

カメラ 1 台によるゴルフクラブヘッドの 3 次元姿勢計測

君塚 渉^{*1}, 大貫 正秀^{*2}

Measurement of a Three-Dimensional Posture of Golf Club Head through One Set of Camera.

Wataru KIMIDUKA^{*1} and Masahide ONUKI^{*2}

^{*1} Dunlop Sports Ltd.
Wakinohama-cho 3-6-9, Chuo-ku, Kobe, 651-0072 Japan

We developed the method to measure the three-dimensional posture of the golf club head based on one photo taken by one set of a camera, and found the following in terms of the measurement accuracy. (1)The measurement error can be decreased by putting markers on the wider surface of a head. (2)In the case where the posture of a head significantly deviates from the standard posture, the measurement accuracy deteriorates compared with the case of a small deviation. (3) The measurement error can be reduced by identifying the coordinates of the center of markers instead of visually selecting a pixel as the center of markers.

Key Words : Measurement, Posture, Golf Club, Image Processing, Accuracy, Newton-Raphson Method

1. 緒言

ゴルファーのスイングは人によって異なり、各々のスイングに適したゴルフクラブを提供するフィッティングと呼ばれるサービスが存在する。これまでフィッティングの現場においては、ゴルファーにボールを試打してもらい、その打ち出し結果を基に推奨ゴルフクラブを決定することが主流であった。さらに近年では、より適したゴルフクラブをフィッティングするために、ボールの打ち出しの原因となるボールインパクト時のゴルフクラブヘッドの3次元姿勢を計測することが重要となってきた。物体の3次元座標計測に関わる先行技術としては、空間に固定された2台以上のカメラで空間上の観測点を撮影し、その画像上に写った観測点の位置から空間上の観測点の座標を特定するDLT法(Direct Linear Transformation method)と呼ばれる方法がある⁽¹⁾⁽²⁾。さらに物体上の複数の観測点の座標を求めることで、その物体の位置や姿勢を特定する方法が運動解析の分野で広く使用されている⁽³⁾。この方法をインパクト時のヘッド姿勢計測に適用させた技術もある⁽⁴⁾。しかし、カメラ2台以上を必要とする計測システムは広い設置スペースが必要なこと、システムを運搬して使用する場合にはその都度設置に多くの時間を要すること、システムを展開する際に費用がかかること等の問題がある。カメラ1台による撮影のみでヘッドの3次元姿勢が計算できれば上記問題は軽減されるが、カメラ1台による撮影のみでヘッドの3次元姿勢を計測する技術はこれまで報告されていない。そこで、本研究では、カメラ1台による撮影のみでヘッドの3次元姿勢を計測する方法を考案し、実験検証によりその計測精度を調査した。

2. 理論

2・1 DLT法

一般的に、空間上の観測点の座標をカメラで撮影した画像から求める場合、以下に示すDLT法という手法が用いられる⁽¹⁾⁽²⁾。図1に、実空間(Object space)にある点Pをカメラで撮影したときの、実空間での座標 (X, Y, Z) とフィルム面上(Digitizing plane)の座標 (U, V) の関係を示す。ここで、点Oはカメラのレンズ中心点であり、座標系 $X'Y'Z'$ は点Oを原点とし、フィルム面上座標系のU軸V軸と X' 軸 Y' 軸が平行な座標系であり、Lは点Oから

^{*1} 正員, ダンロップスポーツ株式会社 (〒651-0072 神戸市中央区脇浜町 3-6-9)

^{*2} 正員, ダンロップスポーツ株式会社 (〒651-0072 神戸市中央区脇浜町 3-6-9)

E-mail: wataru-kimizuka@dunlopsports.co.jp

P までの Z 軸上の距離であり, F は点 O から点 Q (点 P の写像) までの Z 軸上の距離であり, 点 (U_0, V_0) は Z 軸を含む直線とフィルム面の交点である. ベクトル \mathbf{OP} と \mathbf{OQ} を座標系 $X'Y'Z'$ の成分で書き出せば, 式 (1) のようになる. ただし, \mathbf{M} は座標系 XYZ から座標系 $X'Y'Z'$ への 3×3 の回転行列を表す.

$$\mathbf{OP} = \mathbf{M} \cdot \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{OQ} = \begin{bmatrix} U - U_0 \\ V - V_0 \\ -F \end{bmatrix} \quad (1)$$

また, \mathbf{OP} と \mathbf{OQ} には, $\mathbf{OQ} = -F/L \cdot \mathbf{OP}$ の関係があり, この式を成分ごとに書き下し, Z'成分の式を用いて L を消去すれば, 以下の 2 式となる. ただし, m_{ij} は \mathbf{M} の i 行 j 列成分を表す.

$$U = U_0 - F \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \quad (2)$$

$$V = V_0 - F \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)}$$

式中でレンズとフィルムの位置関係によって決まる定数をまとめ, 整理すると以下の 2 式となる. これらの定数 $A_1 \sim A_4, B_1 \sim B_4, C_1 \sim C_3$ はカメラ定数と呼ばれている.

$$U = \frac{A_1 X + A_2 Y + A_3 Z + A_4}{C_1 X + C_2 Y + C_3 Z + 1} \quad (3)$$

$$V = \frac{B_1 X + B_2 Y + B_3 Z + B_4}{C_1 X + C_2 Y + C_3 Z + 1}$$

11 個のカメラ定数を求めるには, 実空間座標 (X, Y, Z) とフィルム面上座標 (U, V) が既知である 6 点以上をカメラで撮影し, 各点の (X, Y, Z) と (U, V) を上式に代入して合計 12 個以上の方程式をつくり, 最小二乗法によって 11 個のカメラ定数を求める. このカメラ定数を求める作業をキャリブレーションという.

11 個のカメラ定数が求めれば, 実空間座標 (X, Y, Z) が既知の点のフィルム面上座標 (U, V) を求めることができる. 反対に, フィルム面上座標 (U, V) から実空間座標 (X, Y, Z) を求めるには, カメラ定数が既知の 2 台以上のカメラを用いて同じ点を撮影し, 得られた $(U_1, V_1) (U_2, V_2) \dots$ を上式に代入することで 4 個以上の方程式をつくり, 最小二乗法によって (X, Y, Z) が得られる.

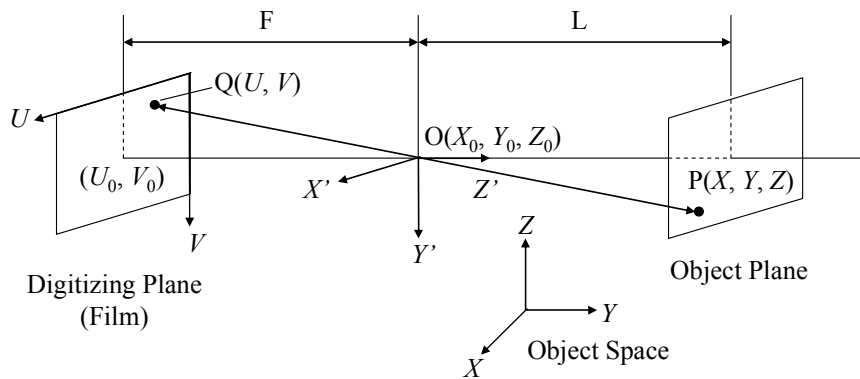


Fig. 1 Direct Linear Transformation method

2・2 1 台のカメラのみで求める場合

上記のように, DLT 法で空間上の独立した 1 点の座標を求めるにはカメラが 2 台以上必要で, 1 台のカメラ画像から点の座標を求めることはできない. しかしながら, 大きさのある物体に固定された複数点の座標については, 各点間の位置関係 (即ち物体座標系における各点の座標) が既知であれば, その関係式を, 空間座標 (X, Y, Z)

を求めるための方程式に加えることができ、複数点の座標（即ち物体の位置と姿勢）を求めることができる。以下には、物体の代表点の空間座標 (X, Y, Z) と物体の姿勢 (α, β, γ) を未知数として解く場合について述べる。

式 (3) を変形すると、以下の式となる。

$$\begin{aligned} (A_1 - C_1U)X + (A_2 - C_2U)Y + (A_3 - C_3U)Z + (A_4 - U) &= 0 \\ (B_1 - C_1V)X + (B_2 - C_2V)Y + (B_3 - C_3V)Z + (B_4 - V) &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、物体座標系における代表点から N 個の各点へのベクトル $\mathbf{r}_{i=1,2,\dots,N-1}$ （既知）を用いて、物体上の各点の空間座標は、 $\mathbf{R}_{i=1,2,\dots,N-1} = (X, Y, Z) + \mathbf{T} \cdot \mathbf{r}_{i=1,2,\dots,N-1}$ と表せる。ただし、 \mathbf{T} は空間座標系から物体座標系への座標変換行列であり、 α, β, γ の既知の関数である。すなわち、 $\mathbf{R}_{i=1,2,\dots,N-1}$ は物体の代表点の空間座標 (X, Y, Z) と物体の姿勢 (α, β, γ) の関数となる。この $\mathbf{R}_{i=1,2,\dots,N-1}$ と各点のフィルム面上座標 $(U_{i=1,2,\dots,N-1}, V_{i=1,2,\dots,N-1})$ を式 (4) に代入すると、以下のように $2N$ 個の非線形連立方程式ができる。ここで、 R_{iX}, R_{iY}, R_{iZ} は各々 $\mathbf{R}_{i=1,2,\dots,N-1}$ の X, Y, Z 座標を表している。

$$\begin{aligned} (A_1 - C_1U)X + (A_2 - C_2U)Y + (A_3 - C_3U)Z + (A_4 - U) &= 0 \\ (B_1 - C_1V)X + (B_2 - C_2V)Y + (B_3 - C_3V)Z + (B_4 - V) &= 0 \\ (A_1 - C_1U_1)R_{1X} + (A_2 - C_2U_1)R_{1Y} + (A_3 - C_3U_1)R_{1Z} + (A_4 - U_1) &= 0 \\ (B_1 - C_1V_1)R_{1X} + (B_2 - C_2V_1)R_{1Y} + (B_3 - C_3V_1)R_{1Z} + (B_4 - V_1) &= 0 \\ (A_1 - C_1U_2)R_{2X} + (A_2 - C_2U_2)R_{2Y} + (A_3 - C_3U_2)R_{2Z} + (A_4 - U_2) &= 0 \\ (B_1 - C_1V_2)R_{2X} + (B_2 - C_2V_2)R_{2Y} + (B_3 - C_3V_2)R_{2Z} + (B_4 - V_2) &= 0 \\ \vdots & \\ (A_1 - C_1U_{N-1})R_{N-1X} + (A_2 - C_2U_{N-1})R_{N-1Y} + (A_3 - C_3U_{N-1})R_{N-1Z} + (A_4 - U_{N-1}) &= 0 \\ (B_1 - C_1V_{N-1})R_{N-1X} + (B_2 - C_2V_{N-1})R_{N-1Y} + (B_3 - C_3V_{N-1})R_{N-1Z} + (B_4 - V_{N-1}) &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

この未知数6個、式の数 $2N$ 個の連立方程式に対してニュートンラフソン法を適用させることで、6個の未知数、即ち、物体代表点の位置と物体の姿勢を求めることができる。

3. 実験

3・1 事前準備

3・1・1 ヘッド角度設定治具

ヘッドを 0.1° 以下の精度で、所定のフェース角とライ角に設置するために、回転ステージと傾斜ステージを組み合わせた治具を作製した。図2にその写真を示す。青丸の回転ステージを回転させることでフェース角を、緑丸の傾斜ステージを回転させることでライ角を調節する。このような構成により、ある基準姿勢で設置した場合のフェース角・ライ角に対して相対角度 0.1° 以下の精度で角度の変更ができる。

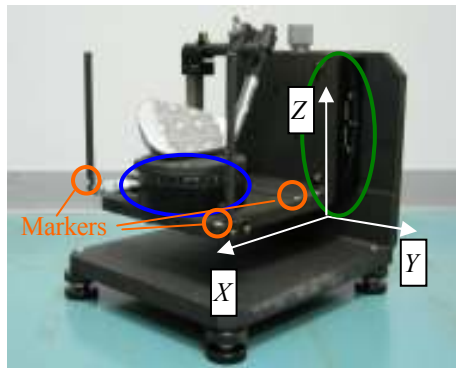


Fig. 2 Jig for setting the angle of club heads

3・1・2 キャリブレーション用マーカの貼付と座標値の測定

実験時の空間座標系を決定するために、上記ヘッド角度設定治具に6点にマーカを貼付した。2・1で示したように、この6点は実験時の空間座標が既知でなければならない。そこで、この6点のうちの1点を空間座標系原点とし、図2のように各座標軸方向を定め、各マーカの座標を3次元計測機（GOM社製 ATOS2SO）で測定した。

3・1・3 ヘッド姿勢を求めるためのマーカの貼付と座標値の測定（W#1, I#7）

2・2で示したように、ヘッド姿勢を計算するには、ヘッドに固定された3点以上のマーカの、ヘッドに固定された座標系における座標値が既知でなければならない。そこで、ヘッドのフェースライン上に2点、フェースライン上ではないフェース面内に1点、その他フェース面内やボディの各部に複数のマーカを貼付し、3・1・2と同様に3次元計測機（GOM社製）で各マーカの座標を測定した。その後、フェースライン上の1点をヘッド座標系原点とし、フェースラインに沿う方向をヘッド座標系 X 軸、フェース面に垂直な方向をヘッド座標系 Y 軸、 X 軸 Y 軸に垂直な方向をヘッド座標系 Z 軸としたときの各マーカの座標 $\mathbf{r}_{i=1,2,\dots,N-1}$ を、座標変換によって算出した。

3・2 精度検証実験手順

3・2・1 キャリブレーション用の画像撮影

角度設定治具にヘッドを固定し、フェース角・ライ角の目盛を0°に合わせる。次に、治具を所定の位置（想定したい打点の位置）に設置し、キャリブレーション用の画像を撮影する。このとき、固定されたカメラの視界に全てのキャリブレーションマーカが入るようにする。これ以降、カメラの位置と角度、治具の位置は変えない。

3・2・2 フェース角・ライ角を変更しての画像撮影

ヘッドを所定のフェース角・ライ角になるように、回転ステージと傾斜ステージの調整部分を回転させ、各場合の画像を1枚ずつ撮影する。図3に撮影した画像の一例を示す。

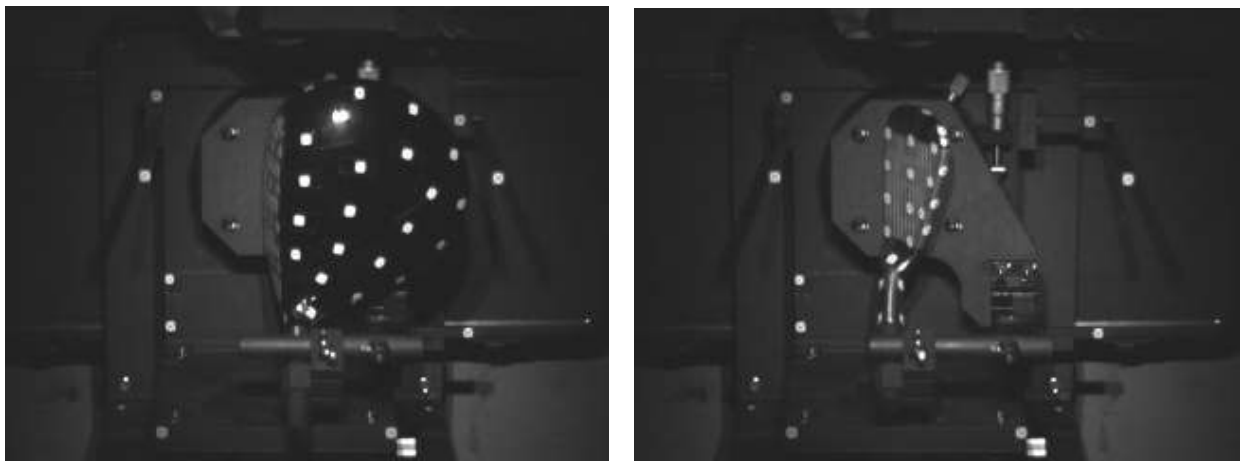


Fig. 3 Example of the photo at the experiment

3・2・3 キャリブレーション

3・2・1で撮った画像をPCの画像処理ソフトDipp-Image（株式会社DITECT）で読み込み、台座に固定された6個のマーカの画像上での座標 (U, V) を求める。6組の (U, V) と3・1・2で測定した各マーカの空間座標 (X, Y, Z) を用いて、2・1で説明した方法でカメラ定数を求める。

3・2・4 画像上のマーカー位置の特定

3・2・1と3・2・2で撮った各画像をPCの画像処理ソフトDipp-Image（株式会社DITECT）で読み込み、ヘッドに固定されたN個のマーカーの画像上での座標 (U, V) を求める。

3・2・5 ヘッド姿勢の特定

3・2・1と3・2・2で撮った各画像について、3・2・4で特定したN個のマーカーの画像上での座標 (U, V) と3・1・3で測定して算出したヘッド座標系における各点の座標 $r_{i=1,2,\dots,N-1}$ を用いて、2・2で説明した方法でヘッド姿勢を求める。ここで、本研究におけるヘッド姿勢 (α, β, γ) は、空間座標系 XYZ を Y 軸周りに α° 回転させ、次に Z 軸周りに β° 回転させ、最後に X 軸周りに γ° 回転させてヘッド座標系 $X'Y'Z'$ に一致させる場合の α, β, γ を指す。数値計算にはMATLAB（MathWorks）を用いる。キャリブレーション時のヘッドのフェース角・ライ角に対する各姿勢での相対的なヘッドのフェース角・ライ角を計測値とする。

3・3 精度検証項目

本実験では、（1）マーカーの貼付位置（2）ヘッド位置や姿勢の変化の大小（3）マーカー中心座標の特定方法が計測精度に及ぼす影響を調査した。

3・3・1 マーカーの貼付位置が計測精度に及ぼす影響調査

3・2・1における治具の位置は、クラブヘッドのセンターでボールを打撃するような位置とし、3・2・2におけるヘッドの姿勢はフェース角 $(0^\circ, -1^\circ, -5^\circ)$ ・ライ角 $(0^\circ, -1^\circ, -5^\circ)$ とし、各場合の画像を撮影した。3・2・4におけるマーカー座標の特定においては、マーカー中心を目視で特定し、画素の位置を (U, V) とした。3・2・5におけるヘッド姿勢算出に用いるマーカーの組み合わせを以下のように変えることによって、マーカーの貼付位置が計測精度に及ぼす影響を調査した。

組み合わせ1：マーカーを広い範囲に貼付したときを想定（図4の赤丸で囲まれたマーカー4個）

組み合わせ2：マーカーを狭い範囲に貼付したときを想定（図4の青丸で囲まれたマーカー4個）

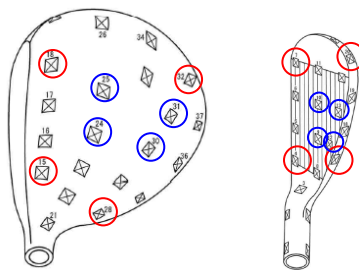


Fig. 4 Combinations of markers

3・3・2 ヘッド位置や姿勢の変化の大小が計測精度に及ぼす影響調査

3・2・1における治具の位置は、クラブヘッドの（トゥ側、ヒール側）でボールを打撃するような位置とし、3・2・2におけるヘッドの姿勢はフェース角 $(0^\circ, -5^\circ, 25^\circ)$ ・ライ角 $(0^\circ, 25^\circ)$ とし、各場合の画像を撮影した。3・2・4におけるマーカー座標の特定方法は3・3・1と同じ方法を用いた。3・2・5におけるヘッド姿勢算出に用いるマーカーの組み合わせは、3・3・1における組み合わせ1を用いた。

3・3・3 マーカー中心座標の特定方法が計測精度に及ぼす影響調査

3・2・2におけるヘッド位置・姿勢は3・3・2と同じとした。3・2・4におけるマーカー座標の特定においては、マーカー図心座標を以下のようにして計算し、 (U, V) とした。図5に、実験で撮影した画像を、輝度15を閾値にして2値化し、マーカー部分を拡大したものを示す。2値化処理によって、黒部分の輝度は0に、白部分の輝度は255になる。各マーカー図心座標は、各マーカーについて、それを囲む範囲（赤枠）内の全ての画素の位置 (U_i, V_i) と輝度 M_i から、 $(U, V) = ((\sum U_i \cdot M_i) / (\sum M_i), (\sum V_i \cdot M_i) / (\sum M_i))$ で求める。3・2・5におけるヘッド姿勢算出に用いるマーカーの組み合わせは、3・3・1における組み合わせ1を用いた。

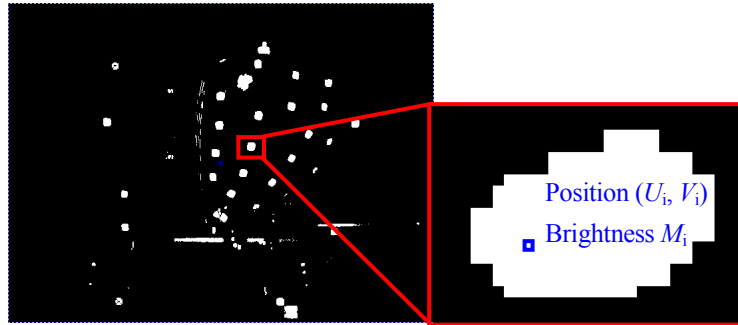


Fig. 5 Example of the photo data digitized for identifying the center of marker

4. 結果および考察

4.1 マーカーの貼付位置が計測精度に及ぼす影響調査

表1にドライバーのヘッド、表2に7番アイアンのヘッドの姿勢設定値と各マーカーの組み合わせで算出した姿勢算出結果を示す。各表の1列目は、想定した打点を示しており、センター打点想定はカメラに写る範囲の中央付近に治具（ヘッド）を設置した場合を表している。2, 3列目は、角度設定治具で設定したフェース角・ライ角である。4, 5列目は、実験で撮影した画像から上記方法を用いて算出したフェース角とライ角の計測値である。6, 7列目は、設定値と計測値の差の絶対値であり、測定誤差を表している。

平均誤差は、W#1の場合、マーカーを広い範囲に貼付することを想定した組み合わせ1でフェース角0.13°、ライ角0.49°、マーカーを狭い範囲に貼付することを想定した組み合わせ2でフェース角0.32°、ライ角1.80°となり、フェース角とライ角ともにマーカーを広い範囲に貼付した方が計測誤差は小さくなっていることが確認できる。I#7の場合、マーカーを広い範囲に貼付することを想定した組み合わせ1でフェース角0.11°、ライ角0.20°、マーカーを狭い範囲に貼付することを想定した組み合わせ2でフェース角0.87°、ライ角0.77°となり、W#1と同様に、フェース角とライ角ともにマーカーを広い範囲に貼付した方が計測誤差は小さくなっていることが確認できる。これより、マーカーを可能な限り広い範囲に貼付することで、計測誤差を小さくすることができると言える。

Table 1 Effects of the combination of markers on the measurement accuracy about W#1

Driver Combination 1

Driver Combination 2

Setting			Measurement		Error	
Impact point assumed	Face Angle	Lie Angle	Face Angle	Lie Angle	Face Angle	Lie Angle
Center	0	-1	0.02	-1.38	0.02	0.38
Center	0	-5	-0.13	-4.39	0.13	0.61
Center	-1	0	-1.00	-0.81	0.00	0.81
Center	-1	-1	-1.00	-0.79	0.00	0.21
Center	-1	-5	-1.14	-5.24	0.14	0.24
Center	-5	0	-5.17	0.45	0.17	0.45
Center	-5	-1	-5.20	-1.27	0.20	0.27
Center	-5	-5	-5.36	-5.93	0.36	0.93
Aberage					0.13	0.49

Setting			Measurement		Error	
Impact point assumed	Face Angle	Lie Angle	Face Angle	Lie Angle	Face Angle	Lie Angle
Center	0	-1	0.00	0.02	0.00	1.02
Center	0	-5	0.55	-2.94	0.55	2.06
Center	-1	0	-0.89	1.10	0.11	1.10
Center	-1	-1	-0.31	2.17	0.69	3.17
Center	-1	-5	-0.68	-4.96	0.32	0.04
Center	-5	0	-4.39	2.64	0.61	2.64
Center	-5	-1	-4.85	1.14	0.15	2.14
Center	-5	-5	-4.86	-2.75	0.14	2.25
Aberage					0.32	1.80

Table 2 Effects of the combination of markers on the measurement accuracy about I#7

Iron Combination 1

Iron Combination 2

Setting			Measurement		Error		Setting			Measurement		Error			
Impact point assumed	Face Angle	Lie Angle	Face Angle	Lie Angle	Face Angle	Lie Angle	Impact point assumed	Face Angle	Lie Angle	Face Angle	Lie Angle	Face Angle	Lie Angle		
Center	0	-1	-0.21	-0.76	0.21	0.24	Center	0	-1	0.53	-0.11	0.53	0.89		
Center	0	-5	-0.20	-4.91	0.20	0.09	Center	0	-5	0.55	-3.97	0.55	1.03		
Center	-1	0	-0.98	0.11	0.02	0.11	Center	-1	0	0.00	0.00	1.00	0.00		
Center	-1	-1	-0.98	-1.03	0.02	0.03	Center	-1	-1	0.01	-1.93	1.01	0.93		
Center	-1	-5	-0.97	-5.67	0.03	0.67	Center	-1	-5	0.03	-5.77	1.03	0.77		
Center	-5	0	-5.12	0.15	0.12	0.15	Center	-5	0	-4.04	-0.75	0.96	0.75		
Center	-5	-1	-5.13	-1.08	0.13	0.08	Center	-5	-1	-4.15	-0.14	0.85	0.86		
Center	-5	-5	-5.15	-5.21	0.15	0.21	Center	-5	-5	-3.96	-4.06	1.04	0.94		
Aberage						0.11	0.20	Aberage						0.87	0.77

4・2 ヘッド位置や姿勢の変化の大小が計測精度に及ぼす影響調査

表3にヘッド位置や姿勢を大きく変化させた場合の、姿勢設定値とマーカーの組み合わせ1で算出した姿勢算出結果を示す。各表の1列目は、想定した打点を示しており、トゥ打点想定はカメラに写る範囲の下部に治具（ヘッド）を設置した場合を、ヒール打点想定はカメラに写る範囲の上部に治具（ヘッド）を設置した場合を表している。2～7列目の表示については4・1と同様である。

平均誤差は、W#1の場合、フェース角0.21°、ライ角0.77°であり、I#7の場合、フェース角0.24°、ライ角0.35°となり、4・1で示した組み合わせ1の計測誤差に比べて大きいことが確認できる。これより、ヘッドの姿勢が基準姿勢に比べて大きく変化する場合には、あまり変化しない場合に比べて計測精度が低下すると言える。

Table 3 Effects of the magnitude of the posture change of club heads on the measurement accuracy

Driver (Combination 1)

Iron (Combination 1)

Setting			Measurement		Error		Setting			Measurement		Error			
Impact point assumed	Face Angle	Lie Angle	Face Angle	Lie Angle	Face Angle	Lie Angle	Impact point assumed	Face Angle	Lie Angle	Face Angle	Lie Angle	Face Angle	Lie Angle		
Toe	25	0	24.74	0.29	0.26	0.29	Toe	25	0	25.14	0.24	0.14	0.24		
Toe	25	25	24.73	25.55	0.27	0.55	Toe	25	25	25.22	25.20	0.22	0.20		
Toe	-5	0	-4.92	0.27	0.08	0.27	Toe	-5	0	-5.13	0.13	0.13	0.13		
Toe	-5	25	-4.91	25.22	0.09	0.22	Toe	-5	25	-4.48	23.91	0.52	1.09		
Heel	25	0	25.05	-0.91	0.05	0.91	Heel	25	0	25.03	0.21	0.03	0.21		
Heel	25	25	25.50	22.44	0.50	2.56	Heel	25	25	24.94	25.21	0.06	0.21		
Heel	-5	0	-4.90	-0.07	0.10	0.07	Heel	-5	0	-4.47	-0.60	0.53	0.60		
Heel	-5	25	-4.63	23.67	0.37	1.33	Heel	-5	25	-4.67	24.91	0.33	0.09		
Aberage						0.21	0.77	Aberage						0.24	0.35

4・3 マーカー中心座標の特定方法が計測精度に及ぼす影響調査

表4に図心座標を計算で特定した場合の、姿勢設定値とマーカーの組み合わせ1で算出した姿勢算出結果を示す。各表の1～7列目の表示については4・2と同様である。

平均誤差は、W#1の場合、フェース角0.08°、ライ角0.37°であり、I#7の場合、フェース角0.09°、ライ角0.34°となり、4・2で示した計測誤差に比べて小さくなっていることが確認できる。これより、マーカーの図心位置を目視で画素ごとに特定するのではなく座標を計算して特定することで、計測誤差を小さくすることができると言える。

Table 3 Effects of the method for identifying the center of markers on the measurement accuracy
 Driver (Combination 1) Iron (Combination 1)

Setting			Measurement		Error		Setting			Measurement		Error			
Impact point assumed	Face Angle	Lie Angle	Face Angle	Lie Angle	Face Angle	Lie Angle	Impact point assumed	Face Angle	Lie Angle	Face Angle	Lie Angle	Face Angle	Lie Angle		
Toe	25	0	24.92	-0.86	0.08	0.86	Toe	25	0	24.94	-0.08	0.06	0.08		
Toe	25	25	25.04	24.64	0.04	0.36	Toe	25	25	24.99	24.71	0.01	0.29		
Toe	-5	0	-4.97	-0.12	0.03	0.12	Toe	-5	0	-4.90	-0.44	0.10	0.44		
Toe	-5	25	-4.87	24.80	0.13	0.20	Toe	-5	25	-4.87	24.40	0.13	0.60		
Heel	25	0	25.04	0.40	0.04	0.40	Heel	25	0	24.82	0.45	0.18	0.45		
Heel	25	25	25.22	25.39	0.22	0.39	Heel	25	25	24.86	25.22	0.14	0.22		
Heel	-5	0	-5.07	-0.16	0.07	0.16	Heel	-5	0	-4.98	0.27	0.02	0.27		
Heel	-5	25	-4.96	25.47	0.04	0.47	Heel	-5	25	-4.89	24.63	0.11	0.37		
Average						0.08	0.37	Average						0.09	0.34

5. 結論

カメラ1台による撮影で得られる画像1枚から任意の3次元ヘッド姿勢を測定する手法を開発した。また、その測定精度について、以下のことがわかった。

- (1) マーカーを可能な限り広い範囲に貼付することで、計測誤差を小さくすることができる。
- (2) ヘッドの姿勢が基準姿勢に比べて大きく変化する場合には、あまり変化しない場合に比べて計測精度が低下する。
- (3) マーカーの図心位置を、目視で画素ごとに特定するのではなく、マーカーの図心座標を計算して特定することで、計測誤差を小さくすることができる。

文献

- (1) Abdel-Aziz, Y. I. and H. M. Karara, "Direct linear transformation from comparator coordinates into object space in close-range photogrammetry", *ASP Symposium on Close-Range photogrammetry*, American Society of Photogrammetry, Falls Church (1971).
- (2) 池上康男, 桜井伸二, 矢部京之助, "DLT法", *Japanese Journal of Sports Science*, 10-3 (1991), pp. 191-195.
- (3) ゴードン・ロバートソンら, 身体運動のバイオメカニクス研究法, (2008), pp. 39-48.
- (4) アクシュネットカンパニー, 特許公報, 2729569(1997).