円形ターゲットの中心位置の計測手法の比較

Comparison of Measuring Methods of Circular Target Location

松岡 龍治^{*,**}・曾根 光男^{*}・須藤 昇^{*}・横塚 英世^{*}・白井 直樹^{**}*Ryuji MATSUOKA, Mitsuo SONE, Noboru SUDO,
Hideyo YOKOTSUKA and Naoki SHIRAI*

Abstract : A circular target on a plane is projected as an ellipse onto an oblique image. This paper reports an experiment conducted to evaluate measuring methods of elliptical target location by using simulated images of various sizes, eccentricities, and rotation angles of elliptical targets. Three popular measuring methods in digital photogrammetry : unweighted centroid method using a binary image created by thresholding (BCM), weighted centroid method (WCM), and least squares matching (LSM) were investigated. The experiment results show that BCM is robust against flatness and rotation of a target, and image noise. However, BCM cannot produce more accurate measuring results than WCM and LSM. Meanwhile, the results demonstrate that WCM is robust against flatness and rotation of a target, and WCM can achieve the most accurate measurement when a target image has no image noise. However, the measuring error of WCM would be proportional to the magnitude of image noises, and WCM would be unable to provide the best measuring results when a target image has larger image noises. The results indicate that LSM is rather robust against image noise, but very sensitive to flatness and rotation of a target. Moreover, the results show that BCM using an enlarged target image by bi-linear interpolation should be a good measuring method on accuracy and robustness against flatness and rotation of a target, and image noise.

1. はじめに

非計測用カメラを対象としたカメラキャリブレーションでは、2次元平面上に分布する標定点を用いる方法がよく用いられている。現在市販されている非計測用カメラに対応した画像計測ソフトウェアのカメラキャリブレーションにおいても、2次元平面上に分布する標定点を撮影した画像（アナログ写真をデジタル化した画像も含めて）を用いる方法を採用しているものがある（EOS Systems Inc., 2003, クラボウ エレクトロニクス事業部, 2001）。このようなカメラキャリブレーションでは、標定点として円形ターゲットを採用し、撮影画像上でのその中心位置をデジタル画

像処理技術により自動計測することが一般的となっている。また、カメラキャリブレーションに限らず、対象物の3次元計測においても、デジタル画像処理技術を利用して撮影画像上での円形ターゲットの中心位置を自動計測することが行われている（服部ほか, 2001）。

デジタル画像処理技術を利用して撮影画像上の円形ターゲットの中心位置を計測する手法としては、撮影画像を2値化することによって図形を抽出した後、その2値図形の重心を求める方法（近津ほか, 2001）、濃淡レベルから計算される重みを用いた加重平均により濃淡図形の重心を求める方法（服部ほか, 1999）、最小2乗マッチング法（EOS Systems Inc., 2003）などがある。

本論文は、これらの計測手法の計測精度を比較するため、様々な大きさの円形ターゲットのシミュレーション画像を用いて行った実験の結果を報告するものである。

一般に円形ターゲットは撮影画像では楕円となり、円形ターゲットの中心を画像へ投影した位置が円形

* 東海大学情報技術センター
Tokai University Research & Information Center

**国際航業株式会社

Kokusai Kogyo Co., Ltd.
「写真測量とリモートセンシング」VOL. 48, NO. 3, 2009

ターゲットの撮影画像上での本来の位置であるが、この位置と撮影画像上での楕円の中心位置との間には、鉛直撮影以外ではずれが生じる。このずれは円形ターゲットの画像上の位置として楕円の中心を採用した場合に発生する誤差であり、本論文では、この誤差を偏心誤差と呼ぶことにする。偏心誤差に対し、デジタル画像処理技術を利用して撮影画像上の楕円の中心位置を計測する際の誤差を単に計測誤差と呼ぶことにする。

本論文では、まず偏心誤差について簡単に述べた後、計測誤差に関する実験について報告する。

2. 偏心誤差

2.1 偏心誤差の一般式

対象物空間座標系を (X, Y, Z) 、画像座標系を (x, y) とし、画面距離が c であるカメラを用いて画像を撮影するときのカメラの位置を (X_0, Y_0, Z_0) 、姿勢を (ω, ϕ, κ) とする。

点 $P_c(X_c, Y_c, Z_c)$ を中心とする水平面 $Z=Z_c$ 上の半径 R の円を撮影したとき、円の中心 P_c が画像に撮影される点 $p_c(x_c, y_c)$ の画像上の位置は、次式(1)で表される。

$$\begin{cases} x_c = -c \frac{a_{11}(X_c - X_0) + a_{12}(Y_c - Y_0) + a_{13}(Z_c - Z_0)}{a_{31}(X_c - X_0) + a_{32}(Y_c - Y_0) + a_{33}(Z_c - Z_0)} \\ y_c = -c \frac{a_{21}(X_c - X_0) + a_{22}(Y_c - Y_0) + a_{23}(Z_c - Z_0)}{a_{31}(X_c - X_0) + a_{32}(Y_c - Y_0) + a_{33}(Z_c - Z_0)} \end{cases} \quad (1)$$

ただし、 $a_{11} \sim a_{33}$ は以下のとおりである。

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

一方、 $P_c(X_c, Y_c, Z_c)$ を中心とする水平面 $Z=Z_c$ 上の半径 R の円は、撮影画像上では楕円となり、その中心 $p_E(x_E, y_E)$ 、長半径 a 、短半径 b 、長軸の回転角 α は、以下の式(3)～(5)で求められる。

$$\begin{cases} x_E = -c \frac{BE - DF}{AB - D^2} \\ y_E = -c \frac{AF - DE}{AB - D^2} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} a = \max(s, t) \\ b = \min(s, t) \end{cases} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2D}{A - B} \quad (5)$$

ただし、 $A \sim F$ 、 s 、 t は以下のとおりである。

$$\begin{cases} A = (Z_c - Z_0)^2 - 2\{a_{11}a_{13}(X_c - X_0)(Z_c - Z_0) + a_{12}a_{13}(Y_c - Y_0)(Z_c - Z_0)\} \\ \quad + \{(X_c - X_0)^2 + (Y_c - Y_0)^2 - (Z_c - Z_0)^2 - R^2\}a_{13}^2 \\ B = (Z_c - Z_0)^2 - 2\{a_{21}a_{23}(X_c - X_0)(Z_c - Z_0) + a_{22}a_{23}(Y_c - Y_0)(Z_c - Z_0)\} \\ \quad + \{(X_c - X_0)^2 + (Y_c - Y_0)^2 - (Z_c - Z_0)^2 - R^2\}a_{23}^2 \\ C = (Z_c - Z_0)^2 - 2\{a_{31}a_{33}(X_c - X_0)(Z_c - Z_0) + a_{32}a_{33}(Y_c - Y_0)(Z_c - Z_0)\} \\ \quad + \{(X_c - X_0)^2 + (Y_c - Y_0)^2 - (Z_c - Z_0)^2 - R^2\}a_{33}^2 \\ D = -\{(a_{11}a_{23} + a_{13}a_{21})(X_c - X_0)(Z_c - Z_0) + (a_{12}a_{23} + a_{13}a_{22})(Y_c - Y_0)(Z_c - Z_0)\} \\ \quad + \{(X_c - X_0)^2 + (Y_c - Y_0)^2 - (Z_c - Z_0)^2 - R^2\}a_{13}a_{23} \\ E = +\{(a_{11}a_{33} + a_{13}a_{31})(X_c - X_0)(Z_c - Z_0) + (a_{12}a_{33} + a_{13}a_{32})(Y_c - Y_0)(Z_c - Z_0)\} \\ \quad - \{(X_c - X_0)^2 + (Y_c - Y_0)^2 - (Z_c - Z_0)^2 - R^2\}a_{13}a_{33} \\ F = +\{(a_{21}a_{33} + a_{23}a_{31})(X_c - X_0)(Z_c - Z_0) + (a_{22}a_{33} + a_{23}a_{32})(Y_c - Y_0)(Z_c - Z_0)\} \\ \quad - \{(X_c - X_0)^2 + (Y_c - Y_0)^2 - (Z_c - Z_0)^2 - R^2\}a_{23}a_{33} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} s = \sqrt{\frac{2(Ax_E^2 + By_E^2 + Cf^2 + 2Dx_Ey_E + 2Ex_Ef + 2Fy_Ef)}{(A+B) + \sqrt{(A-B)^2 + 4D^2}}} \\ t = \sqrt{\frac{2(Ax_E^2 + By_E^2 + Cf^2 + 2Dx_Ey_E + 2Ex_Ef + 2Fy_Ef)}{(A+B) - \sqrt{(A-B)^2 + 4D^2}}} \end{cases} \quad (7)$$

よって、円の中心 P_c が画像に撮影される点 $p_c(x_c, y_c)$ と撮影画像上での楕円の中心 $p_E(x_E, y_E)$ との位置のずれである偏心誤差 $\Delta p(\Delta x, \Delta y)$ は次式(8)で求められる。

$$\begin{cases} \Delta x = x_E - x_c = (-c) \left\{ \frac{BE - DF}{AB - D^2} \frac{a_{11}(X_c - X_0) + a_{12}(Y_c - Y_0) + a_{13}(Z_c - Z_0)}{a_{31}(X_c - X_0) + a_{32}(Y_c - Y_0) + a_{33}(Z_c - Z_0)} \right\} \\ \Delta y = y_E - y_c = (-c) \left\{ \frac{AF - DE}{AB - D^2} \frac{a_{21}(X_c - X_0) + a_{22}(Y_c - Y_0) + a_{23}(Z_c - Z_0)}{a_{31}(X_c - X_0) + a_{32}(Y_c - Y_0) + a_{33}(Z_c - Z_0)} \right\} \end{cases} \quad (8)$$

以上のように、偏心誤差 $\Delta p(\Delta x, \Delta y)$ は、カメラの画面距離 c 、画像撮影時のカメラの位置 (X_0, Y_0, Z_0) と姿勢 (ω, ϕ, κ) 、および対象となる円形ターゲットの中心位置 (X_c, Y_c, Z_c) とその半径 R によって求められることになる。

2.2 偏心誤差の試算

EOS Systems Inc. 製の PhotoModeler Pro 5 でのカメラキャリブレーションを参考にして、楕円の形状（長半径 a 、短半径 b 、長軸の回転角 α ）および偏心誤差 $\Delta p(\Delta x, \Delta y)$ を試算した。

PhotoModeler Pro 5 でのカメラキャリブレーションは、図 1 (a) に示すような縦 10 個 × 横 10 個の合計 100 個の円形ターゲットが描かれている Calibration Grid を斜めに撮影した画像を用いる (EOS Systems Inc.,

(a) Calibration Grid

(b) 撮影画像

図1 PhotoModeler Pro 5 の Calibration Grid とその撮影画像

2003)。この Calibration Grid では、円形ターゲットの中心間の距離を 1 とすると、円形ターゲットの半径は 0.1125 となっている。図 1 (b)に、この Calibration Grid を撮影した画像の例を示す。

楕円の形状および偏心誤差の試算は以下の条件で行った。

- (1) 円形ターゲットの半径 R を 11.25mm とする。
- (2) 撮影に用いるカメラは 35mm 判カメラ (画面サイズ: 36mm×24mm) とし、図 2 に示すように、画面の横置き (横位置) と縦置き (縦位置) の 2 種類の撮影を行う。
- (3) カメラの画面距離 c は 24mm, 35mm, 50mm の 3 種類とする。
- (4) 撮影は、奥行き方向の撮影距離 ($Z_c - Z_0$) を 1,000 mm とし、鉛直撮影からの撮影方向の傾き (撮影角) θ は 15°, 30°, 45° の 3 種類とする。なお、画像撮影時のカメラの姿勢が $(\omega, \phi, \kappa) = (-\theta, 0, 0)$ を満足するように対象物空間座標系 (X, Y, Z) を設定する。
- (5) $c=35\text{mm}$, $\theta=30^\circ$ のときの撮影を標準撮影と考え、表 1 に示すように、 (c, θ) の組み合わせとして、標準撮影の (35mm, 30°) 以外に、(24mm, 30°), (50mm, 30°), (35mm, 15°), (35mm, 45°) の 4 種類、合わせて 5 種類の撮影を行う。
- (6) 楕円の形状および偏心誤差の試算は、図 2 において、横一上、横一下、縦一上、縦一下と示した位置で行う。この 4 箇所は、横位置および縦位置のとき、画面枠から長辺および短辺の長さの 10% の距離だけ内側となる位置である。

以上の条件で試算を行った結果を表 1 に示す。この表 1 において、 $r=\sqrt{ab}$ は、長半径 a 、短半径 b の楕円と面積が等しい円 (以後、等積円と呼ぶことにする)

図2 画像座標系における35mm 判カメラの画面

の半径であり、 Δs は、偏心誤差 ($\Delta x, \Delta y$) の大きさ $\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$ である。表 1 には参考として $\Delta s/r$ の値も示す。この $\Delta s/r$ の最大値は 0.008 であり、例えば、撮影画像上で r が 5, 10, 20, 40 画素の円では、 Δs がそれぞれ 0.04, 0.08, 0.16, 0.32 画素となることを意味している。この偏心誤差の値は、本論文に示す実験で得られた計測誤差に比べて無視できない大きさであるため、今回設定したような撮影条件では、偏心誤差を補正する必要があることになる。

考えられる偏心誤差の補正方法を、標定を例として述べることにする。ここで、カメラの画面距離 c と円形ターゲットの半径 R は既知とする。また、2 枚以上の画像に撮影されていない円形ターゲットについては、その Z 座標 Z_c も既知とする。偏心誤差の補正は以下の手順で行われる。

- (i) 計測された楕円の中心の画像座標 (x_E, y_E) を円形ターゲットの画像座標 (x_c, y_c) として、画像撮影時のカメラの位置 (X_0, Y_0, Z_0) と姿勢 (ω, ϕ, κ) を求める。

表 1 投影楕円の形状と偏心誤差の大きさ

		(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
画面距離 c		35mm	24mm	50mm	35mm	35mm
撮影角 θ		30°	30°	30°	15°	45°
横－上	長半径 a	0.299mm	0.193mm	0.443mm	0.361mm	0.213mm
	短半径 b	0.201mm	0.112mm	0.326mm	0.308mm	0.098mm
	$r = \sqrt{ab}$	0.245mm	0.147mm	0.380mm	0.333mm	0.145mm
	扁平率 f	0.327	0.419	0.265	0.146	0.538
	回転角 α	−15.2°	−15.9°	−13.7°	−21.1°	−10.0°
	偏心 誤差	Δx	0.0002mm	0.0002mm	0.0003mm	0.0001mm
		Δy	−0.0009mm	−0.0004mm	−0.0014mm	−0.0008mm
		Δs	0.0009mm	0.0005mm	0.0015mm	0.0008mm
		$\Delta s/r$	0.0036	0.0034	0.0039	0.0025
横－下	長半径 a	0.438mm	0.345mm	0.573mm	0.439mm	0.396mm
	短半径 b	0.357mm	0.256mm	0.492mm	0.393mm	0.287mm
	$r = \sqrt{ab}$	0.396mm	0.297mm	0.531mm	0.416mm	0.337mm
	扁平率 f	0.185	0.257	0.141	0.105	0.276
	回転角 α	−42.5°	−47.1°	−35.5°	−53.1°	−31.3°
	偏心 誤差	Δx	0.0005mm	0.0005mm	0.0004mm	0.0001mm
		Δy	−0.0022mm	−0.0018mm	−0.0028mm	−0.0013mm
		Δs	0.0023mm	0.0019mm	0.0028mm	0.0013mm
		$\Delta s/r$	0.0058	0.0064	0.0054	0.0031
縦－上	長半径 a	0.264mm	0.157mm	0.410mm	0.341mm	0.168mm
	短半径 b	0.169mm	0.084mm	0.291mm	0.288mm	0.067mm
	$r = \sqrt{ab}$	0.211mm	0.115mm	0.345mm	0.314mm	0.106mm
	扁平率 f	0.361	0.465	0.291	0.156	0.602
	回転角 α	−8.6°	−8.7°	−7.9°	−12.3°	−5.3°
	偏心 誤差	Δx	0.0001mm	0.0001mm	0.0002mm	0.0001mm
		Δy	−0.0006mm	−0.0003mm	−0.0012mm	−0.0007mm
		Δs	0.0007mm	0.0003mm	0.0012mm	0.0007mm
		$\Delta s/r$	0.0031	0.0025	0.0035	0.0023
縦－下	長半径 a	0.471mm	0.383mm	0.599mm	0.459mm	0.433mm
	短半径 b	0.405mm	0.302mm	0.544mm	0.416mm	0.356mm
	$r = \sqrt{ab}$	0.437mm	0.340mm	0.571mm	0.437mm	0.393mm
	扁平率 f	0.139	0.213	0.092	0.093	0.176
	回転角 α	−56.9°	−62.2°	−46.6°	−66.8°	−41.9°
	偏心 誤差	Δx	0.0003mm	0.0004mm	0.0003mm	0.0001mm
		Δy	−0.0027mm	−0.0024mm	−0.0033mm	−0.0014mm
		Δs	0.0027mm	0.0024mm	0.0033mm	0.0014mm
		$\Delta s/r$	0.0063	0.0072	0.0057	0.0032

- (iii) 求められたカメラの位置 (X_0, Y_0, Z_0) と姿勢 (ω, ϕ, κ) を用いて、円形ターゲットの対象物空間座標 (X_c, Y_c, Z_c) を求める。
- (iii) 求められた対象物空間座標 (X_c, Y_c, Z_c) を用いて、式(8)より偏心誤差 $(\Delta x, \Delta y)$ を求める。
- (iv) 求められた偏心誤差 $(\Delta x, \Delta y)$ を用いて、 $(x_E - \Delta x, y_E - \Delta y)$ を計算し、これを円形ターゲットの補正された画像座標として用いて、あらためてカメラの位置 (X_0, Y_0, Z_0) と姿勢 (ω, ϕ, κ) を求める。
- (v) 以降、(iii)で計算される偏心誤差 $(\Delta x, \Delta y)$ の変化量が設定したしきい値以下となるまで、あるいは、(iv)で求められるカメラの位置 (X_0, Y_0, Z_0) と姿勢 (ω, ϕ, κ) の変化量が設定したしきい値以下となるまで、(ii)～(iv)の処理を繰り返す。

以上が標定における偏心誤差の補正方法として考えられる方法である。3次元計測の場合は、(i)と(iv)において画像撮影時の位置 (X_0, Y_0, Z_0) と姿勢 (ω, ϕ, κ) を求める処理を行わず、(v)における処理の終了判定は偏心誤差 $(\Delta x, \Delta y)$ の変化量だけとする。

また、カメラから円形ターゲットまでの距離に比べて、円形ターゲットの大きさが小さいときは、 $\Delta x, \Delta y$ はほぼ R^2 に比例する。また a, b は R に比例するため、 $\Delta s/r$ がほぼ R に比例することになる。つまり、小さなターゲットを用いることにより、 $\Delta s/r$ を偏心誤差の補正が不要な程度まで小さくすることは可能である。ただし、撮影画像上の楕円が小さくなるため、以下に示す実験結果から明らかなように、計測誤差は大きくなる。

3. 画像上の楕円の中心位置の計測手法

本論文では、白い背景の上に描かれた黒い円形ターゲットを撮影した画像において、撮影された円形ターゲット（撮影画像上では楕円となる）の中心位置を計測することを対象とする。ここで、撮影画像の画素 (x, y) における濃淡レベルを $P(x, y)$ 、黒い楕円の濃淡レベルを P_F 、白い背景の濃淡レベルを P_B とする。ただし、 $P_F < P_B$ であるとする。また、撮影画像上での楕円の中心位置を (x_E, y_E) とする。

このようなデジタル画像上での楕円の中心位置を計測する手法としては、図形の重心を求める方法、テンプレートマッチングによる方法、図形の輪郭抽出結果を利用する方法などがある。

3.1 図形の重心を求める方法

デジタル画像上の楕円の中心位置を計測するために用いられる、図形の重心を求める代表的な方法としては、2値化によって図形を抽出した後、その2値図形の重心を求める方法と、濃淡レベルから計算される重みを用いた加重平均により濃淡図形の重心を求める方法がある。本論文では、前者を2値化法、後者を加重平均法と呼ぶことにする。

なお、以下では、重心位置を計算する領域を制限するため、図形が存在が想定される領域では $M(x, y) = 1$ 、その領域外では $M(x, y) = 0$ となるマスク画像 $M(x, y)$ を与えることにする。

2値化法、加重平均法ともに、以下の式(9)で楕円の中心位置 (x_E, y_E) を求めることができる。

$$\begin{cases} x_E = \frac{\sum_x \sum_y M(x, y) \cdot W(x, y) \cdot x}{\sum_x \sum_y M(x, y) \cdot W(x, y)} \\ y_E = \frac{\sum_x \sum_y M(x, y) \cdot W(x, y) \cdot y}{\sum_x \sum_y M(x, y) \cdot W(x, y)} \end{cases} \quad (9)$$

2値化法と加重平均法の違いは、式(9)における $W(x, y)$ の与え方の違いである。

3.1.1 2値化法

2値化法では、式(9)における $W(x, y)$ を以下の式(10)で与える。

$$W(x, y) = \begin{cases} 1, & P(x, y) \leq P_T \\ 0, & P(x, y) > P_T \end{cases} \quad (10)$$

ここで、 P_T は2値化のしきい値であり、 $W(x, y) = 1$ である画素は図形であり、 $W(x, y) = 0$ である画素は背景とされる。

3.1.2 加重平均法

加重平均法では、式(9)における $W(x, y)$ を以下の式(11)で与える。

$$W(x, y) = \begin{cases} (P_L - P(x, y)), & P(x, y) \leq P_L \\ 0, & P(x, y) > P_L \end{cases} \quad (11)$$

ここで、 P_L はしきい値であり、 $P(x, y) \leq P_L$ である画素についてのみ、図形の重心位置の計算に用いることになる。 $P_L = P_B$ とするのが一般的である。

3.2 テンプレートマッチングによる方法

テンプレートマッチングによって楕円の中心位置を計測することも行われているが、その際には、図形の変形に対応し、またサブピクセル単位で対応位置を求めることが望ましいため、最小2乗マッチング法(LSM)が用いられることが多い。たとえば、PhotoModeler Pro 5のカメラキャリブレーションでは、キャリブレーションシート上の楕円の中心位置の計測は最小2乗マッチング法によって行うことが標準となっている(EOS Systems Inc., 2003)。

3.3 図形の輪郭抽出結果を利用する方法

2値化して図形を抽出し、その抽出図形の輪郭線を追跡し、輪郭線を構成する画素列より、楕円の中心を求める方法で、各種のアルゴリズムが提案されている(坂上・高木, 1983, Luhmann, 1986, Zhou, 1986)。しかし、これらのアルゴリズムは一般に複雑であり、撮影画像上での楕円の中心位置の計測で、これらの方法が利用されることは多くないため、本論文では、計測精度の比較対象としては採用しなかった。

ただし、以下に示すような簡便な方法で、楕円の方程式を求め、その結果を最小2乗マッチング法のテンプレート画像を作成するときに用いた。

- (i) 2値化により図形を抽出する。
- (ii) 抽出図形を構成する画素の中で、ある x 座標において y 座標が最小あるいは最大になる画素を輪郭画素として抽出する。同様に、ある y 座標において x 座標が最小あるいは最大になる画素も輪郭画素として抽出する。

(a) 画素ごとの円形ターゲットの面積

- (iii) 抽出された輪郭画素は楕円の周上にあると考え、最小2乗法により楕円の方程式を求める。

なお、このような簡便な方法で求められた楕円の方程式から計算される中心位置は、以下に示す実験では、ほとんどの場合において3.1.1で述べた2値化法で求められる中心位置より誤差が大きかった。

4. 計測精度比較実験の概要

4.1 実験対象画像

今回の実験で用いた画像は、濃淡レベルが P_B である背景に、濃淡レベルが P_F である、長半径が a 、短半径が b 、長軸の回転角が α である楕円が描かれた状況を想定し、これをデジタル画像化したものである。画素 i に含まれる円形ターゲットの面積を A_i とすると、この画素の濃淡レベル P_i を以下の式(12)で計算した。

$$P_i = A_i P_F + (1 - A_i) P_B + \delta_i \quad (12)$$

ここで、 δ_i は現実には撮像された画像には雑音が含まれることを考慮して加えたガウス雑音である。実験では、その標準偏差 σ_N として、0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8の9種類の値を考えた。また、円形ターゲット画像は8ビット(256レベル)のグレースケール画像とし、ガウス雑音を加わることを考慮して、 $P_B=192$ 、 $P_F=64$ とした。

このようにして半径が3画素である円をデジタル画像化した例を図3に示す。図3の例では $\sigma_N=0$ である。同図(a)に円形ターゲットが含まれる画素について

(b) 円形ターゲット画像

図3 円形ターゲットのデジタル画像化

その面積 A_i を示し、この面積に従ってデジタル画像化されたものが同図(b)である。

今回の実験で準備した楕円の大きさは、Photo Modeler Pro 5 でのカメラキャリブレーションにおいて撮影される画像上での円形ターゲットの大きさから、等積円の半径 r で 2～40画素とした。

4.2 中心位置の計測手法

今回の実験では、以下の4種類の計測手法で楕円の中心位置を計測し、その結果を比較した。なお、実験では、等積円の半径 r に応じた拡大率で拡大した楕円の内側のみを1、それ以外を0とするマスク画像 $M(x, y)$ を用いた。拡大率は、 $r \leq 5$ 画素で1.7、5画素 $< r \leq 10$ 画素で1.4、10画素 $< r$ で1.2とした。

4.2.1 2値化法

式(10)の2値化のしきい値 P_T の値によって計測精度が異なる可能性が予想されるため、今回の実験では、 P_T として以下の3種類の値を設定し、その計測結果を比較した。

- (1) 中間値： $P_T = (P_F + P_B)/2 = 128$
- (2) 上側四分値： $P_T = (P_F + 3P_B)/4 = 160$
- (3) 下側四分値： $P_T = (3P_F + P_B)/4 = 96$

なお、実験結果において、特に P_T の値を示していない場合は、 $P_T = 128$ (中間値) の結果である。

4.2.2 加重平均法

式(11)のしきい値 P_L の値によって計測精度が異なる可能性が予想されるため、今回の実験では、 P_L として以下の5種類の値を用い、その計測結果を比較した。

- (1) 背景値 - 4： $P_L = P_B - 4 = 188$
- (2) 背景値 - 2： $P_L = P_B - 2 = 190$
- (3) 背景値 ± 0 ： $P_L = P_B = 192$
- (4) 背景値 + 2： $P_L = P_B + 2 = 194$
- (5) 背景値 + 4： $P_L = P_B + 4 = 196$

なお、実験結果において、特に P_L の値を示していない場合は、 $P_L = 192$ (背景値 ± 0) の結果である。

4.2.3 最小2乗マッチング法

今回の実験では、幾何変換はアフィン変換とした。テンプレート画像を円形とし、3.3で述べた簡易的な方法で求められた楕円の方程式から変換係数の初期値を設定すると、回転に関する不定性のため、安定した解

が得られなかった場合が多かった。このため、求められた方程式に対応する楕円を、4.1で述べた方法でデジタル化した画像をテンプレート画像として、マッチングを行った。なお、繰り返し計算の途中で求められる中心位置が、初期位置より x 座標あるいは y 座標で2画素以上離れた場合は、マッチングに失敗したと判定した。

4.2.4 拡大画像を使用した2値化法

以下に示す実験結果で、2値化法が加重平均法や最小2乗マッチング法より著しく低い計測精度を示したこと、半径が大きくなるに従ってその計測精度が向上したこと、そして画像に含まれる雑音に対してロバストであったことなどを考慮して、線形内挿法によって画像を拡大し、その画像に対して2値化法を適用する方法も比較対象に加えた。今回の実験では、横2倍×縦2倍あるいは横4倍×縦4倍に拡大した拡大画像を使用し、式(10)の2値化のしきい値 P_T は中間値 ($P_T = 128$) とした。以後、横 n 倍×縦 n 倍に拡大した画像を使用する方法を n 倍拡大2値化法と呼ぶことにする。

なお、実験結果において、特に n の値を示していない場合は、 $n=4$ (4倍拡大2値化法) の結果である。

4.3 計測結果の評価

1組の長半径 a 、扁平率 f 、長軸の回転角 α のターゲットについて、その中心位置に依存した計測となるのを避けるため、一様乱数に従って中心位置が画素内でランダムになるように配置して、1,024枚のターゲット画像を作成し、その中心位置を計測した。平均的には、横 $1/32$ 画素×縦 $1/32$ 画素間隔で、楕円の中心位置が計測されることになる。

ターゲットの中心位置の計測精度の評価は、この1,024点の計測誤差のRMSで行った。以降、この計測誤差のRMSを、単に計測誤差と呼ぶことにする。

5. 実験結果と考察

5.1 形状の違いによる計測精度の違い

楕円の形状の違いによる中心位置の計測精度の違いを調べるため、扁平率 f として0.0 (円)、0.2、0.4、0.6、0.8の5種類、長軸の回転角 α として0°、15°、30°、45°の4種類について実験を行った、 (f, α) の組み合わせは表2に示すような17種類となる。

表2 扁平率と長軸の回転角の組み合わせ

		扁平率 f				
		0.0	0.2	0.4	0.6	0.8
回転角 α	0°
	15°
	30°
	45°

本研究では、楕円の中心位置の計測は2次元処理であり、その計測精度は楕円の面積に依存すると考え、扁平率の異なる楕円についての計測精度の比較は、等面積の楕円について行うことにした。そして、等積円の半径 r として、5画素、10画素、20画素、40画素の楕円に対して実験を行った。2値化法と拡大2値化法は $P_T=128$ 、加重平均法は $P_L=192$ とした。なお、実験に用いた画像には雑音を付加していない ($\sigma_N=0$)。実

験結果を図4～図7に示す。また、最小2乗マッチング法では、表3に示すように、どの大きさの楕円でも、 $f=0.8$ でのマッチング失敗率が高かったため、グラフには $f=0.8$ の結果は含めていない。なお、表3に示していない扁平率に対しては、マッチング失敗は発生しなかった。これらの図表より、以下のことがわかった。

- (1) どの計測手法においても、計測精度が楕円の軸の回転角に依存することを特に示す結果は得られなかった。
- (2) どの計測手法においても、扁平率が大きくなるに従って概ね計測精度が低下した。また、 $f=0.2$ の計測精度は若干のばらつきはあるが、 $f=0.0$ (円) の計測精度とほぼ同程度であると言える結果であった。
- (3) 2値化法、加重平均法、拡大2値化法の計測精度は、ほぼ同じ傾向を示し、軸の回転角の違いによるばらつきはあるが、 $f=0.6$ でも $f=0.0$ より大きく計測精度が低下する結果ではなかった。特に、加重

(a) 2値化法

(b) 加重平均法

(c) 最小2乗マッチング法

(d) 拡大2値化法

図4 楕円の形状による計測精度の違い ($r=5$ 画素, $\sigma_N=0$)

(a) 2値化法

(b) 加重平均法

(c) 最小2乗マッチング法

(d) 拡大2値化法

図5 楕円の形状による計測精度の違い ($r=10$ 画素, $\sigma_N=0$)

平均法は、 $r=5$ 画素を除き、 $f=0.6$ でも $f=0.0$ とほぼ同程度と言える計測精度であった。そして、これらの手法の $f=0.8$ での計測誤差は $f=0.0$ の計測誤差の概ね2倍以下であった。

- (4) 最小2乗マッチング法の計測精度は、扁平率に依存する傾向が最も高く、特に $f=0.6$ では計測精度が著しく低下した。また、 $f=0.8$ では、軸の回転角によっては、マッチングに失敗する率が50%を超える場合があるなど、この手法を偏平した楕円に適用することが難しいことを示す結果であった。

なお、以下では、扁平率が0である円を対象とした実験結果についてのみ示すことにする。

5.2 大きさの違いによる計測精度の違い

画像上のターゲットの大きさの違いによる中心位置の計測精度の違いを調べるため、円の半径 r を2画素から40画素まで0.1画素ずつ変えて作成した、雑音が付加されていない ($\sigma_N=0$) 画像を用いて実験を行った。

2値化法と拡大2値化法では $P_T=128$ 、加重平均法では $P_L=192$ とした。この実験結果を図8に示す。この図8より、以下のことがわかった。

- (1) 計測精度が高い順に並べると、すべての半径において、加重平均法、拡大2値化法、最小2乗マッチング法、2値化法となった。計測誤差の最大値は、2値化法では、 $r=2.1$ 画素のときに0.176画素、加重平均法では、 $r=2.4$ 画素のときに0.009画素、最小2乗マッチング法では、 $r=2.3$ 画素のときに0.126画素、拡大2値化法では、 $r=2.1$ 画素のときに0.040画素であった。
- (2) 2値化法、加重平均法、拡大2値化法では、計測精度が半径に依存して周期的に変動した。その振幅は、最も計測精度が低い2値化法で最も大きく、逆に最も計測精度が高い加重平均法で最も小さくなった。また、その周期は0.5画素と短く、また単振動に近い波形であった。これらの計測手法では、半径が大きくなるに従って計測誤差の振動の振幅は小さく

(a) 2値化法

(b) 加重平均法

(c) 最小2乗マッチング法

(d) 拡大2値化法

図6 楕円の形状による計測精度の違い ($r=20$ 画素, $\sigma_N=0$)

なったが、振動の周期は半径に応じて変化することはなかった。

- (3) 最小2乗マッチング法でも、半径に従って計測精度が変動したが、その波形は複雑な形状を示し、周期を算定することは困難であった。

計測精度が半径によって周期的に変動することをさらに詳しく調べるため、半径 r が、4～6画素、9～11画素、19～21画素、39～41画素の4区間について、0.05画素ごとに計測を行った。図9に、中間値 ($P_T=128$) による2値化法、上側四分値 ($P_T=160$) による2値化法、加重平均法、最小2乗マッチング法、拡大2値化法の計測誤差を示す。この図9より、以下のことがわかった。

- (1) すべての区間において、中間値による2値化法と上側四分値による2値化法では、振動の位相が反転していた。図9には示していないが、下側四分値 ($P_T=96$) による2値化法の結果は上側四分値による2値化法の結果とほぼ一致するものであった。

- (2) 2値化法では、振動の振幅が大きいため、しきい値 P_T の設定次第で計測精度が大きく異なることになる。 P_T の設定値の違いによる1周期内での計測誤差の違いは、最大で2倍程度となっており、半径によっては、中間値を用いた場合が最も計測精度が高い場合もあれば、上側四分値あるいは下側四分値を用いた場合が最も計測精度が高い場合もある。

- (3) 加重平均法では、半径が小さい ($r=4\sim6$ 画素) ときには、計測誤差の周期性が明瞭に認められるが、一般的に計測精度が非常に高いため、特に問題はないと考えられる。

ここで、2値化法による1次元の線分の中点の位置の計測誤差について考えてみる。図形と背景の濃淡レベルの中間値をしきい値とした2値化法によって線分の中点の位置を計測したときの誤差のRMS、すなわち計測誤差は、標本化のみを行い、量子化は行っていないデジタル画像に対しては解析的に求めることができ、次式(13)に示すように、線分の長さ l の小数部分

(a) 2値化法

(b) 加重平均法

(c) 最小2乗マッチング法

(d) 拡大2値化法

図7 楕円の形状による計測精度の違い ($r=40$ 画素, $\sigma_N=0$)

表3 最小2乗マッチング法におけるマッチング失敗率

等積円の半径 r	扁平率 f	回転角 α			
		0°	15°	30°	45°
5.0画素	0.8	39.4%	69.4%	77.1%	23.4%
10.0画素	0.6	0.5%	18.7%	0.7%	0.0%
	0.8	37.2%	61.3%	71.1%	47.5%
20.0画素	0.8	4.8%	51.6%	58.4%	34.1%
40.0画素	0.8	10.4%	25.4%	49.3%	55.9%

$\tau = 1 - [I]$ ($[]$ はガウス記号) の関数となる。この計測誤差を τ ($0 \leq \tau < 1$) について示したのが図10である。

$$\text{計測誤差} = \sqrt{\frac{1}{4}\tau^2 - \frac{1}{4}\tau + \frac{1}{12}} \quad (13)$$

このように、2値化法による1次元の線分の中点の位置の計測では、しきい値による判定に関係する画素が線分の両端の2画素に限定されるため、計測誤差は長さ l の整数部分 $[l]$ に依存せず、周期1画素で振動

することになる。

これに対し、2次元の円の中心位置を2値化法、加重平均法、拡大2値化法によって計測するときの誤差を解析的に求めることは困難であるため、その計測誤差が、図8や図9に示したように周期0.5画素で振動し、半径が大きくなるに従って小さくなった理由は明らかではない。

しかし、2値化法については、1次元の線分の中点

図8 半径の違いによる中心位置の計測精度の違い ($\sigma_N=0$)

(a) 半径：4～6画素

(b) 半径：9～11画素

(c) 半径：19～21画素

(d) 半径：39～41画素

- ▲ 2 値化法 (しきい値：中間値)
- 2 値化法 (しきい値：上四分値)
- ▲ 加重平均法
- 最小 2 乗マッチング法 [LSM]
- 4 倍拡大 2 値化法

図9 計測精度の半径による周期的な変動 ($\sigma_N=0$)

図10 2値化法による長さ l の線分の中点の計測誤差

の位置の計測誤差が周期1画素で振動するということを2次元に拡張して考えると、2次元の円の中心の位置の計測誤差が直径1画素（半径0.5画素）の周期性を有することは理解できないことではない。

ただし、1次元の線分の中点の位置の計測とは異なり、2次元の円の中心の位置の計測では、しきい値による判定に関係する画素が円の周上の画素となり、その画素の数は円の半径 r に比例する。このため、図8に示した2値化法による円の中心位置の計測誤差は、 r の小数部分 $\tau = r - [r]$ に依存して振動する成分と $\sqrt{r}$ に反比例して減少する成分が合成されたものと考えられる。

つぎに、計測誤差の周期性の影響を取り除いて、半径の違いによる中心位置の計測精度の違いを調べるために、半径 r の ± 1 画素の区間で移動平均をとった結果を、図8に太線で描き加えた図を図11として示す。この図11より、以下のことがわかった。

- (1) 図11には周期性の影響がまだ残ってはいるが、すべての計測手法において、半径 r が大きくなるに

従ってその計測誤差が小さくなった。なお、2値化法と拡大2値化法では、ほぼ $\sqrt{r}$ に反比例して減少したが、これに対し、加重平均法と最小2乗マッチング法では、 $\sqrt{r}$ に反比例した減少ではなかった。

- (2) 2値化法では、移動平均の上下に大きく振動し、1周期0.5画素中の計測誤差の最大値と最小値の比は約2となった。つまり、1周期0.5画素中の計測誤差の最大値と最小値は、それぞれ移動平均値の約4/3倍、約2/3倍となった。
- (3) 拡大2値化法でも、2値化法より振動の振幅は小さいが、同様に移動平均の上下に振動し、1周期0.5画素中の計測誤差の最大値と最小値の比は約2となった。

5.3 雑音の大きさの違いによる計測精度の違い

雑音の大きさの違いによる中心位置の計測精度の違いを調べるため、半径 r が5画素、10画素、20画素、40画素の4種類の円について、付加雑音の標準偏差 σ_n を0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8として作成した9種類の画像を用いて、計測実験を行った。図9からわかるように、この設定した半径の値に対する2値化法や拡大2値化法の計測誤差は振動のほぼ中央に位置する。

また、拡大2値化法については、横2倍×縦2倍および横4倍×縦4倍に拡大した2種類の拡大画像を使用した場合の計測精度の違いもあわせて調査した。なお、2値化法、拡大2値化法（2倍、4倍）のしきい値 P_T は中間値（ $P_T=128$ ）とした。

さらに、加重平均法のしきい値 P_L の違いによる計測誤差の違いを調べるため、 P_L の値を、背景値 - 4（ $P_L=188$ ）、背景値 - 2（ $P_L=190$ ）、背景値 + 2（ $P_L=194$ ）、

図11 半径の違いによる中心位置の計測精度の違い（ $\sigma_n=0$ ，移動平均あり）

背景値+4 ($P_L=196$)とした場合の実験も行った。

なお、実験結果を示す図12および図13では、2値化法、背景値±0による加重平均法、最小2乗マッチング法の計測誤差を基本とし、図12には2倍拡大2値化法と4倍拡大2値化法の計測誤差を、図13には異なるしきい値 P_L を用いたときの加重平均法の計測誤差を合わせて示すことにする。この図12および図13より、以下のことがわかった。

- (1) 4種類の半径すべてにおいて、2値化法の計測誤差は最も大きかったが、その値は雑音の大きさには依存せず、ほぼ一定であった。2値化法は、雑音に対してロバストであると言える。
- (2) 4種類の半径すべてにおいて、2倍拡大2値化法と4倍拡大2値化法は2値化法より計測精度が高くなった。また、4倍拡大2値化法が2倍拡大2値化法よりも計測精度が高くなった。ただし、2値化法と異なり、雑音が大きくなるに従って計測誤差がやや大きくなった。
- (3) 最小2乗マッチング法の計測精度は、拡大2値化法と同様に、雑音が大きくなるに従って計測誤差がやや大きくなった。
- (4) しきい値を背景値±0とした場合の加重平均法の計測誤差は、雑音の大きさにほぼ比例する結果となった。これは、量子化誤差を考慮しない場合の理

(a) 半径：5画素

(b) 半径：10画素

(c) 半径：20画素

(d) 半径：40画素

- △— 2値化法
- 2倍拡大2値化法
- ▲— 4倍拡大2値化法
- *—* 加重平均法
- 最小2乗マッチング法 [LSM]

図12 計測手法による中心位置の計測精度の違い (基本+異なる拡大率の拡大2値化法)

(a) 半径：5画素

(b) 半径：10画素

(c) 半径：20画素

(d) 半径：40画素

- △ 2 値化法
- ▲ 加重平均法 (しきい値：背景値 + 4)
- 加重平均法 (しきい値：背景値 + 2)
- *-* 加重平均法 (しきい値：背景値 ± 0)
- 加重平均法 (しきい値：背景値 - 2)
- ▲ 加重平均法 (しきい値：背景値 - 4)
- 最小 2 乗マッチング法 [LSM]

図13 計測手法による中心位置の計測精度の違い (基本+異なるしきい値の加重平均法)

論的な計測誤差の性質 (Maas, *et al.*, 1993) と一致するものである。半径が大きくなるに従って、雑音による計測精度の低下は著しく、 $r=5$ 画素では、 $\sigma_N=4$ において、2 倍拡大 2 値化法とほぼ同じ計測精度であったのに対し、 $r=40$ 画素では、 $\sigma_N=4$ において、拡大 2 値化法 (2 倍、4 倍) や最小 2 乗マッチング法より低い計測精度となった。ただし、 $r=40$ 画素の $\sigma_N=8$ を除いて、2 値化法よりは計測精度が高かった。

- (5) しきい値 P_L を楕円の濃淡レベルに近づけて、背景値 - 2 あるいは背景値 - 4 とした場合の計測精度

は、背景値 ± 0 とした場合の計測精度とほぼ同程度あるいはやや高い結果であった。これに対し、しきい値 P_L を楕円の濃淡レベルから遠ざけて、背景値 + 2 あるいは背景値 + 4 とした場合の計測精度は、背景値 ± 0 とした場合の計測精度より低くなった。また、このときの計測誤差は、雑音がないとき ($\sigma_N=0$) でも 0 ではなく、理論値とずれた結果であった。このことより、しきい値 P_L を背景の濃淡レベルと等しくするか、あるいはそれよりやや図形の濃淡レベルに近づけた値に設定することが望ましいと言える。

6. 各計測手法の計測精度の特徴

各計測手法の計測精度の特徴を実験結果に基づいてまとめると、以下ようになる。ここで、 r は円の半径、 f は楕円の扁平率、 σ_N は雑音の標準偏差である。

6.1 2値化法

- (1) 雑音に対してロバストではあるが、 $\sigma_N \leq 8$ での計測精度は、他の3手法の計測精度より低い。計測対象が円の場合、 $r=2.1$ 画素における計測誤差が0.18画素となるなど、概ね $r \geq 7$ 画素でなければ、計測誤差が0.1画素以下とはならない。
- (2) 計測対象が円の場合、計測精度は半径に応じて周期0.5画素の単振動をする。その振幅は大きく、1周期0.5画素中の計測誤差の最大値と最小値の比は約2となる。
- (3) 計測精度は2値化のしきい値 P_T に大きく依存する。計測対象が円の場合、同じ半径であっても、 P_T の値の違いによる計測誤差の最大値と最小値の比は約2となる。
- (4) 計測精度が楕円の軸の回転角に特に依存することはない。
- (5) 楕円の扁平率が大きくなるに従って計測精度は低下する。ただし、 $f \leq 0.6$ の楕円に対しては、円に対する計測精度より大きく計測精度が低下することはない。 $f=0.8$ の楕円に対する計測誤差は円に対する計測誤差の概ね2倍以下となる。

6.2 加重平均法

- (1) 計測誤差は雑音の標準偏差にほぼ比例して大きくなる。計測対象が円の場合、 $\sigma_N \leq 2$ では、他の3手法の計測精度より高くなるが、 $\sigma_N \geq 4$ では、 $r \geq 10$ 画素で拡大2値化法（2倍、4倍）より、 $r \geq 20$ 画素で最小2乗マッチング法や拡大2値化法（2倍、4倍）より計測精度が低くなる。
- (2) 計測精度はしきい値 P_L にも依存し、 P_L の値を標準的な背景の濃淡レベルではなく、より図形の濃淡レベルから遠ざけた値に設定すると、計測精度は低下する。
- (3) P_L に適切な値を設定し、雑音が小さいときは、非常に高い計測精度が期待できる。
- (4) 計測精度が楕円の軸の回転角に特に依存すること

はない。

- (5) 楕円の扁平率が大きくなるに従って計測精度は低下する。ただし、 $f \leq 0.6$ の楕円に対しては、円に対する計測精度より大きく計測精度が低下することはない。 $f=0.8$ の楕円に対する計測誤差は円に対する計測誤差の概ね2倍以下となる。

6.3 最小2乗マッチング法

- (1) 計測精度の雑音に対するロバスト性は2値化法と加重平均法の中間で、拡大2値化法と同程度である。計測対象が円の場合、 $r=5$ 画素のときは、ややロバスト性が低く、 $\sigma_N \leq 8$ の計測精度が加重平均法の計測精度より低くなる。しかし、 $r \geq 10$ 画素では、ロバスト性が高く、 $r=10$ 画素で $\sigma_N \geq 6$ 、 $r=20$ 画素で $\sigma_N \geq 4$ 、 $r=40$ 画素で $\sigma_N \geq 3$ において、加重平均法の計測精度を上回る。
- (2) 計測精度が楕円の軸の回転角に特に依存することはない。
- (3) 計測精度は楕円の扁平率に大きく依存する。特に $f=0.6$ の楕円に対しては、計測精度が著しく低下する。さらに、 $f=0.8$ の楕円に対しては、マッチングに失敗する確率が50%を超えることもあり得るなど、偏平した楕円の計測に適用することは難しい。

6.4 拡大2値化法

- (1) 拡大画像の拡大率が4倍以下では、拡大率が大きくなるに従って計測精度は向上する。
- (2) 計測精度の雑音に対するロバスト性は高く、計測対象が円の場合、4倍拡大2値化法の計測精度は、 $r=5$ 画素のときは $\sigma_N \geq 3$ で、 $r \geq 10$ 画素のときは $\sigma_N \geq 2$ で、加重平均法の計測精度を上回る。
- (3) 計測対象が円の場合、計測精度は半径に応じて周期0.5画素の単振動をする。1周期0.5画素中の計測誤差の最大値と最小値の比は約2となる。
- (4) 計測精度が楕円の軸の回転角に特に依存することはない。
- (5) 楕円の扁平率が大きくなるに従って計測精度は低下する。ただし、 $f \leq 0.6$ の楕円に対しては、円に対する計測精度より大きく計測精度が低下することはない。 $f=0.8$ の楕円に対する計測誤差は円に対する計測誤差の概ね2倍以下となる。

7. ま と め

今回の実験結果に基づいてまとめた各計測手法の特徴は6.に示したとおりであるが、画像に含まれている雑音の大きさに応じて、適切な計測手法を選択すれば、雑音の標準偏差 σ_n が8以下の画像において、円あるいは扁平率が0.4以下の楕円に対しては、等積円の半径が5画素程度では0.05画素、10画素以上では、0.03画素の計測精度が達成できると考えられる。これに対し、扁平率が0.8程度のかなり扁平した楕円に対する達成可能な計測精度は、等積円の半径が5画素程度では0.10画素、10画素以上では、0.05画素程度であると考えられる。

今回の実験結果より、円形ターゲットの中心位置をできるだけ高精度に自動的に計測する手法として、以下の方法が考えられる。

- (i) 画像全体あるいは部分画像の濃淡レベルの最大値と最小値の平均値をしきい値として用いて2値化を行い、楕円の輪郭画素を抽出し、楕円の方程式を求める(3.3参照)。
- (ii) 求められた楕円の方程式を用いて、楕円に確実に含まれる画素(図形と確実に認められる画素)と楕円に確実に含まれない画素(背景と確実に認められる画素)を抽出し、図形と背景の濃淡レベルの平均値と標準偏差を求める。
- (iii) 求められた図形および背景の濃淡レベルの標準偏差を雑音の標準偏差と考え、この値および図形の形状に応じて、以下の(iv)あるいは(v)の処理を行う。
- (iv) 等積円の半径が約20画素以下の小さな図形では、雑音の標準偏差が2以下のときは、加重平均法で、2以上のときは、4倍拡大2値化法で中心位置を計測する。
- (v) 等積円の半径が約20画素以上の大きな図形では、雑音の標準偏差が1.5以下のときは、加重平均法で、1.5以上のときは、4倍拡大2値化法で中心位置を計測する。

(受付日2008.9.4, 受理日2009.5.12)

参考文献

- クラボウ エレクトロニクス事業部, 2001. Kuraves V. 2.0.0 オペレーションマニュアル カメラレンズ歪み補正編.
- 坂上勝彦, 高木幹雄, 1983. 反復演算による重なり合った粒子像の分離, 情報処理学会論文誌, vol. 24, no. 5, pp.561-567.
- 近津博文, 国井洋一, 中田隆司, 2001. デジタル写真測量からみた300万デジタルスチルカメラの精度検証, 写真測量とリモートセンシング, vol. 40, no. 2, pp.33-38.
- 服部 進, 秋本圭一, 岡本 厚, 長谷川博幸, 井本治孝, 1999. ターゲット場の多重撮影による基準点のないCCDカメラキャリブレーション, 電子情報通信学会論文誌 D-II, vol. J82-D-II, no. 9, pp.1391-1400.
- 服部 進, 秋本圭一, 井本治孝, 2001. コード付きターゲットを使った工業画像計測の自動化, 電子情報通信学会論文誌 D-II, vol. J84-D-II, no. 9, pp.2011-2019.
- EOS Systems Inc., 2003. *PhotoModeler Pro 5 User Manual*.
- Luhmann, T., 1986. "Automatic Point Determination in a Réseau Scanning System," Proceedings, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Commission 5, InterCongress Symposium, Ottawa, Canada, pp.400-408.
- Maas, H.-G., Gruen, A., Papantoniou, D.A., 1993. "Particle Tracking in three dimensional flows - Part I: Photogrammetric determination of particle coordinates," *Experiments in Fluids*, vol. 15, pp.133-146.
- Zhou, G. 1986. "Accurate Determination of Ellipse Centers in Digital Imagery," Technical Papers of ACSM-ASPRS Annual Convention, Washington D.C., U.S.A., vol. 4, pp.256-264.