

# DLT法を用いた動作計測・解析システムの応用と評価

高見涼太郎・高戸 仁郎\*・田内 雅規

**要旨** 人間の身体の動きを細かな手指の動きから歩行に至るまで定量的に解析するための新しい3次元動作計測・解析システムを開発した。このシステムでは計測対象の動作記録に2台のデジタルビデオカメラを用い、パーソナルコンピュータに記録画像を取り込んで処理を行う。測定点は任意に50点まで設定でき、各フレーム毎に任意の計測点の座標を算出することが出来る。測定点の座標計算には、DLT(Direct Linear Transformation)法を用いた。測定精度を評価するために50cm×50cmの平面に5cm間隔で格子状に線を引いた較正板を用いて計測を行った結果、最大誤差は計測範囲の大きさの1.0%以下であり、一般的身体動作の解析には十分な精度であると考えられた。記録用カメラのセッティング状態が精度に及ぼす影響についても検討を行ったが、2台のカメラの較正板からの俯角が15度以下でかつ光軸方向の交差角が60度以上であれば十分な計測精度を得ることが確認出来た。

**キーワード**：動作解析, DLT法, ビデオ撮影法

## I. はじめに

人間の身体は多数の関節と各種の筋肉によって構成されており、複雑な三次元運動を可能にしている。身体及びその部分の動きを解析することによって各種の目的に役立てようとする試みは、産業界、運動学、動作学、保健福祉領域等の様々な分野において行われてきた。その測定は、過去においてはストロボや高速フィルムを用いた2次元の解析法が主流であった。

近年の計算機の計算能力の著しい向上とビデオカメラ関連技術の向上に加え、計算機とビデオ間での画像情報を通信・処理するためのハードウェアとソフトウェアの双方の充実により、画像データの大量蓄積や画像処理が一般のパーソナルコンピュータを用いて比較的容易に出来るようになってきた。これらの既存の技術を活用することにより、身体の動きに対応した3次元空間座標の時空間変化を複数のビデオカメラを用いて記録し、これらの画像を計算機に入力し編集、分析することにより、人間の行動や身体の動きを定量的に解析することが技術的に可能となってきた。この様な技術的背景をもとに、近年

各種の三次元行動・動作解析が可能であるようなシステムが作成され、様々な目的に利用されている。しかしながら、それらの三次元計測方式の多くは身体にビデオカメラで記録可能な形状や色調のマーカー、あるいは発光体等を計測点として用いるものであった<sup>1)</sup>。従ってその使用に際しては、発光体の装着及びカメラの設置条件や照明環境、および較正用フレームの設置といった様々な拘束条件が生じるとともに、システム規模が大きくかつ高価であるという問題点があった。そのため、身体運動の三次元計測に対する要望は極めて高いにも関わらず、まだ一般化していないという現状があり、簡便で、測定環境を選ばず、かつ精度が高いシステムの出現が期待されている。

本研究では、簡便で、測定環境を選ばず、かつ高い精度を有する身体動作計測・解析システムの開発の第一歩として、DLT法を用いた動作計測・解析システム構築を試みた。構築したシステムを用いて実空間の計測を行い、その計測精度を評価した結果、十分実用に耐え得ることが示された。

## II. システム構成

本研究で開発した動作計測・解析システムは、2台のデジタルビデオカメラと、ビデオキャプチャボードを装備した1台のパーソナルコンピュータ及び解析ソフトウェアで構成されている。従来の装置で必要だったマーカ等を用いた計測点の設定や、大規模な照明環境、較正用フレームは必要としない。第一の理由として、高解像度ビデオカメラとパーソナルコンピュータの間での画像通信を画像がほとんど劣化しないデジタル通信で行う技術が開発されたことが挙げられる。このことにより、ビデオテープに記録された高解像度の画像データをデータケーブル一本とインターフェースカードによりパーソナルコンピュータに簡単に取り込むことが可能になった。従って、画像をビデオテープに一旦記録してからパーソナルコンピュータに転送すればよいため、測定現場に大規模な解析装置を現場に持ち出す必要性が無くなった。第二に、画像解析手法としてDLT法(後述)を採用したことが挙げられる。この方法は、3次元空間上の座標の時空間変化を記録画像から計算するため、2台のビデオカメラで計測対象を同時に記録した画像さえあれば、原理的に3次元空間座標を算出することが出来る。デジタル画像通信技術を応用した製品の活用とDLT法の採用は、測定装置と解析装置の分離を可能にし、測定の簡便さを向上させた。

## III. 空間座標の計算方法

一般の画像記録装置が記録出来る画像は2次元平面である。計測対象の実際の3次元空間座標を得るためには、同一時刻において異なる方向から記録した2枚以上の2次元画像上の座標から、求めたい3次元空間座標を計算しなければならない。

3次元空間座標の再構築には、画像記録装置(ビデオカメラ等)の実空間上の位置、光軸の方向、レンズ系の特性といったカメラ変数が正確に知られていることが必要である。しかしながらこれらのパラメータを直接求めることは一般に困難であり、特に屋外環境下ではカメラの位置と方向を正確に定めることがほとんど不可能である。これらの理由から、既知の3次元空間上の座標(以下コントロールポイントと呼ぶ)とそれらを記録した2次元画像上での

座標の双方を用いて、カメラ変数を間接的に計算により求め、さらに求めたカメラ変数を用いて3次元空間座標を算出する方法が開発されている。この方法はDLT(Direct Linear Transformation)法と呼ばれており、現在も体育学の分野において広く用いられている身体の動作記録・解析方法の1つである<sup>2)</sup>。

### III. i DLT法

DLT法は1971年にAbdel-Aziz and Kararaにより開発された<sup>3)</sup>。この方法の最大の特徴は、カメラ変数を計算により求めるため、カメラの位置や方向といったカメラの設置に関する制約が比較的少ないことである。従ってDLT法を用いた動作計測システムを用いれば、屋外においても比較的容易に3次元空間座標の時空間変化を計測することができる。さらに記録した画像の各フレーム毎に計測点の変化を追跡し3次元座標を計算することが出来るため、互いの座標が交差するような複雑な振舞いをする計測対象についても座標を算出する事が出来る。また計測空間の大小に関しても、計測空間を確保する適切なカメラ倍率を選んだ後、倍率を固定して撮影することにより、記録画像から座標を算出することが可能である。

### III. ii DLT方程式とDLTパラメータの算出

DLT法では、次の方程式を用いて3次元座標を算出する<sup>2), 3)</sup>。画像記録装置で記録した画像平面上の座標(U, V)は、3次元実空間上の座標(X, Y, Z)を用いて、

$$U = \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \quad (1)$$

かつ

$$V = \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \quad (2)$$

と記述する。ただし $L_1 \dots L_{11}$ はDLTパラメータであり、これらはカメラ位置や方向といったカメラ変数等を反映した較正係数である(これらの式の詳しい導出方法は文献<sup>2)</sup>を参照)。これらのDLTパラメータを求めるには、式(1)及び(2)を、 $L_1 \dots L_{11}$ に関する連立一次方程式として解けばよい。すなわち11個の未知数に対し、既知のコントロールポイントの座標(X, Y, Z)とそれらを記録した画像平面上

の座標(U, V)を6セット以上用いることにより、Lに関する11個以上の連立一次方程式を得ることが出来るため、これらを解くことによりDLTパラメータを求めることが出来る。

### III. iii DLT法による座標算出

式(1)及び(2)をX, Y, Zに関して整理すると、

$$(L_1 - L_9 U) X + (L_2 - L_{10} U) Y + (L_3 - L_{11} U) Z = U - L_4 \quad (3)$$

かつ

$$(L_5 - L_9 V) X + (L_6 - L_{10} V) Y + (L_7 - L_{11} V) Z = V - L_8 \quad (4)$$

とあらわすことが出来る。従って前述の方法で求めたDLTパラメータと記録した画像平面上の1つの座標(U, V)により、X, Y, Zに関する連立一次方程式が2つ得られる。さらにカメラを2台用いて、各々のカメラについてのDLT変数を求めておく。2台のカメラより同一の空間座標(X, Y, Z)に対し、異なる2つの画像上の座標(U, V), (U', V')を得る。これらから、未知であるX, Y, Zに関する連立一次方程式が3つ以上得ることが出来るため、これらを解くことにより計測対象の実空間座標(X, Y, Z)を算出することが出来る。

## IV. 解析操作

構築したシステム及び解析操作手順は、以下の通りである。

### IV. i 画像データの記録

計測対象の画像データを記録するために2つのビデオカメラ(DCR-VX1000, SONY製)をそれぞれ三脚上に固定し、画像をDVビデオカセットに収録した。計測対象を記録している間は、前述のDLTパラメータが一定となるように、カメラ位置、方向、倍率は一定とした。

記録した画像は、DLT法を用いて座標を計算するため、パーソナルコンピュータ(V450HS, Iiyama製、以下PCと呼ぶ)に転送した。転送は、画像を記録したDVビデオカセットをビデオカセットデッキ(WV-D10000, SONY製)にて再生し、再生した画像をPC上に装備したビデオキャプチャボード(DVBK-W2000, SONY製)を介して取り込みを行

った。取り込み間隔は、計測対象の動作速度に応じて1/30秒から1秒の間で任意に設定することが可能である。取り込み枚数は、一回の取り込み操作当たり最大150枚であるが、繰り返し取り込んでゆくことにより長時間にわたる記録画像を取り込むことが可能である。取り込んだ画像はいったんDVファイル形式にて記録した後、汎用性の高いビットマップ形式に変換しPCに記録した。

### IV. ii 画像データの解析

DLTパラメータ及び3次元空間座標を算出するため、2台のビデオカメラで記録した画像上の座標を求める必要がある。本システムでは、記録したビットマップ形式の画像ファイルをPCのディスプレイ上に表示させ、求めたい画像上の座標をクリックし、そのカーソルの位置から画像上の2次元座標(U, V)を求めた。画像上の座標を正確に求めるために、ビットマップの拡大、縮小表示も行えるように工夫した。また、時系列データとして記録された画像ファイルの表示変更もボタンクリックによりスムーズに行えるように設定した。DLTパラメータを求めるため、6つのコントロールポイントの実空間上の座標を入力した。さらに1台目のカメラで6つのコントロールポイントを記録した際の2次元画像平面上の座標、及び1台目と異なる方向から同一のコントロールポイントを2台目のカメラで記録した際の2次元画像平面上の座標を入力した。これにより、3次元空間上のコントロールポイント6点((X<sub>1</sub>, Y<sub>1</sub>, Z<sub>1</sub>), ..., (X<sub>6</sub>, Y<sub>6</sub>, Z<sub>6</sub>))および1台目のカメラで記録した画像平面上の6点((U<sub>1</sub>, V<sub>1</sub>), ..., (U<sub>6</sub>, V<sub>6</sub>))と2台目のカメラで記録した画像平面上の6点((U'<sub>1</sub>, V'<sub>1</sub>), ..., (U'<sub>6</sub>, V'<sub>6</sub>))の座標を得るので、前述の式(1)及び(2)においてそれぞれのカメラの12個のLに関する連立一次方程式を得る。これら方程式のうち、(U'<sub>6</sub>, V'<sub>6</sub>)に関するものを除いた11個の連立一次方程式を掃出し法により解き、DLTパラメータL<sub>1</sub>...L<sub>11</sub>を求めた。

3次元空間座標は、求めたDLTパラメータと2台のビデオカメラで記録した画像平面上の座標(U, V), (U', V')を前述の式(3)及び(4)にそれぞれ代入して得た未知空間座標(X, Y, Z)についての連立方程式を、掃出し法により解くことで求めた。

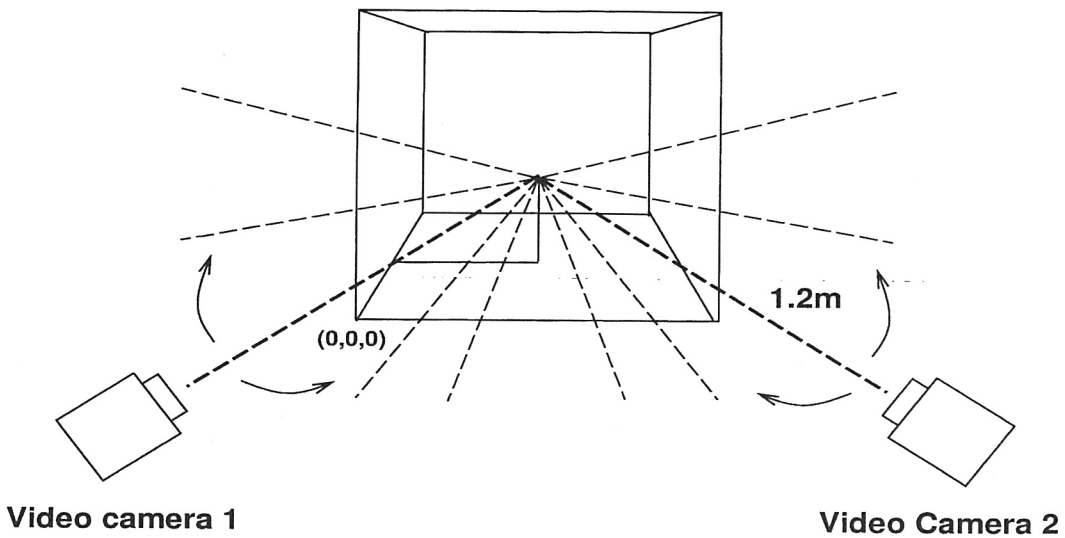


図1 キャリブレーション測定時の2台のデジタルビデオカメラの位置関係。光軸方向の交差角および俯角を変えて同一の較正板の画像を記録し座標を計算した。詳細は本文。

### V. 較 正

構築した計測システムの計測精度を評価するために、既知な3次元空間座標と画像から計算により求めた座標を比較した。既知の空間座標を得るために、高さ10cm、幅50cm、奥行き50cmの較正板を2枚用いた。較正板上の50cm×50cm平面上に5cm間隔の格子状に直線を引き、直線の交点を座標点とした。1枚の較正板上にもう1枚の較正板を垂直に重ねて動かすことにより、一辺の長さが50cmである直方体上の座標を得ることが出来た。

3次元空間座標を計算により求める際、同一のコ

ントロールポイントを用いてもビデオカメラの位置によって測定結果が異なる可能性が考えられる。従ってビデオカメラを先ず、地面から直方体の中心までの高さと同じ高さに設定し、直方体の中心からの距離1.2mの地点に設置し、さらに2台のカメラで記録した画像の中心が直方体の中心座標と重なる向きに設定した。また、このときの2台のカメラと中心を結んだ線が交差する点でなす角（以後光軸方向の交差角と呼ぶ）が90度となるように設定した。さらに、図1に示すように2台のカメラの光軸方向の交差角を90、60、30度と変化させ、さらにカメラの光軸の較正板からの俯角(以後俯角と呼ぶ)も0、15、

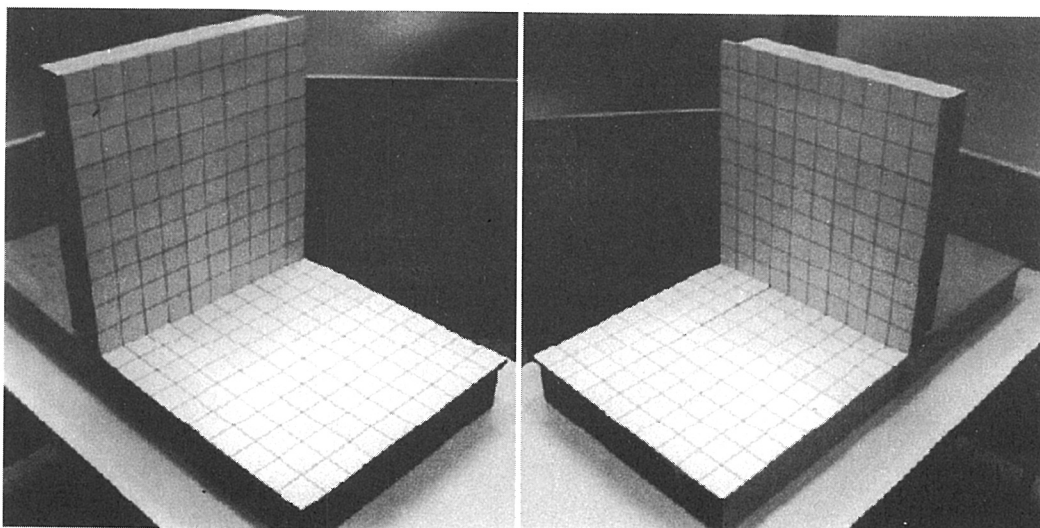


図2 記録画像の一例。光軸方向の交差角90度、俯角30度の場合の2台のデジタルビデオカメラによる較正板の記録画像である。

表1. カメラ角度を変えた際の測定誤差一覧

俯角 (度)	座標軸	光軸方向の交差角 (度)					
		90		60		30	
		標準誤差	最大誤差	標準誤差	最大誤差	標準誤差	最大誤差
0	X	1.2(0.2)	4.3(0.9)	0.9(0.2)	2.9(0.6)	1.3(0.3)	3.7(0.7)
	Y	1.5(0.3)	4.1(0.8)	1.8(0.4)	4.8(1.0)	3.5(0.7)	10.8(2.2)
	Z	1.8(0.4)	5.2(1.0)	1.8(0.4)	4.5(0.9)	2.6(0.5)	9.4(1.9)
15	X	1.3(0.3)	5.5(1.1)	1.3(0.3)	4.5(0.9)	1.3(0.3)	4.0(0.8)
	Y	1.3(0.3)	4.4(0.9)	2.6(0.5)	7.8(1.6)	4.2(0.8)	12.4(2.5)
	Z	2.7(0.5)	8.2(1.6)	2.1(0.4)	6.8(1.4)	1.9(0.4)	7.8(1.6)
30	X	1.1(0.2)	4.0(0.9)	1.2(0.2)	3.4(0.7)	2.6(0.5)	8.3(1.7)
	Y	1.5(0.3)	5.3(1.1)	1.9(0.4)	4.9(1.0)	6.0(1.2)	19.1(3.8)
	Z	2.7(0.5)	10.8(2.2)	2.3(0.5)	7.6(1.5)	4.4(0.9)	13.1(2.6)

単位はmm 括弧内は%

30度と変化させ、直方体の各辺上の座標について記録画像から計算した。記録した画像の一例を図2に示す。求めた座標について、既知の空間座標に対する標準誤差および最大誤差を算出し計測精度を評価した。コントロールポイントの設定パターンは全ての計測において同様とし、各々の座標は、 $(x, y, z) = (0, 0, 500), (0, 500, 0), (0, 500, 500), (500, 0, 500), (500, 500, 0), (500, 500, 500)$ とした。おのおのの条件下において直方体の各辺上の座標132点について計算した際の、既知の空間座標に対する標準誤差および最大誤差を表1に示す。ただし括弧内は、計測範囲の大きさに対する相対誤差(%)である。

表1より、全ての場合において標準誤差は6mm(1.2%)以下であり、最大誤差は19.1mm(3.8%)であった。最大誤差が計測範囲の大きさの1.0%以下となる場合は、俯角が0度かつ光軸方向の交差角が90度および60度のときであることが読み取れる。俯角を増加させていった場合はz軸上の点に誤差が生じてくることがわかった。一方、光軸方向の交差角を減少させていった場合はy軸上の点に誤差が生じてくることを読み取れ、特に60度から30度に減少させた時が顕著であった。全ての場合において、x軸に関しては他の軸に比べて俯角、光軸方向の交差角ともに影響が少なかった。

## VI. 考 察

較正の結果より、俯角が0度かつ光軸方向の交差角が90度および60度のときは最大誤差が計測範囲の

1.0%以下となることがわかった。Woodらは、誤差が2%以上となると許容範囲外であることを指摘している<sup>4)</sup>。従って、我々の得た誤差水準は一般的身体動作の解析には十分な精度であると考えられる。また最大誤差を2%(標準誤差0.6%)まで許容すれば、俯角が15度以下でかつ光軸方向の交差角が60度以上であればこの精度を達成できることが示唆された。このことはカメラ設置条件を従来の計測機器よりも大幅に緩和したものであり、本システムの計測環境に対する柔軟性の高さを裏付けた。

今回の解析では計測対象が較正板であったため、計測精度はこの較正板による空間座標の範囲内において保証される。一般の身体の動作(例えば歩行など)については、計測範囲が今回とは異なってくるので再度較正をする必要がある。しかしながら、カメラレンズ系の非線形要素の影響を考慮しなければ、本システムにおける計測範囲の大きさに対する誤差(%)については計測範囲を変えても大きく変わるものではないと推測出来る。

実際の身体の動作計測、解析を行う際は、2台のビデオカメラで記録される画像間の同期を厳密に取る必要がある。実験中に、点滅するLEDアレイを用い計測対象と同様に記録すれば同期を取ることが可能であることを確認した。しかしながら、LEDの光量や測定環境によってLEDの発光が確認できない場合が想定される。これらの環境下でも画像間の同期を取るための機能(例えば各々のカメラレンズ直下にてLEDを同期させて発光させる等)を今後開発して行く必要がある。

Ⅶ. 文 献

- 1) 中村隆一 斎藤宏 (1992). 基礎運動学. 第4版. 医歯薬出版.
- 2) 池上康男 桜井伸二 矢部京之助 (1991). DLT 法. Jpn. J. Sports Sci., 10(3):191-195.
- 3) Shapiro, R. (1978). Direct linear transformation method for three-dimensional cinematography. Res.Quart., 49(2):197-205.
- 4) Wood, GA and Marshall, RN (1986). The accuracy of DLT extrapolation in three-dimensional film analysis. J. Biomechanics, 19(9):781-785

## A three-dimensional body movement analyzing system adapting direct linear transformation method

RYOTARO TAKAMI, JINRO TAKATO\*, MASAKI TAUCHI

*Department of Welfare System and Health Science, Faculty of Health and Welfare Science, Okayama Prefectural University, 111 Kuboki, Soja-shi, Okayama 719-1197, Japan*

*\*Department of Welfare System and Health Science, Faculty of Medical Science and Welfare, Tohoku-bunka-gakuen University, 6-45-16, Kunimi, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi 981-8551, Japan*

**Abstract** In the present study, we have developed a system that makes us possible to measure a variety of movements of human body quantitatively in three-dimensional space. The system consists of two digital video cameras, a personal computer, a digital video capturing board, and DLT (direct linear translation) analyzing software. In this system, measuring points can be set as many as 50 on one video frame and each of them could be chosen from any part of measuring space. As a result of calibration of accuracy of certain points within the measuring space, the error range of the system was found to be acceptable. The distribution of error ranged under 1.0 percent of the measuring space. Overall, the system developed in this study seems to provide economical and simple three-dimensional movement analysis equipment.

**Keyword** : analysis of body movement, DLT method, video analysis