

2次元 DLT 法を用いた VTR 動作解析システムの確立に関する研究

橋原孝博*・西村清巳**

*広島大学総合科学部

**広島大学教育学部

A study on the automated VTR motion analysis system by Two Dimensional DLT Method

Yoshihiro HASHIHARA * and Kiyomi NISHIMURA **

* *Faculty of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University*

** *Faculty of Education, Hiroshima University*

Abstract : The purpose of this study was to establish the automated VTR motion analysis system by Two Dimensional Direct Linear Transformation Method. Video digitizer equipped with video cassette recorder, personal computer were used for the VTR film analysis, where the coordinates were automatically transferred into the computer. The position data calculated by 2D-DLT method were very accurate. The mean deviations of computed coordinates from the actual coordinates were 0.012m in the horizontal direction (x), and 0.013m in the vertical direction (y).

キーワード：2次元 DLT 法、映画撮影法、動作分析

緒 言

スポーツ場面の動作分析法として現在最もポピュラーに使用されている方法³⁾は16mm高速度カメラを使用した3次元映画撮影法 (Three Dimensional Cinematography)²⁾である。16mm高速度カメラを用いた撮影は分析に必要な鮮明な映像が得られるが、数分に1回フィルム交換をしなければならない点、カメラのモーター回転数が一定になるまでに約1~2秒間要する点から長時間にわたる動作を連続的に定量解析することは不可能である。一方、VTRカメラは16mm高速度カメラのそのような欠点を補うものであるが、現在の高速ビデオは撮影時に大量の光量を必要とし、屋内スポーツ競技の撮影にはまだ適用が難しい。通常の家用的ビデオは、毎秒30フレームの静止画像しか得られず、分析に十分な撮影コマ数を得るまでには開発されていない。しかし最近、フィールド再生が可能なビデオ編集機が一般に市販されるようになり、毎秒60コマの静止画像までは時系列データを手軽に採集できるようになった。

3次元映画撮影法はまた複数のカメラを使用することから撮影フィルムの分量が多く、身体各部

位の座標検出から力学データの算出に至るまでコンピューターを利用するにしても多大な労力を必要とする。従来の2次元映画撮影法は3次元映画撮影法ほど分析時間を必要としない。しかし撮影カメラの光軸を運動面と垂直に交差するようにカメラを設置することが難しく、その使用は実験室研究のみに限定され、フィールド実験ではこれまで使用されてこなかった。しかしながら Walton が開発した2次元 DLT 法⁵⁾は較正器を設置した平面上での座標が正確に検出されてさえおれば、カメラの位置や方向に関する情報は知る必要がなく、精度の高い2次元座標が得られるとされている。従って、家庭用ビデオで撮影した選手の動作をフィールド再生可能な編集機で再生し、2次元 DLT 法を用いて分析すれば、3次元映画撮影法ほど正確で詳細な情報は得られないが、簡便さではむしろ3次元映画撮影法よりも汎用性の高い定量解析ができると考えられる。

そこで本研究の目的は、ビデオ分析装置のオンライン化をはじめとした2次元 DLT 法による動作解析システムを確立することである。

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

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

図1 実空間における2次元座標 x 、 y とフィルム面上の2次元座標 U 、 V との関係
($A \sim L$ は DLT 係数、Walton, 1979⁵⁾)

方 法

1. 2次元 DLT 法の概説

Walton は図1に示すような実空間における2次元座標とフィルム面上の2次元座標との関係を表す関係式を示している。ここで A 、 B 、 D 、 E 、 F 、 H 、 J 、 L は DLT 係数 (Direct Linear Transformation Parameters)⁵⁾ と呼ばれるもので、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ルム面との距離) により決定される。DLT 法ではこれら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)⁵⁾ を撮影し、この点の2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る。すなわち図1に示す関係式を $A \sim L$ までの係数について解けば、

$$Ax + By + D - ExU - FyU = U \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$Hx + Jy + L - ExV - FyV = V \quad \dots\dots\dots (2)$$

となり、式(1)(2)は A から L まで8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4個の実測値とフィルム面上の2次元座標がわかれば、 U 、 V あわせて8通りの連立1次方程式が得られ (図2参照)、これを解けば $A \sim L$ までの DLT 係数が求められる。

このようにして $A \sim L$ までの8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検出することにより、その実空間座標を求めることができる。つまり式(1)(2)を x 、

y に関して整理すれば、

$$(A - E U) x + (B - F U) y = U - D \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$(H - E V) x + (J - F V) y = V - L \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。ここでU、Vのフィルム面上の2次元座標が得られれば、x、yに関する方程式が2組得られることになり(図3参照)、これを連立1次方程式として解けば、実空間座標x、yが得られる。

以上述べてきた2次元映画撮影法は Two Dimensional Direct Linear Transformation Method (2次元 DLT 法)⁵⁾と呼ばれ、距離較正に用いるコントロールポイントさえ撮影しておればカメラのフィルム面を運動面と平行に設置する必要がなく、これまでの2次元映画撮影法と比べて測定が極めて容易な解析法であるとされている。

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 & -U_1x_1 & -U_1y_1 & 0 & 0 & 0 \\ x_2 & y_2 & 1 & -U_2x_2 & -U_2y_2 & 0 & 0 & 0 \\ x_3 & y_3 & 1 & -U_3x_3 & -U_3y_3 & 0 & 0 & 0 \\ x_4 & y_4 & 1 & -U_4x_4 & -U_4y_4 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & -V_1x_1 & -V_1y_1 & x_1 & y_1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -V_2x_2 & -V_2y_2 & x_2 & y_2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -V_3x_3 & -V_3y_3 & x_3 & y_3 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -V_4x_4 & -V_4y_4 & x_4 & y_4 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ D \\ E \\ F \\ H \\ J \\ L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix}$$

図2 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、1979⁵⁾)

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

図3 実空間座標x、yを求めるためのマトリックス (添字はカメラ台数、Walton、1979⁵⁾)

2. 分析装置のオンライン化と2次元 DLT 法の導入

2次元 DLT 法により動作中の身体各部位および物体の2次元座標を算出する場合、座標検出、演算処理上必要とするコンピュータ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。以下分析手順に従って説明をしていくことにする。

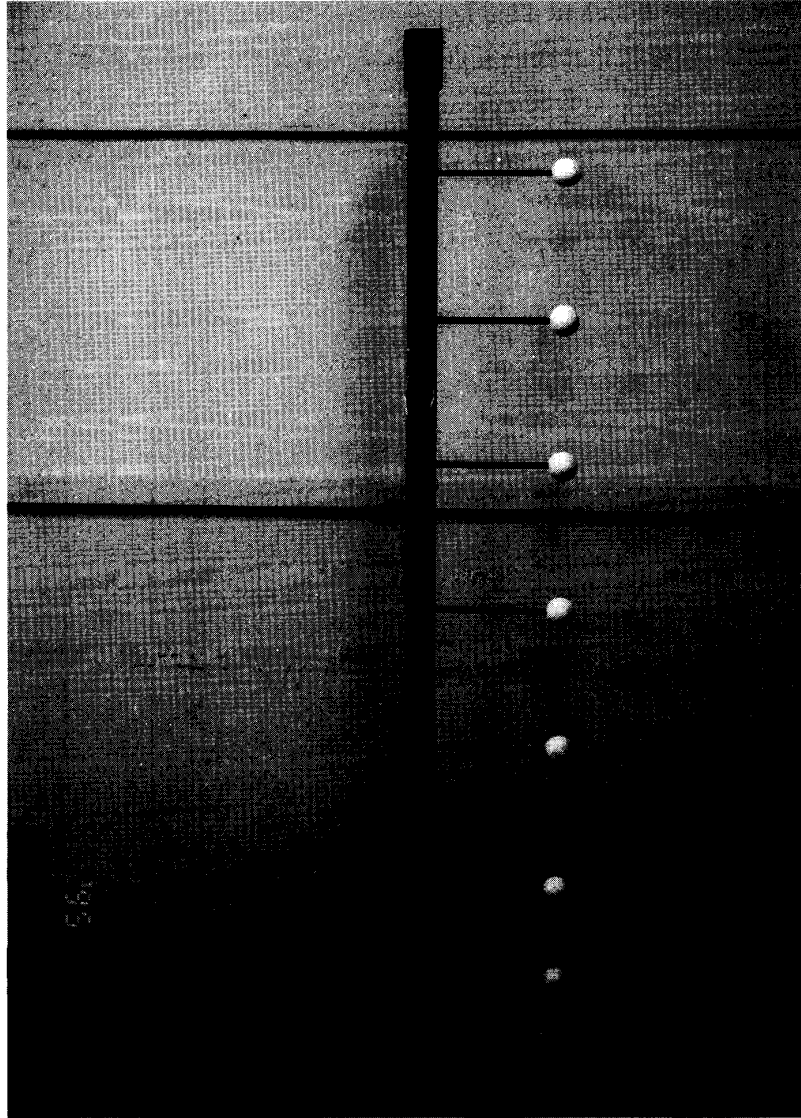


図4 本研究で用いた較正器（自作、高さ2 m、一番下の較正点と床面との距離は17.7cm、一番下の較正点とその次の較正点の距離は20cm、その他の較正点間の距離は30cm）

1) 較正点の2次元座標の実測

図4は本研究で用いた自作の較正器を示したものである。この較正器を図5の①で示す位置に設置し、アタックラインの側方に固定したSVHSビデオカメラで撮影した。同時に被験者がサーブ動作をするラインとエンドラインの交点を原点(0,0)として較正点(較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、鉛直方向をy方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)

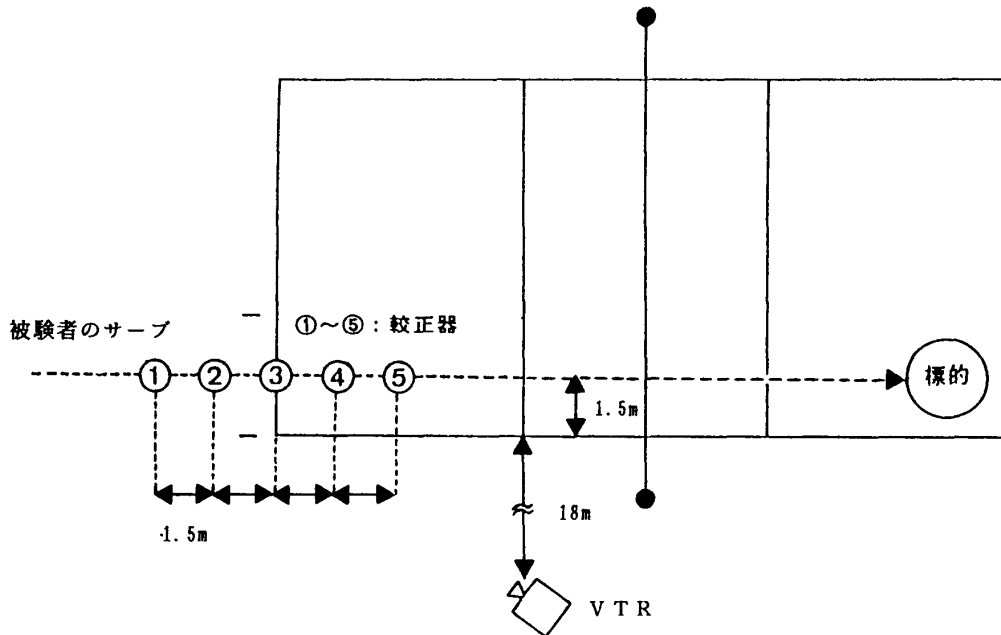


図5 撮影場面におけるカメラ位置と校正器の位置

とし、全白球の中心を一鉛直線が通過するよう、校正器の支柱に取り付けてある水準器で調整した。①の地点における撮影と実測が終了したら、校正器を②③④⑤の地点へ順次移動させ撮影と校正点の2次元座標の実測を繰り返した。

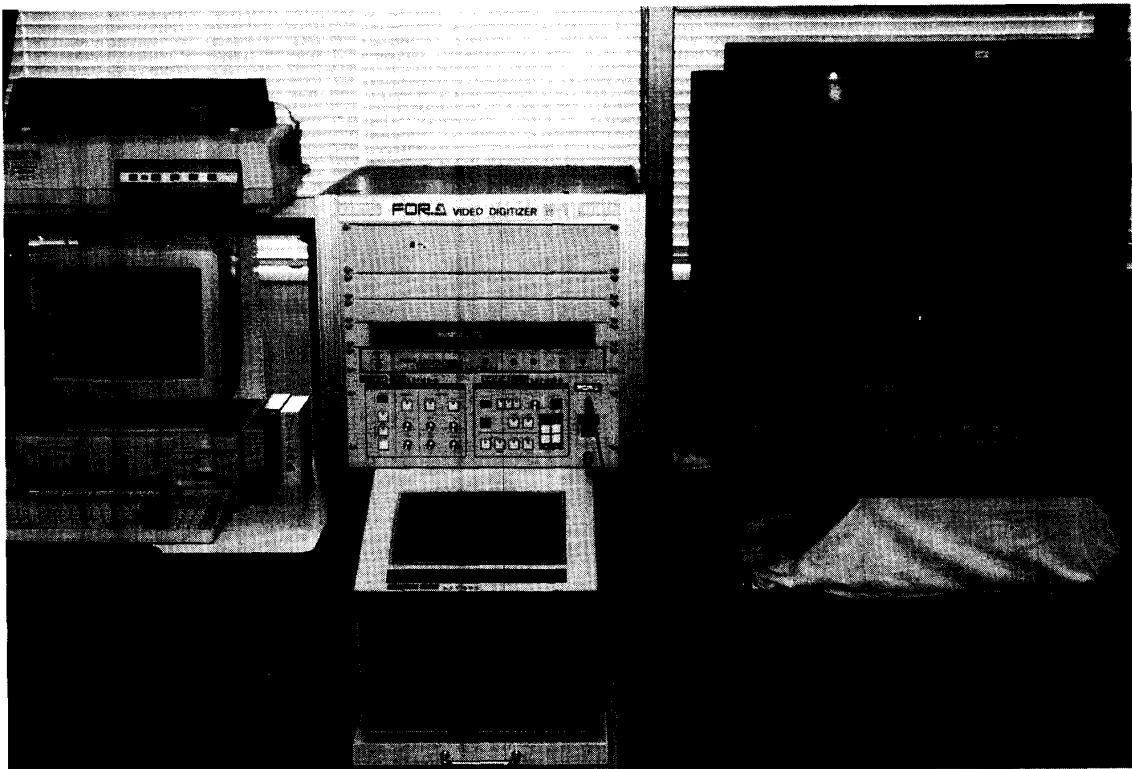


図6 VTR フィルム分析装置 (写真右がビデオ編集機、中央がビデオデジタイザー、左がパーソナルコンピュータであり、GPIB I/O ボードを介して装置を接続し、VTR フィルム分析装置としてオンライン化したものである)

2) 較正点のフィルム分析

図6は本研究で用いたビデオ分析装置を示したものである。較正器を撮影したVTRフィルムをSVHS VTR編集機にかけ、静止画像をビデオデジタイザーのスクリーン部分に投影した。そして各較正点の位置および基準マーク（座標検出における原点）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、VTRフィルムのコマを進め、同様の要領で②③④⑤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次元座標から、図2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係数を算出した。しかし較正点の2次元座標を実測する際の測定ミスのため、求めたDLT係数が動作中の身体各部位および物体の2次元座標を推定するのに適切でないことがあるので、実測による較正点の2次元座標と得られたDLT係数により推定した較正点の2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、その較正点のデータを取り除き、もう一度DLT係数を求め直した。

4) 動作のフィルム分析

VTRカメラで撮影した動作のフィルムを前述した分析装置にかけ、運動開始10コマ前から運動終了後10コマまで1コマ毎に身体各部位および物体の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2次元映画撮影法では動作中の2次元座標をDLT係数により推定して求めるので、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で行われる必要がある。もし動作の撮影中にカメラが動いた場合はそのフィルム部分の計算のために別にDLT係数を求めて使用しなければならない。

5) 動作中の身体各部位および物体の2次元座標の算出

フィルム分析した身体各部位および物体の2次元座標と既に算出されているDLT係数から図3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動作中の身体各部位および物体の2次元座標を算出した。そしてこれをもとに動作中の各種力学データを求めた。

結果と考察

1. 2次元DLT法による座標の精度

表1は本研究で用いた較正点の実測値、推定値（2次元DLT法により求めた同一の較正点の2次元座標）、そして実測値と推定値の誤差を示したものである。本研究における実測値と推定値の誤差の最大値は、水平方向が2.4cm、鉛直方向が2.6cmであり、較正点数31点の標準誤差は水平方向が1.2cm、鉛直方向が1.3cmであった。

ここで示した標準誤差は回帰から求めた推定値と実測値の差の標準偏差⁴⁾のことであり、回帰式のパラメーターの推定精度を表すものである。従って、本研究のようにVTRカメラのフィルム面が運動面と平行になっていなくても、この2次元DLT法を用いれば、精度の高い2次元座標が得

表1 較正点の実測値と推定値の誤差

No.	x (m)	p x (m)	p x - x (m)	y (m)	p y (m)	p y - y (m)
1	-2.95	-2.95647	-6.46925E-03	1.877	1.8711	-0.005898
2	-2.95	-2.95976	-9.75633E-03	1.577	1.5748	-2.20287E-03
3	-2.95	-2.96304	-0.0130405	1.277	1.27871	1.71161E-03
4	-2.95	-2.94059	9.41133E-03	0.977	0.982746	5.74553E-03
5	-2.95	-2.94388	6.12307E-03	0.677	0.687158	0.010158
6	-2.95	-2.94716	2.83694E-03	0.377	0.391789	0.0147891
7	-2.95	-2.94946	5.38111E-04	0.177	0.185161	8.16058E-03
8	-1.45	-1.42893	0.0210685	1.877	1.88371	6.71244E-03
9	-1.45	-1.43312	0.0168824	1.577	1.56172	-0.0152763
10	-1.45	-1.46205	-0.0120521	1.277	1.26939	-7.61223E-03
11	-1.45	-1.44072	0.0092802	0.977	0.976953	-4.69089E-05
12	-1.45	-1.4449	5.10371E-03	0.677	0.655693	-0.0213067
13	-1.45	-1.4738	-0.0237962	0.377	0.363836	-0.0131639
14	-1.45	-1.45134	-1.34432E-03	0.177	0.159708	-0.0172918
15	0.05	0.0285446	-0.0214554	1.277	1.28903	0.0120262
16	0.05	0.048787	-1.21297E-03	0.977	1.00007	0.0230707
17	0.05	0.0685772	0.0185772	0.677	0.682597	5.59741E-03
18	0.05	0.0642835	0.0142835	0.377	0.394295	0.017295
19	0.05	0.0367854	-0.0132146	0.177	0.192546	0.0155464
20	1.55	1.54141	-8.58605E-03	1.877	1.87918	2.17533E-03
21	1.55	1.56011	0.0101078	1.577	1.56465	-0.0123483
22	1.55	1.53091	-0.0190865	1.277	1.2508	-0.0262038
23	1.55	1.55008	7.62939E-05	0.977	0.965403	-0.0115971
24	1.55	1.56874	0.0187398	0.677	0.651838	-0.025162
25	3.05	3.0562	6.19555E-03	1.877	1.89016	0.0131601
26	3.05	3.05042	4.21047E-04	1.577	1.57975	2.75064E-03
27	3.05	3.04518	-4.82416E-03	1.277	1.29777	0.0207692
28	3.05	3.03941	-0.0105896	0.977	0.987819	0.0108185
29	3.05	3.05698	0.0069797	0.677	0.678073	0.001073
30	3.05	3.05122	1.21522E-03	0.377	0.368663	-8.33747E-03
31	3.05	3.04755	-2.45118E-03	0.177	0.17189	-5.11028E-03
標準誤差			0.0119763			0.0134327

※ x, y : 較正点の実測値

※ p x, p y : DLT法による較正点の推定値

※ p x - x, p y - y : 推定値と実測値の誤差

られると考えられる。

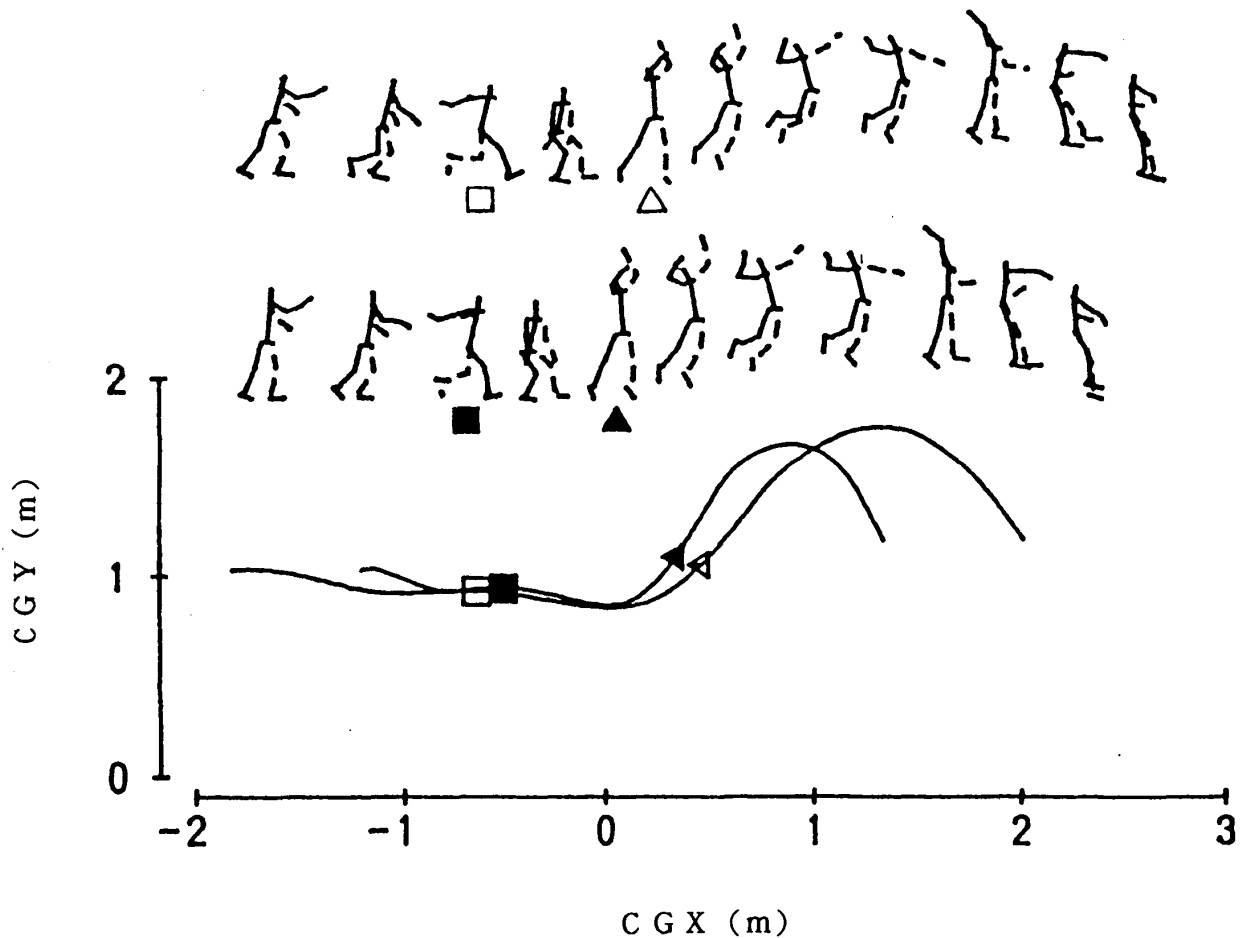


図7 バレーボールのジャンピングサーブ動作中の身体重心の動き（原点は踏切中身体重心が最も低くなった瞬間の床面の位置、CGXは水平方向、CGYは鉛直方向の重心位置を示す）

2. 動作分析結果の一例

以上のようにして2次元DLT法により求めた身体各部位の位置データを、トスを上げた後1ステップの助走からジャンピングサーブをした動作（5試技）と助走中にトスを上げ、さらに1ステップの助走からジャンピングサーブをした動作（5試技）に分け、踏切中身体重心が最も低くなった瞬間の床面の位置を原点(0,0)として規格化・平均化の手法¹⁾により演算処理した。

図7はこのようにして求めたジャンピングサーブ動作中の身体重心の動き（平均）とサーブ動作をスティックピクチャー（平均）で示したものである。黒印の付いた曲線はトスを上げた後1ステップの助走からジャンピングサーブをした動作を、白抜きの印が付いた曲線は助走をしながらトスを上げ、さらに1ステップの助走からジャンピングサーブをした動作を示している。そして各曲線上の■□と▲△はそれぞれ踏切移行時および踏切離地時の重心位置を表している。図上端のスティックピクチャーは左からトス開始時、助走中間、右足を接地して踏切に移行した瞬間、踏切中身体重心が最も低くなった瞬間、踏切離地時、バックスイング中間、バックスイング終了時、フォアスイング中間、空中で身体重心が最も高くなった瞬間（インパクト付近）、手先が肩の高さ付近までフォロースルーされた瞬間、着地時の各動作を示し、破線は左の腕と脚を示している。

選手のプレイがこのように定量解析できれば、これまで経験と勘に頼ることが多かった指導場面

においてスポーツ技術を正しく理解することができ、効果的な技術指導をするのに役立つと考えられる。2次元 DLT 法は選手が複雑に移動方向を変えたり体を回転させたりしてプレイするスポーツ場面の全てを定量解析することはできないが、直線的に移動している場面、例えばバレーボールのサーブやブロック動作では観覧席から斜め方向に撮影したフィルムからでも定量解析できる方法であり、スポーツ技術の有効な分析手段として役立つと考えられる。

ま と め

本研究の目的は、従来の2次元映画撮影法と比較して撮影が容易で、3次元映画撮影法よりも分析に時間がかからない2次元 DLT 法による VTR 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 VTR 編集機を装着したビデオデジタイザー、パーソナルコンピューターを用い、デジタイザーとコンピューターは GPIB I/O ボードにより電氣的に接続した。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2次元座標の精度は高く、スポーツ場面における技術分析の有効な手段として役立つと考えられた。

引用・参考文献

- 1) 橋原孝博・阿江通良・横井孝志・石島繁・古藤高良・渋川侃二 (1988) 規格化・平均化の手法による運動技術解析の試み—バレーボールのスパイク技術について—。体育学研究. 33(3) : 201-210.
- 2) 橋原孝博・小村堯・宮原満男 (1988) 3次元映画撮影法の導入に伴う16mm 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 保健体育学研究第6巻. 33-41.
- 3) 橋原孝博・佐賀野健・西村清巳 (1995) バレーボールのスパイクにおける跳躍距離に関する研究—中垣内祐一選手のスパイクの場合—。広島体育学研究. 21 : 67-74.
- 4) 体育科教育研究会編 (1979) 体育学実験・演習概説。大修館書店：東京。 pp.146-149.
- 5) Walton, J.S.(1979) Close-Range Cine-Photogrammetry:Another Approach to Motion Analysis. In: Terauds, J.(Ed.) Science in Biomechanics Cinematography. Academic Publishers: Del Mar. pp. 69-97.