

マルチビューアースタンドを利用した 三角測量法による3次元形態測定

生形 貴男¹

A three-dimensional digitizing system based on triangulation using multiple viewing images

Takao UBUKATA¹

Abstract A three-dimensional digitizing system for measurements of organic forms was installed in the Institute of Geosciences, Shizuoka University. It is based on a triangulation method using an image-capture device that enables multiple viewing of the object fixed on the stage. The device consists of a standing arm and an attached CCD camera that can be tilted so as to capture images from a known angle of offset. The CCD camera and its controller can be connected with a personal computer via USB. Measurements of x and y coordinates of points of interest are made on the captured image using a computer program developed in this study. The x and y coordinate data collected from the images of normal and offset views determine the z heights of the points. An original add-in program for Microsoft Excel is used to calculate the z values of the points. The program corrects the warp caused by aberrations of the lens simultaneously with calculation of z . It also includes the option for calculating three-dimensional Bookstein shape coordinates based on the calibrated data. The result obtained from 20 repeated measurements of a sample indicates that the standard deviation of the measurements is less than 1% of the mean in the x - y plane and no more than 2% in z dimension. The system is most useful for capturing landmark-point and line-tracing coordinate data from a small- to medium-sized specimen.

Key words: 3D digitization, morphometrics, data-capture device

はじめに

かつて、化石や貝殻などの形態測定といえば、専らノギスを用いた距離変量の計測であった。近年、座標データに基づく幾何学的形態測定学の急速な普及により、標識点や輪郭に沿った点の座標を計測する機会が増えつつある。座標データの取得方法として最も一般的なのは、対象を特定の方向から撮影し、写真画像の上で計測点の(x , y)座標を測定する方法である。しかし当然ながら、この方法ではその点の高さの情報(z 座標)を捨ててしまうことになる。また、2次元座標を取得するにしても、化石標本の様態によっては、カメラに対して厳密に定位置・

定方位で設置することが難しい場合も少なくない。こうした場合でも、各計測点の3次元座標データがあれば、計算によって位置と向きを合わせた補正データを正確に求めることができる。このように、形態測定における様々な場面で、3次元計測の需要が増えつつある。

3次元形態測定法には、大きく分けて、レーザ光線などを対象物の表面に投影して走査する方法(光投影法)、計測点に当たったセンサーヘッドの位置を検出する方法(3次元位置センサー法)、2方向から撮影した画像のそれぞれについて同一点の座標を計測し z 座標を計算する方法(三角測量法)などがある。光投影法は、中でも最も高い測定精度が得られる方法であるが(Dean, 1996)、基本的に

¹静岡大学理学部地球科学教室, 422-8529 静岡市大谷836

¹Institute of Geosciences, Shizuoka University, 836 Oya, Shizuoka 422-8529, Japan
E-mail: sbtubuk@ipc.shizuoka.ac.jp

は表面形状の計測方法であり、特定の点の座標を取得する方法ではない。3次元位置センサー法は、特定点の3次元座標を計測するための方法であるが、接触計測であるために、顕微鏡で見るとような小さなものや著しく脆い標本の計測には向かない。これに対して、三角測量法は、測定精度に難があるものの、装置さえ工夫すれば様々な大きさの対象を非接触で計測することを可能とする。また、他の2つの方法に比べて格段に簡便であるため、多少精度を犠牲にしても大量のデータを取得したいという場合には適している。

先頃、筆者は、科学研究費補助金の研究課題「貝殻全体の成長と部分の成長パターンとの関係から見た貝殻の形態的多様性と進化」の遂行のために、ズームレンズ付デジタルマイクロスコープとマルチビューアースタンドを利用した三角測量法に基づく3次元形態測定システムを導入したので、ここにその概要を報告する。

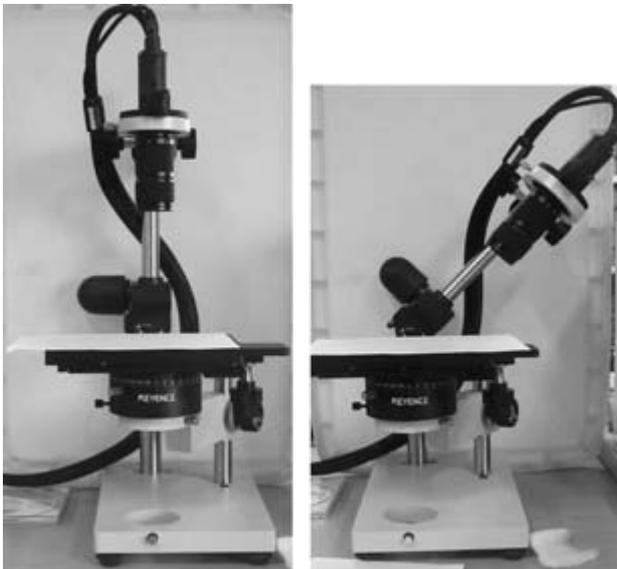


図1 画像を取り込むためのマルチビューアースタンドの装置。CCDカメラとレンズを取り付けたカメラポールを両側に傾けることができる。

Fig. 1 The image-capture device. A CCD camera with a microscope lens is attached to the standing arm that can be tilted toward the right and left sides.

装置の概要

画像の取り込みには、90万画素のCCDカメラを搭載したデジタルマイクロスコープKeyence社製VH-5000を用いる。VH-5000は、コントローラ部とカメラユニットからなり、カメラユニットの先には様々な倍率のズームレンズを着脱できる。本研究で導入したシステムでは、同社製の低倍率ズームレンズVH-Z05（5～40倍）を採用した。コントローラ部は、USBビデオキャプチャユニットVH-E500によってパーソナルコンピュータに接続され、付属のソフトウェアPictureFolder for VH-5000によって画像の取り込みと画像ファイルの出力を行う。画像はビットマップファイルとしてコンピュータに出力・保存できる。

本システムでは、レンズを装着したカメラユニットをマルチビューアースタンドVH-S10のカメラ台に固定してある（図1）。このカメラ台はカメラポールに沿って上下に動く。カメラポールは、前面から向かって右側に90°、左側に60°の範囲内で傾斜できる。このマルチビューアースタンドに可動式試料台マルチステージVH-S11を装着すると、試料台の水平面内の2方向の変位と回転および鉛直方向の変位と回転が可能となる。本システムでは、カメラポールを傾斜した際のカメラとレンズの鉛直面内での回転が、試料台上面内の一点を中心とし、カメラの撮影枠の長辺方向の回転となるように、カメラユニットの取り付け向きと試料台の高さを微調整して固定した。カメラから試料台までの距離は、専らカメラ台を上下させることによって調節するようにした。

ビットマップファイルとして保存した画像データに基づき、Microsoft Visual Studio 6.0によって開発したWindowsプログラムDigitizer（付録1）によって計測データを取得する。Digitizerでは、画像をロードし、画面上でポインタを計測点に合わせてクリックすることでその点の座標を記録し、一連のデータをひとつのCSVファイルとして出力することができる。

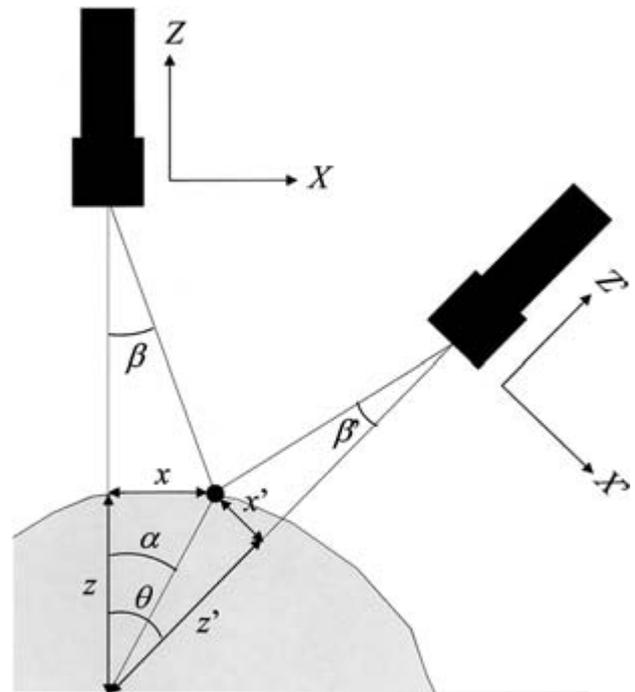


図2 試料上の計測点（図中黒丸）を真上と斜めから見たときの模式図。2方向から見たときの x 座標の値と傾斜角から z 座標を計算できる。

Fig. 2 A schematic diagram illustrating the geometry of the multiple viewing of the object. The z value of the black bold point in the diagram can be determined if x and x' coordinates of the point and tilting angle (θ) are given.

三角測量法による3次元計測の原理

本システムでは、上記マルチビューアースタンドによって、試料を真上と斜め45°の2方向から撮影した画像のそれぞれについて同一点の2次元座標を取得し、それら2組

の座標からその点の試料台からの高さを計算して3次元座標を求める。以下にその基本的原理を概説する。

図2のように、黒丸で示した試料中の計測点について、真上から見た場合の X - Y - Z 座標系と角度 θ 回転させた場合の X' - Y' - Z' 座標系を考え（それぞれ像の中央が原点）、それぞれの座標系における計測点座標を (x, y, z) , (x', y', z') とする。このとき x, x', y, y' は既知変数である。図2から、

$$\cos\alpha = \frac{z}{\sqrt{x^2+z^2}}, \quad \sin\alpha = \frac{x}{\sqrt{x^2+z^2}} \quad (1)$$

また、

$$\sin(\theta-\alpha) = \frac{-x'}{\sqrt{x'^2+z'^2}} \quad (2)$$

$$\therefore \sin\theta\cos\alpha - \cos\theta\sin\alpha = \frac{-x'}{\sqrt{x'^2+z'^2}} \quad (2)$$

(1) を (2) に代入して、

$$z = \frac{x\cos\theta - x'}{\sin\theta} \quad (3)$$

同様に、

$$\cos(\theta-\alpha) = \frac{z'}{\sqrt{x'^2+z'^2}} \quad (4)$$

$$\therefore \cos\theta\cos\alpha + \sin\theta\sin\alpha = \frac{z'}{\sqrt{x'^2+z'^2}} \quad (4)$$

(1) を (4) に代入して、

$$z' = x\sin\theta + \frac{x\cos\theta - x'}{\sin\theta}\cos\theta \quad (5)$$

$\theta = \pi/4$ のとき、(3), (5) はそれぞれ、

$$z = x - \sqrt{2}x', \quad z' = \sqrt{2}x - x' \quad (6)$$

となり、3次元座標が求まる。ここで座標データとして欲しいのは (x, y, z) であるが、後述するようにレンズの

収差による歪み補正の際に (x', y', z') の値も必要となる。

レンズの収差による歪みの補正

本システムの CCD カメラで実際に取り込んだ画像はレンズの収差のせいで歪んでおり、その画像から計測した座標データは本来の (x, z) , (x', z') とは異なる。この歪みの大きさは、レンズから計測点までの距離によってかなり変わるので、カメラを傾斜させて低倍率で撮影する際には特にその影響が大きく、補正が必要となる。

レンズによる結像の歪みは、光線と光軸とのなす角によって光線の収束位置が変わることで生じる光線収差が原因である。光線収差は、光線の発信源とレンズで屈折する位置がそれぞれ光軸からどれだけ離れているかによって決まるので (山口, 1988), レンズが同じであれば、計測点の光軸までの距離と計測点からレンズまでの距離によって収差による歪みの程度が決まることになる。

そこで、本システムにおける収差による画像の歪みを評価するために、方眼紙を試料台に載せて、縦横の目盛の交点の座標を計測した。目盛の値を真の座標値とみなして、計測値がそれからどれくらいずれているかを見積もった。その際、レンズ下面から試料台までの距離 L が 15.9 cm と 12.6 cm のそれぞれの場合について、ズームレンズの倍率を 5 倍と 10 倍と 20 倍に 3 段階変えて、真上と斜め 45° の 2 方向から撮影し、それぞれの画像上で計測を行い、各場合について 35~94 点の目盛の座標値を得た。座標データの取得には、上記の Digitizer プログラムを用いた。

回帰分析の結果、真の座標値 (x, y) とその実測値 (px, py) との関係は、レンズ下面と測定点を結んだ線分

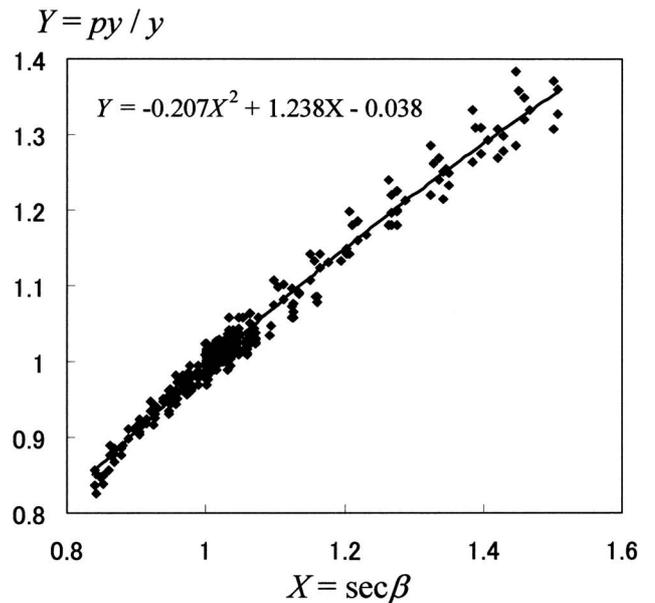
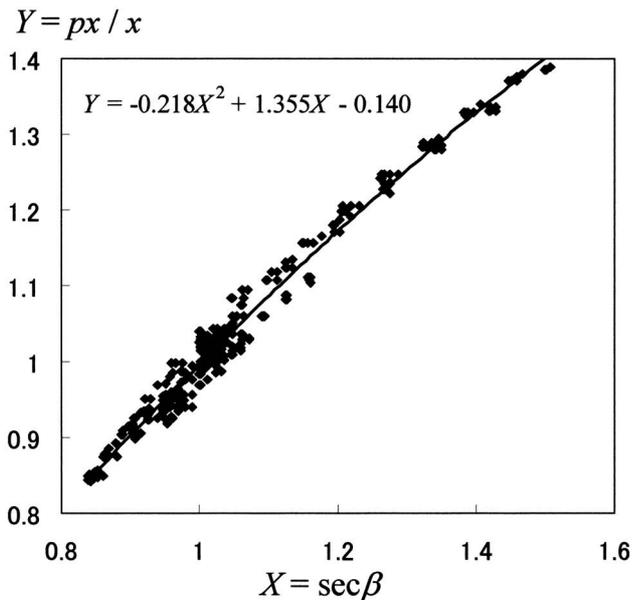


図3 レンズの収差による歪み補正のために方眼紙の計測から見積もった真の座標値 (x, y) と実測値 (px, py) との関係。両者の関係は光線と光軸のなす角 (図2) の余弦を使って表される。

Fig. 3 Relationship between the known coordinates on a section paper (x, y) and their measurements including aberrations of the lens (px, py) . Plots of the ratio of the measured values to the true values against $\cos\beta$ are shown, where β is the angle between the directions of the ray and the optical axis (Fig. 2).

(光線) がレンズの光軸となす角 β (図2) の余弦を使って以下のような2次式で近似的に表されることがわかった (図3).

$$\begin{aligned} x &= (-0.218\sec^2\beta + 1.355\sec\beta - 0.140) px \\ y &= (-0.207\sec^2\beta + 1.238\sec\beta - 0.038) py \end{aligned} \quad (7)$$

ただし
$$\sec\beta = \frac{\sqrt{x^2 + y^2 + (L-z)^2}}{L}$$

(x', y') と (px', py') の関係も $\sec\beta'$ を介して (7) と同様にあらわせる. (6) と (7) を連立させて解析的に解くのは困難なので,

$$\sec\beta \approx \frac{\sqrt{px'^2 + py'^2 + L^2}}{L}, \quad \sec\beta' \approx \frac{\sqrt{px'^2 + py'^2 + L^2}}{L}$$

として連立方程式 (6), (7) を解き, その解をさらに (7) に代入して再び連立方程式を解くというふうにより, 再帰的な計算によって解を収束させ, (x, y, z) を求める.

以上の3次元座標の計算は, Microsoft Excel 2002のマクロで作成したプログラムXYZcalc (付録2) によって, Excelのワークシート上で行う.

形状座標の計算

上記のようにして求めた座標値は, 試料台に設置した

試料の位置と向きおよび試料の大きさによって異なる. 座標データから標本同士の形状を比較する場合には, 座標値から位置と向きと大きさの情報を除かなければならない. そのためには, 試料ごとの座標値のセット (図形) を変位, 回転, 拡大または縮小によって整理させる必要がある. このようにして求められる座標は形状座標と呼ばれ, 図形の整理の仕方によって様々なものがある (Dryden & Mardia, 1998). 本システムでは, 上記プログラムXYZcalcによって, 以下に述べる3次元Bookstein形状座標を計算する.

Bookstein形状座標とは, 図形を構成する点のうち基準として選んだ2点を結ぶ線分を基線 (baseline) として, この基線の端点の座標がそれぞれ $(0, 0)$, $(1, 0)$ となるように全ての計測点の座標を変換したものである (Bookstein, 1991). 元の座標値の変異が正規分布に従うとき, Bookstein形状座標も正規分布するので, 統計的な扱いが容易である (三中, 1999). Dryden & Mardia (1998) は, 2次元形状座標であったBookstein座標を3次元に拡張した. 3次元の場合には, 2つの基準点 (x_1, y_1, z_1) , (x_2, y_2, z_2) によって基線を与え, これらの点ともうひとつの基準点 (x_3, y_3, z_3) の3点で基準面を与える. このときこの図形を変位, 回転, 拡大または縮小するこ

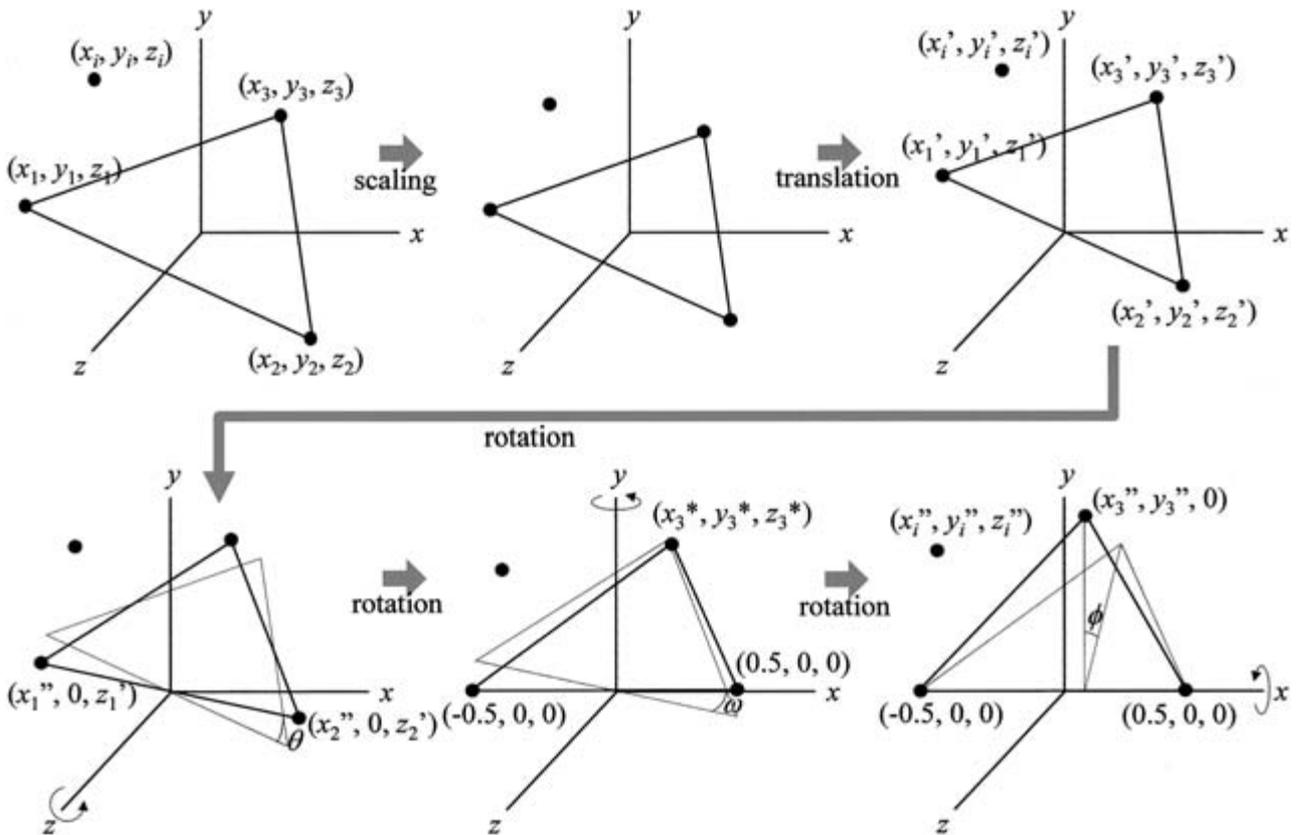


図4 3次元Bookstein座標の求め方. まず, 基線の長さが1になるように図形を拡大または縮小し, 基線の midpoint が原点に合うように図形を変位させる. その後, 図形をz軸の周りに回転させて基線をx-y面上に乗せ, 次にy軸の周りの回転によって基線をx軸に乗せ, 最後にx軸の周りの回転によって基準面をx-y面上に乗せる. この一連の変換によって得られる図形各点の座標が3次元Bookstein座標である.

Fig. 4 A geometrical illustration of transformations of the figure for obtaining the three-dimensional Bookstein coordinates. The original configuration is rescaled and translated so that the baseline is of unit length and has midpoint at the origin. Subsequently, the figure is rotated around z- and y-axes successively to place the baseline along the x-axis, and is further rotated so that the baseplane lies in the x-y plane. The remaining transformed coordinates give the Bookstein coordinates.

とによって、基線を与える2つの基準点の座標がそれぞれ $(-0.5, 0, 0)$, $(0.5, 0, 0)$, 基準面を与えるもうひとつの基準点の z 座標が0となるように全ての計測点を変換したものが3次元Bookstein形状座標である (図4). XYZcalcでは、3次元Bookstein形状座標を以下のようにして求める。

まず図形を、基線の長さが1になるように拡大または縮小し、さらに基線の midpoint が原点となるように変位させる。このとき計測点 i の座標が (x_i, y_i, z_i) から (x'_i, y'_i, z'_i) に変換されるとすれば、

$$x'_i = \left(x_i - \frac{x_1 + x_2}{2} \right) / D, \quad y'_i = \left(y_i - \frac{y_1 + y_2}{2} \right) / D, \\ z'_i = \left(z_i - \frac{z_1 + z_2}{2} \right) / D$$

ただし $D = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$

こうして変換した図形をさらに z 軸のまわりに回転して基線を z - x 平面上に乗せるとすると、反時計回りを正の向きとする回転角を θ とすれば、図4より $\tan \theta = -y'_2 / x'_2$ だから、

$$\cos \theta = \frac{x'_2}{\sqrt{x'^2_2 + y'^2_2}}, \quad \sin \theta = -\frac{y'_2}{\sqrt{x'^2_2 + y'^2_2}}$$

その後、 y 軸のまわりを反時計回りに ω 回転して基線を x 軸に合わせるとすると、

$$\tan \omega = \frac{z'_2}{\sqrt{x'^2_2 + y'^2_2}}, \\ \therefore \cos \omega = \frac{x'^2_2 + y'^2_2}{\sqrt{x'^2_2 + y'^2_2 + z'^2_2}}, \quad \sin \omega = \frac{z'_2}{\sqrt{x'^2_2 + y'^2_2 + z'^2_2}}$$

以上の変換で、基線の端点の座標はそれぞれ $(-0.5, 0, 0)$, $(0.5, 0, 0)$ となる。また、このとき、基準面上の3番目の基準点の座標を (x_3^*, y_3^*, z_3^*) とすると、基準面が z - x 平面となす角 ϕ は、反時計回りを正の向きとすれば

$$\tan \phi = -\frac{y_3^*}{z_3^*} \quad (8)$$

で与えられる。 (x_3^*, y_3^*, z_3^*) をさらに x 軸のまわりに反時計回りで ϕ 回転すれば、基準面は x - y 平面に載る。ここで、 x 軸、 y 軸、 z 軸のまわりを回転させる行列をそれぞれ R_x , R_y , R_z とおけば、

$$R_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix}, \quad R_y = \begin{pmatrix} \cos \omega & 0 & \sin \omega \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \omega & 0 & \cos \omega \end{pmatrix}, \\ R_z = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

だから (ただし反時計回りを正の向きとする), $(x_3^*, y_3^*, z_3^*)^T = R_y R_z (x'_3, y'_3, z'_3)^T$ より、

$$y_3^* = -x'_3 \sin \theta + y'_3 \cos \theta, \\ z_3^* = -x'_3 \sin \omega \cos \theta - y'_3 \sin \omega \sin \theta + z'_3 \cos \omega \quad (9)$$

式 (8) を (9) に代入すれば、 $\cos \phi$ と $\sin \phi$ を求めることができる。以上のようにして、各回転行列 R_x , R_y , R_z を求めることができる。

そこで、次に一般の点の回転について考える。 (x'_i, y'_i, z'_i) が3方向の回転によって (x''_i, y''_i, z''_i) に変換されるとすれば、 $(x''_i, y''_i, z''_i)^T = R_x R_y R_z (x'_i, y'_i, z'_i)^T$ となるから、

$$R_x R_y R_z = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}$$

とおけば、

$$r_{11} = -\cos \omega \cos \theta \\ r_{12} = \cos \omega \sin \theta \\ r_{13} = \sin \omega \\ r_{21} = -\cos \phi \sin \theta - \sin \phi \sin \omega \cos \theta \\ r_{22} = \cos \phi \cos \theta - \sin \phi \sin \omega \sin \theta \\ r_{23} = \sin \phi \cos \omega \\ r_{31} = \sin \phi \sin \theta - \cos \phi \sin \omega \cos \theta \\ r_{32} = -\sin \phi \cos \theta - \sin \phi \sin \omega \sin \theta \\ r_{33} = \cos \phi \cos \omega$$

となり、これらを使うと3次元Bookstein形状座標は、

$$x_1'' = r_{11} x'_1 + r_{12} y'_1 + r_{13} z'_1 \\ y_1'' = r_{21} x'_1 + r_{22} y'_1 + r_{23} z'_1 \\ z_1'' = r_{31} x'_1 + r_{32} y'_1 + r_{33} z'_1$$

として求められる。

XYZcalcでは、基線を与える2つの基準点、基準面上のもうひとつの基準点、その他の測定点の順に、座標計測データをExcelのワークシート上に並べて入力すれば、上記の計算を実行できる。

測定誤差

本システムでの3次元座標の測定精度を評価するために、繰り返し測定によって確率誤差を見積もった。計測対象として直方体の消しゴムを用い、上面の4つの頂点のうち3点の3次元座標を求め、この座標データから直方体の長さ (length) と幅 (width) と厚さ (thickness) を求めた。この計測は、レンズと試料台の距離 L が15.9 cmで倍率5倍の場合と、 $L = 12.6$ cmで倍率5倍の場合、さらには $L = 12.6$ cmで倍率10倍の場合の3通りのそれぞれ

表1 20回の繰り返し測定によって見積もった計測誤差。

Table 1 The errors of the 20 repeated measurements of a parallelepiped sample.

	$L=15.9$ cm, $\times 5$			$L=12.6$ cm, $\times 5$			$L=12.6$ cm, $\times 10$		
	length	width	thickness	length	width	thickness	length	width	thickness
true value	23.45	21.35	12.00	23.45	21.35	12.00	23.45	21.35	12.00
mean	23.64	21.49	12.30	23.58	21.53	12.77	23.13	21.15	12.64
std.	0.158	0.180	0.223	0.165	0.083	0.173	0.096	0.045	0.183
std./mean	0.0067	0.0084	0.0181	0.0070	0.0039	0.0136	0.0042	0.0021	0.0145
p	0.22	0.45	0.18	0.44	0.033	0.000008	0.0008	0.000004	0.0005

について20回ずつ繰り返した。また、ノギスでその直方体消しゴムの長さと同幅と厚さを計測し、この計測値を“真の値”と見なして繰り返し測定と計測値と比較し、系統誤差の評価を行った。

その結果、確率誤差は、カメラが遠くて倍率が低いほど大きくなる傾向があった(表1)。これは、対象が同じ大きさなら、画面上で被写体を大きく写すほど測定が精密になることを意味し、直感的には当たり前の結果であるといえる。計測値の平均値に対する標準偏差の割合は、本装置の設置範囲内で最大に積もっても、 x と y から求めた長さで1%未満、 z から求めた高さでは2%未満であると考えられる。一方、計測値の平均を“真の値”と比較すると、 x と y から求めた長さではさほど変わらないようにも見えるが、計測値と同じ平均と標準偏差を持つ正規分布から無作為抽出して“真の値”よりも平均から離れた値が得られる確率(p)を計算すると、カメラが近くて倍率が高いほど p は小さく、倍率10倍では両者の間に軒並み1%水準で有意差が認められた(表1)。これは、視野が広角なほど確率誤差が大きいためシステム誤差が検出されにくいことにもよるが、一方で倍率が10倍の場合でのみ x 、 y から求めた長さが“真の値”よりも縮むので、ズームの倍率に依存する系統誤差が多少あるものと思われる。また、 z から求めた高さでは概ね“真の値”よりもやや大きい値が出ており、特に視野が狭くなるほど相対的な系統誤差が大きくなる傾向がある。これらの結果は、高倍率で視野が狭くなるほどステージとカメラポールのセンタリングがシビアになることを考えれば、やはり直感的には当然のことと言えるだろう。このように、高倍率狭視野域では系統誤差による影響が確率誤差よりも深刻になるので、正確さと精密さのバランスを考慮して判断すれば、ある程度広角で撮影するほうが良質のデータを得られると考えられる。 L が15.9 cmで倍率5倍の場合、系統誤差は x と y から求めた長さで1%未満、 z から求めた高さでは2.5%程度である。

おわりに

貝殻の長さを測るだけなら、高精度と簡便さを併せ持っている点で、ノギスほど優れた計測器はないだろう。実際、化石の計測には、今日でもなお多くの場合にノギスが用いられている。3次元計測ができる様々な専用測定機器も市販されているが、それらは少なくともノギスよりは大幅に高価なので、古人類学や古脊椎動物学などの分野以外にはほとんど普及していないのが現状である。一方、パーソナルコンピュータの発達・普及により、大量のデジタル画像データを簡単に取り込めるようになったので、低コストで簡便な画像計測の手法が今後発展してゆくものと思われる。

画像計測から3次元座標を得る本形態測定システムは、数mm～数cmスケールの標本の座標計測に最も効果的であり、測定精度も化石の計測においては実用的な水準にあるといえる。また、一組の画像から多数の点の座標を簡単に取得できるので、多くの個体からなる集団標本を扱う研究には特に適している。装置は市販の製品を組み

立てただけの簡単なものであり、同様の構造・機能を有する装備さえ用意すれば、誰にでも簡単に作るができる。応用可能性としては、たとえばアンモナイトの縫合線に沿った3次元座標データの取得や、二枚貝の成長線に沿った3次元輪郭の数値化など、様々な用途が考えられる。

謝辞

静岡大学理学部地球科学教室の里村幹夫教授には、初稿を校閲していただいた。本システムの導入には、文部科学省科学研究費補助金(2003年度、若手研究(B)、課題番号15740310)を使用した。ここに記して謝意を表す。

引用文献

- Bookstein F. L. (1991), *Morphometric Tools for Landmark Data: Geometry and Biology*. Cambridge University Press, New York, 435p.
- Dean D. (1996), Three-dimensional data capture and visualization. *In*: Marcus L. F., Corti M., Loy A., Naylor G. J. P. & Slice D. E. (eds.) *Advances in Morphometrics*, Prentice Hall, New York, 53-69.
- Dryden I. L. & Mardia K. V. (1998), *Statistical Shape Analysis*. John Wiley & Sons, Chichester, 347p.
- 三中信宏 (1999), 形態測定学. 古生物の科学2, 古生物の形態と解析 (棚部一成・森 啓編), 朝倉書店, 東京, 61-99.
- 山口一郎 (1988), 応用光学. オーム社出版局, 東京, 258p.

付録1 座標データ計測プログラム Digitizer.

Appendix 1 Digitizer: a computer program for capturing coordinate data on an image.

```
Option Explicit 'declare public variables
```

```
Dim i, j As Integer
```

```
Dim cx(400), cy(400) As Integer
```

```
Private Sub Dir1_Change()
```

```
File1.Path=Dir1.Path
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Drive1_Change()
```

```
Dir1.Path=Drive1.Drive
```

```
End Sub
```

```
Private Sub cmdStart_Click()load picture
```

```
j=0
```

```
picGraphic.Picture=LoadPicture(Dir1.Path &"¥"&_
File1.FileName)
```

```
End Sub
```

```
Private Sub picGraphic_MouseDown(Button As Integer,_
shift As Integer,_
```

```

X As Single,Y As Single)measure coordinates
picGraphic.Circle(X,Y), 30, RGB(255, 0, 0)
i=i+1
cx(i)=X:cy(i)=Y
End Sub
-----
Private Sub cmdRevise_Click()'undo
i=i-1
End Sub
-----
Private Sub cmdSave_Click()'save data
Dim k As Integer
j=j+1
Open Dir1.Path &"¥"& txtFilename.Text &".csv"
For Output As #1
For k=1 To i
Write #1, cx(k), cy(k)
Next k
Close #1
i=0
Erase cx, cy
End Sub
-----
Private Sub cmdEnd_Click()'quit
Unload Form1
End Sub

```

付録2 z座標および3次元Bookstein形状座標計算プログラム XYZcalc.

Appendix 2 XYZcalc: an add-in program for Excel for obtaining z coordinate and calculating Bookstein coordinates.

```

Sub XYZcalc()
Dim nx(), ny(), nz()As Double
Sheets("data input").Select
sc=Sqr((Cells(2, 5).Value-Cells(3, 5).Value)^2
+(Cells(2, 6).Value-Cells(3, 6).Value)^2)
L=Cells(2, 7).Value*sc
i=1
While Not Cells(i+1,1).Value=""
i=i+1
Wend
n=i-1
ReDim nx(n), ny(n), nz(n)
For i=1 To n
x=Cells(i+1,1).Value-4819
y=Cells(i+1,2).Value-3615
tx=Cells(i+1,3).Value-4819
ty=Cells(i+1,4).Value-3615
nL=Sqr(x^2+y^2+L^2)
nLt=Sqr(tx^2+ty^2+L^2)+tx
For j=1 To 30
nx(i)=(-0.2184*(nL/L)^2+1.3554*(nL/L)-0.1403)*x

```

```

ny(i)=(-0.2073*(nL/L)^2+1.2379*(nL/L)-0.0384)*y
ntx=(-0.2184*(nLt/L)^2+1.3554*(nLt/L)-0.1403)*tx
nty=(-0.2073*(nLt/L)^2+1.2379*(nLt/L)-0.0384)*ty
nz(i)=nx(i)-Sqr(2)*ntx
ntz=Sqr(2)*nx(i)-ntx
nL=Sqr(nx(i)^2+ny(i)^2+(L-nz(i))^2)
nLt=Sqr(ntx^2+nty^2+(L-ntz)^2)
Next j
Next i
Sheets("calibrate").Select
For i=1 To n
Cells(i+1, 1).Value=nx(i)*10/sc
Cells(i+1, 2).Value=ny(i)*10/sc
Cells(i+1, 3).Value=nz(i)*10/sc-2
Next i
End Sub
-----
Sub Bookstein()
Dim x(), y(), z() As Double
Sheets("Bookstein").Select
i=1
While Not Cells(i+2, 2).Value=""
i=i+1
Wend
n=i-1
ReDim x(n), y(n), z(n)
For i=1 To n
x(i)=Cells(i+2, 2).Value
y(i)=Cells(i+2, 3).Value
z(i)=Cells(i+2, 4).Value
Next i
D=Sqr((x(2)-x(1))^2+(y(2)-y(1))^2+(z(2)-z(1))^2)
Select Case x(2)
Case Is=x(1)
costh=0:sinth=1
Case Else
tanth=(y(2)-y(1))/(x(2)-x(1))
costh=1/Sqr(1+tanth^2)
sinth=tanth/Sqr(1+tanth^2)
End Select
tanom=(z(2)-z(1))/Sqr((x(2)-x(1))^2+(y(2)-y(1))^2)
cosom=1/Sqr(1+tanom^2)
sinom=tanom/Sqr(1+tanom^2)
nx=(2*x(3)-x(1)-x(2))/2/D
ny=(2*y(3)-y(1)-y(2))/2/D
nz=(2*z(3)-z(1)-z(2))/2/D
tanph=(-nx*sinom*costh-ny*sinom*sinth+nz*cosom)/
(-nx*sinth+ny*costh)
cosph=1/Sqr(1+tanph^2)
sinph=tanph/Sqr(1+tanph^2)
r11=-cosom*costh
r12=-cosom*sinth
r13=sinom
r21=cosph*sinth+sinph*sinom*costh

```

```
r22=cosph*costh-sinph*sinom*sinth
r23=sinph*cosom
r31=sinph*sinth+cosph*sinom*costh
r32=sinph*costh+cosph*sinom*sinth
r33=cosph*cosom
For i=1 To n
  nx=(2*x(i)-x(1)-x(2))/2/D
  ny=(2*y(i)-y(1)-y(2))/2/D
  nz=(2*z(i)-z(1)-z(2))/2/D
  Cells(i+2, 5).Value=r11*nx+r12*ny+r13*nz
  Cells(i+2, 6).Value=r21*nx+r22*ny+r23*nz
  Cells(i+2, 7).Value=r31*nx+r32*ny+r33*nz
Next i
End Sub
```