台のカメラで同時に撮影されているが、同一時刻の映像を撮影しているとは限らない。そこで、同期フレーム（例えばインパクトの瞬間）を基準にして各カメラの時間軸を規格化した。このとき、No.1カメラ（分析コマ数の少ないカメラ）の時刻に一致するNo.2カメラのデータがない場合には、ラグランジェの1次補間公式によりNo.2カメラ

のデータを補間して求め、両カメラの2次元座標を同期調整した。

#### 6) 運動動作中の身体各部位等の3次元座標の算出

同期調整された各カメラごとの2次元座標と、既に算出されている各DLT係数から、図4に示す連立1次方程式をたて、最小二乗法を使用して正規方程式を求め、これを解くことにより運動動作中の身体各部位等の3次元座標を算出した。

### 3. DLT法による3次元座標の精度

Shapiro (1978<sup>4)</sup>) は直径2.3cmの較正点を48個吊した四角錐型の較正器（高さ約2m、横約1m）を較正器の基盤の中心から6.7mの位置に固定した2台の高速度カメラ（両カメラ間の距離は2.3mで、両カメラでカバーしている撮影範囲は約3m）で撮影し、ボールの自由落下などのテストを行って、実験室的にDLT法が高速度カメラによる映画撮影法と組み合わせて使用できることを確かめている。そして、橋原 (1987<sup>2)</sup>) はバレーボール国際大会における競技中のスパイク動作を3次元映画撮影法（DLT法）によりとらえ、撮影範囲が広いもの（バレーボールコート約2/3で、高さが約4m）でもDLT法を使用すれば比較的高い精度で定量分析することが可能であると述べている。なお、本研究における較正点に対して実測による3次元座標とDLT法により算出した3次元座標との標準誤差は、較正点数54個で、X方向（サイドライン方向）が0.019m、Y方向（ネット方向）が0.008m、Z方向（鉛直方向）が0.011mであった。

### ま と め

本研究の目的は多量の座標検出、演算処理を必要とする3次元映画撮影法（DLT法）を逐行

するための16mm動作解析システムを確立することであった。分析装置には Nac 社製モーションアナライザー・グラフペンシステム, N E C 社製PC-98XL パーソナルコンピューターを用い, GPIB I/Oボードによりこれらの装置を電氣的に接続した。なお, 座標検出や各種演算処理用のコンピュータープログラムには自作のプログラムを使用した。このような動作解析システムにより算出した3次元座標の精度は良く, 選手が複雑に移動方向を変えたり身体を回転させたりしてプレイするスポーツ競技において, 選手の動作をとらえ, それを分析・検討することが可能であると考えられた。

#### 引用・参考文献

- 1) Bullok, I. K. and Harley, I. K. : The measurement of three-dimensional body movements by the use of photogrammetry. *Ergonomics* 15, 3 : 309-22, 1972.
- 2) 橋原孝博 : バレーボールのスパイク技術に関する運動学的研究—高い打点で強く打撃するためのスパイク技術について—。筑波大学教育学博士論文 : 51—2, 1987.
- 3) 池上康男 : 写真撮影による運動の3次元解析法. *Japanese Journal of Sports Sciences* 2, 3 : 163-70, 1983.
- 4) Shapiro, R. : Direct linear transformation method for three-dimensional cinematography. *Research Quarterly* 49, 2 : 197-205, 1978.
- 5) Walton, J. S. : "Science in Biomechanics Cinematography", Academic Publishers, Del Mar, 1979, 69-97.