

アフィン変換の応用による実長計測システムの開発

黒 田 正治郎

抄録

静止画像より被対象物を抽出し、その大きさを計測するシステムを試作した。簡単なモデルでのシミュレーションであるが、撮影角が 0° から 70° の範囲で 10° 間隔で撮影した画像から、撮影角 0° で撮影した画像への再現性は95%以上であった。このことから、Mobile 機器との組み合わせにより、簡便な操作で、高精度で実長が計測できるシステムの開発が可能になった。

キーワード

静止画像、実測値計測、シミュレーション

The Development of the Actual Length Measurement System by Applying an Affine Transformation

Kuroda, Shoziro

Abstract

From a still image taken with any angle by a digital camera, I have developed a system to measure the actual length of the target object by computer simulation.

As a result, the reproducibility of the image taken at an imaging angle of 0 degrees from images taken at an imaging angle of 0 to 70 degrees at 10 degree intervals was more than 95%. By applying this result to a mobile device, it is possible to provide a system with high reproducibility for measuring the actual length of the target object.

Key Words

still image, Actual Length Measurement System, simulation

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 使用機材
- § 3. 撮影角と距離に伴う画像補正
- § 4. 自動化計測システムのフローチャート A
- § 5. 計測のためのフローチャート B
- § 6. 自動化計測システムによる計測実験
- § 7. 今後の課題

§ 1. はじめに

生態系の観察において個体数を計測する場合、手動カウンタによる目視計測や静止画像から個体数を読み取ることが可能である。しかし、個体間距離をリアルタイムで計測する場合、目視では被写体の移動に伴う変化には追従できない。さらに動きのない個体でも、個体数が多いと同一時間内に測定できる個体数は限られ、同時に記録保存の観点でも困難さが伴うなど多くの問題が生じる。そのため、個体数計測では撮影した静止画像から個体間距離を計測することが用いられるが、静止画像から読み取れる値は、撮影位置や距離、使用したデジタルカメラの焦点距離や倍率の影響により正確ではない。特に、被写体を垂直方向から撮影することが困難な位置的条件下では、被写体に対してカメラが傾いた状態で撮影することになり、被写体までの距離と被写体ーカメラ間の角度(以降、撮影角)が、被写体の大きさに大きく影響する。

一般に CG アプリケーションで利用されているアフィン変換⁽¹⁾⁻⁽³⁾を活用した画像変換の処理システムでは、遠近感は再現できるものの後述する理由により、被写体までの距離と撮影角度の補正が十分に行えず、実測システムへの応用には不向きであることが分かった。

また前報で、2 焦点距離撮影による実測値計測システム⁽⁴⁾を報告したが、このシステムは撮影角 = 0°での条件で活用できるものであり任意の撮影角での計測には対応していない。さらに、生態系観測に特化した自動化システムの研究例はないことから、任意の撮影角で撮影した静止画像を垂直方向から撮影した画像に自動修正するシステムを開発した。本報では、SmartPhone への移植も視野にいれているので、計算量の少ない補正システムを目指した。このシステムにより、異なる環境で観測した結果から、鳥類や昆虫類に見られる個体間の特定距離を研究するツールとなりえる。

§ 2. 使用機材

システムの最終形態が SmartPhone 駆動型を目指し、リアルタイムでのフィールドワークでも計測ができるように発展させる予定であるが、本報では、そのプロトタイプを試作を行いその精度を調べた。

開発環境は、以下のように PC + VisualStudio で構築した。

〈使用機材〉

- Windows 8.1 PC (Core i7 : 3.4MHz)
- VisualStudio2010
- 撮影用デジタルカメラ

(Sony : DSC-HX200V⁽⁵⁾ : 以降 HX200V)

撮影条件 : Autofocus on, Premium Auto on,
Image stabilizer on

保存条件 : JPEG (4,896×3,672)

- WiFi 通信実験用 SD : Eye-Fi (ProX2)
- 傾斜計 (BevelBox)
- GPS (GPS Staus)

デジタルカメラと傾斜計を三脚の雲台に固定し、撮影角を記録した。

§ 3. 撮影角と距離に伴う画像補正

デジタルカメラで撮影した場合、画像の大きさを決定する要素は、被対象物までの距離、撮影角、撮影に使用したズームレンズの倍率、撮像素子の解像度である。そのため、撮影した静止画像から被対象物の実寸を計測するには、これらの要素に対する補正が必要になる。

(3-1) ズームレンズによる拡大効果と撮像素子の解像度に関する補正

前報と同様に、撮影機材として非球面レンズ 1 枚を含む 10 群 11 枚というレンズ構成の HX200V を使用した。HX200V に搭載されている撮像素子のドットピッチは、1.27 μ m であり、撮像素子上に記録される被対象物の大きさは、撮影に使用したズーム倍率、被対象物とカメラ間距離に依存する。

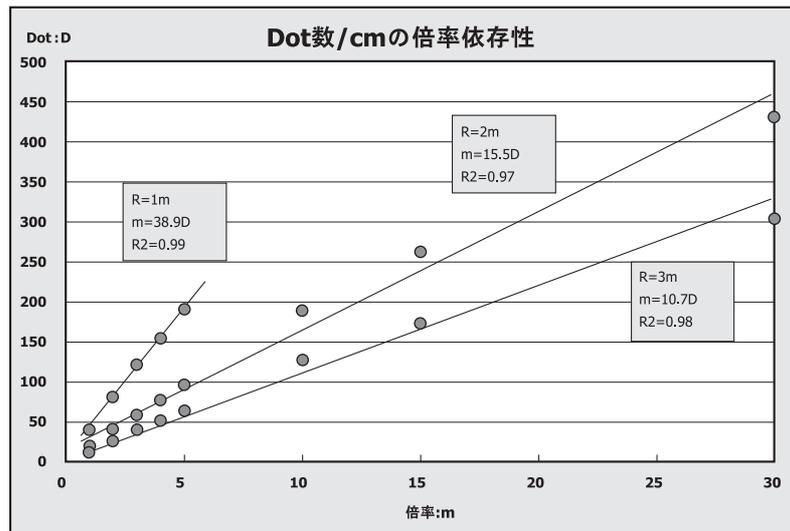


図1 静止画像の大きさとズームレンズの倍率の関係

そこで、撮像素子上の大きさと、ズーム倍率、カメラ間距離依存性を測定した。

この結果より、静止画像の大きさとズームレンズの倍率間には線形性があり、倍率10倍までは距離-倍率間にも線形性が確認できた。

このデータをもとに、ズームレンズによる拡大効果と撮像素子の解像度に関する補正を、次の変換で行った。

$$\begin{bmatrix} x1 & y1 & z1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x0 & y0 & z0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & Mx \\ 0 & 1 & 0 & My \\ 0 & 0 & 1 & Mz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots(1)$$

ここで、Mx、My、Mz は、図1より算出した倍率補正を示し、(x0, y0, z0)、(x1, y1, z1) は変換前 / 後の座標を示す。

(3-2) 距離に伴う補正

2次元CGなどで遠近感を表現するために、射影変換と視野角の変化を用いて、遠くのは小さく、近くにあるものは大きく描画する。その際、仮想的に最遠方として遠クリップ平面と映像面として近クリップ平面を設定し遠近感を表現するが、設定に任意性があるので実寸を計測するシステム

には適していない。そこで、現実の観測系に近いモデルとして、光学系による拡大 / 縮小の効果を採用することにした。

しかし、計測に使用したHX200Vのズームレンズの詳細は公表されておらず、撮像素子上に結像した画像の大きさやレンズから結合面までの距離等を複合レンズの計算式から算出することは困難である。そのため、ズームレンズを単レンズとした近似により画像修正のシステムを考える。

単レンズの場合、撮影した画像から被対象物の大きさを計測するには、単レンズの公式より

$$x0 : x1 = a : b \quad \dots\dots(2)$$

$$1/a + 1/b = 1/f \quad \dots\dots(3)$$

x0 : 被対象物の x 軸方向の大きさ

x1 : 撮像素子上に結像した画像の x 軸方向の大きさ

a : レンズと被対象物までの距離

b : レンズと撮像素子までの距離

f : レンズの焦点距離

より、デジタルカメラでは測定が困難なレンズから撮像素子までの距離 b を消去すると、撮像素子上に結像した被対象物の x 軸方向の大きさ x1 は

$$x1 = x0 \cdot f / (a - f) \quad \dots\dots(4)$$

となる。また、画像からの被対象物の大きさを算出するには

$$x0 = x1 \cdot (a - f) / f \quad \dots\dots(5)$$

(3-3) 撮影角度に伴う補正

被対象物の中心とレンズの中心が一致し撮影角が0°であれば、静止画像には変形や歪は生じないが、撮影角θで見下ろす位置で撮影した場合、角度による修正と距離による修正が必要になる。

そこで、被対象物の座標を(x0, y0, z0)、被対象物の中心までの距離を a、被写体とデジタルカメラの垂直方向の差：h、被写体とデジタルカメラの水平距離：r、撮影角θとした実験系を設定した。

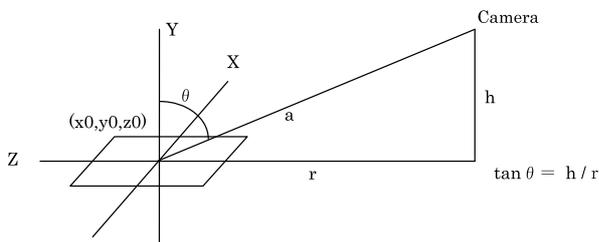


図2 実験系

観測系の原点を被対象物の中心とし、回転軸をX軸とした場合、回転角θによる回転後の座標(x1, y1, z1)は、次のようになる。

$$[x1 \ y1 \ z1 \ 1] = [x0 \ y0 \ z0 \ 1] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & c & s & 1 \\ 0 & -s & c & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

より……(6)

$$\begin{aligned} x1 &= x1 \\ y1 &= y0 \cdot s - z0 \cdot c \\ z1 &= y0 \cdot c + z0 \cdot s \end{aligned} \quad \dots\dots(7)$$

ここで、s=sin θ、c=cos θとした。

さらに、X軸回転による角度補正とカメラとの距離補正を考慮すると、撮像素子上での座標(x2, y2, z2)は次のようになる。なお、a=SQRT(r²+h²)である。

$$\begin{aligned} x2 &= x1 \cdot f / (a - y0 \cdot s - f) \\ y2 &= y1 \cdot f / (a - y0 \cdot s - f) \end{aligned} \quad \dots\dots(8)$$

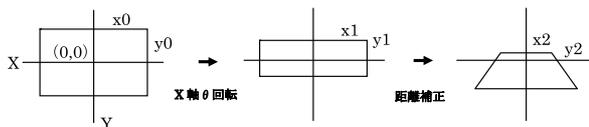


図3 座標変換の模式図

§ 4. 自動化計測システムのフローチャートA

撮影した画像から被対象物の実長を計測するシステムの動作仕様Aを、図のように決めた。なお、本報でのプロトタイプでは、開発時間の短縮と操作の煩雑さを解消するために、デジタルカメラで撮影した画像は、Wi-Fi (Eye-Fi) でルータを経由してPCの特定フォルダに転送し保存した。

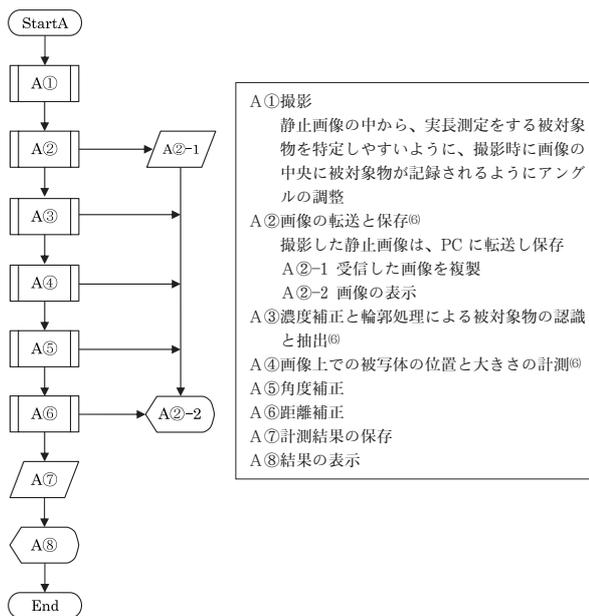


図4 計測システムによる実長計測の処理過程A

§ 5. 計測のためのフローチャート B

被対象物を認識し抽出を容易なものにするために、被対象物は白色のサンプル (14.8cm × 10.0cm) とした。サンプルの背景を黒とすることでハイコントラストの画像を得ることができ、画像上でサンプルの大きさの読み取り精度を向上させることができる。このことにより、フローチャート A における処理 A③ A④は、前報⁶⁾で報告したシステムを流用することができた。フローチャート A の処理 A⑤ A⑥において、角度と距離に伴う補正を行うために、実験系の原点を被写体の中心座標とする必要があるので、フローチャート B の処理 B②では、次の変換を用いた。

$$\begin{bmatrix} x_2 & y_2 & z_2 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & T_x \\ 0 & 0 & 0 & T_y \\ 0 & 0 & 1 & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots(9)$$

T_x, T_y, T_z は、被対象物の中心座標と実験系の原点の差を示す (x_2, y_2, z_2) は、平行移動後の被対象物の座標

被写体とカメラの距離は、被写体の中心-カメラ間： a とした。さらに、画像の大きさと実験系のスケールが異なるので、図 1 の結果をもとに画像の大きさを実験系の大きさに補正した。

§ 6. 自動化計測システムによる計測実験

本システムの精度を計測するために、撮影角 $\theta = 0^\circ$ で撮影した画像から、撮影角 θ の画像を再現するシミュレーションを行った。

〈実験①〉

被対象物は、白色のサンプル (14.8cm × 10.0cm) を使用し、カメラと被対象物の中心までの距離を 100cm とした。また、被対象物の中心からの法線

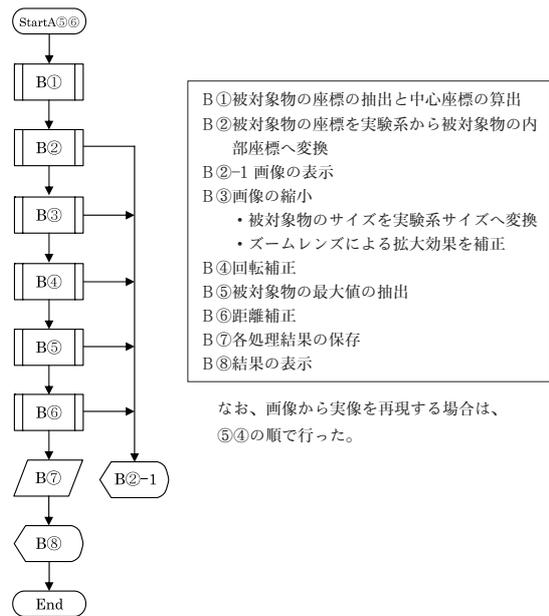


図 5 計測システムによる実長計測の処理過程 B

とカメラの角度 (= 撮影角) を傾斜計で計測しながら撮影角 $\theta = 0^\circ \sim 80^\circ$ の範囲を 10° 間隔で撮影を行った。

被写体の読み取り精度を高めるために、ズームレンズの倍率は被写体が可能な限り大きく撮影できるように 4 倍を選択した。

図 6 における実測値は、上記の条件における撮影で得られた画像から抽出した被対象物の 4 隅の座標より、横 / 縦を算出したものである。また計算値は、撮影角 $\theta = 0^\circ$ のデータをもとに、角度補正と距離補正を行ない角度 θ の画像を再現した画像より算出した横 / 縦である。

この結果を比較すると、撮影角 $\theta = 0^\circ \sim 60^\circ$ の範囲では、横 / 縦 = $1.47 \pm 10\%$ を再現することができた。一方、 70° 以上の高角度では、実測値とのずれが大きくなったが、これは被対象物の読み取り精度、撮影角の精度、被対象物の中心位置の抽出、内部座標への変換近似に問題があると考えられるので、今後の課題としたい。

〈実験②〉

本システムの精度を確認するために、撮影角 $\theta = 0^\circ \sim 80^\circ$ で撮影した画像から、 $\theta = 0^\circ$ で撮影した画像への逆変換シミュレーションを行った。

カメラの位置は水平面から上方 100cm に固定し、被対象物の中心とレンズの中心を合わせ、撮影角度が実験①と同じになるように、水平距離を変えて撮影を行った。なお、水平距離は 5mm 単位で計測し四捨五入した。

ズームレンズの倍率は画像からの読み取り精度を向上させるため、下表のように可能な限り高倍率を選択した。

表 1 計測条件

撮影角 (°)	0	10	20	30	40	50	60	70	80
水平距離 (cm)	0	18	36	58	84	119	173	275	567
倍率	3	3	3	3	3	5	15	30	30

撮影角 $0^\circ \sim 80^\circ$ で撮影した各画像から被写体部分を抽出し、読み取った 4 つの頂点の位置をもとに、距離補正と角度補正を行い、それぞれの撮影角で撮影した画像から、 $\theta = 0^\circ$ 画像への再現性を確認した。

図 7 が示すように、 $\theta < 70^\circ$ での相対誤差の平均は -0.45% となり、縮小傾向があるものの、変形した画像から $\theta = 0^\circ$ 画像の再現が高精度で可

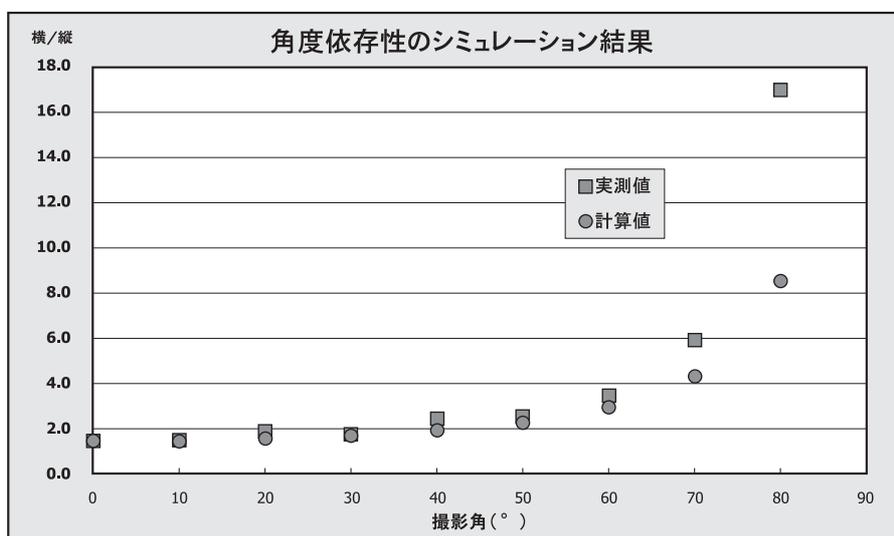


図 6 実寸再現シミュレーション結果

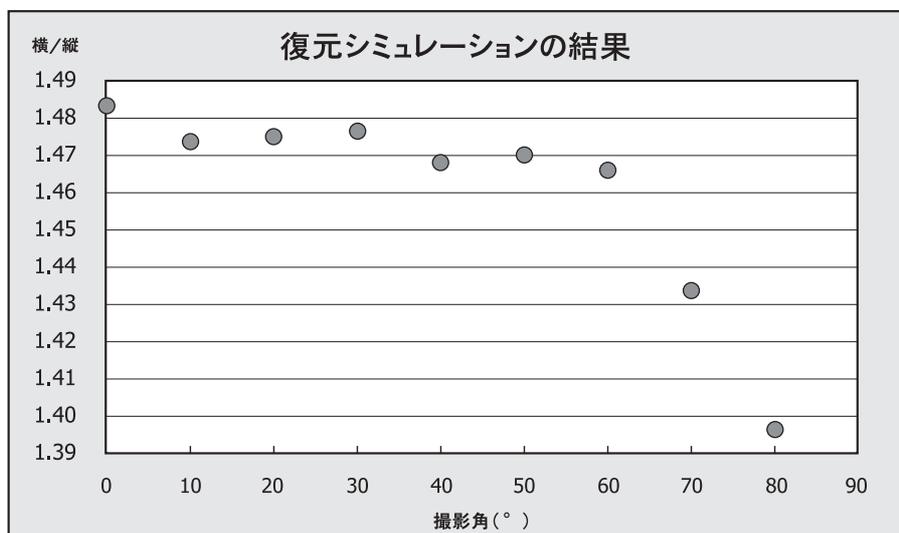


図 7 計測システムによる実測結果

能であることが分かった。しかし、 $\theta = 70^\circ$ での横 / 縦の計算値は被対象物の横 / 縦である1.48を大きく下回り1.43 (-3.1%)、 $\theta = 80^\circ$ では、1.39 (-5.7%)であった。実験①と同様に撮影角の小さい画像からの読み取り精度に問題があると考えられるので、今後の課題としたい。

§ 7. 今後の課題

実験①②の結果、今回開発したシステムは、撮影角 $\theta < 70^\circ$ では実用的な再現性が期待できることが分かった。ただし撮影角 $\theta > 70^\circ$ では6%程度の誤差が生じていた。誤差の要因であるが、撮影時の画像中心と、被写体の中心の位置がずれていることや光軸のずれが考えられる。画像中心は液晶モニタに表示される水平インジケータを基準マーカーとして利用し、目視で被写体の中心を決め撮影したことから、計算時に算出した被写体の中心とのずれがあったと思われる。被写体中心は回転による距離変化に敏感な要素であるので、正確に決めることが今後の課題である。撮影角が大きくなると、被対象物のエッジが不鮮明になり読み取りの精度が低下することが考えられるので、撮影角の精度を向上させたい。

今後は、全自動化システムの構築と簡素化を目指し、測定精度を向上させるために、次の要素を検討する。

- 全領域で使用できるシステムの開発。
- 撮影と計測を一体化した MobilePC や SmartPhone、Tablet 用アプリケーションの開発。
- 本システムに特化したエッジ検出アルゴリズムの開発。
- 倍率補正值に自動化。
- 光軸のズレ補正。

しかし、MobilePC や SmartPhone、Tablet を使用する場合、表示ディスプレイが小さく拡大表示をしても高い精度が期待できないことや高倍率で撮影が可能な機種が少ないことが問題として残る。また、現状のデジタルカメラでは、基準マーカーの配置や OS とエッジ検出アルゴリズムの組み込みは困難であるため、エッジ検出アルゴリズムの組み込みが可能な OS 内蔵のデジタルカメラの登場に期待したい。

今後は、デジタルカメラと Mobile 機器との組み合わせや Mobile 機器単体での仕様を視野に入れ、解決可能な課題から取り組み、より簡便な操作で、高精度で実長が計測できるシステムの開発を目指す。

参考文献

- (1) 「3次元アフィン変換」
〈<http://www.geocities.co.jp/SiliconValley-Bay/4543/Rubic/Mathematics/Mathematics-3.html>〉、201407
- (2) 「3D プログラミング基礎知識(3)」
〈<http://tech-sketch.jp/2011/12/3d3.html>〉、201407
- (3) 「3D プログラミング基礎知識(4)」
〈<http://tech-sketch.jp/2011/12/3d4.html>〉、201407
- (4) 黒田正治郎、「2焦点距離撮影による実長計測システムの開発」、近畿大学短期大学部 短大論集、2010、45、pp.55-65.
- (5) 「HX200V」
〈<http://www.sony.jp/cyber-shot/products/DSC-HX200V/spec.html>〉、201208
- (6) 黒田正治郎、「無定形・透明・微小物の数量計測システム」、近畿大学短期大学部 短大論集、2010、43、pp.19-27

光学全般

- (1) 堀 健夫、『物理学総論下巻』、学術図書出版社、1976、pp.235-446
- (2) 青木貞雄、『光学入門』、共立出版社、2007、pp.1-72