

## 形状関数を利用した画像ゆがみ補正方法の提案

田 添 亘<sup>†</sup> 梅 沢 貞 夫<sup>†</sup>

本論文は2次元図形のゆがみを補正する方法について述べたものである。図形のゆがみには移動、回転、スキュー、拡大、縮小など純幾何学的なゆがみと、それ以外の非幾何学的なゆがみがある。これらのゆがみを補正して元の図形に復元する方法は種々提案されているが、いずれもゆがみの性質を限定してそれに適した補正方法として提案されている。本論文では図面やグラフのように、図形が矩形領域の中に存在し、その矩形を座標の基準として利用できる問題に限定して、ゆがみがいかなる性質であっても同一の手段で補正できる方法を提案した。補正の手段としては形状関数を利用している。この方法を計算機で実行できるツールとして開発し、ゆがんだ図形の補正に適用してその精度を検討した。その結果、本法が上記の問題に対して有効な手法であることを確認した。

### Method Proposal with Shape Function to Restore Distortions of a Figure

WATARU TAZOE<sup>†</sup> and SADAO UMEZAWA<sup>†</sup>

This paper proposes a method to restore distortions of two dimensional figures. There are geometrical distortions which occur when figures are transferred, rotated, skewed, expanded or reduced and other non-geometrical distortions. Some kinds of methods to restore these distortions have been proposed, but they are only applicable to a particular distortion. In this paper we propose a new method applicable to any distortion for figures within the limits, figures which are enclosed by a rectangle. This method uses the shape function. We developed a computer program to execute this method and examined the accuracy. As a result of this examination, we confirmed that this method was very useful for restoring distortions for figures within the limits.

#### 1. はじめに

実験により求められたデータや文献などに公表されたデータをデータベース化する場合、グラフ上にプロットされた点の座標を読み取る作業がある。

グラフのような図形の座標データを読み取る手段としては、デジタイザのようにカーソルまたはスタイラスペンなどで図形上の点を順次指定することによって、図形データを計算機に入力する方法がある。一方、図形をスキャナによってイメージとして計算機に取り込み、CRT上のカーソルで図形上の点を指定する方法もある。これらの方法は基準となる直交座標が図形上に正確に示されていることを前提としている。読み取る図形が、原図から複写などで二次的・三次的に加工されたものの場合、元の図が忠実に反映されていれば問題は無いが、たとえば厚みのある文献から複写した

ものを利用しなければならない場合などには、ずれ・ゆがみを生じていることが多い。

そのような場合には図形上の基準直交座標がデジタイザや計算機上の基準座標に対してゆがんでおり、何らかの補正を加えなければ正確な座標値を求めることはできない。

平面図形のゆがみを補正する技術は産業上の多様な場面で必要とされるが、基本的な技術は幾何学的なゆがみを座標変換によって補正するものである。ゆがみが拡大、縮小、平行移動あるいは回転によると推測される場合は、ヘルマート変換式が用いられている。その変形にスキューゆがみ（せん断ゆがみ）が含まれている場合は、アフィン変換式が用いられる。そのほかゆがみの性質によって擬似アフィン変換式、2次等角変換式、2次射影変換式などが用いられている<sup>1),2)</sup>。

このような手法を用いてゆがみを補正する場合、ゆがみの性質があらかじめ分かっている場合には、それに対応する補正方法を適用することで、容易に補正ができる。しかし、一般的にはゆがみの性質は幾何学的

<sup>†</sup> 株式会社日立製作所機械研究所  
Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi,  
Ltd.

でないことが多く、そのような場合は高次多項式が用いられている<sup>2)</sup>。これは原図における座標の分かっている複数の基準点を選択し、その基準点の既知の座標と補正後の座標との誤差が最小になるように、多項式の係数を決定する方法である。この方法を適用するには多項式の次数をどう選ぶか、基準点をどこにとるかなどを、ゆがみの性質に応じて決める必要があり、高度な専門知識を要求される。

一方、画像のゆがみの対象をスキャナ（コピー機）による画像に限定して、Shape from Shading<sup>3)</sup>の原理を用いて補正する方法が提案されている<sup>4),5)</sup>。厚みのある書籍の綴り代部分のように、原稿がスキャナ面に完全に密着されていない部分の画像ゆがみを補正するものである。ここではコピー画像に表現された画像の濃淡情報から複写時の原稿の3次元形状を復元し、その形状から元の2次元平面状態での画像を求めている。この方法ではスキャナ固有の幾何学的、光学的パラメータを必要とするため、複写物に表現されている情報だけでゆがみを補正することはできない。

この点を改良する研究として、複写物に表現されている原稿の輪郭情報から幾何学的パラメータを推定する方法が提案されている<sup>6)</sup>。しかし、このような改良を加えても現段階では綴りに直交する原稿の断面形状が一定の場合、すなわち複写された画像が複写物（書籍）の綴りに直交する方向のみにゆがんでいる場合に限られる。

本論文では図面やグラフのように、図形が矩形領域の中に存在し、その矩形を座標の基準として利用できる問題に限定して、ゆがみの性質によらず任意のゆがみを高精度に補正する方法を提案する。具体的には、写像関数の一種で、規則的な図形とゆがんだ図形とを対応づける手段として利用される「形状関数」を応用し、数カ所の基準点を指定するだけで、図形や画像のゆがみを効率良く、かつ精度良く補正・復元する方法について提案する。

## 2. 形状関数によるゆがみの補正

ゆがんだ図形とゆがむ前の図形とを比べたとき、ゆがむ前の図形内の任意の矩形領域（四角形領域）は、ゆがんだ図形内のゆがんだ四角形領域と対応し、その領域内のゆがみは、ゆがんだ四角形の辺の形状によって特徴づけられるような四角形領域を選ぶことができる。

そのような四角形領域の各頂点および辺の中点の座標と、四角形領域内の任意の点の座標とを対応づける関係として、形状関数と呼ばれる関数が知られている。

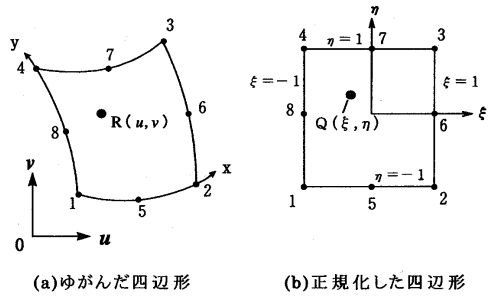


図1 ゆがんだ四角形と正規化した四角形の対応  
Fig. 1 The relation between distorted and normalized quadrangles.

### 2.1 形状関数

形状関数<sup>7),8)</sup>は写像関数の一種で、規則的な図形とゆがんだ図形とを対応づける手段として利用されている。一般的な形状関数は理論的に導くことができず、試行錯誤的に偶然見つけられたものが多い。ここでは、そのうちの1つであるセレンディピティ要素の8節点四角形の場合を例にあげる。

図1の(b)に示す \$\xi-\eta\$ 直交座標上に辺の長さが2の8節点正方形を想定したとき、それぞれの節点に対し次のような形状関数 \$N\_1 \sim N\_8\$ が求められている。

$$N_1 = \frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta)(-1-\xi-\eta) \quad (1)$$

$$N_2 = \frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta)(-1+\xi-\eta) \quad (2)$$

$$N_3 = \frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta)(-1+\xi+\eta) \quad (3)$$

$$N_4 = \frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta)(-1-\xi+\eta) \quad (4)$$

$$N_5 = \frac{1}{2}(1+\xi^2)(1-\eta) \quad (5)$$

$$N_6 = \frac{1}{2}(1+\xi)(1-\eta^2) \quad (6)$$

$$N_7 = \frac{1}{2}(1-\xi^2)(1+\eta) \quad (7)$$

$$N_8 = \frac{1}{2}(1-\xi)(1-\eta^2) \quad (8)$$

$$(|\xi| \leq 1, |\eta| \leq 1)$$

\$N\_i\$ : 節点 \$i\$ に対する形状関数

\$\xi, \eta\$ : 四角形の各頂点の座標を \$\pm 1\$ とする座標

図1(b)の正規化された四角形要素内にある点 \$Q(\xi, \eta)\$ を、図1(a)のゆがんだ四角形要素内の点 \$R(u, v)\$ に写像するには、次の式を用いる。

$$u = \sum_{i=1}^8 N_i \times u_i \quad (9)$$

$$v = \sum_{i=1}^8 N_i \times v_i \quad (10)$$

$u_i, v_i$  : 図 1 (a) の各節点の座標

この手法は、たとえば有限要素法<sup>8)</sup>の自動要素分割に利用されている。

図面やグラフなどのように、矩形領域の内部に描かれた図形が何らかの原因でゆがんだとすると、矩形の四辺も同じ要因のゆがみを生じ、図 1 (a) のようなゆがんだ四辺形となる。形状関数は図 1 (b) の正規化された四辺形の内部の点を、図 1 (a) のゆがんだ四辺形の内部の点に写像するために使われるが、ゆがんだ四辺形の内部の点を正規化された四辺形の内部の点に逆写像することができれば、ゆがんだ図形を元の図形に戻すことができると考えられる。すなわち  $(u, v)$  を既知の座標として、それから未知の座標  $(\xi, \eta)$  を求めることができれば、図形のゆがみを補正することが可能になる。

## 2.2 形状関数によるゆがみの補正

式 (9), (10) を展開すると、 $\xi$  と  $\eta$  を未知数とする 3 次の 2 元連立方程式になる。以下にその式を示す。

$$F(\xi, \eta) = A_1\xi + A_2\eta + A_3\xi\eta + A_4\xi^2 + A_5\eta^2 + A_6\xi^2\eta + A_7\xi\eta^2 + A_8 - 4u = 0 \quad (11)$$

$$G(\xi, \eta) = B_1\xi + B_2\eta + B_3\xi\eta + B_4\xi^2 + B_5\eta^2 + B_6\xi^2\eta + B_7\xi\eta^2 + B_8 - 4v = 0 \quad (12)$$

ここで、

$$A_1 = 2(u_6 - u_8) \quad (13)$$

$$A_2 = -2(u_5 - u_7) \quad (14)$$

$$A_3 = u_1 - u_2 + u_3 - u_4 \quad (15)$$

$$A_4 = u_1 + u_2 + u_3 + u_4 - 2(u_5 + u_7) \quad (16)$$

$$A_5 = u_1 + u_2 + u_3 + u_4 - 2(u_6 + u_8) \quad (17)$$

$$A_6 = -u_1 - u_2 + u_3 + u_4 + 2(u_5 - u_7) \quad (18)$$

$$A_7 = -u_1 + u_2 + u_3 - u_4 - 2(u_5 - u_8) \quad (19)$$

$$A_8 = -(u_1 + u_2 + u_3 + u_4) + 2(u_5 + u_6 + u_7 + u_8) \quad (20)$$

$$B_1 = 2(v_6 - v_8) \quad (21)$$

$$B_2 = -2(v_5 - v_7) \quad (22)$$

$$B_3 = v_1 - v_2 + v_3 - v_4 \quad (23)$$

$$B_4 = v_1 + v_2 + v_3 + v_4 - 2(v_5 + v_7) \quad (24)$$

$$B_5 = v_1 + v_2 + v_3 + v_4 - 2(v_6 + v_8) \quad (25)$$

$$B_6 = -v_1 - v_2 + v_3 + v_4 + 2(v_5 - v_7) \quad (26)$$

$$B_7 = -v_1 + v_2 + v_3 - v_4 - 2(v_5 - v_8) \quad (27)$$

$$B_8 = -(v_1 + v_2 + v_3 + v_4) + 2(v_5 + v_6 + v_7 + v_8) \quad (28)$$

$A_i, B_i$  ( $i = 1, 8$ ) は  $u_i, v_i$  で表される係数で、ゆがんだ四辺形の頂点と辺の中点の座標を定めれば定数になる。また  $u, v$  は四辺形の内部の点 R の座標を定めれば定数になる。したがって、式 (11), (12) は  $\xi, \eta$  に関する連立方程式である。この方程式は双 1 次、双 2 次、双 3 次の未知数を含み、代数的に解くことはできない。しかし非線形方程式の近似解法を用いれば解くことは可能である。

以上の手順により、元の座標  $(x, y)$  上の四辺形 (正方形または長方形) の頂点と辺の中点に対応するゆがんだ四辺形上の点  $u_i, v_i$  ( $i = 1, 8$ ) が分かれば、 $u_i, v_i$  で囲まれた領域の内部にある任意の点 R  $(u, v)$  の座標からその点に対応する  $(\xi, \eta)$  の値を求めることができる。 $(\xi, \eta)$  は、縦横  $\pm 1$  の正方形に対応するから、元の四辺形の縦横の寸法から縮尺などを定めれば、元の座標上に対応する点  $(x, y)$  を近似的に決定することができる。

## 3. 図形のゆがみ補正ツール

以上で述べた図形のゆがみ補正方法を計算機による具体的なツールとして開発した。図形データを計算機に取り込む手段としてはイメージスキャナを用いる。スキャナで取り込んだ図形データをビットマップ形式で CRT 上に表示し、カーソル線の交点を図形上の指定点に合わせることによって、CRT 座標上の座標値を認識するようにした。カーソルの合わせ方によって誤差が生じるが、これは操作上の誤差であって本法の理論的な誤差とは区別されるものである。

式 (11), (12) を解く手段としては Newton-Raphson 法を用いた<sup>9)</sup>。 $\xi, \eta$  の初期値としては式 (29) を用いている。

$$\left. \begin{aligned} \xi_0 &= 2(u - u_{\min}) / (u_{\max} - u_{\min}) - 1 \\ \eta_0 &= 2(v - v_{\min}) / (v_{\max} - v_{\min}) - 1 \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

$\xi_0, \eta_0$  : 初期値

$u_{\max}, v_{\max}$  :  $u_i, v_i$  の最大値

$u_{\min}, v_{\min}$  :  $u_i, v_i$  の最小値

収束判定は近似解の変化率が 0.05% 以下になることを条件とした。

## 4. 補正精度の検討

ゆがみが幾何学的である場合は厳密な補正が可能で

あるが、本法は基本的には近似補正であり、補正精度がどの程度得られるかを検討しておく必要がある。ヘルマート変換やアフィン変換は線形の変換であり、それによるゆがみも線形である。図1において(a)の図形が(b)の矩形領域を線形変換したものであれば、形状関数の性質から式(9)、(10)の関係は領域内のすべての点について誤差なしで成り立つ。ただし、本法は(a)を(b)に戻す過程で式(11)、(12)を近似解法によって解いているので、それによる誤差は避けられない。2次等角変換、2次射影変換など非線形な変換によってゆがんだ図形の場合は、式(9)、(10)の関係は8個の節点上以外では近似的なものにすぎない。

そこで、まず2次等角変換および任意の関数のような座標変換式によってゆがませた図形の復元を想定し、それぞれに本法を適用して補正の精度を検討した。3章で述べた補正ツールではカーソルの操作による誤差も含まれるため、8個の基準点の座標  $(u_i, v_i)$  と補正対象点の座標  $(u, v)$  は変換式から直接計算して求めたものを使用した。

次に、実際の図形のゆがみを対象とする場合は、原図となる印刷物自体にも誤差が含まれ、また、それをスキャナで画像化する際の誤差および画像から座標を読み取る際の誤差、すなわち光学的・機構的な誤差が加算される。それらの総合的な誤差を検討するために、実際の図形をスキャナでデジタル画像化し、3章で述べた図形のゆがみ補正ツールを使用してゆがみの補正を行い、その精度を検討した。

4.1 2次等角変換でゆがめた図形の補正

図2に示すグラフを原図として、それに式(30)に示す2次等角変換を適用してゆがませた結果を図3に示す(2次等角変換では座標変換式の係数の意味が図形の大きさに依存するため、式(30)は正規化した座標  $(x', y')$ 、 $(u', v')$  で表してある)。この図形について8個の基準点の座標  $(u'_i, v'_i)$  と図形上の複数の指定点の座標  $(u'_j, v'_j)$  を、ゆがむ前の座標  $(x', y')$  に式(30)の変換を与えて求めた。以上の手順により原図の座標、基準点の座標および指定点の座標とも、まったく誤差を含まない数値として扱うことができる。したがって、以下本法によって補正した後の座標  $(x_2, y_2)$  には、純粋に形状関数によるゆがみ補正の誤差のみが含まれることになる。

$$\left. \begin{aligned} u' &= \frac{1}{8}(x'^2 - y'^2) + \frac{1}{2}x'y' + \frac{5}{8}x' - \frac{3}{200}y' \\ v' &= -\frac{1}{2}(x'^2 - y'^2) + \frac{1}{8}x'y' + \frac{3}{200}x' - \frac{5}{8}y' \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

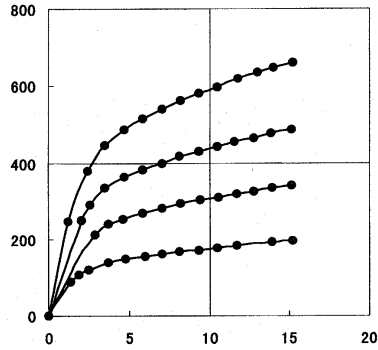


図2 ゆがみのない図形(原図)  
Fig. 2 A figure with no distortion (original figure).

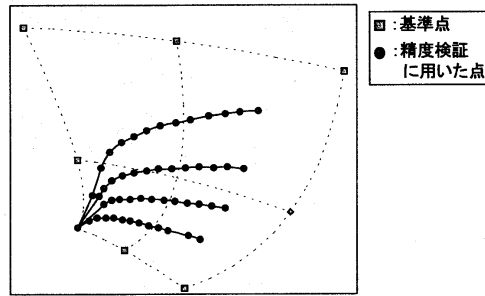


図3 2次等角変換によりゆがみを与えた図形  
Fig. 3 A figure distorted by the second-order conformal transformation.

図4はゆがむ前のグラフ(図2)の上に、本法を用いてゆがみを補正して求めた点を重ね合わせたものである。また表1は、図2に示す原図上の点の座標値と、ゆがみを補正して求めた点の座標値を比較し、誤差を求めたものである。

表1に示すように、この補正值における誤差はほとんどなく、グラフのフルスケールに対して0.0001%未満で補正されている。また、図4に示すように補正によって求められた各点は、元の図形にはほぼ完全に重なることが確認できた。

4.2 任意の高次関数でゆがめた図形の補正

前節の2次等角変換によるゆがみは幾何学的ゆがみの範疇に含まれる。ここでは任意のゆがみを与えた図形に対して本法の補正を適用してみる。前節と同じ図2を原図とし、任意のゆがみとして式(31)による変換を与えた結果を図5に示す。

$$\left. \begin{aligned} u' &= 0.05y'^2 + 1.03x' \\ v' &= 0.03x'^2 + 0.05x' - 1.02y' \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

表1 2次等角変換式によるゆがみに対する補正結果

Table 1 A comparison of the restored coordinates to the original coordinates and the relative error between them (corresponding to Fig. 4).

元図		補正值		誤差 (%)		
X値	Y値	X <sub>2</sub> 値	Y <sub>2</sub> 値	$(X-X_2)/20 \times 100$	$(Y-Y_2)/800 \times 100$	$(\text{SQRT}(X^2+Y^2))$
0	0	0	0	0	0	0
1.202452	247.46715	1.202458	247.46755	-3E-05	-5.0375E-05	5.8631E-05
2.461206	379.4859	2.461202	379.48587	2E-05	3E-06	2.0224E-05
3.515601	445.49476	3.515606	445.49504	-2.5E-05	-3.5125E-05	4.3113E-05
4.701662	487.8972	4.701665	487.89768	-1.5E-05	-6.1125E-05	6.2939E-05
5.883946	516.22544	5.883951	516.2255	-2.5E-05	-7.875E-06	2.6211E-05
7.065788	539.74285	7.065793	539.74294	-2.5E-05	-1.15E-05	2.7518E-05
8.183206	563.34908	8.183208	563.34945	-1E-05	-4.675E-05	4.7808E-05
9.364619	582.14533	9.364616	582.14558	1.5E-05	-3.125E-05	3.4664E-05
10.48139	598.71464	10.48138	598.71469	2E-05	-6E-06	2.0881E-05
11.79436	619.91595	11.79436	619.91601	-1.5E-05	-7.375E-06	1.6715E-05
12.97535	634.0798	12.97535	634.07992	1E-05	-1.4625E-05	1.7717E-05
13.96053	648.15444	13.96053	648.15475	0	-3.9E-05	3.9E-05
15.20821	660.0023	15.20821	660.00255	-1.5E-05	-3.075E-05	3.4213E-05
4.755043	147.09095	4.755039	147.09086	2E-05	1.1275E-05	2.2959E-05
6.003362	154.60867	6.003362	154.60932	0	-8.0525E-05	8.0525E-05
7.053213	161.23644	7.053214	161.23696	-5E-06	-6.4E-05	6.4195E-05
8.169762	166.86624	8.169752	166.86689	5E-05	-8.1275E-05	9.5423E-05
9.350528	171.60599	9.35052	171.60601	4E-05	-1.725E-06	4.0037E-05
10.46729	178.19765	10.46728	178.19801	6E-05	-4.5475E-05	7.5286E-05
11.71496	182.90098	11.71495	182.9015	2E-05	-6.5075E-05	6.8079E-05
13.94514	192.34409	13.94513	192.34411	3E-05	-2E-06	3.0067E-05
15.1926	196.12077	15.19259	196.12115	5E-05	-4.73E-05	6.8828E-05

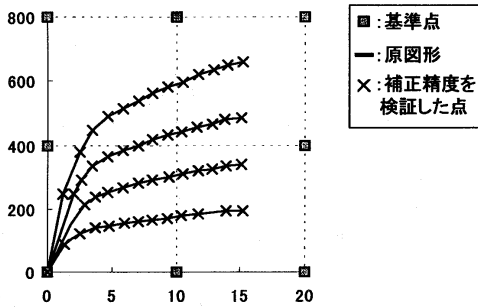


図4 ゆがみ補正した図形と原図との比較 (表1に対応)

Fig. 4 A comparison of the restored figure to the original figure (corresponding to Table 1).

図6はゆがむ前のグラフ(図2)の上に、ゆがみを補正して求めた点を重ね合わせたものである。また表2は、図2に示す原図上の点の座標値と、ゆがみを補正して求めた点の座標値を比較したものである。表2に示すように、この場合も2次等角変換によるゆがみの場合と同様に誤差はほとんどなく、また図6に示すように補正によって求められた各点は、元の図形にはほぼ完全に重なることが確認できた。

このようにゆがみの性質が平行移動、回転、拡大縮小、2次等角変換のように幾何学的な場合でも、ゆがみの性質にかかわらず、本法を用いれば同じ手法で高精度に補正

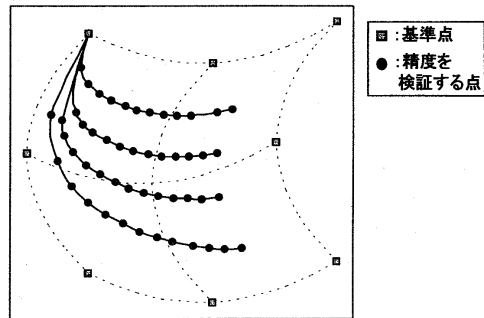


図5 変換式(31)によりゆがみを与えた図形

Fig. 5 A figure distorted by the transformation of coordinates shown in Eq. (31).

することが可能である。

4.3 複写により生じたゆがみの補正

実際に本法が必要になるのは、印刷物をコピーしたりスキャナで画像化したときに図形に生じるゆがみを補正する場合である。そこで3章で述べた図形のゆがみ補正ツールを使用して、スキャナによるデジタル画像化にともなう生じたゆがみの補正を行った。

図7は、厚みのある本のページ上に描かれた方眼をスキャナによりデジタル画像化したものである。図に見られるように本の綴り代に近い部分にゆがみが集中している。このようにゆがみが部分的に生じている

表 2 式 (31) によるゆがみに対する補正結果

Table 2 A comparison of the restored coordinates to the original coordinates and the relative error between them (corresponding to Fig. 6).

元図		補正值		誤差 (%)		
X値	Y値	X <sub>2</sub> 値	Y <sub>2</sub> 値	$(X-X_2)/20*100$	$(Y-Y_2)/800*100$	$(\text{SQRT} x^2+y^2 )$
0	0	0	0	0	0	0
1.20246	247.468	1.20246	247.4675	0	1.25E-07	1.25E-07
2.4612	379.486	2.4612	379.4859	0	0	0
3.51561	445.495	3.51561	445.495	0	0	0
4.70167	487.898	4.70167	487.8977	0	0	0
5.88395	516.226	5.88395	516.2255	0	0	0
7.06579	539.743	7.06579	539.7429	0	0	0
8.18321	563.349	8.18321	563.3495	0	0	0
9.36462	582.146	9.36462	582.1456	0	0	0
10.4814	598.715	10.4814	598.7147	0	0	0
11.7944	619.916	11.7944	619.916	0	0	0
12.9753	634.08	12.9753	634.0799	0	1.25E-07	1.25E-07
13.9605	648.155	13.9605	648.1547	0	0	0
15.2082	660.003	15.2082	660.0025	0	0	0
7.05321	161.237	7.05321	161.237	0	1.25E-07	1.25E-07
8.16975	166.867	8.16975	166.8669	0	2.5E-08	2.5E-08
9.35052	171.606	9.35052	171.606	0	1E-07	1E-07
10.4673	178.198	10.4673	178.198	0	-2.5E-08	2.5E-08
11.715	182.902	11.715	182.9015	0	-5E-08	5E-08
13.9451	192.344	13.9451	192.3441	0	1.25E-07	1.25E-07
15.1926	196.121	15.1926	196.1212	0	-7.5E-08	7.5E-08

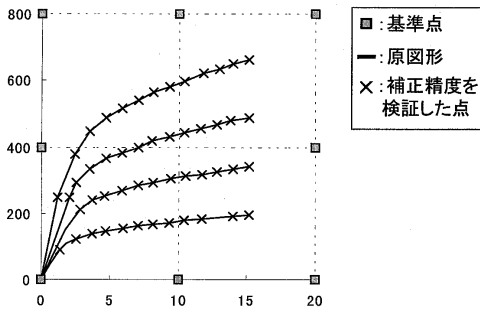


図 6 ゆがみ補正した図形と原図との比較 (表 2 に対応)

Fig. 6 A comparison of the restored figure to the original figure (corresponding to Table 2).

場合は、図形全体を複数の四辺形に分割して補正することが必要と考えられる。そこで全体を 1 つの四辺形領域とした場合と、2 つの四辺形領域に分割した場合について補正精度を比較してみる。

図 8 は図形全体を 1 つの四辺形領域とし、8 個の基準点と補正の対象となる方眼の交点にマークを記したものである。これらの各点の座標をカーソル操作によって読み取り、補正後の座標を求めた。図 9 は原図の方眼の上に、ゆがみの補正によって得られた点を重ね合わせたものである。また表 3 は、原図の方眼の交点の座標値 (印刷によるずれを含まない理想的な方眼の座標) と、ゆがみを補正して得られた座標値とを比較し、フルスケールに対する補正誤差を求めたものである。結果を見ると誤差は本の横 (x) 方向で大きく、

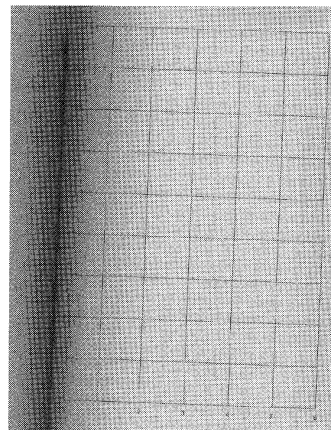


図 7 複写によってゆがんだ方眼紙

Fig. 7 A figure distorted by the reproduction of the original section paper.

縦 (y) 方向ではほとんど誤差は見られない。また x 方向でも縦じ代に近い領域での誤差が大きいことが分かる。これはゆがみが縦じ代付近で x 方向にのみ生じていることと関係があると考えられる。

#### 4.4 領域の分割による補正

図 10 は図形全体を 2 つの四辺形領域とし、それぞれに 8 個の基準点を設け、補正の対象となる方眼の交点にマークを記したものである。これらの各点について前節と同様の操作によって補正後の座標を求めた。図 11 は原図と、ゆがみの補正によって得られた点を

表3 全体を1つの四辺形としたときの補正結果

Table 3 A comparison of the restored coordinates to the original coordinates and the relative error between them (corresponding to Fig. 9).

元図		補正值		誤差 (%)		
X値	Y値	X <sub>2</sub> 値	Y <sub>2</sub> 値	(X-X <sub>2</sub> )/6*100	(Y-Y <sub>2</sub> )/9*100	SORT X <sub>2</sub> -X + Y <sub>2</sub> -Y
1	1	0.866181	0.998431	2.23031667	0.017433333	2.2303848
1	2	0.861269	1.997912	2.31218333	0.0232	2.3122997
1	3	0.856804	2.997212	2.3866	0.030977778	2.386801
1	4	0.838833	3.995965	2.68611667	0.044833333	2.6864908
1	5	0.835765	4.994456	2.73725	0.0616	2.737943
1	6	0.832622	5.993244	2.78963333	0.075066667	2.7906431
1	7	0.829399	7.004426	2.84335	-0.04917778	2.8437753
1	8	0.827811	8.002879	2.86981667	-0.03198889	2.8699949
2	1	1.929947	1.004357	1.16755	-0.04841111	1.1685532
2	2	1.932446	1.991049	1.1259	0.099455556	1.1302841
2	3	1.920485	3.002059	1.32525	-0.02287778	1.3254475
2	4	1.922481	4.000494	1.29198333	-0.00548889	1.291995
2	5	1.911393	4.997657	1.47678333	0.026033333	1.4770128
2	6	1.900451	5.99492	1.65915	0.056444444	1.6601098
2	7	1.903186	6.992158	1.61356667	0.087133333	1.6159176
2	8	1.892177	8.001196	1.79705	-0.01328889	1.7970991
5	3	5.055912	3.004693	-0.9318667	-0.05214444	0.9333244
5	4	5.05121	4.00254	-0.8535	-0.02822222	0.8539665
5	5	5.046135	4.999328	-0.7689167	0.007466667	0.7689529
5	6	5.052418	5.995504	-0.8736333	0.049955556	0.8750604
5	7	5.046614	6.989707	-0.7769	0.114366667	0.7852728
5	8	5.051736	7.996762	-0.8622667	0.035977778	0.8630169

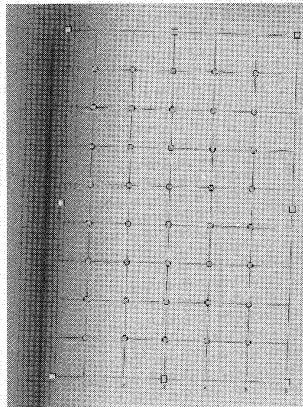
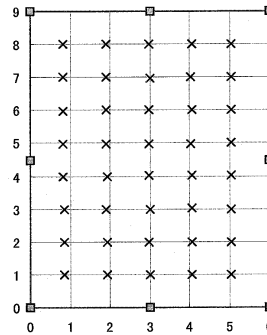


図8 全体を1つの四辺形として補正するための基準点  
Fig. 8 The eight base points located around one quadrangle which covers the whole figure.

□ : 基準点  
○ : 精度を検証する点



X : 補正後の座標  
□ : 基準点

図9 ゆがみ補正した点と原図との比較 (表3に対応)  
Fig. 9 A comparison of the restored points to the original section paper (corresponding to Table 3).

重ね合わせたものである。また表4は、原図の座標値とゆがみを補正して得られた座標値とを比較し、フルスケールに対する補正誤差を求めたものである。

表3と表4を比較すると同じxの位置、たとえばx=1における補正誤差は前者が2~3%であるのに対し、後者では0.5~0.8%と改善されている。このようにゆがみが部分的に生じている図形に対しては、ゆがみの生じている領域と、そうでない領域を分けて本法を適用することで補正の精度を高めることができる。

領域をさらに分割すれば補正精度をより高めること

が可能と考えられるが、実用上は2つの領域に分ける程度で、それ以上は原図上に基準点が求められないなどの問題もあるため難しい。そのためゆがみが局所的に生じている図形では高い補正精度は望めない。しかしカーソル操作で図形を処理することを前提とすれば、実用的な補正精度は得られているものとする。

4.5 基準点についての考察

本論文は初めに述べたように「グラフなど矩形領域の中に存在し、その矩形を座標の基準として利用できる問題」に限定して、ゆがみの補正方法を提案したものである。また、補正ツールの開発においては、す

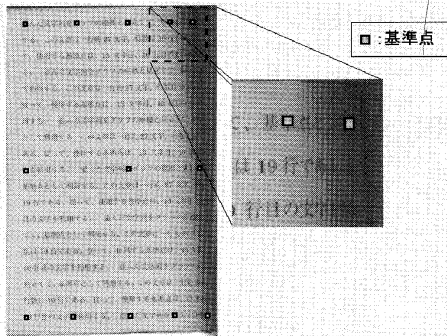


図 12 書籍のゆがみを補正するための基準点  
 Fig. 12 The thirteen base points used to correct distortion image of the book.

る。もう1つはグラフなどのポイントの補正ではなく、画像全体に補正を施すための処理をどうするかである。後者の問題は処理手順と処理時間の問題に帰せられるので、ここでは前者の基準点の問題について考察する。

印刷物となった書籍内の文章はほぼ一定の幅に平均した文字数として印字されており、特に固定ピッチフォントを用いている場合にはその文字間隔が一定となっている。また行方向の間隔も均等に配列されているものが多い。そこで、そのような書籍の場合にはその紙面内に印刷されている文字を補正の基準点として利用することができる。たとえば複写によってゆがんだ画像に記されている文章の1行の文字数と行数を数えれば、その頁の最初の行と最後の行および中間行の文字列から、それぞれ行の先頭、最後および中間の文字を選ぶことにより、補正に必要な基準点をおおよそ定めることができる。

図12は、日本語には固定ピッチフォント、数字にはプロポーションアルフォントを用いて印字された厚みのある書籍をスキャナで読み取った画像について、上記の方法で基準点を定めたものである。前節で述べた理由により全体を2つの領域に分けて基準点を定めている。現在の補正ツールでは画像全体を対象に補正することは無理なので、いくつかの文字の中心点の位置を補正してみた。

図13は、別途ゆがみがでないように複写した画像の上に、上記により補正して得られた文字の中心点を、8個の基準点が該当する文字の中心に合うようにして重ねたものである。

基準点とした文字も、補正の対象とした文字もマウスの操作で中心点をピックアップしているので行方向に不揃いが見られ、また中央行の「立」や下から4行

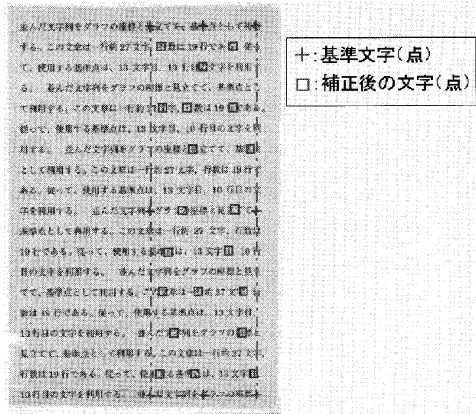


図 13 ゆがみ補正した点と原画像との比較  
 Fig. 13 A comparison of the restored points to the original image.

目の「字」などは、他と比較すると隣りの文字に寄った位置に補正されているが、全体としてはゆがみのない画像の文字列にほぼ一致していることが分かる。

### 5. 結 論

形状関数を利用することにより、数カ所の基準点を指定するだけで、図形のゆがみを補正・復元する方法について述べた。

少数の事例について検討しただけであるが、幾何学的なゆがみなど座標の関数で表されるゆがみを持つ図形の場合は、本論文の方法により、ゆがみの性質によらず1つの手段で任意のゆがみを高精度に補正できる可能性がある。

実際の印刷物をコピーしたりスキャナで画像化するとき生じるゆがみは、必ずしも座標の関数で表現できない性質を持つ場合もあると考えられる。特にゆがみが部分的に生じている場合は、領域全体を1つの四辺形として補正を行うと、高い補正精度は得られない。そのような場合は領域を複数の四辺形領域に分割して補正することで精度を高めることができる。

本論文では、グラフなどの図形を対象としてゆがみの補正を論じているが、一般的な画像の補正についても応用が可能であると考えられる。たとえば、ラスタ画像の場合には本論文で述べた図形上の点の座標に対応するのは画像のピクセルであり、同じ手法でゆがみを補正できる。ただその場合は画像の再配列や画像データの挿入などの処理もあわせて行う必要がある。

本論文の方法は図面やグラフのように、図形が矩形領域の中に存在し、その矩形を座標の基準として利用



できる問題にはきわめて有効な手段であるといえる。

### 参 考 文 献

- 1) 画像処理標準テキストブック編集委員会(監修): Image Processing〈画像処理標準テキストブック〉, (財)画像情報教育振興協会(1997).
- 2) 榎本 肇(編): 画像エレクトロニクス講座9「画像の情報処理」, コロナ社(1978).
- 3) Horn, B.: Obtaining shape from shading information, *The psychology of computer vision*, Winston, P.H. (Ed.), pp.115-155 (1975).
- 4) 和田利和, 浮田浩行, 松山隆司: イメージスキャナを用いた書籍表面の3次元形状復元(I)—近傍照明下でのShape from Shading, 電子情報通信学会論文誌(D-II), Vol.J77-D-II, No.6, pp.1059-1067 (1994).
- 5) 和田利和, 浮田浩行, 松山隆司: イメージスキャナを用いた書籍表面の3次元形状復元(II)—相互反射を考慮した近傍光源下のShape from Shading, 電子情報通信学会論文誌(D-II), Vol.J78-D-II, No.2, pp.311-320 (1995).
- 6) 大削弘樹, 伊藤秀隆, 隈元 昭: 書籍の輪郭情報に基づくコピー機の画像補正: 画像電子学会誌, Vol.27, pp.397-404 (1998).
- 7) 鳥谷浩志, 千代倉弘明(編): 3次元CADの基礎と応用, 共立出版(1991).
- 8) 鷲津久一郎ほか: 有限要素法ハンドブックI基礎編, p.372, 培風館(1989).
- 9) Peter Henrici, 一松 信ほか(訳): 数値解析の基礎, 培風館(1973).

(平成11年4月9日受付)

(平成11年10月7日採録)



田添 亘(正会員)

1971年生。1993年函館工業高等専門学校機械工学科卒業。同年,(株)日立製作所機械研究所入社。材料データベースの研究に従事。日本機械学会正員。



梅沢 貞夫

1944年生。1967年東北大学工学部機械工学科卒業。同年,(株)日立製作所日立研究所入社。材料強度の研究に従事。日本機械学会正員。