ビデオ画像を用いたボート漕法の動的解析

Dynamic Analysis of Boat Rowing using Video Imagery

近 津 博 文*, 村井俊治**

Hirofumi CHIKATSU, Shunji MURAI

Abstract : The video imagery gives important information to the dynamic analysis of human motion in the field of sports training or rehabilitation. For understanding the dynamics of human motion from image sequences, however, there are two complicated subjects. One is an image processing, for example, automated recognition of human's feature points such as head, shoulder, elbow, knee etc.. The second is, how to estimate the camera parameter in the photogrammetry.

This paper presents a method to estimate the camera parameter, and shows the results of dynamic analysis in the case of boat rowing. In this study, the bow and no. 2, gold medalists in the Canadian eight team on the Barcelona olympic games at 1992 were selected.

1. はじめに

ビデオカメラの利用はスポーツ時の障害防止, 技術の向上あるいは歩行訓練におけるリハビリテーション等スポーツおよび医学の分野における人体の動作解析に極めて有効な情報を提供するものと期待される。しかし, ビデオ画像の有効利用の為には解決されなければならない二つの問題が含まれている。一つは画像処理であり, 連続画像からの人体の動きの検出, 特に肘, 膝等の人体の特徴点の自動的抽出が問題となる。筆者等は人体および輪郭などの特徴情報を利用した画像処理により1991年8月, 東京で開催された世界陸上選手権100m 競技におけるカール・ルイスの特徴点抽出を行なった¹⁾。その結果さらに高次元での画像処理技術が課題となった。ノイズ部分での輪郭の検出²⁾³⁾, コンピュータグラフィックやアニメーション技術の利用⁴⁾⁵⁾等, 特徴点の自動抽出のためには画像処理技術だけでなくパターン認識, コンピュータグラフィック, アニメーション技術さらには人工知能とを結合した技

術が必要とされる⁶⁾。

従来の動作解析は一般的に固定されたカメラの視準範囲の中において行なわれてきた⁷⁾⁸⁾。したがって, カメラキャリブレーションを予め行なうことが可能である。しかし, 一般的に撮影されたビデオ画像あるいはTV 画像を利用した動作解析を考慮すると, これらの画面には基準点等は存在せず, またカメラに対する情報が得られない場合, さらに物体の移動とともにカメラも移動するような場合(カール・ルイスの動作解析においてはカメラの位置は固定されており回転角が未知量であった。)もありカメラの標定要素をいかに定めるかが二つめの問題となる。

本研究では, 上記二番目のカメラの標定問題を取り上げ, 物体の移動とともにカメラの位置および回転角も変化する例としてバルセロナ・オリンピック(1992年)でのエイト競技の画像から優勝チーム・カナダのバウ(船首の漕ぎ手)と2番に対する一本(一漕ぎ)分の動作解析を行なった。なお, 本研究では特徴点の抽出はマニュアルで行なった。

2. カメラの標定

本研究で使用した画像データはTV 放送用に撮影されたもので, 撮影カメラはボートと共に移動し, ま

* 東京電機大学理工学部建設工学科

** アジア工科大学院(東京大学生産技術研究所)
「写真測量とリモートセンシング」Vol. 32, No. 3, 1993

たTV観戦者のために撮影アングルおよびフォーカスが常に変化している。画面には基準点は存在しない。さらに、国外での撮影のため使用カメラの同定ができず、ビデオカメラのキャリブレーションにおける焦点距離およびスケールファクター等の初期値が設定されない等極めて悪条件下での画像である。

本研究においては画面に見られるコースおよびコース幅用のブイを基準点として利用することとし、各ブイの間隔をボートおよびオール長さ等との関係からコース間隔（横方向）5mおよびコース幅間隔10mとする。しかし、ズーム画面にはブイが入らず、ワイド画面には多くのブイがあるものの人物が小さすぎて例えマニュアルでも特徴点の抽出は不可能であり、約5分30秒間のレース中で動作解析に使用出来そうな画面は1400m（3'47.433"；図1～3'49.066"；図2）付近での約一本分である。図1から2のわずかに約1.6秒の間にもフォーカスが変化していることが認められる。

図1 標定画像（3分47.433秒）

図2 標定画像（3分49.066秒）

単写真標定では次の共線条件式が観測方程式となる。

$$\begin{aligned} x &= -f \frac{a_{11}(X-X_0) + a_{12}(Y-Y_0) + a_{13}(Z-Z_0)}{a_{31}(X-X_0) + a_{32}(Y-Y_0) + a_{33}(Z-Z_0)} \\ y &= -f \frac{a_{21}(X-X_0) + a_{22}(Y-Y_0) + a_{23}(Z-Z_0)}{a_{31}(X-X_0) + a_{32}(Y-Y_0) + a_{33}(Z-Z_0)} \end{aligned} \dots\dots\dots(1)$$

- ここに、 (x, y) ；写真座標
- (X, Y, Z) ；地上座標
- (X_0, Y_0, Z_0) ；撮影点の地上座標
- ω, ϕ, κ ；カメラ軸の回転角
- a_{ij} ； ω, ϕ, κ よりなる回転行列
- f ；焦点距離

しかし、図1および2においてもハレーションが認められるブイが画面上に一直列存在するのみで、標定計算は極めて不安定となる。本研究では $\phi = 0^\circ$ と仮定し、 $\omega, \kappa, f, X_0, Y_0, Z_0$ の6個を未知量とした。

標定計算の実行に当たっては、まずカメラ位置と焦点距離の初期値を任意に与え、収束解が得られる各初期値の範囲を求める。この場合、標定結果は焦点距離の初期値により異なる。そこで、本研究では本解析に使用した一本分以外の画面に撮影されているカメラと人との位置から推定されるカメラ高3.2mを考慮して、焦点距離の初期値を変化させて算出される6個（ $\omega, \kappa, f, X_0, Y_0, Z_0$ ）の標定要素の内、3.2mに近い Z_0 が得られた場合を標定結果として採用する（ $Z_0 = 3.2\text{m}$ と固定させる方法も一つの手段であるが、本研究ではこの値は、標定結果採用の判断の基準にとどめた）。なお、算出された各要素を用いて各基準点に対して式(1)より $Z = 0$ として導かれる次式

$$\begin{aligned} X &= X_0 - Z_0 \frac{a_{11}x + a_{21}y - a_{31}f}{a_{13}x + a_{23}y - a_{33}f} \\ Y &= Y_0 - Z_0 \frac{a_{12}x + a_{22}y - a_{32}f}{a_{13}x + a_{23}y - a_{33}f} \end{aligned} \dots\dots\dots(2)$$

から計算される座標値と予め定めた座標値（図3）との平均二乗誤差（写真1； $\sigma_{xy} = 0.118\text{m}$ ，写真2； $\sigma_{xy} = 0.102\text{m}$ ）は焦点距離に左右されず、推定されたカメラモデルから十分に対象平面が再現されると判断されるため焦点距離の厳密解に拘束される必要はない。図3に図1および2における座標系を示す。

表—1は図1および2に対するキャリブレーションの結果である。図3に図1，2に対するカメラの位置

図3 標定画像における地上座標

表1 標定結果

図1	図2
ω ; 87°14'16.7" (0.5816°)	87°18'44.2" (0.3464°)
ϕ ; 0°0'00"	0°0'00"
κ ; -1°0'37.2" (0.5820°)	0°43'33.0" (0.3465°)
X_o ; 8.253m (0.1448m)	13.521m (0.0857m)
Y_o ; 90.687m (0.4339m)	90.364m (0.2500m)
Z_o ; 3.132m (0.4077m)	3.287m (0.2458m)
f ; 2200.395mm (0.7122mm)	1499.921mm (0.3502mm)

ただし, () ; RMS

を示す。

一方, 図1と2の間(約1.6秒間)では ω , κ , f , X_o , Y_o , Z_o は直線的に変化するものと仮定し, 一本分の各画面に対するこれらの未知数を定める。

3. 人体の特徴点位置の解析

各特徴点は完全な動作の繰り返しが行なわれるものとして3分47.4秒から3分48.9秒迄の45画面を一本分とした。また, 本研究で動作解析の対象とする人体の特徴点は頭, 首, 肩, 肘(左右), グリップ(左右), 背中, 膝, シートおよび踵の11点である。これらの各特徴点に対する平面座標(X' , Y')はカメラの位置からボートが走行している平面までの距離は一定であること(図4)を考慮すると, 次式より算出される。

図4 カメラとボートとの位置関係

$$X = (Z' - Z_o') \frac{a_{11}x + a_{21}y - a_{31}f}{a_{12}x + a_{22}y - a_{32}f} + X_o'$$

$$Y' = (Z' - Z_o') \frac{a_{13}x + a_{23}y - a_{33}f}{a_{12}x + a_{22}y - a_{32}f} + Y_o' \dots\dots\dots(3)$$

ここに, X_o' , Y_o' , Z_o' ; カメラの位置,

図5はバウ波よけ先端, 踵およびシート部分の鉛直方向の時間変位を示したものである。図5より船の上下動が理解される。図6は船の水平方向に対する相対速度および加速度を示したものである。図7から図8にバウおよび2番の各特徴点に対する時間変位を示す。各特徴点の水平変位はバウ波よけに対する変位であり, また鉛直変位はバウ波よけの鉛直方向の変位を差引き船の上下動の影響を除いたものである。

なお, これらの図は5点平均により平滑化処理を施

図5 バウ波よけ, 踵およびシートの鉛直変位

(a) 相対速度

(b) 加速度

図6 ボートの速度と加速度

した結果である。

4. 動作分析

キャッチ（漕ぎ始め）の瞬間を水面に接したオールブレード（オール先端の偏平部）から水飛沫が上がる1コマ手前の画面およびフィニッシュ（漕ぎ終わり）の瞬間をブレードが水面から離れる画面とすると、2番のブレードの動きより各動作の瞬間は3分47.8秒（キャッチ）および3分48.4秒（フィニッシュ）となる。したがって、一本中におけるストローク（ブレードが水中にある時間）とフォワード（ブレードが空中にある時間）との比率は1：1.5となる。また、この時点におけるストロークの強さはピッチ40の力漕と分析される。

図9は頭、肩、肘、グリップ（握り部分）、背中、膝およびシートの一本中のバウおよび2番の動きの軌跡を示したものである。なお、これらの軌跡は踵を原点としたものであり、肘およびグリップについてはインボード（オール後端）側ではバウの左腕と2番の右腕、アウトボード（オール前端）側ではバウの右腕と2番の左腕との比較を行なった。

図9よりバウの膝およびシートのレンジ（移動範囲）

(a) 頭、首、肩、背中、膝、踵の水平変位

(b) グリップ（左右）、肘（左右）、シートの水平変位

(c) 頭、首、肩、背中、膝、踵の鉛直変位

(d) グリップ（左右）、肘（左右）、シートの鉛直変位

図7 特徴点の時間変位（バウ）

は2番に比べて短く、逆にグリップ、肘、頭、肩および背中に対するレンジは大きく、バウは上体の前傾・後傾を大きく、背中を湾曲させ、体のもたれを大きく

(a) 頭, 首, 肩, 背中, 膝, 踵の水平変位

(b) グリップ (左右), 肘 (左右), シートの水平変位

(c) 頭, 首, 肩, 背中, 膝, 踵の鉛直変位

(d) グリップ (左右), 肘 (左右), シートの鉛直変位

図8 特徴点の時間変位 (2番)

取った漕法を採っていることが理解される。また、フィニッシュ後のハンズアウェイ (両腕の移動) もバウおよび2番の各グリップは前方や上に向かい理想的な

(a) グリップ, 肘 (インボード側)

(b) グリップ, 肘 (アウトボード側)

(c) 頭, 肩, 背中, 膝, シート

図9 特徴点の軌跡

動きを示している。

図11は図10におけるバウと2番に対する角 α , β の時間変位を示したものである。図11においてもバウは背中を湾曲させて前傾・後傾を大きく採っていることが分かる。また、バウ, 2番ともに最大前傾角(47.633秒)付近においてすねが最も鉛直に近い漕法姿勢となり、脚の開きと体の開きが同時に進行している。バウはフォワード後半のシートレンジの短さを上体の前傾により、フォワード前半のグリップレンジの大きさを

図10 漕法姿勢

(a) 角 α

(b) 角 β

図11 漕法姿勢の時間変位

体のもたれにより補っていると分析される。なお、キャッチ直前において2番の β がバウに比べて大きいのは2番の膝は左腕に遮られているため抽出時に誤差が含まれた結果と判断される。

一方、図12(a)は踵とグリップとの水平方向に対する距離の変位からバウおよび2番のアウトボード側におけるグリップ速度を示したものである。ミドル中間からフィニッシュ直後にかけてバウは2番より早いグリップ操作を行ないレンジの大きさを補っていると理

解される。図12(b)はシートの水平方向の速度を示したものである。なおキャッチ(47.8秒)と同時に各水平速度の減少が認められる。

バウは上体の前傾・後傾を大きく取り、レンジを長くした漕法であり、2番は上体の揺れを小さく取り、脚を中心にした漕法とボート漕法における代表的な二つの漕法姿勢⁹⁾の典型的な特徴を示した例と思われる。

(a) グリップ

(b) シート

図12 グリップとシートの速度

5. シミュレーション

各特徴点の動きの視覚化はボート漕法のトレーニングにおいても有効な方法である。本研究ではバウと2番の動きをスティックモデルにより再現し、一本分の動きを百本繰り返すシミュレーターを作成した。本シミュレーターは次の3つの選択項目からなり、表示対象をバウ、2番および両者の3通りの選択ができる他、ストロークの強さも3段階用意した。

1. 百本分の連続的スティックモデルの表示
2. 一本分の各特徴点の軌跡の表示
3. 一本分の連続スティックモデルの表示

また、キャッチ時およびフィニッシュ時には信号音

が発生され、ディスプレイ上ではスティックモデルの色が変わる等聴覚的にも視覚的にもトレーニングに有効な環境とした。

図13は両者を選択した場合の上記3項目の表示例であり、(a)はローイング中のフィニッシュにおけるスティックモデル、(b)は一本分における頭、首、肩、背中、肘(左右)、グリップ(左右)、膝およびシートを選択した場合の各特徴点の軌跡、(c)は一本分の連続スティ

ックモデルを表示したものである。

5. 結 論

本研究ではビデオ画像を利用してバルセロナ・オリンピックでのエイト競技の動作解析を行なった。その結果を以下に示す。

- 1) 画面上に写し込まれているコースおよびコース幅用のパイを基準点とすることによりカメラの標定計算が可能となった。
- 2) バウおよび2番の漕法姿勢はボート漕法における代表的な二つの姿勢の典型例であることが分析された。
- 3) 各特徴点の動きをスティックモデル化したシミュレーターはボート漕法のトレーニングに有効な方法であると思われる。

今後、ビデオ画像を利用した人体の動作解析のためには画像処理において特徴点の自動抽出システムが課題と思われる。

(受付1993. 3. 2, 受理1993. 5. 11)

参 考 文 献

- 1) H. Chikatsu etc.: Sports Dynamics of Carl Lewis through 100 m race using Video imagery, 17th ISPRS, Com. 5, Washington. D.C., pp. 875-879, 1992.
- 2) M.K. Leung and Y-H. Yang: Human body motion segmentation in a complex scene. Pattern Recognition, Vol. 20, No. 1, pp. 55-64, 1987.
- 3) K. Akita: Image sequence analysis of real world human motion. Pattern Recognition, Vol. 17, No. 1, pp. 73-83, 1984.
- 4) T.W. Calvert: Goal-Directed, Dynamic animation of human walking, Computer Graphics, Vol. 23, No. 3, pp. 233-242, 1989.
- 5) W. Kinzel and E.D. Dickmanns: Moving humans recognition using spatio-temporal models, 17th ISPRS, Com. 5, Washington, D.C., pp. 885-892, 1992.
- 6) 原島博他: 次世代画像符号化の構想, 電子情報通信学会技術研究報告, IE87-1, pp. 1-8, 1987.
- 7) T. Tsukiyama and Y. Shirai: Detection of the movements of persons from a sparse sequence of TV images. Pattern Recognition, Vol. 18, pp. 207-213, 1985.
- 8) J.U. Baumann etc.: Photogrammetry in medical gait analysis, 17th ISPRS, Com. 5, Washington, D.C. pp. 464-468, 1992.
- 9) 須藤武幸: ボート競技, 講談社.

(a) フィニッシュにおけるスティックモデル

(b) 特徴点の軌跡

(c) 連続スティックモデル

図13 シミュレーター表示例