

# チームスポーツにおけるプレイヤーおよび フォーメーションの三次元計測法の開発

— 因子分解法による三次元分析 —

田房 友典\*・葛目 幸一\*・塚本 秀史\*・横田 臣博

## Development of Three-Dimensional Measurement Method of Players and Formation in the Team Sports — Three-Dimensional Analyses based on Factorization —

Tomonori Tabusa\*, Kouichi Kuzume\*, Hideshi Tsukamoto\* and Takahiro Yokota

### Abstract

In this paper, we propose three-dimensional measurement method based on factorization for analysis of team sports. Usually, three-dimensional measurement is used DLT (Direct Linear Transformation) method. So that the method needs camera calibration; in the fields and the wide area cannot measure it immediately. On the other hand, the factorization can be recovered by non-calibration. In the propose method, the three-dimensional method employing uncalibrated video cameras for 3-D analyzes. We show three team sports (soccer, volleyball and basketball) 3-D analysis results.

### 1. はじめに

二方向以上の映像から得られた二次元座標を利用して三次元座標を計算する研究は、応用分野の広さから多くの研究者によって報告されている。特に身体運動の三次元座標生成(モーションキャプチャ)は、スポーツ分野におけるフォームやフォーメーションの分析、医療分野におけるリハビリテーション運動機能評価、バーチャルリアリティ空間・ビデオゲームにおけるリアルな動作を必要とするキャラクタの生成など、様々な分野で必要性が高まっている<sup>[1]</sup>。

持丸<sup>[2]</sup>は、一般的に三次元座標復元方法は、光学的手法と非光学的手法に分類されるとしている。また、ステレオビジョンに代表される光学的手法は被写体への非接触計測であり、精度の高い安定した復元が可能であるため市販品も多い。しかし、この光学的手法は計測時に世界座標系を定義する必要から、あらかじめ計測場所に専用の計器を設置して二次元座標から三次元座標を計算するためのカメラキャリブレーションを行わなければならない。したがって、計測環境や対象の移動範囲の条件によっては

利用し難い方法ともいえる。一方、トランスミッタで磁場を発生させ、その中でケーブルのついた磁気センサを各関節に装着して運動を測定するといった非光学的手法は、被写体への接触式計測であるため動作や行動範囲が極端に制限される。

また結城ら<sup>[3]</sup>は、スポーツバイオメカニクスで対象とする運動は、広い計測範囲を必要とすることが多く、スピードスケートの場合には、1サイクルの動作の計測に15mの計測範囲が必要としている。固定カメラの前に人間の動作範囲を限定した三次元計測では、池上ほか<sup>[4]</sup>、Abdel-Aziz et al.<sup>[5]</sup>、Marzan et al.<sup>[6]</sup>が報告するDLT法(Direct Linear Transformation technique)が多く用いられる。動作が広範囲にわたる場合、結城ら<sup>[3]</sup>は動作範囲を分割し、各範囲に2台のカメラを固定してその範囲ごとにDLT法を適用しているが、 $N$ 個の範囲に対して $2N$ 個のカメラが必要になり、また結果の連続性にも問題がある。Nachbauer et al.<sup>[7]</sup>は、動作の全範囲にわたってキャリブレーションのための較正点(基準点)を設置し、2台のカメラを自由に動かしながら対象を撮影することによって、対象の動作の

三次元座標計算を行っている。この原理は、2台のカメラが常に最低6個の共有する較正点をとらえるように対象を撮影すれば、サンプリング時間ごとにそれらの点を使ってDLT法が適用できることにある。しかし、この方法は多数の較正点を常設しなければならない、競技会等の実際の競技や演技を計測するには現実的ではない。高松ら<sup>[8]</sup>は、数少ない基準点のみ常設しておき、カメラのパンニング動作につれて、DLT法のパラメータ計算のための較正点の位置を画像上の基準点の位置から求めるといふ、仮想較正点を用いた方法を提案している。しかし、カメラの回転が小さいことを前提とした位置予測を行っているため、撮影対象と計測範囲が限定され、対象となる運動が行われる範囲が広がるとキャリブレーションが困難となる欠点がある。

一方、金出ら<sup>[9]</sup>の因子分解法は複数枚の画像だけを用いて、剛体の三次元形状とカメラ姿勢を推定するというものである。この方法は1台のカメラを移動させながら対象を撮影し、常に観察される測定点の二次元座標を計測行列に挿入する。そして、その計測行列を正射影を仮定したカメラモデルにもとづき、カメラ座標系の正規直交性を満たすようにカメラ運動と三次元形状を表す行列に分解するのであるが、剛体にしか適用できない。タンジュークイラ<sup>[10]</sup>およびTan, J. K<sup>[11]</sup>は、多数のカメラを固定して同時に変形体を撮影し、サンプル時刻ごとに得られる複数の画像から計測行列を作成し、全サンプル時刻の計測行列をひとつにまとめた拡大計測行列を特異値分解することによって、変形体の三次元形状を得る方法を提案している。この方法は、カメラのキャリブレーションが不要であり、また三次元復元誤差の減少と計算結果のつなぎ合せ不要という特徴を持つが、狭い計測範囲を想定したカメラ固定方式のため広範囲に動く対象には適用できない。また、反射マーカを予め計測対象に付着させ、複数台のカメラで撮影し三次元動作の分析を行う方法もあるが、実際の競技会などでは制限があり計測が困難である。そのようなことから実験環境ではなく、実際の競技会での広範囲に移動するチームスポーツのプレイヤーの動きやフォーメーションを三次元的に分析した報告はきわめて少ない。

本研究は、カメラのキャリブレーションおよび反射マーカを必要としない方法で、移動範囲の大きい計測対象を撮影し、タンジュークイラ<sup>[10]</sup>およびTan, J. K<sup>[11]</sup>の因子分解法理論をさらに展開した手法にて、実際の競技会のようなカメラの撮影条件が制限される場面におけるプレイヤー等の二次元座標データ(画像情報)から三次元座標データへの復元を行う。そして、プレイヤーの動作やフォーメーションを各種グラフや3Dグラフィックスに出力し、三

次元動作分析とその誤差の算出を行い、スポーツにおけるプレイヤーの動作及びフォーメーション分析等における本研究の実用性や有用性といった今後の実践的価値について検討することを目的とする。

## 2. 方法

### 2.1 因子分解法(拡大計測行列)にもとづく三次元座標変換手順

3台のビデオカメラで計測対象(プレイヤーやボール)を撮影し、映像上からマウスにてポイントを決め、二次元デジタル座標(以下測定点とする)として取得する。それぞれのビデオカメラ $f(f=1, 2, \dots, F)$ 番目の映像 $I_f(t)(t=1, 2, \dots, T)$ によって、測定点 $s_p(t)(p=1, 2, \dots, P_t)$ が観測される。この測定点の映像上での位置を $(x_{fp}(t), y_{fp}(t))$ とする。時刻 $t$ における $I_f(t)$ 上の $xy$ 座標を順に、対応を取りながら計測行列 $W(t)$ に記入する。

$$W(t) = \begin{pmatrix} x_{11}(t) & x_{12}(t) & \cdots & x_{1P}(t) \\ x_{21}(t) & x_{22}(t) & \cdots & x_{2P}(t) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{F1}(t) & x_{F2}(t) & \cdots & x_{FP}(t) \\ y_{11}(t) & y_{12}(t) & \cdots & y_{1P}(t) \\ y_{21}(t) & y_{22}(t) & \cdots & y_{2P}(t) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{F1}(t) & y_{F2}(t) & \cdots & y_{FP}(t) \end{pmatrix} \quad (1)$$

$W(t)$ を時系列の順に並べた $W$ を作成する。この行列 $W$ を拡大計測行列と呼ぶ。

$$W = (W(1), W(2), \dots, W(t), \dots, W(T)) \quad (2)$$

さらに $W$ を、式(3)を用いて行列 $\tilde{W}$ に変換する。 $Q$ は、行列 $W$ に記入された全測定点の数、 $E$ は成分がすべて1の $Q \times Q$ 行列である。

$$\tilde{W} = W - \frac{1}{Q} W \cdot E \quad (3)$$

行列 $\tilde{W}$ は式(4)に示すように、各ビデオカメラの方向を与える姿勢行列 $M$ と、全測定点の三次元座標を与える形状行列 $S$ とに分解することができる。

$$\tilde{W} = M \cdot S \quad (4)$$

この分解を実際に行うには、 $\tilde{W}$ を特異値分解し、カメラレンズ座標系の正規直交性を利用して唯一解を求める。つまり、計測行列 $W$ に計測対象の二次元座標を挿入するだけで、三次元座標 $S$ を求めることができる。

### 2. 1. 1 三次元グラフィックス表示方法

特異値分解によって分解された三次元座標を与える形状行列 $S$ は、物体に付けられた測定点の三次元座標をフレーム毎に列挙したデータ配列である。データ配列だけでは、フレームの区切りや物体形状を把握することは困難である。

形状行列 $S$ は、測定点が記述されている順序が各フレームで同じである。形状行列 $S$ を示す三次元測定点座標ファイルと、フレーム毎の測定点数や測定点間の接続情報を記述した接続情報ファイルを用いて、任意の対象物に対して三次元グラフィックス表示を行う。

表示用ソフトはOpenGL<sup>[12]</sup>により作成しており、任意に視点方向を変化させることができ、水平方向から撮影した映像を垂直方法からの視点へと移動することができる。

### 2. 2 デジタルビデオカメラによる撮影

計測対象物 (プレイヤーやボール) が広範囲に移動する三種類のチームスポーツのゲームを3台の固定したデジタルカメラで撮影し、三次元座標に変換するための二次元座標データを取得した。撮影はPanasonic (NV-DJ1000,NV-NX2000), Sony (DCR-TRV30) のカメラを使用し、各カメラ間の同期は中央に位置するカメラのフラッシュを用いた。また、三次元座標の復元誤差を算出するための既知の固定点 (サッカーゴール、バスケットボールのバックボード、バレーボールのアンテナ・支柱等) も測定点とした。

各種目の撮影環境を図2.2.1, 図2.2.2, 図2.2.3に示す。点線の円で囲んだ塗りつぶし部分を計測対象とし、撮影は1/10秒の間隔で10秒間行い100フレームを取得した。(バレーボールのみ130フレームとした) 計測対象物は、サッカーがFW 3名, DF 3名, GK 1名, ボール 1個, サッカーゴール, バスケットボールがOF 5名, DF 5名, ボール 1個, バックボード, バレーボールがプレイヤー10名, ボール 1個, ネット・ボール・アンテナとした。測定点は、サッカーではプレイヤーは頭頂部の1ヶ所とし、ボールは中央部1ヶ所, サッカーゴールはコーナー部分を8所の計16ヶ所とした。バスケットボールでは身体の方角や姿勢が分析できるように、プレイヤーの頭頂部と仙骨相当部位の2ヶ所とし、ボールは中央部1ヶ所, バックボード16ヶ所計37ヶ所とした。バレーボールも身体の方角や姿勢が分析できるように、プレイヤーの頭頂部と仙骨相当部位の2ヶ所とし、ボールは中央部1ヶ所, ネット・ボール・アンテナで8ヶ所計29ヶ所とした。

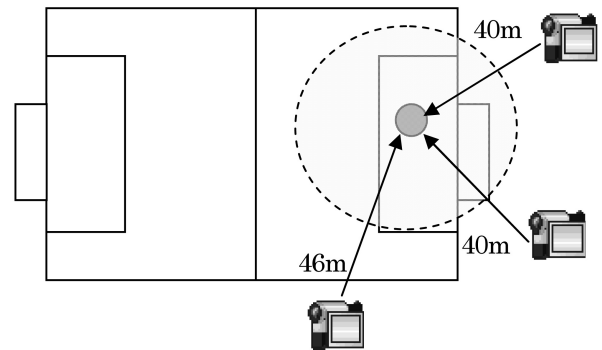


図2.2.1 撮影環境 (サッカー)

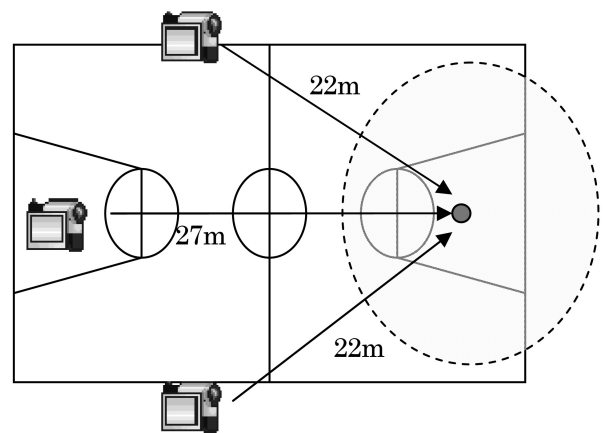


図2.2.2 撮影環境 (バスケットボール)

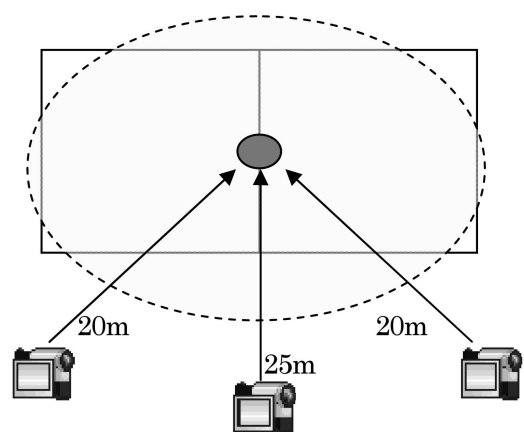


図2.2.3 撮影環境 (バレーボール)

### 2. 3 三次元復元座標誤差の算出

計測対象の中で固定されている物体のある部分の長さ (図2.3.1に示されるようなサッカーゴール・バスケットボード・ネット支柱などの①~②, ③~④, …といった固定点間の長さ) を実測し、各映像フレーム中の固定点間の長さの比を比較することによって、三次元復元座標の誤差を求めた。固定点間の各映像フレーム中の長さを  $L(i)(i=1, \dots, N)$  とし、復

元後の各フレームの長さを  $\hat{L}(i) (i = 1, \dots, N)$  とした。それぞれのフレームの長さの平均を  $L_{ave}, \hat{L}_{ave}$  とし、各フレームを平均の長さに対する比で次のように表す。

$$R(i) = \frac{L(i)}{L_{ave}} \quad (5)$$

$$L_{ave} = \frac{1}{N} \sum L(i) \quad (6)$$

$$\hat{R}(i) = \frac{\hat{L}(i)}{\hat{L}_{ave}} \quad (7)$$

$$\hat{L}_{ave} = \frac{1}{N} \sum \hat{L}(i) \quad (8)$$

誤差  $e$  は次式により計算し、実測値と復元後の比の差を相対誤差として定義した。

$$e = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{R(i) - \hat{R}(i)}{R(i)} \quad (9)$$

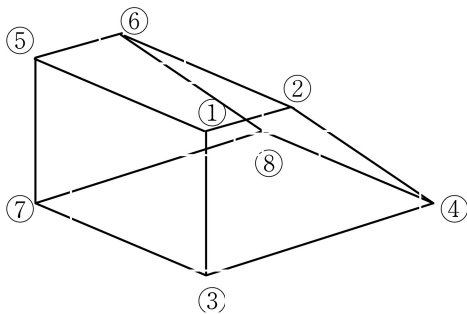


図2.3.1 誤差を算出するための既知の固定点例 (サッカーゴールの測定点)

### 3. 結果

#### 3. 1 三次元復元座標データのグラフ出力

各種目の撮影で得られた測定点を画像上よりデジタイズし、拡大計測行列にもとづき二次元座標から三次元座標に復元した。そして、それらの三次元座標をもとに以下に示す各種のグラフに出力した。横軸はフレーム数 (1/10sec) とし、左縦軸は人間の移動量を画素数単位 (pixel) で表している。移動量は次式

$$d = \sqrt{(\hat{x} - x)^2 + (\hat{y} - y)^2 + (\hat{z} - z)^2} \quad (10)$$

とし三次元空間における移動距離を算出した。ここでの  $x, y, z$  は測定点の三次元座標とした。

図3.1.1はサッカーの各プレイヤー別の1/10secごとの運動量すなわち単位時間当たりのコート内での動

きの大きさを示している。右縦軸はボールの移動量 (pixel) とする。22~29フレームはコーナーキックからのセンタリングの瞬間であり、計測中の各プレイヤーの最も大きな動きの変化がグラフに表れている。その時のFW①②の2名の移動量は180~200pixelであり、DF①②③3名の移動量50pixelの約4倍の動きがある。一方GKは主にFWやDF、ボール位置やゲームの展開によりポジションを変化させる動きが検出されている。図3.1.2は撮影中 (10秒間) の各プレイヤーが三次元的にどれだけ移動したかという総移動距離を示しており、FWがDFの約2倍動いていることがわかる。

図3.1.3はバスケットボールにおけるオフenseプレイヤーの1/10secごとのコート内におけるポジションの移動量の変移を示している。1フレーム目は、offense①がボールをキープし、offense②とディフェンスの様子を伺いながら攻撃に入る瞬間である。21フレームでoffense①は、offense②へパスを出し、一気にゴール付近へ移動する。offense②は、スリーポイントライン上を攻め込み、51フレーム付近で他のoffenseへパスを出し、受け取ったoffenseは、71フレームでシュートし、88フレームでゴールリングへボールが入る。グラフ全体からは、バスケットボールプレイヤー特有のコート内でのダイナミックのポジション変化が観測できる。offense①, ②のグラフからは、攻撃における一連のフォーメーションの動きが見て取れ、offense①, ②間では、プレー局面において5~10フレーム (0.5秒~1秒) の時間差で動作開始のタイミングをずらしている特徴があることがわかる。

図3.1.4は1/10secごとのバレーボールにおける攻撃側コート各プレイヤーの腰の位置およびボールの高さの推移を示している。尚、出力は垂直方向のみの座標変動とし、基準点 (0 pixel) は床平面とした。

1回目の攻撃は1~57フレームまでであり、12フレームのレシーブ、30フレームのトス、45フレームのスパイクで終了している。2回目の攻撃は58フレームからであり、相手コートからの返球を67, 82, 97の3回のプレーで返球し、113フレームでアタッカーが相手のブロックに反応しプレーが終了している。一般的にレシーバーはボールレシーブ時に低い姿勢を取るため腰の位置がセッターよりも10pixel程度低いことがわかる。また、アタッカーはスパイク直前の予備動作として股関節・膝関節の屈曲が深く行われ15~20pixel程度の沈み込みが検出された。

#### 3. 2 三次元グラフィックス出力

図3.2.1と図3.2.2にバレーボールの3Dグラフィック出力例を示す。

図3.2.1は床平面上からネットと平行になるように

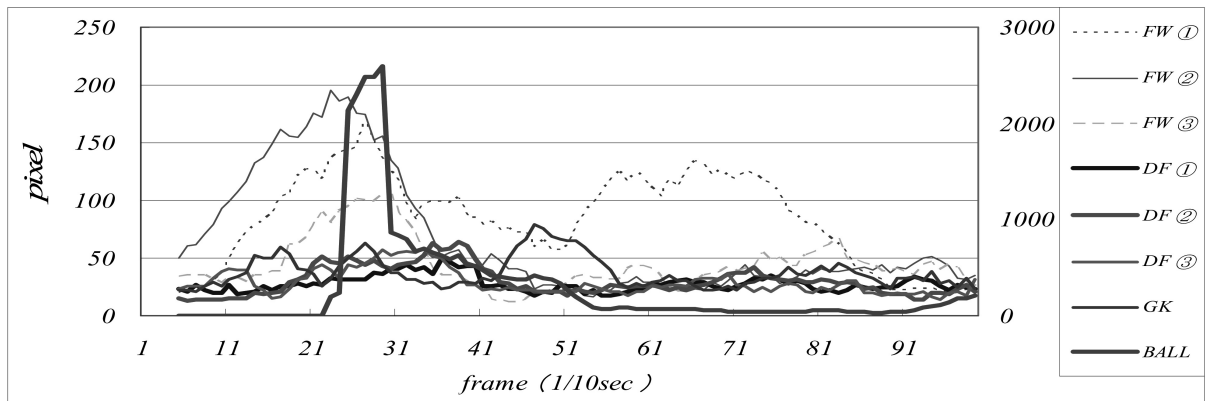


図3.1.1 運動量の変異 (サッカー)

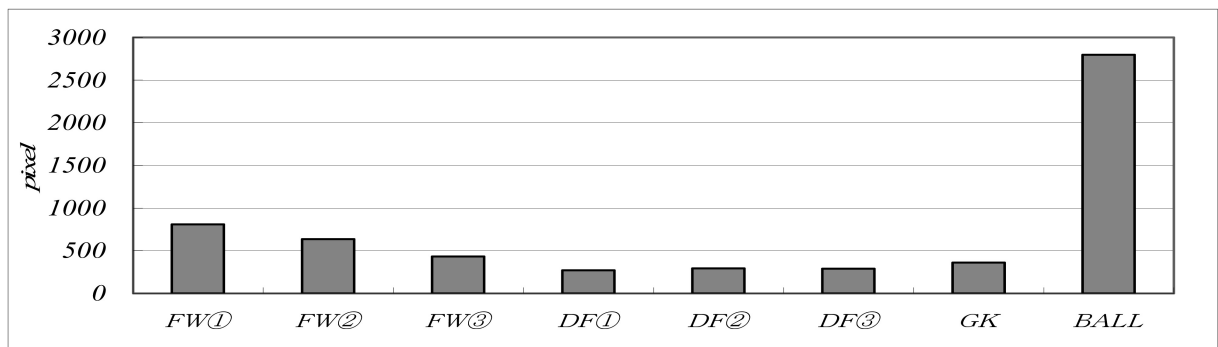


図3.1.2 個人別総移動距離 (サッカー)

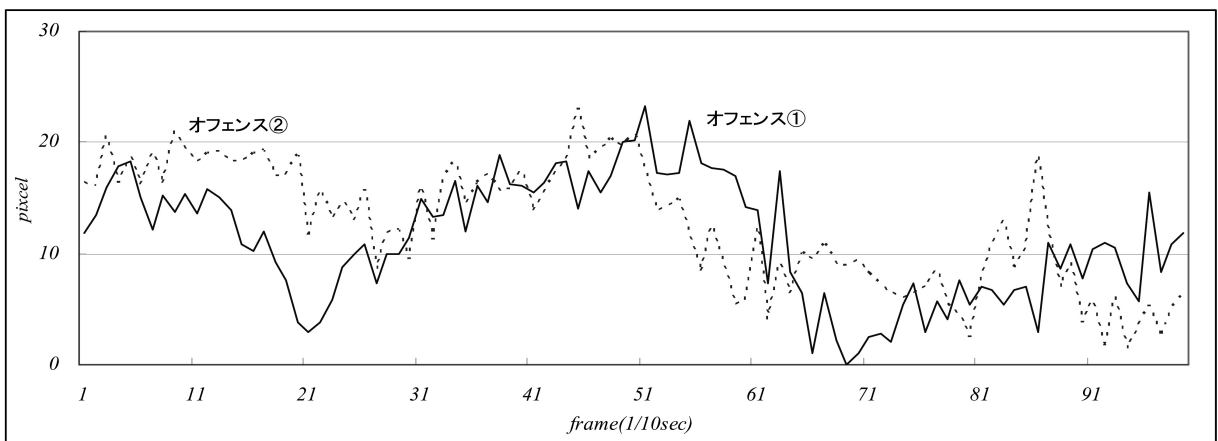


図3.1.3 オフェンス (バスケットボール)

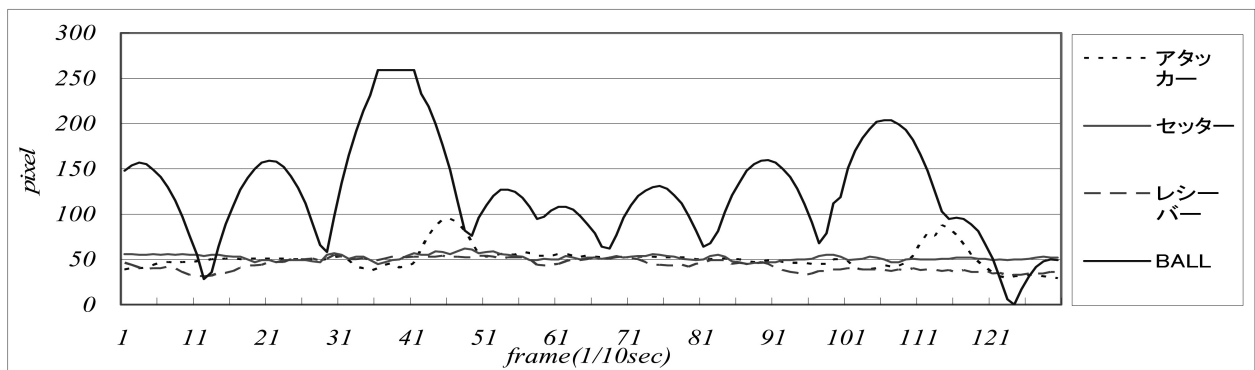


図3.1.4 高さの推移 (バレーボール)

とらえたものである。図3.2.2は天井からの視点に変え、床平面を垂直に捉えてある。図3.2.1は、プレーヤーやボールの高さを観測することができ、図3.2.2は、各プレーヤーの位置関係の変化（フォーメーション）を観測することができる。

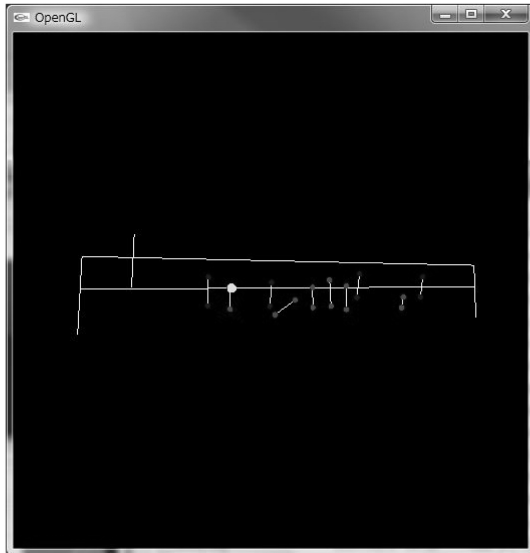


図3.2.1 3D表示 (水平視点)

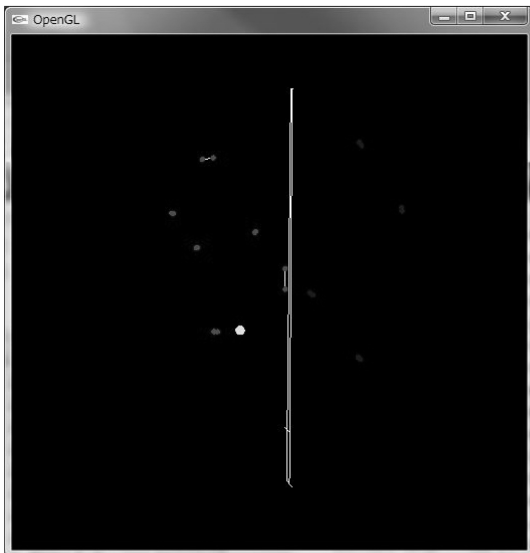


図3.2.2 3D表示 (垂直視点)

表3.3.1 復元誤差

計測対象	測定点数	復元誤差 (%)
サッカー (サッカーゴール)	12	21.15
バスケットボール (バックボード)	8	4.90
バレーボール (ネットと支柱)	5	15.50

### 3. 3 三次元復元データの誤差

表3.3.1は各種目における既知の固定点間の実測値と三次元復元座標との比から算出した相対誤差 (%)を示している。三種目中一番大きな誤差のサッカーゴールと最小のバスケットボールバックボードの差は16.25%あった。復元精度の悪いサッカーは、計測範囲が広範囲としたため、サッカーゴールとカメラの位置関係が遠距離となり、形状を正確に測定できなかった。また、バレーボールは、計測範囲が体育館の側面までとなっているため、側面に近い場所で行う運動は、カメラレンズの歪によって誤差を生じる恐れがある。詳細については、事項で述べる。

## 4. 考 察

本研究はDLT法のような実験環境下の計測ではなく、実際の競技会のようなカメラ設置に制限のある広範囲に移動するチームスポーツのプレイヤーの動きやフォーメーションを分析した。プレイヤーの上下・左右・前後の動きの方向性の分析だけではなく、その動きのスピード（俊敏性など）を他のプレイヤーと対比することができた。そして映像から得られる視覚的な動きだけではなく、プレイヤーやボールの  $x$ ,  $y$ ,  $z$  軸の三次元座標から得られる移動量等の数値計算や、今回出力したパターン以外の様々な分析に対応した出力を可能とした。計測を実施した三種目の計測において、他のDLT法と同様に二次元座標から三次元座標に復元したプレイヤー、ボールの立体的な動きをとらえることができた。

3Dグラフィックスは、三次元座標データをもとに描画し、 $x$ ,  $y$ ,  $z$  軸別に180度回転させ、あらゆる角度からの出力を行った。そのことにより、実際には見られないような角度からのプレイヤーの動きやフォーメーションも分析できたほか、グラフィックソフトによる動画の出力を可能とした。この動画処理は、特異値分解によって分解された三次元計測点座標ファイル（形状行列）とフレーム毎の計測点や計測点間の接続情報を記述した接続情報ファイルを用いて行った<sup>[12]</sup>。その結果、動画を一時停止・スロー再生など多彩な描画を実現させ、計測結果を数値や静止画だけでなく、三次元イメージとして選手や指導者に提供することができるようになった。この点においては、今回実施した方法はDLT法に映像処理技術を付加させた新しい試みである。

三種目の計測においては平均13.85%の三次元復元誤差を生じた。それに比べ、DLT法よりも計測範囲を広げた高松ほか<sup>[8]</sup>が開発したパンニングDLT法の計測誤差は、1%前後と精度が高い。誤差の要因としては、ビデオカメラの射影モデルに正射影を仮定したことがあげられる。そのため正射影近似によ

る誤差が避けられなかった。対策として、擬似中心射影や弱中心射影を用いた近似およびカメラ画質の向上が、三次元復元誤差の低減につながると考えられる。現在のところDLT法を用いた計測法と比較して精度が落ちるため、微細なプレイヤーの動き等の分析には不向きであるといえる。また、映像上からの座標デジタイズに関しては、本研究では手作業で行い労力を要したが、将来的には自動デジタイズプログラムの開発により、撮影とリアルタイムでの三次元動作の分析が可能と考えられる。

競技力向上を目的とする選手や指導者にとっては、DLT法による実験環境で得られた三次元分析データの利用価値は高い。一方、実際の試合などで得られた三次元分析データがあれば、競技力を向上させていく上で非常に有益であることも事実である。しかしながら、スポーツの指導現場にそのような情報はほとんど提供されていない。それは実際の試合では、三次元用分析機材の設置が非常に困難であることに起因する。実際の試合ではメディアなどからプレイヤーの動きやフォーメーションの映像等は得られるだろう。しかし、それは単に視覚的な動きをとらえたものに過ぎず、三次元用分析データとしては使うことができない。水泳競技を例にとると、国内外の有数な大会では、プールの底に設置された移動式および固定式水中カメラから多視点の映像データを取得している。しかし、競技中のプールの中に較正点が設定できないため、DLT法が使えず三次元分析は困難である。他の競技においても、競技エリア内の較正用器具設置が競技進行に支障をきたすため、同じ状況と思われる。このようにDLT法では、実際の競技会のような広範囲な計測・分析といった設定になると、DLTパラメータ算出のための較正点の必要性や測定システムの規模の大きさ複雑さの関係で、計測が非常に困難であるといえる。今回実施した計測法は、競技会場のスタンド等に3台のカメラを設置し撮影を行うといった簡単な方法であり、競技会の運営を妨げることはない。そして測定点の抽出が可能であれば、単体に限らず複数の剛体、変形体、移動体の三次元動作の分析が可能である。また、DLT法のような複雑なカメラキャリブレーションが不要であり、用途に応じて固定点を含む測定点の二次元座標を抽出すれば、各種のグラフに出力したり映像上での測定対象物の移動や回転が自由にできる。また、実際の動きの分析だけではなく、三次元3Dグラフィックスによる動画シミュレーションを出力させてゲームの作戦を検討したり、プレイヤーの視線・位置から見たゲームの全体像やボール・他のプレイヤーの位置を再現させたりするなど、実戦時の動きをイメージさせることも可能といえよう。動作分析やフォーメーション分析のみならず、

選手のイメージトレーニング・新たなるコーチング手法開発など様々な用途に柔軟に対応できるシステムとしても転用が可能である。

以上のことから、本研究における三次元分析方法はいくつかの課題を残しつつも、DLT法にはないいくつかの特徴を有しているといえる。今後、 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 軸別の復元誤差縮小の対策・改善を行えば、計測範囲が限定的でかつ設定が複雑という従来のDLT法をおぎなう映像処理技術を駆使した三次元分析方法として、体育・スポーツ科学の発展に少なからず寄与できるものと思われる。

## 5. まとめ

- 1) 本研究は、広範囲に移動するチームスポーツのプレイヤーの動きやフォーメーションを因子分解法により三次元分析を試みた。計測においてのDLT法との相違点は較正点やカメラキャリブレーションを必要としない点である。また、カメラ設置に大きな自由度があり、実際の試合などにも対応できる計測方法とした。
- 2) 三種目の計測を行った結果、三次元復元誤差は平均13.85%となり、DLT法等の1%前後の誤差と比べ大きな差が生じた。原因として、ビデオカメラの射影モデルに正射影を仮定したことがあげられ、対策として擬似中心射影・弱中心射影を用いた近似およびカメラ画質の向上が考えられる。
- 3) 実験環境下ではなく、広範囲にわたる実際の試合等に対応した三次元分析という観点からは、DLT法はいくつかの点で不向きといえる。しかし、本研究で示した因子分解法による分析方法は、復元誤差の課題が残されているが、DLT法等の欠点をおぎなうことができる。今後、問題点の改善とともに更なる研究が進められれば、新しい計測方法として体育・スポーツ科学の発展に寄与できるものと思われる。

本研究は平成15年度日本体育学会愛媛支部学術研究助成金の交付を受けて行われた。

## 文 献

- [1] ミニ特集：人間の運動計測とその応用：計測と制御, pp.36-9 (1997).
- [2] 持丸正明：身体の運動計測技術の動向：計測と制御, pp.36-9, pp.609-614 (1997).
- [3] 結城匡啓, 阿江通良, 浅見高明：スピードスケートにおける加速理論の再検討：バイオメカニズム 11, pp.111-121 (1992).

- [4] 池上康男, 桜井信二, 矢部京之助: DLT法: J. J. Sport, pp. 10-3, 191-195 (1991).
- [5] 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 Symposium on Close Range Photogrammetry. American Society of Photogrammetry Falls Church VA : 1-19.
- [6] Marzan, G. T., Karara, H. M. (1975) A computer program for direct linear transformation solution of the colinearity condition and some applications of it. In: Proceedings of the Symposium on Close Range Photogrammetric Systems. American Society of Photogrammetry, Falls Church : 420-476.
- [7] Nachbauer, W., Kaps, P., Nigg, B., Brunner, F., Luts, A., Obkircher, G. and Mossner, M. (1996) A video technique for obtaining 3-D coordinates in alpine skiing. Appl J. Biomechanics 12 (1) : 104-115.
- [8] 高松潤二, 阿江通良, 藤井範久: 大きな計測範囲のためのパンニングDLT法の開発: 体育学研究 42, pp.19-29 (1997).
- [9] 金出武雄, コンラッドポールマン, 森田俊彦: 因子分解法による物体形状とカメラ運動の復元: 電子情報通信学会論文誌 76 D-II 8, pp.1497-1505 (1993).
- [10] タンジュークイ, 石川聖二, 加藤清史: 因子分解を利用したモーションキャプチャ法: 計測自動制御学会論文集 36-11, pp.980-984 (2000).
- [11] Tan, J. K., Ishikawa, S (2001) Human motion recovery by the factorization based on a spatio-temporal measurement matrix. Computer Vision and Image Understanding 82 2 : 101-109.
- [12] 田房友典, 安藤美紀: 人の運動解析のための3次元表示に関する研究: 弓削商船高等専門学校紀要 第25号, pp.25-34 (2003).