

## 2点間距離に基づく三次元 DLT パラメータ算出手法に関する研究

藤井 範久

### A Study on the Calculation of the DLT parameters Based on the Distance between Two Reference Points in Three Dimensional Motion Analysis

FUJII Norihisa

The purpose of this study was to develop a calculation method of DLT parameters using both a dynamic calibration method and the Genetic algorithm for three dimensional motion analysis of human movements. A dynamic calibration (DC) method used in this study was as follows: (1) Setting a reference mark for the origin of three dimensional coordinate system. (2) Setting reference marks for axes of three dimensional coordinate system. (3) Winding a calibration rod with two reference marks at each end of the rod. The DLT parameters were computed using the Genetic algorithm in order to minimize the errors between the real length of the calibration rod and the length estimated by the DLT method. Comparing the calibration method proposed in this study and a conventional calibration method (Static calibration method, SC), it is considered that DC method can be used as a simple and quick calibration method for the three dimensional motion analysis, although the standard error of DC method was larger than SC method in normal condition. And also, it is considered that the DC method can correct the DLT parameters calculated by SC method when the three dimensional coordinates of reference marks are erroneous.

**Key words:** Three dimensional motion analysis, Direct Linear Transformation Method, Dynamic calibration method, Genetic algorithm

#### I. 緒言

身体運動を分析する手段の一つとして、画像分析法がある。画像分析法は、ゴニオメータなどの機械的計測方法とは異なり、被験者を拘束せずに複雑な身体運動を分析できるため競技スポーツの動作分析には適している。画像分析法には、カメラ配置によって直交法やステレオグラム法などがあるが、現在ではカメラ位置の制約が少ない DLT 法(Direct Linear Transformation Method) (Abdel-Aziz and Karara, 1971; Marzan and Karara, 1975) が主流である。また近年では、スキーのジャンプ競技(Yeadon, 1989)や棒高跳び(高松ほか, 1998)などの広い計測範囲を測定するために、カメラを固定しないパンニング DLT 法

も提案されている。

DLT 法を用いて動作分析を行うためには、2 台以上のカメラそれぞれについて 11 個の校正係数(以降 DLT パラメータと呼ぶ)を算出するのが一般的である。DLT パラメータは、原理的にはカメラ位置や光軸の方向などから求めることができるが、光軸の方向などを正確に計測することは困難である。そこで、三次元座標値が既知の基準点を 6 点以上撮影し、基準点のデジタイズ座標系における 2 次元座標値から DLT パラメータを算出する(これを校正作業と呼ぶ)。さらに対象とする身体運動を分析する際には、デジタイズ座標系における身体特徴点の 2 次元座標値と事前に算出した DLT パラメータを用いて身体特徴点の三

次元座標値を再構築する。

近年、クロスカントリーレースやMTBレースなど自然環境を競技エリアとしたスポーツが人気を集めている。このようなスポーツの身体運動をDLT法によって動作分析する場合、較正用の基準点または基準点を取り付けた較正器を設置する地面に高低差があり、較正作業を行うためには高低差を測定する時間と手間が必要になる。また水泳の飛込み競技のように基準点を地面に設置することが困難な場合にはワイヤーを用いて基準点を吊るす方法が考えられるが、ワイヤーが揺れて基準点の位置が安定しないなどの問題点がある。このようにDLT法は、較正用の基準点を正確に設置してDLTパラメータの算出ができれば動作を簡便に計測できるものの、測定対象によってはDLTパラメータを算出するのが困難であったり、DLTパラメータの算出精度に問題が生じることがある。

一方臨床歩行分析の分野においては、VICONシステム(Oxford Metrics社)に代表される自動運動計測装置が用いられるようになってきている。自動運動計測装置は、身体に取り付けた反射マーカーを専用カメラで撮影することで、マーカーの三次元座標値を自動的に計測するものである。これらの自動運動計測装置では、「ダイナミックキャリブレーション(Dynamic Calibration)」(以降DC法と呼ぶ)と呼ばれるDLTパラメータ算出方法が採用されている場合が多い。VICONシステムのDC法では、はじめに6個の基準点(三次元座標値は既知)を設置したL字型の較正器を床面に設置して計測空間の座標系を決める。つぎに両端に基準点を取り付けた棒状の較正器を計測空間内で振り回し、DLTパラメータを算出するものである。このDC法は、簡便かつ迅速に較正作業を行うことができるという利点がある。しかし、L字型の較正器を設置する床面が水平でない場合には高低差を測定する時間と手間が必要になり、また反射マーカーを用いることで外光(太陽光)などの外乱に弱いという欠点がある。

以上のことを踏まえて、近年では通常のビデオカメラシステムによる動作分析においても、DC法による較正作業を行うことへの期待が高まっている。DC法による較正作業が可能となれば、撮影したビデオ画像から手作業で二次元座標を測定することは避けられないが、較正用の基準点や較

正器の設置を簡便かつ迅速に行えるという利点がある。また上述したような基準点の設置が困難な場合でも較正作業を行えるなど、通常のビデオカメラシステムによる動作分析の適用性がさらに高まると考えられる。さらに公式競技会での選手の動作分析を行う場合には、競技スケジュールの合間に迅速に較正作業を行わなければならないことも多く、短時間で較正作業を終わらせることには大きな利点である。

そこで本研究では、VICONシステムなどで用いられているDC法を基礎にして、三次元座標値が既知である基準点をほとんど用いずに、棒状の較正器に取り付けた2個の基準点間の距離情報に基づいてDLTパラメータを算出する方法を検討することを目的とする。さらに、新しいDC法を用いる場合の注意点や問題点についても検討を加える。

## II. DLTパラメータ算出方法および実験方法

### 1. DLT法の基本概念

Fig.1は、DLT法の基本概念を説明するために、レンズ中心、レンズの光軸、デジタイズ座標系 $O'-UV$ などの関係を模式的に示したものである。ここで、レンズ中心 $(X_{lens}, Y_{lens}, Z_{lens})$ 、レンズの光軸がデジタイズ座標系と交わる点 $C(U_C, V_C)$ 、レンズ中心から原点に向かう線分がデジタイズ座標面と交わる点 $P(U_P, V_P)$ 、三次元座標系 $O-XYZ$ とデジタイズ座標系 $O'-UVW$ との座標変換用オイラー角 $(\theta, \psi, \phi)$ (原島, 1985)、レンズ中心 $(X_{lens}, Y_{lens}, Z_{lens})$ からデジタイズ座標系までの距離 $L_{lc}$ 、レンズ中心から原点までのレンズ光軸上での距離 $L_p$ とした。このうちレンズ中心座標値を除く9個の値 $(U_C, V_C, U_P, V_P, \theta, \psi, \phi, L_{lc}, L_p)$ をカメラ定数と呼ぶことにする。なおレンズ中心の座標値をカメラ定数とすることもあるが(池上ほか, 1991)、上述の9個のカメラ定数から三次元幾何学的変換を行うことでレンズ中心座標を導出できるので、本研究ではレンズ中心 $(X_{lens}, Y_{lens}, Z_{lens})$ をカメラ定数から除いた。ここで従来の較正方法では、カメラ定数、特に座標変換ベクトル $(\theta, \psi, \phi)$ を直接測定することは困難であるため、三次元座標が既知である基準点とそのデジタイズ座標系における二次元座標値からDLTパラメータを算出する(これをDC法に対してStatic Calibration法、

以降 SC 法と呼ぶ。

さらに、関節などの身体特徴点Jの三次元座標値を算出する場合には、複数のカメラのデジタル座標系における特徴点Jの二次元座標値( $U_j, V_j$ )と、11個のDLTパラメータから特徴点Jの三次元座標値( $X_j, Y_j, Z_j$ )を再構築する。

なお従来のSC法における較正点の設置手順、DLTパラメータ算出、特徴点の三次元座標値算出に関しては本論文の目的の範囲外なので、文献(Abdel-Aziz and Karara, 1971; Marzan and Karara, 1975; 池上ほか, 1991)に譲ることにする。

## 2. DC 法による DLT パラメータ算出方法

### 1) DC 法における基準点の撮影方法

上述したように、9個のカメラ定数を計測することができればDLTパラメータを算出すること

ができる。また三次元座標値が既知である基準点を6個以上設置することによってもDLTパラメータを算出することができる。しかしカメラ定数を直接測定することは困難であり、また緒言で述べたように基準点を精度よく設置できない場合もある。

そこで、従来のビデオカメラシステムによるDLT法の較正作業にDC法を応用することにする。較正作業の基本的な流れは以下の通りである。なお基準点および棒状の較正器の移動のさせ方の概念図をFig. 2に示す。

- (1) カメラ配置：従来の較正方法であるSC法と同様に、複数台のカメラを配置する。この際、2台のカメラの光軸が平行になるような場合は、計測精度が悪くなる可能性があり望ましくない。

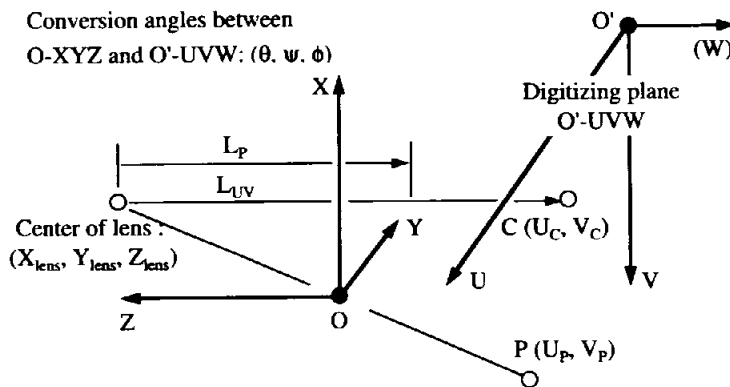


Fig. 1 Schematic illustration for DLT method

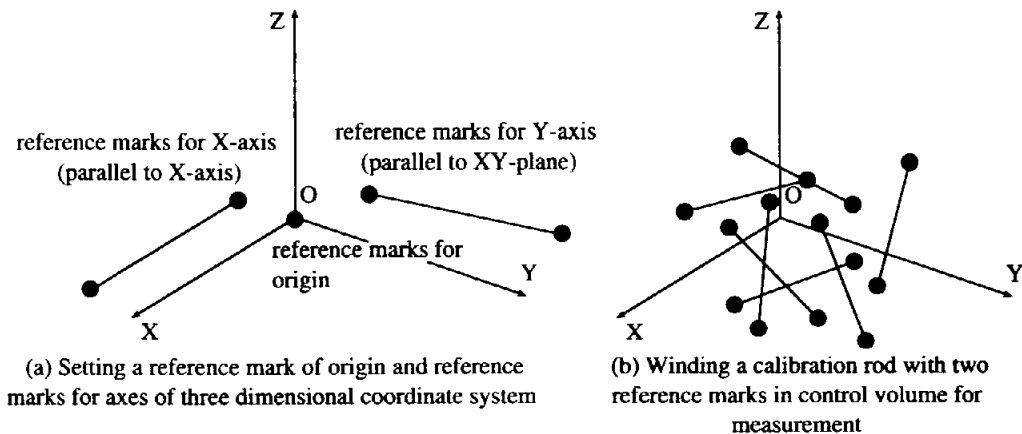


Fig. 2 Calibration procedure of DC method

- (2) 座標原点の設定：三次元座標系の原点となる基準点を、すべてのカメラの画角に入る位置に設置する。
- (3) 座標軸の設定：二つの座標軸(ここでは仮に水平面内の X 軸および Y 軸とする)を設定するために、それぞれ 2 個の基準点を設置する。設置する基準点は、X 軸および Y 軸の方向を設定するためだけに用いるので正確な三次元座標値は不要であり、2 個の基準点が水平になればよい。さらに Y 軸については X 軸とほぼ直交していればよく、X 軸用の 2 個の基準点が座標軸方向と一致していればよい。
- (4) 計測空間の較正：計測空間全体の較正を行うために、両端に基準点 2 個を取り付けた棒状の較正器を計測空間内で無作為に移動させる(具体的には較正器を持って振り回す)。
- (5) 基準点の撮影：原点用基準点、座標軸用基準点、計測空間較正用基準点(較正器)、これらすべての基準点をビデオカメラで同期撮影する。

## 2) DLT パラメータ算出基準

SC 法で DLT パラメータを算出する際には、再構築した基準点の三次元座標値と実測した三次元座標値との誤差の二乗和が最小になるように DLT パラメータを求めている。しかし本研究で検討している DC 法では、原点を除く基準点の三次元座標値は未知であるため、以下の三項目の誤差の和  $E_{DC} = E_{axis} + E_{dist} + E_{recon}$  を DLT パラメータ算出の際の目的関数(評価関数)とした。ただし、以下の誤差は仮の DLT パラメータを用いて算出することになる。

- ・原点および座標軸の三次元座標値に関する誤差  $E_{axis}$ ：仮の DLT パラメータをもとに、原点ならびに座標軸用の基準点の三次元座標値を再構築する。ここで再構築された原点と  $(0, 0, 0)$  との距離、ならびに座標軸用基準点の再構築誤差の和を  $E_{axis}$  とした。なお座標軸用基準点の再構築誤差とは、上述のように X 軸と Y 軸を用いて較正した場合には、X 軸 1m あたりの誤差と、X 軸および Y 軸方向のベクトルの外積計算で求められる Z 軸 1m あたりの誤差の和である。
- ・較正器に取り付けた基準点間の距離に関する誤差  $E_{dist}$ ：仮の DLT パラメータをもとに、較正

器両端の基準点の三次元座標値を算出し、2 個の基準点間の距離と実測値との誤差を算出した。そして較正作業中の全ビデオフレームにおける実測値との標準誤差を  $E_{dist}$  とした。

- ・三次元座標再構築に関する誤差  $E_{recon}$ ：再構築された三次元座標値を DLT 法の基礎方程式に代入したときの誤差を算出し、全ての較正用基準点における標準誤差を  $E_{recon}$  とした。ここで「DLT 法の基礎方程式に代入したときの誤差」とは、概念的には以下のような誤差である。複数台のカメラから基準点に向かうベクトルは理論的には 1 点で交わるが、DLT パラメータに誤差が含まれる場合には、ベクトルは「ねじれの位置」になる。この際のベクトル間の最小距離が「DLT 法の基礎方程式に代入したときの誤差」である。

## 3) DLT パラメータの最適化手法

上述の目的関数  $E_{DC} = E_{axis} + E_{dist} + E_{recon}$  は、仮の DLT パラメータをもとにして算出されるものであり、 $E_{DC}$  を最小にすることで正確な DLT パラメータを算出できると考えられる。ここで仮に 2 台のビデオカメラを用いたとすると、計 22 個の DLT パラメータを求めることになるが、これは多次元非線形システムの最適解を求めることになる。一般に多次元非線形システムは、変数が多くなると解析的に解を求めるのが困難になり、繰り返し処理をともなった最適化処理が必要になる。この際、最急降下法などの古典的な最適化手法を用いて最適化を行うと、いわゆる局所解に陥る可能性があり、DC 法における DLT パラメータ算出には適用できない。

そこで本研究では、最適化手法として遺伝的アルゴリズム法(Genetic Algorithm 法、以降 GA 法と呼ぶ)を採用する。GA 法は、複数の個体が環境との適合度を基準にして増殖、交配、突然変異を繰り返しながら、環境に最も適した個体が生き残ることを模した手法、すなわち生物の進化過程を模した手法である。GA 法は、従来の最適化手法では解くのが困難であった最適化問題に対しても、実用上の最適解を速やかに求めることができる手法であると言われている(安居院と長尾, 1993)。

さらに本研究では、より速やかに、そして局所解に陥る可能性が少なくなることを目的として、最適化処理を以下の 3 段階に分けて行う。なお第

1段階および第2段階においては、9個のカメラ定数から11個のDLTパラメータを算出した後に、基準点の三次元座標を再構築している。

第1段階：9個のカメラ定数のうち、レンズの光軸がデジタル座標系と交わる点 $C(U_c, V_c)$ は、レンズの歪みなどが無視できると仮定した場合にはデジタル座標系の中心になる。また、レンズ中心から原点に向かう線分がデジタル座標系と交わる点 $P(U_p, V_p)$ については、実際に分析(デジタル)することで求めることができる。そこで第1段階では、これらを除いた5個のカメラ定数( $\theta, \phi, \phi, L_v, L_p$ )を独立変数として最適化処理を行う。なお、本研究で用いたビデオ画像分析装置(DKH社, Frame-Dias)の分解能は $512 \times 512$ であり、 $C(U_c, V_c) = C(255, 255)$ とした。

第2段階：第1段階で定数とした $P(U_p, V_p)$ および $C(U_c, V_c)$ についても変数であるとし、9個のカメラ定数を独立変数として最適化処理を行う。これにより、原点基準点のデジタル座標誤差やレンズ光軸のずれを考慮したDLTパラメータを算出することができる。

第3段階：11個のDLTパラメータを独立変数として最適化処理を行う。

### 3. 実験方法

#### 1) DC法によるDLTパラメータの算出精度

DC法によるDLTパラメータの算出精度を検討するため、Fig. 3に示す $1.2 \times 4.0 \times 2.0$ mの計測空間に対してDLTパラメータの算出を行った。具体的には、はじめに原点およびXおよびY座標

軸方向に基準点を設置した。この際、地面が水平であると考えられたので、Fig. 3に示す原点(P1)とポイント2(P2)、原点(P1)とポイント4(P4)を、それぞれXおよびY座標軸方向を設定する基準点として用いることにした。

つぎに2台の高速度ビデオカメラ(Nac社 Memrecam)をX軸方向約25m、Y軸方向±約20mの位置に設置し、計測空間をできるだけ大きく撮影できるように画角を調節した。計測空間付近での左右方向の画角は約5mであり、ビデオ画像分析装置の分解能が $512 \times 512$ なので、デジタル座標系における1単位は約0.01mであった。

そして最後に、基準点間の距離が1.5mのDC法用較正器を計測空間内で無作為に振り回し、2台の高速度ビデオカメラ(Nac社 Memrecam)で同期撮影した。この際、DLTパラメータ算出に利用できる基準点の組は、650組であった。また最適化処理にGA法を用いる際の変数としては、個体数500個、交配率20%、突然変異率25%とし、収束条件は特に設定せず各段階40世代、計120世代の最適化処理を行った。

一方SC法との比較のために、計測空間内の8ヶ所(Fig. 3における白楕円位置)に、基準点を取り付けた棒状の較正器を垂直に立て、SC法によるDLTパラメータ算出を行った。較正器には5個の基準点を取り付けてあるため、計40個の基準点を用いてDLTパラメータを算出した。

そして最後に、DC法およびSC法で算出したDLTパラメータを用いて、SC法で用いた40個の基準点の三次元座標値を再構築した。

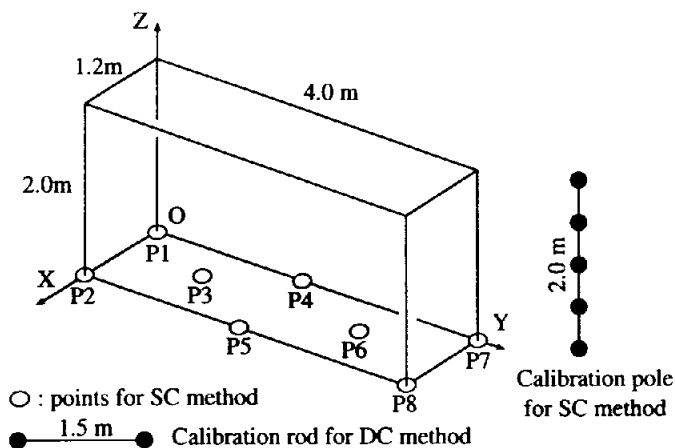


Fig. 3 Control volume for measurement

## 2) DC法とSC法との併用によるDLTパラメータの算出

SC法における基準点座標値が不正確である場合の代表例として、水泳の3m板飛び込み試技の三次元動作分析を取り上げた。そこで、はじめにSC法によるDLTパラメータを算出するために、Fig. 4 (a)に示すようなL型アンクル材とワイヤーを利用した較正器で較正作業を行った。この際、基準点21を座標原点、基準点21から25へ向かう軸をX軸、基準点21から6へ向かう軸をY軸とした。最初に述べたようにワイヤーを用いることで基準点が揺れるが、基準点が動かないような構造にすると較正器の重量が大きくなり、飛び板上で較正器を保持することが困難であったためFig. 4 (a)に示すような構造を採用した。つぎに基準点の揺れはないものとしてSC法によるDLTパラメータ算出を行った。さらに両端に2個の基準点を取り付けた棒状の較正器を無作為に振り回し、2台の高速度ビデオカメラで撮影した。最後に、SC法によって算出したDLTパラメータを、DC法の第3段階の初期値として最適化処理を行った。GA法を用いる際の交配率などの変数は、上述したものと同様であった。なおビデオカメラはプールサイドに置き、見上げるような方向にレンズ光軸を向けて約 $2 \times 3 \times 5$  mの計測空間を撮影した。ビデオカメラと計測空間の距離約30m、カメラ間距離約30mであり、計測空間をできる限り大きく撮影できるように画角を調節した。

## 3) DC用較正器の振り方およびデータ数の影響

DC法における較正器の振り回し方によるDLTパラメータ算出精度の変化を検討するため、上述

した650組の基準点データから計測空間の各座標軸(X, Y, Z軸)に平行もしくは平行に近いデータを450組を抽出した。また同じ650組の基準点データから無作為に450組のデータを抽出した。これら2組のデータを用いてDC法によるDLTパラメータを算出した後、SC法で用いた40個の基準点の三次元座標値を再構築した。

また650組の基準点データから無作為に600個、300個、150個のデータを抽出し、同様にDC法によるDLTパラメータを算出した後、SC法で用いた40個の基準点の三次元座標値を再構築した。

## Ⅲ. 結果および考察

### 1. 最適化処理過程

Fig. 5に、GA法における世代(最適化ループの繰り返し回数)と目的関数(評価関数)の関係を示す。GA法による最適化開始と同時に評価関数が急激に減少していることが分かる。また各世代における最適解(評価関数が最も小さい個体)は、増殖によるものが63%、交配によるものが37%で、突然変異によるものはなかった。すなわち、GA法を用いて得られる最適解は偶然算出されたものではなく、GA法の大域的な最適化能力によって算出されたものと考えられる。

しかし、個体数、交配率、突然変異率など、経験的に決定したパラメータがあり、これらのパラメータの影響については今後の検討課題である。また他の多次元非線形最適化手法についても検討する必要がある。

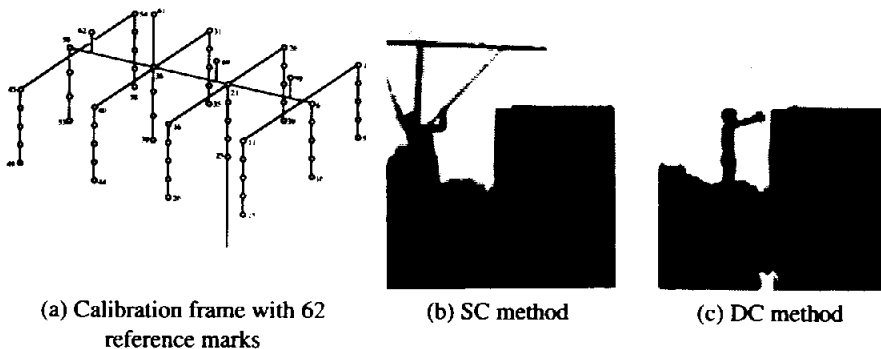


Fig. 4 Calibration procedure for analysis of Diving motion

## 2. DC法によるDLTパラメータ算出精度の検討

Fig. 6に、DC法および従来のSC法によって算出したDLTパラメータをもとに、 $1.2 \times 4.0 \times 2.0\text{m}$ の計測空間を再構築した結果を示す。それぞれ実線が実際の計測空間、破線がDLT法によって再構築した計測空間を示している。またTable 1に、DC法とSC法で求めたDLTパラメータをもとにして、SC法で用いた40個の基準点を再構築した際の標準誤差、ならびにDC法の較正器に取り付けた2個の基準点間の距離を算出して、その平均値と標準偏差を示した。

DC法とSC法による標準誤差は、それぞれ $0.0445\text{m}$ と $0.0334\text{m}$ で、約 $0.01\text{m}$ の差があった。またDC法とSC法によってDC法の較正器に取り付けた基準点間の距離を求めた結果は、それぞれ $1.493\text{m}$ と $1.494\text{m}$ とほぼ同程度であった。

SC法は標準誤差が最小になるようなDLTパラ

メータを解析的に算出したものであり、DC法の標準誤差がSC法より大きくなるのは当然である。またDC法は、計測空間の絶対位置を原点用基準点で決定しているため、基準点のデジタル誤差の影響が計測空間全体の誤差に影響を及ぼす可能性がある。一方SC法では40個の基準点を用いて計測空間の絶対位置を決めており、原点は特別な基準点ではない。そこでデジタル座標系での原点用基準点の二次元座標値に意図的に誤差を与えると、DC法では標準誤差が大きく変動するが、SC法ではその変動は小さかった。

今回の実験において、デジタル座標系の分解能の1単位は、概算で $0.01\text{m}$ であった。DC法とSC法による基準点間の距離計測の差( $1.493\text{m}$ と $1.494\text{m}$ の差)はデジタル座標系の分解能より小さく、DC法による距離計測精度はSC法と同程度であると考えられる。すなわち原点用基準点のデジタルにおける誤差を小さくすることで、

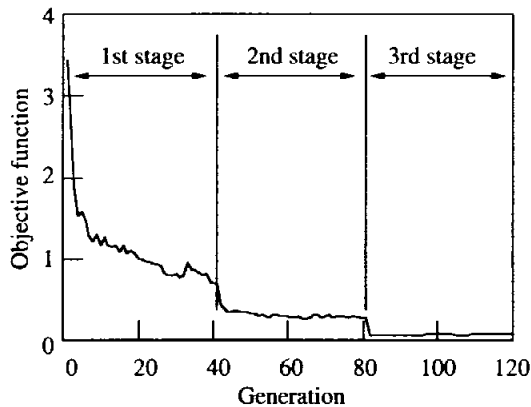


Fig. 5 Objective function during optimization by GA method

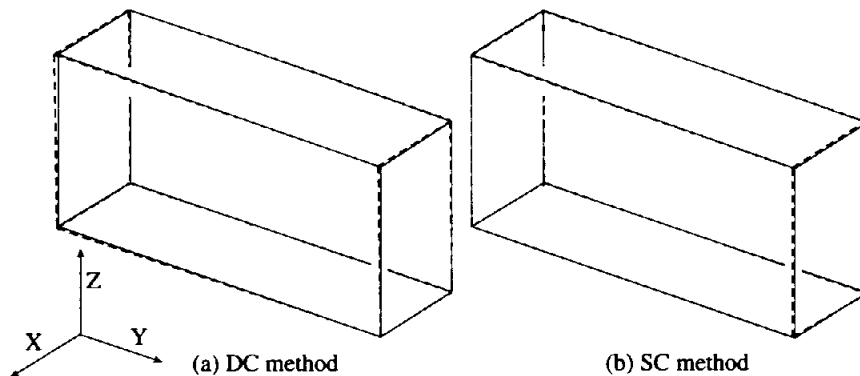


Fig. 6 Reconstruction of control volume

DC法とSC法の標準誤差(0.0445mと0.0334m)は同程度になると予想される。またDC法は、較正作業が簡便で、かつ迅速に行えることを考慮すると、基準点の三次元座標値を測定できない場合や較正作業に時間をかけられない場合にはDC法は有効な較正手段であると考えられる。

### 3. DC法によるDLTパラメータの補正

飛び込み動作を計測することを念頭において、ワイヤーで作成した較正器を用いてSC法による較正を行った。さらにSC法で求めたDLTパラメータをDC法の初期パラメータとし、DC法とSC法を併用する形で較正を行った。Table 2に、それぞれの方法で算出したDLTパラメータを用いて、DC法における基準点間の距離、原点座標値の再構築結果をまとめて示す。またFig. 7に、DC法によって得られたDLTパラメータを用いて再構築した「後方1回半宙返り1回半捻り」のスティックピクチャを示す。

DC法の較正器に取り付けた2個の基準点間の距離は、実測値1.810mに対してDC法1.807±

0.029m、SC法1.817±0.036mであった。また原点の三次元座標値の再構築に関する誤差も、SC法に比べてDC・SC併用法のほうが小さかった。

SC法で用いた較正器の基準点の三次元座標値は無風状態で計測したものであるが、飛び板上での較正作業中はワイヤーが揺れて三次元座標値が変化して誤差が大きくなったと考えられる。しかし、DC法を併用してDLTパラメータを補正することによって、計測誤差を大幅に軽減することが可能であった。すなわち、従来のSC法を用いてDLTパラメータを算出する際でも、基準点の三次元座標値の測定精度が悪い場合には、DC法とSC法を併用することによって精度向上が期待できる。

### 4. DC用較正器の振り方およびデータ数の影響

Table 3に無作為に棒状のDC用較正器を振り回して較正した場合と、各座標軸にほぼ平行に振り回した場合の基準点再構築誤差を示す。無作為に振り回した場合には、後述するデータ数の影響で、標準誤差はTable 1に比べて大きくなってい

Table 1 Errors of calculated reference marks (unit: m)

|           | Standard error |       |       |          | Distance between reference marks |
|-----------|----------------|-------|-------|----------|----------------------------------|
|           | Xaxis          | Yaxis | Zaxis | Absolute |                                  |
| DC method | 0.021          | 0.038 | 0.012 | 0.044    | 1.493±0.015                      |
| SC method | 0.005          | 0.033 | 0.004 | 0.033    | 1.494±0.014                      |

Real: 1.500

Table 2 Errors of calculated reference marks for Diving motion analysis (unit: m)

|              | Errors in axes |       | Distance between reference marks |
|--------------|----------------|-------|----------------------------------|
|              | Xaxis          | Zaxis |                                  |
| DC/SC method | 0.003          | 0.003 | 1.807±0.029                      |
| SC method    | 0.008          | 0.021 | 1.817±0.036                      |

Real: 1.810

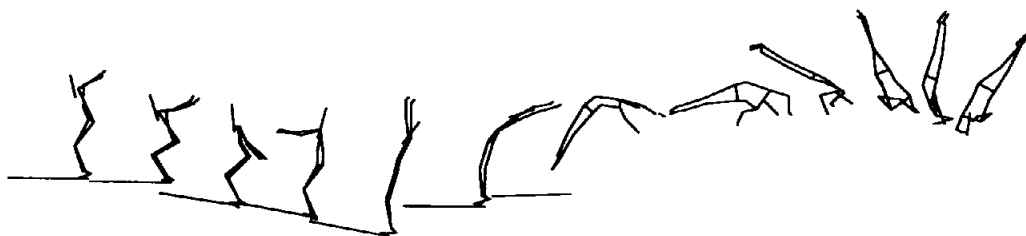


Fig. 7 Diving motion analyzed by DC method



るものの、実用上問題がない範囲であろう。一方、座標軸にほぼ平行に振り回した場合には、無作為に振り回す場合に比べて誤差が約3倍になった。

この誤差が大きくなる要因について、二次元平面内での較正作業に置き換えて考えてみる。まず、計測範囲として Fig. 8 (a) に示すような正方形の領域を考え、較正用の器具を X 軸、Y 軸に平行に移動させて DC 法による較正を行ったと仮定する。この場合、Fig. 8 (b) に示すような菱形の領域を再構築した場合でも、座標軸に平行な2点間の距離は一定であり誤差は発生しない。一方 Fig. 8 (c) に示すように、無作為に移動させた較正器を Fig. 8 (b) の再構築平面に当てはめると、較正器の方向によって2点間の距離が変化す

ることが分かる。すなわち DC 法による較正作業においては、較正器をあらゆる方向に向けることが重要であることが分かる。

Fig. 9 に、DC 法で用いる較正器のデータ数(2点間距離の数)と標準誤差の関係を示す。基準点のデータ数が少なくなるにしたがって標準誤差が大きくなっており、DC 法では多くのデータを必要とすることが分かる。しかしデータ数を多くすることは分析時間の増大につながるため、計測精度と分析時間と関係を考慮したうえでデータ数を決定する必要がある。

#### IV. 結言

本研究では、ビデオカメラシステムによる三次元動作分析において、棒状の較正器に取り付けた

Table 3 Effect of moving pattern of calibration rod in DC method (unit: m)

|                  | Standard error |       |       |          |
|------------------|----------------|-------|-------|----------|
|                  | Xaxis          | Yaxis | Zaxis | Absolute |
| Random           | 0.028          | 0.037 | 0.014 | 0.049    |
| Parallel to axes | 0.105          | 0.039 | 0.064 | 0.129    |

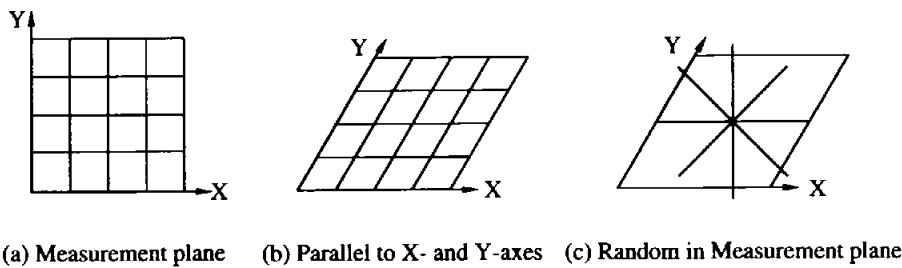


Fig. 8 Effect of moving pattern of calibration rod in DC method

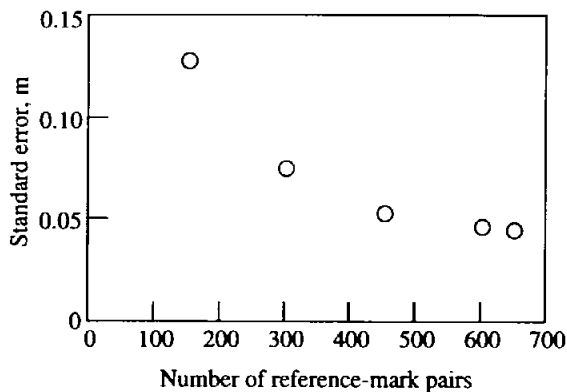


Fig. 9 Effect of the number of reference-mark pairs on the standard error in DC method

2個の基準点間の距離情報に基づいて三次元DLTパラメータを算出する方法(DC法)を提案し、計測精度の面から従来の方法との比較を行った。その結果、DLT法による三次元動作分析を行う際の較正作業について、以下のような知見が得られた。

- (1) 基準点座標値を正確に測定できる場合は、従来の較正方法(SC法)を用いる。
- (2) 基準点を設置できない場合、または短時間で較正作業を終了させなければならない場合は、DC法を用いることで実用上問題のない精度でDLTパラメータを算出することができる。
- (3) SC法を用いてDLTパラメータを算出する場合でも、基準点の三次元座標値の測定精度が悪い場合には、DC法を併用することによってDLTパラメータ算出の精度を向上させることが期待できる。

またDC法によるDLTパラメータ算出手法の精度を上げるためには、以下の点に注意する必要がある。

- (1) 較正器を振り回す際には、無作為に、かつ計測空間内すべてカバーするように振り回す必要がある。
- (2) 原点用基準点ならびに座標軸用基準点のデジタイズ誤差は、計測空間全体の再構築誤差に影響を与えるため、慎重に繰り返して行う必要がある。

本研究の一部は、平成9年度文部省科学研究費補助金(奨励研究(A)09780038)によって行われたものである。また本研究の内容の一部は、日本体育学会第49回大会において発表したものである。

## 引用・参考文献

- Abdel-Aziz, Y.I. and Karara, H.M. (1971): Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. In: ASP Symposium on Close Range Photogrammetry. American Society of Photogrammetry, Falls Church, VA, pp. 1-19.
- 安居院猛, 長尾智晴(1993): ジェネティックアルゴリズム, 昭晃堂, 東京, pp.1-16.
- 原島 鮮(1985): 力学I - 質点・剛体の力学-, 裳華房, 東京, pp.202-224.
- 池上康男, 桜井伸二, 矢部京之助(1991): DLT法. Jpn. J. Sports Sci. 10: 191-195.
- Marzan, G.T. and 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, pp.420-476.
- 高松潤二, 阿江通良, 藤井範久(1998): 棒高跳に関するバイオメカニクス的研究 - ポール弦反力から見た最大重心高増大のための技術的要因 -, 体育学研究 42 6 : 446-460.
- Yeadon, M.R. 1989: A method for obtaining three-dimensional data on ski jumping using pan and tilt cameras. Int. J. Sport Biomechanics 5(2): 238-247.