

## いくつかのドラム走査型微小濃度計の位置精度について†

服 部 進††

ドラム走査型微小濃度計（ドラムスキャナ）は測光精度を比較的高く保ちながら、かつ高速分解が可能のために画像の AD 変換装置として広く用いられている。しかし試料をドラムに貼り付けるために、位置歪が入ることは避けられないはずであり、計測用写真や地形図などの高い位置精度を要求する画像の分解には、どの程度の位置精度が保たれるかを知っておかねばならない。この論文は国内で良く使われている市販の透過型ドラムスキャナ 3 機種について、その位置精度を調査したものである。位置精度を位置の再現性と幾何学的歪の 2 つに分け、おのおのの大きさを実験的に推定した。主たる結果は次のようである。・位置再現性、幾何学的歪とも機種によって大きく異なる。・位置の再現性を乱す原因は、機械自身の安定性の不足とドラムが回転している間のフィルムの浮きであり、後者についてはフィルム全面にカバーを掛け、圧着させている機種が良い精度を示していた。・機械本来の精度が高くても、試料を貼るたびにフィルムの変形で複雑な幾何学的歪が入り、これを除去するには十分な数のリゾーマークをおくか、周囲すべてを固定せず、歪の解放を許し、かつ均質に圧着させる機構が不可欠である。

## 1. ま え が き

画像をデジタル化するため、走査型微小濃度計（スキャナ）が使われているが、これらを大別すると表 1 のようになる。概して電子式は高速であるが測光のおよび位置的精度は劣る。他方機械式のフラットベッド型は  $1\ \mu\text{m}$  の位置精度を保証するものもある<sup>1)</sup> が走査速度が遅い。ドラムスキャナは両者の中間的特徴を持ち、比較的高い位置精度と測光精度を保ちながら高速分解が可能であるためよく用いられている。

透過型ドラムスキャナの構造を図 1 に示した。試料（フィルム）をドラムに貼りつけ、高速回転することで回転 ( $y$ ) 方向の分解を行う。軸 ( $x$ ) 方向の移動はねじを切ったスピンドルで行うが、ドラムが移動するものと読みとりヘッドが移動するものがある。

この構造では、本来平面保持すべき試料を曲げるわけであるから複雑な歪が入ることが予測できる。そこで高い位置精度を要求する計測用写真などの分解にはどの程度の位置精度が確保されるかをあらかじめ知っておく必要がある。位置精度についてはメーカーから公称精度が公表されている場合もあるが、実稼働条件で調査した例はほとんどない。

この報文は国内で広く用いられている透過型ドラムスキャナ 3 機種の各 1 台について位置精度を調査した結果を述べている。

なお実験方法の詳細と結果の一部についてはすでに報告した<sup>2),3)</sup> ので、ここでは実験方法は簡略に述べるにとどめる。

実験の主旨から言えば、全機種とも同じ手続きを踏むべきであるが、備えられているソフトウェアの機能に統一性がなく、これを新たに作成するのは容易でなかったため行わず、データの取り方に違いが出た。さらに各機種とも使用年数、使用頻度とも異なっているから、ここで示す結果は 1 つの資料として扱うべき性質のものであることを強調しておく。

## 2. 各スキャナの特徴

表 2 は調査した 3 機種の公称の性能であり、機械に付随する説明書およびパンフレットから転載した。以下に補足的に各々の特徴を述べ、かつ試料（以下フィルムと呼ぶ）の指定された装着方法を説明する。

AD——ドラムが柔らかいプラスチックでできているため表面形状の精度にやや信頼性が欠ける。ドラムの上にさらに薄いプラスチックカバーがあり、フィルムをこの間に挟んで、カバーを帯状のバネで押さえつけることによりフィルムを固定する。このためフィルムの浮き上がりはかなり抑えられる。また測微鏡と座標表示が備わっていて走査開始点は  $1\ \mu\text{m}$  までセットできる。

OD——ドラムは光学的歪を避けるため、枠のみが備えられていて中空である。フィルムのたるみを防ぐため次のような工夫をしている。ドラムの枠の上端にフィルム固定用のピンが 2 本あり、これにあわせてフィルムに穴をあける。フィルムの下端を強いばねで引

† Positional Accuracy of Some Kinds of Drum Scanning Microdensitometers by SUSUMU HATTORI (Institute of Industrial Science, University of Tokyo).

†† 東京大学生産技術研究所

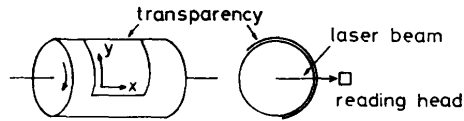


図1 透過型ドラムスキャナの構造  
Fig. 1 Structure of a drum scanner of a transparent type.

表1 よく使われるイメージスキャナ  
Table 1 Classification of image scanners.

機械式スキャナ	フラットベッド型, ドラム型
電子式スキャナ	フライングスポット, 撮像管(TV カメラ)

っ張り固定する。さらにドラムの回転方向の枠に粘着テープで固定する。なお走査開始点の位置ぎめは 1 mm 単位のものさしで行うため、やや不精確である。

ND—ドラムは硬質プラスチックでできている。ドラム軸方向には読みとりヘッドが移動するが、軸方向にステップを刻むときスキャナ本体が多少振動するのが気になる。またヘッドが原点に復帰するときも軽いショックがある。走査開始点の位置ぎめは測微鏡と座標表示で行い、ドラムの軸方向に 1 画素、回転方向に 2 画素単位で設定できる。フィルムはドラム面上に粘着テープで周囲を固定する。

### 3. 実験方法

#### 3.1 位置精度の分類と歪の原因

ドラムスキャナの位置精度検査法としてはすでに情報処理学会イメージプロセッシング研究会が提案した方法<sup>4)</sup>がある。これによれば位置精度を位置の再現性(機械の安定性)と幾何学的歪(正しい座標と測定座標の差)に分けていて、位置の再現性については 5

cm 間隔の正方格子縞チャートを走査して格子点中心部分の動きを追跡する。幾何学的歪は 100 μm 間隔に引いた斜め平行線チャートを用い、線中心の座標から歪量を評価する。著者の方法もこの考え方に従い位置の再現性と幾何学的歪を評価するが、上記のチャートでは特定点の動きを追跡できないため別にテストフィルムを作成した。

位置再現性の低下と幾何学的歪の原因としては次のものが考えられる。

#### ① 位置再現性の低下の原因

- イ. 遠心力などの加力によるフィルムの浮き、移動
- ロ. 光学系の振動
- ハ. サンプリングの不均質 (x 方向)
- ニ. スピンドルのねじの不均質 (y 方向)

機械の安定性

#### ② 幾何学的歪の原因

上記イ, ハ, ニは幾何学的歪の原因でもあるが、他に次が考えられる。

- ホ. ドラム表面の不整
- ヘ. フィルム圧着の不完全

座標の測定値自身に観測誤差が入る以外に上記の 2 種類の歪によって観測値は変動する。これらなるべくすっきり分離できるように以下の実験を行った。

#### 3.2 テストフィルムの作成

図 2 に示すように通常の現像済みフィルムに 2 cm 間隔の格子線を描き、点刻機で 40 μmφ の格子点をあける。格子点座標を精密座標測定機 (Zeiss Jena 社 stecometer) で 5 回測定しその平均値を一応誤差のないものとする。これを「格子点写真座標」と呼ぶ。実験の途中でテストフィルムが破損したため作り直したので、AD, OD と ND の実験ではテストフィルムが異なる。また前者のフィルムでは 79 番の点の鑽孔

表2 ドラムスキャナの諸元  
Table 2 Specifications of the tested drum scanners.

	AD	OD	ND
所 有	製造会社本社	京都大学大型計算センタ	岡山大学総合情報処理センタ
ドラム円周長 (mm)	500	記載なし	500
ドラムの材質	やや軟質のプラスチック	枠のみ (中空)	硬質プラスチック
測定濃度範囲	0~4 D (8 bit)	0~3 D (8 bit)	0~4 D (8 bit)
許容試料サイズ (軸方向×回転方向) (mm)	345×430	記載なし	250×490
走査範囲 (mm)	300×250	254×254	240×250
ドラム軸方向の移動	ドラム	読みとりヘッド	読みとりヘッド
測定点座標の表示と画像のモニタ	あり (1 μm, 4 倍)	なし	あり (1 画素(x), 2 画素(y))
25 μm ピッチでのサンプリング周波数 (kHz)	40	33	45
公称位置精度 (μm)	記載なし	±2 ±5 RMS/cm spot-to-spot	記載なし

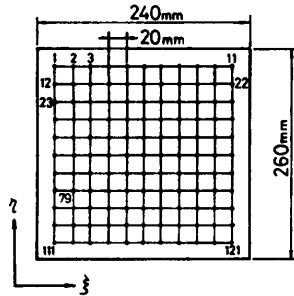


図2 テストフィルム  
Fig. 2 Test film.

表3 格子点写真座標の測定値の標準偏差と最大較差  
Table 3 Standard deviations and maximum differences of observed photographic coordinates of grid points.

テストフィルム	標準偏差 ( $\mu\text{m}$ )		最大較差 ( $\mu\text{m}$ )	
	$\xi$	$\eta$	$\xi$	$\eta$
AD, OD 用	2.7	2.9	13	13
ND 用	2.1	2.0	10	12

表4 位置精度検査の実験項目  
Table 4 Items of the positional accuracy test.

実験番号 N	実験種別	フィルム装着状態	注
1	A-1	最初にフィルム装着	各実験とも3回走査
2	A-2	取り外して同一位置に装着	
3	B	取り外して上下逆にして装着	

の状態が悪く、検査に用いていない。

表3に写真座標の計測値の標準偏差と最大較差(5回の測定値の最大差)を示す。両フィルムの計測精度はほぼ等しい。座標計測値の標準偏差が $2\text{--}3\mu\text{m}$  RMSに納まっているので、 $5\mu\text{m}$  RMS程度の位置歪の比較には格子点写真座標を誤差のないものとして用いても良いであろう。

### 3.3 実験の種類

フィルムをドラムに装着し全面に走査し、これを1走査と呼ぶ。フィルムを装着したままで走査を3回くり返し1実験と呼ぶ。こうして表4に示す3種の実験を行った。

フィルムを装着したままで3回走査したのは位置再現性を見るためであり、同一位置に2回装着したのは装着ごとに特有の「くせ」(非線型のフィルム歪)が発生しないかを検査するためである。上下を逆にしたのは装着による「くせ」とドラム表面の歪を識別しよ

うとしたものである。要約すると、3回の走査から位置再現性を調べ、3種の実験から幾何学的歪を見いだそうとした。

### 3.4 走査方法

サンプリング間隔は位置精度を調べるには少し粗いと思われたが、全スキャナに共通の最小間隔として $25\mu\text{m}$ とした。

走査の状態を均質に保つには、フィルム全体の一様な全面走査が望ましいが、データ量が膨大になるためAD, ODについては全面走査の途中で、格子点を含む列の前後 $4\text{mm}$ (160本)および $5\text{mm}$ (200本)幅のみのデータをとった\*。NDについてはディスク容量が十分であったため全面を分解した。

AD, ODは9回の走査を連続して行ったが、NDについては共同利用のため連続した時間がとれず、各実験ごとに日が異なる。このため連続使用から得られる安定性の点でNDはやや不利な条件を負ったかもしれない。

### 3.5 格子点画像座標の計測

イメージディスプレイ上で分解した画像の格子点座標(これを「格子点画像座標」と呼ぶ)を計測し、さらに1画素内の中心座標をキュービックコンポリューション内挿法で $1\mu\text{m}$ まで読みとった。

ディスプレイ上の出力画像はどの機種も十分明瞭であり格子点座標の読みとりに困難はなかった。また測定濃度範囲は $0\text{--}3\text{D}$ を8ビットで表しているものと $0\text{--}4\text{D}$ を8ビットで表しているものがあるが、画面上でその差は認められず測定精度には影響しないと判断した。

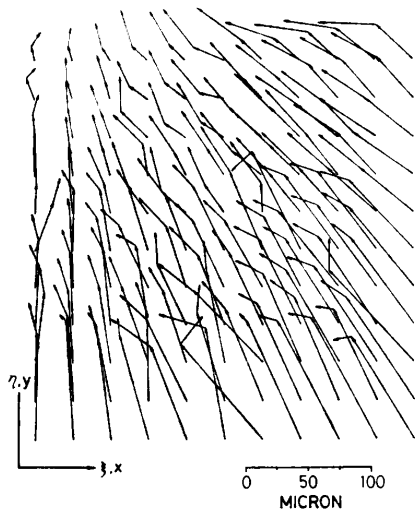
## 4. 位置精度の分析

### 4.1 記号

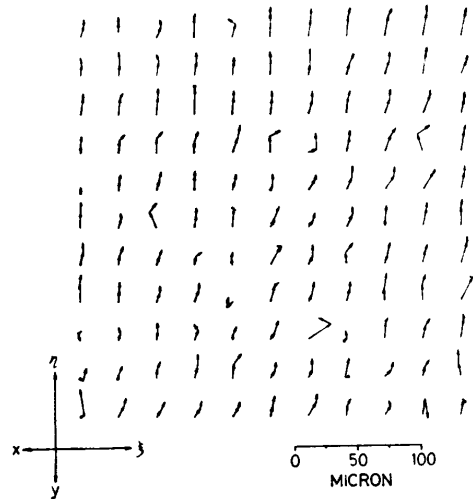
解析に用いる記号を次のように定めておく。格子点の写真座標系を $\xi\eta$ 、画像座標系を $xy$ で表す。 $x$ 軸はドラムの軸方向にとり $\xi$ 軸にほぼ平行である。 $y$ 軸はドラムの回転方向にとる。 $xy$ 座標は実寸法で表示する。

ある観測量ないし統計量 $A$ について、 $x(y)$ 方向の値であることを $A_x(A_y)$ で表す。さらに観測番号を区別する必要があるときは $A_{x,N,k,l}$ のように添字を付ける。ここで、 $N$ : 実験番号( $N=1, 2, 3$ )、 $k$ : 1実験中の走査番号( $k=1, 2, 3$ )、 $l$ : 格子点番号( $l=1, 2, \dots, L$ ) (2種類のフィルムに対して $L=120$ および $L=$

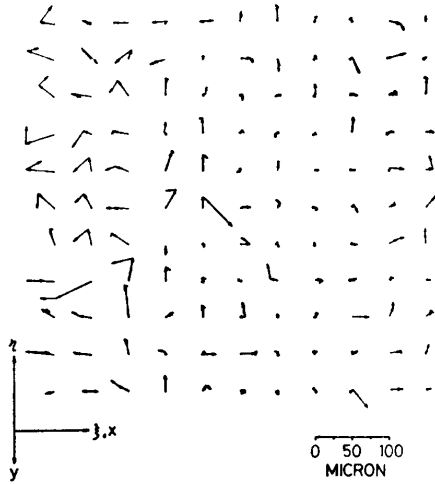
\* ODは位置ぎめが粗いので安全のため大きめに出力した。



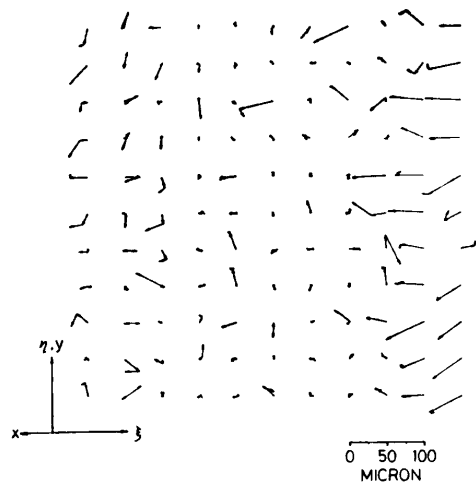
3-1(1) AD,  $N=1$  (第1実験)  
3-1(1) AD,  $N=1$  (Experiment 1)



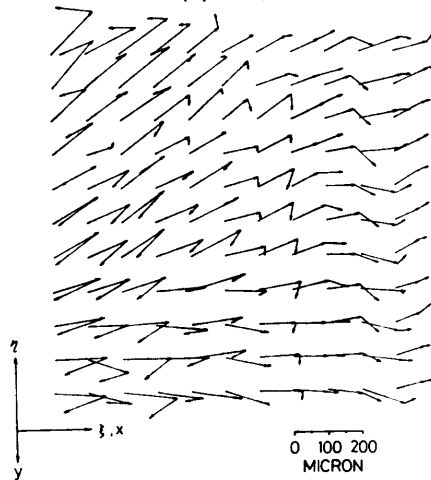
3-1(2) AD,  $N=3$  (第3実験)  
3-1(2) AD,  $N=3$  (Experiment 3)



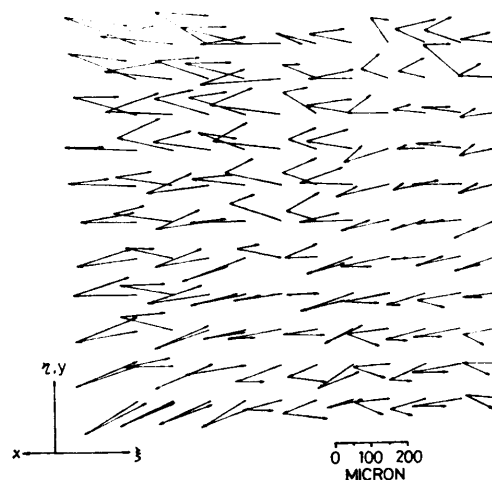
3-2(1) OD,  $N=1$



3-2(2) OD,  $N=3$



3-3(1) ND,  $N=1$



3-3(2) ND,  $N=3$

図3 位置再現性の検査

Fig. 3 Test of positional repeatability.

121)). ただし総称として使う場合は適当に添字を省略することがある. また  $A$  の真値を  $\hat{A}$ , 推定値を  $\hat{A}$ , 観測値を  $A$  で表しておく.

4.2 位置の再現性について

各実験の3回の走査中に格子点の画像座標が移動した量をそれぞれのスキヤナの第1, 第3実験について図3に示した. 図では初回走査の座標値を基準にして, 第2, 第3回走査の移動量を順次矢印で表した. 機種によって移動量が大きく異なるため, 各図で縮尺を変えているので注意されたい. 図3から次のことが推定できる.

AD—第1実験では明らかにフィルムの移動が見られる. おそらくフィルムを挟むだけで固定していないため, 最初歪んだ状態でセットされたフィルムが, 3回走査の結果歪が解除されていったためと推定できる. 第3実験では  $10\mu\text{m}$  程度の一様な  $\eta$  方向への動きがあるが, このときはたまたま最初から歪が小さい状態でセットされたことを示す. この機種の位置再現性には実験の「熟練」が影響すると思われる.

OD—ドラムが中空であるにもかかわらず, 最大移動量は  $50\mu\text{m}$  程度であり位置再現性は比較的良好である. 系統的な動きは見られないので, フィルム全体の移動はない. このことはドラムの回転方向 ( $y$  方向) にフィルムを引っぱって固定する機構が安定性に対して有効に働くことを意味している.

ND—走査ごとに  $x$  軸方向  $100\sim 150\mu\text{m}$  に達する大きな平行移動が見られる. これは読みとりヘッドが原点復帰したときのショックで入るもので, 始点の制御の不備によると推定した.

ADに見られるフィルム移動, NDに見られる始点制御の不備による移動が平行移動要素のみであると仮定すれば, 次のようにそれ以外の偶然歪成分を推定できる.

第  $N$  実験での  $k$  回目と  $(k+1)$  回目の  $l$  番目の格子点の画像座標  $(x_{N,k,l}, y_{N,k,l}), (x_{N,k+1,l}, y_{N,k+1,l})$  の間に

$$\left. \begin{aligned} \hat{x}_{N,k+1,l} + \epsilon_{x,N,k+1,l} + \epsilon_{x,N,k+1,l} \\ = \hat{x}_{N,k,l} + \epsilon_{x,N,k,l} + \epsilon_{x,N,k,l} + O_{x,N,k} \\ \hat{y}_{N,k+1,l} + \epsilon_{y,N,k+1,l} + \epsilon_{y,N,k+1,l} \\ = \hat{y}_{N,k,l} + \epsilon_{y,N,k,l} + \epsilon_{y,N,k,l} + O_{y,N,k} \end{aligned} \right\} (1)$$

の関係があると仮定する. ここで  $\epsilon_x, \epsilon_y$  は偶然歪量,  $\epsilon_x, \epsilon_y$  は画像座標の測定誤差,  $O_x, O_y$  は座標の平行移動成分である. 最小2乗法で未知量  $O_x, O_y$  を決定したときの残差

$$\left. \begin{aligned} \hat{u}_{x,N,k,l} = \hat{O}_{x,N,k} - (\hat{x}_{N,k+1,l} - \hat{x}_{N,k,l}) \\ \hat{u}_{y,N,k,l} = \hat{O}_{y,N,k} - (\hat{y}_{N,k+1,l} - \hat{y}_{N,k,l}) \end{aligned} \right\} (2)$$

から  $\epsilon_{x,N,k,l}, \epsilon_{y,N,k,l}$  の不偏分散  $\sigma^2_{\epsilon_x,N,k}, \sigma^2_{\epsilon_y,N,k}$  を次式で求める.

$$\left. \begin{aligned} \sigma^2_{\epsilon_x,N,k} + \sigma^2_{\epsilon_x} = \frac{1}{2(L-1)} \sum_{l=1}^L \hat{u}^2_{x,N,k,l} \\ \sigma^2_{\epsilon_y,N,k} + \sigma^2_{\epsilon_y} = \frac{1}{2(L-1)} \sum_{l=1}^L \hat{u}^2_{y,N,k,l} \end{aligned} \right\} (3)$$

ここで  $\sigma^2_{\epsilon_x}, \sigma^2_{\epsilon_y}$  は画像座標の測定誤差の分散であり, 全実験で一定であるとして良いが大きさは不明である.  $\sigma^2_{\epsilon_x}, \sigma^2_{\epsilon_y}$  を一応無視して計算すると表5を得た. ADの第1実験には明らかに回転成分が入っているので無視した. 表5から次のことがわかる.

AD—第3実験での偶然歪は  $3\mu\text{m}$  RMS ほどであり, ほとんどが画像座標の測定誤差であろう. したがってフィルム移動がなければほとんどの利用目的について, 極めて良い安定性を持つといえる.

OD— $8\mu\text{m}$  RMS 程度の偶然歪は, ドラムが中空であることを考えると, おそらくフィルムの浮きおよび振動による成分が卓越していると推定される. ただし図3によればむしろフィルム周辺部での歪が大きく, 中心部に小さく, フィルムに原因をもとめると現

表5 位置再現性の検査から推定した偶然歪の標準偏差  
Table 5 Standard deviations of random distortions estimated from the positional repeatability test.

機種	実験番号 $N$	走査番号 $(k+1)-k$	偶然歪の標準偏差 ( $\mu\text{m}$ )	
			$\sigma_{\epsilon_x}$	$\sigma_{\epsilon_y}$
AD	2	2-1	5	9
		3-2	4	7
	3	2-1	2	3
		3-2	2	3
OD	1	2-1	8	7
		3-2	7	6
	2	2-1	9	7
		3-2	6	9
	3	2-1	10	6
		3-2	6	6
ND	1	2-1	15	24
		3-1	35	18
	2	2-1	25	19
		3-2	13	15
	3	2-1	20	22
		3-2	22	17

象が矛盾しているが著者には不明である。

ND—200 μm RMS の偶然歪を持つことから、始点位置の不安定性以外にも機械振動などによる再現性低下の原因を持っているようである。

なお、どの機種についても画像は鮮明でぶれはなかったことから、画素幅のオーダの波長の高周波歪は無視できるようである。

以上のことから位置再現性について次のように言える。位置の再現性を保つには機械本体の安定性が重要であることは言うまでもないが、フィルムの密着性も無視できない。フィルム周囲を固定するのではなく、全体を均等に圧着する工夫が必要である。ADのようにフィルムカバーを付けるのは有効であるが、測光精度を落とすであろうから、むしろフィルムをドラム内面に貼り付け、一様な遠心力で密着をはかるのが望ましい。

4.3 幾何学的歪について

位置再現性が良い場合、幾何学的歪を調べるのには1実験の3走査の観測値の平均を用いるべきであるが、再現性が必ずしも十分でないので、1走査ずつ検査した。

理想状態のスキヤナでは、フィルムは一様に曲げられ線型の歪しか入らないはずであるので、ある1走査について、格子点写真座標  $\xi_{N,k,i}$ ,  $\eta_{N,k,i}$  と画像座標  $x_{N,k,i}$ ,  $y_{N,k,i}$  を次式で関係づける。

$$\left. \begin{aligned} \hat{x}_{N,k,i} + \epsilon_{x,N,k,i} + e_{x,N,k,i} \\ = t_{1,x,N,k}(\xi_{N,k,i} + e_{\xi,i}) \\ + t_{2,x,N,k}(\eta_{N,k,i} + e_{\eta,i}) + t_{3,x,N,k} \\ \hat{y}_{N,k,i} + \epsilon_{y,N,k,i} + e_{y,N,k,i} \\ = t_{1,y,N,k}(\xi_{N,k,i} + e_{\xi,i}) \\ + t_{2,y,N,k}(\eta_{N,k,i} + e_{\eta,i}) + t_{3,y,N,k} \end{aligned} \right\} (4)$$

ここで  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$  は 4.2 節で述べた測定誤差。  $e_x$ ,  $e_y$  は非線型幾何学的歪で 4.2 節の偶然歪  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$  の非線型成分を含む。  $e_{\xi,i}$ ,  $e_{\eta,i}$  は写真座標に含まれる誤差である。  $t_{1,x,N,k}$  などは定数係数である。フィルム装着の仕方から、  $t_{1,x,N,k}$ ,  $t_{2,y,N,k}$  はほぼ 1 または -1 に等しく、  $t_{1,y,N,k}$ ,  $t_{2,x,N,k}$  はほぼ 0 に等しいことがわかっているから、式(4)は  $\xi$ ,  $\eta$  に誤差を含まないとした通常のアフィン変換式

$$\left. \begin{aligned} \hat{x}_{N,k,i} + v_{x,N,k,i} = t_{1,x,N,k}\xi_{N,k,i} \\ + t_{2,x,N,k}\eta_{N,k,i} + t_{3,x,N,k} \\ \hat{y}_{N,k,i} + v_{y,N,k,i} = t_{1,y,N,k}\xi_{N,k,i} \\ + t_{2,y,N,k}\eta_{N,k,i} + t_{3,y,N,k} \end{aligned} \right\} (5)$$

と近似的に等しい。ここに

$$\left. \begin{aligned} v_{x,N,k,i} = e_{x,N,k,i} + \epsilon_{x,N,k,i} \pm e_{\xi,i} \\ v_{y,N,k,i} = e_{y,N,k,i} + \epsilon_{y,N,k,i} \pm e_{\eta,i} \end{aligned} \right\} (6)$$

最小2乗法で式(5)の未知係数  $t_1, t_2, t_3$  を解いたとき、残差  $\hat{v}_{x,N,k,i}$ ,  $\hat{v}_{y,N,k,i}$  から、その分散  $\sigma_{v,x,N,k}^2$ ,  $\sigma_{v,y,N,k}^2$  は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{v,x,N,k}^2 = \frac{1}{L-3} \sum_{i=1}^L \hat{v}_{x,N,k,i}^2 \\ \sigma_{v,y,N,k}^2 = \frac{1}{L-3} \sum_{i=1}^L \hat{v}_{y,N,k,i}^2 \end{aligned} \right\} (7)$$

式(6)の右辺は本来互いに独立であるが、常に同じ写真座標を使うから  $e_{\xi}$ ,  $e_{\eta}$  は系統誤差とみなすべきであり、式(7)を分解するのは困難である。

アフィン変換での残差歪  $\hat{v}_{x,N,k,i}$ ,  $\hat{v}_{y,N,k,i}$  の分布

表 6 各走査ごとにアフィン変換したときの残差歪の標準偏差

Table 6 Standard deviations of residuals of affine transformation for every scanning.

機 種	実験番号 <i>N</i>	走査番号 <i>k</i>	残差歪の標準偏差 (μm)	
			$\sigma_{v,x}$	$\sigma_{v,y}$
AD	1	1	9	14
		2	10	15
		3	10	14
	2	1	9	11
		2	9	15
		3	8	11
OD	3	1	8	13
		2	8	13
		3	7	13
	1	1	12	19
		2	11	18
		3	12	18
2	1	12	19	
	2	10	18	
	3	11	18	
ND	3	1	14	18
		2	13	18
		3	12	19
	1	1	19	23
		2	19	22
		3	16	19
ND	2	1	26	40
		2	18	32
		3	17	25
	3	1	23	29
		2	14	22
		3	21	31

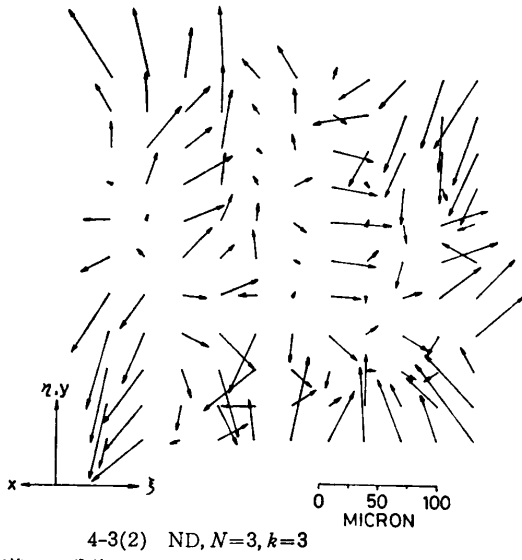
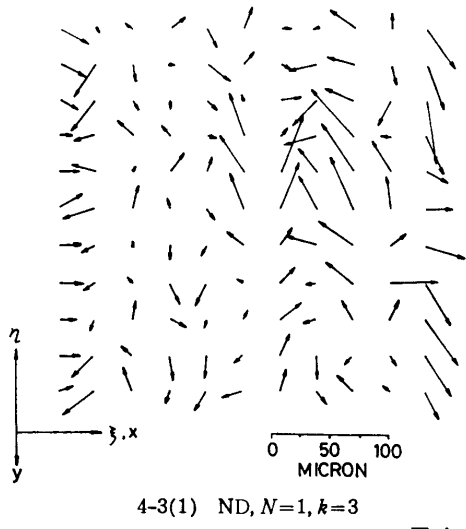
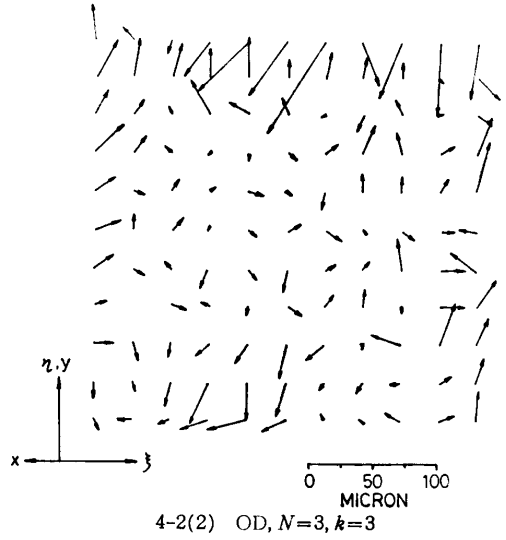
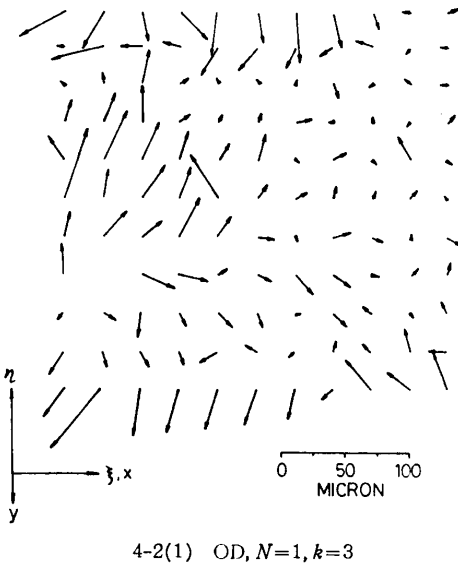
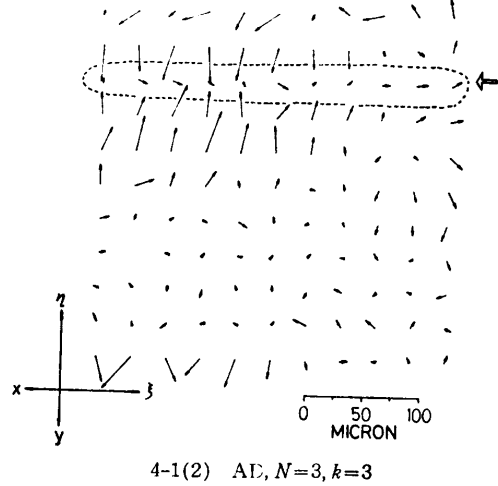
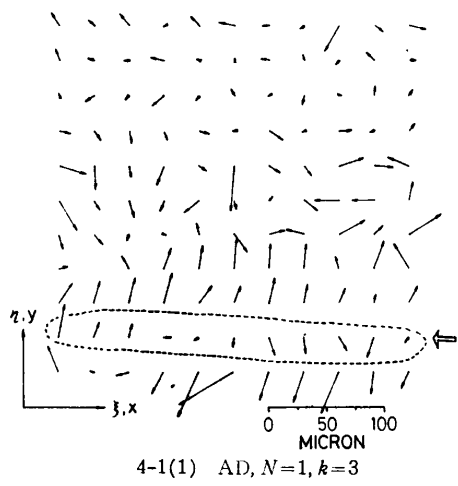


図 4 アフィン変換での残差  
Fig. 4 Residuals of affine transformation.

を各実験の第3走査について図4に示した。表6には各実験、各走査での残差の標準偏差  $\sigma_{v,x}$ ,  $\sigma_{v,y}$  を示した。これらから幾何学的歪について次のことがわかる。

全体的特徴——残差分布は同一実験中では同様の傾向があるが、実験種別が異なると（すなわちフィルムの装着をやり直すと）図4に見るように異なった様相を示す。すなわちフィルム装着のたびに不規則な歪が発生すると考えておくべきである。また残差歪は回転方向の方が大きく、曲面に一樣に貼り付けることがむづかしいことを示している。

なおドラムにフィルムを巻きつけると、ドラムの回転方向に一樣な伸縮がおきることが予想されるが、アフィン変換の係数を調べたところ有意の伸縮はどの機種にも見いだせなかった。

AD——8  $\mu\text{m}$  RMS ( $x$  方向), 13  $\mu\text{m}$  RMS ( $y$  方向) の歪があるが最大歪も 40  $\mu\text{m}$  までで概して幾何学的精度は良好と言える。フィルムをカバーで押え付け、かつ粘着テープで固定しないため、全体が均質に圧着されることで幾何学的精度は良くなっていると推定できる。

なお、第3実験で  $x, y$  軸が 180° 回転していることに注意すれば、ドラム表面には不整があり、系統的な歪（同一場所の同傾向の歪、図に矢印で示す）があることが認められる。ドラムが軟質のプラスチックで作られているため組み立て時に歪が入ったようである。

OD—— $x$  方向 12  $\mu\text{m}$  RMS,  $y$  方向 18  $\mu\text{m}$  RMS の歪はドラムが中空であることを考えると、やむを得ない値であろう。ただ  $y$  軸の終端付近で 40  $\mu\text{m}$  程度のやや大きい歪がおきているが、これはフィルムの固定部分が少し浮いているためである。OD は図3-2によれば各実験の3回走査で系統的歪は生じていないように見えるので、3走査の平均値を観測値とするアフィン変換を行ったところ表7を得た。しかし幾何学的

表7 同種実験内の平均値を用いてアフィン変換した残差歪の標準偏差

Table 7 Standard deviations of residuals of affine transformation of the mean value in every experiment.

機種	実験番号 $N$	残差歪の標準偏差 ( $\mu\text{m}$ )	
		$\sigma_{v,x}$	$\sigma_{v,y}$
OD	1	10	18
	2	9	18
	3	11	18

精度はほとんど改善されず、この機種では幾何学的歪と位置の再現性とは関係していない。これはフィルム周囲を固定するときに入った幾何学的歪は固定され、各走査ごとにその周囲でばらつくと考えてよい。

ND——残差が  $x, y$  方向とも OD より 10  $\mu\text{m}$  RMS ほど大きい。ND については各実験の3走査の残差分布がかなり異なる。しかも表5の  $\sigma_{\epsilon,x}$ ,  $\sigma_{\epsilon,y}$  と表6の  $\sigma_{v,x}$ ,  $\sigma_{v,y}$  が同じオーダーの値であるところから、フィルムの貼り方より、位置再現性を低下させている機械的不安定性が卓越した幾何学的歪の原因である。

以上のことから幾何学的歪について次のことが言える。幾何学的歪を引き越す原因の第1は装着時に入るフィルム変形であり、第2は機械自身の不安定性にある。前者の幾何学的歪を防ぐには表面加工度の良いドラムにフィルムを均質に圧着する必要があり、位置再現性の場合と同じことが言える。とくにフィルム周囲すべてを固定せず、1辺のみとし、歪の解放を許すのが望ましい。

#### 4.4 無相関雑音量の推定

位置精度を確保する手段として、位置のわかっているリゾマークを画像に写し込むのが有効である。ここで用いている 2 cm 間隔の格子点がリゾマークとしてどの程度効果があるか調べてみる。このためには、4.3 節で得た格子点画像座標  $x, y$  から無相関成分を分離すれば推定できる<sup>5)</sup>。すなわち  $x, y$  を相関のある信号  $s_x, s_y$  と無相関雑音  $r_x, r_y$  の和に分解する。

$$x = s_x + r_x, \quad y = s_y + r_y \quad (8)$$

歪が信号成分のみであれば適当な内挿法で格子点間の歪を推定することができる。信号  $s_x, s_y$  はフィルムの非線型の変形、ドラム表面の不整、機械的不安定による歪の低周波成分（波長 4 cm 以上）を含み、雑音  $r_x, r_y$  は機械的不安定による歪の高周波成分と、格子点写真座標および画像座標の測定誤差を含む。フィルム変形を信号に含むのは、フィルムには急な折れ曲がりではなく、2 cm 間隔の格子点での残差には相関があると見なせるためである。

確率場が定常で、 $x, y$  の相互相関性を無視できるとし、それぞれの方向の歪は独立に  $\xi, \eta$  の関数として処理する。以下に雑音分散  $\sigma_r^2$ , 信号分散  $\sigma_s^2$  の推定法を示すが、 $x, y$  は同じ処理であるので  $x$  について説明し添字は省略する。

① アフィン変換のかわりに次の双3次関数により大きな傾向を除去する。



$$\hat{x} + v_x = a_0 + a_1\xi + a_2\eta + a_3\xi^2 + a_4\xi\eta + a_5\eta^2 + a_6\xi^3 + a_7\xi^2\eta + a_8\xi\eta^2 + a_9\eta^3 \quad (9)$$

残差  $v_x$  を最小 2 乗法で決定する。

②  $\xi$  方向,  $\eta$  方向の標本相互相関関数  $C_\xi(j\delta)$ ,  $C_\eta(j\delta)$  ( $j=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm 10; \delta=2 \text{ cm}$ ) を決定する。  $C_\xi$  について述べると次のようである。同じ行に乗っている格子点の組  $l, l'$  について,  $\xi_{N,k,l} - \xi_{N,k,l'} = j\delta$  を満足する組がある  $j$  について  $n_j$  個あったとする。  $C_\xi$  はこれらの組の残差積和から,

$$C_\xi(j\delta) = \frac{1}{n_j} \sum \hat{v}_{x,N,k,l} \hat{v}_{x,N,k,l'} \quad (10)$$

で求める。

③  $v_x$  の相互相関関数  $C(\Delta_\xi, \Delta_\eta)$  を推定する。  $\Delta_\xi, \Delta_\eta$  はそれぞれの方向の距離遅れである。雑音分散  $\sigma^2_r$  を分離するため, 信号はなめらかであるという仮定から  $C$  を Gauss 型にとる。すなわち,

$$\left. \begin{aligned} C(\Delta_\xi, \Delta_\eta) &= \hat{C}_\xi(\Delta_\xi) \hat{C}_\eta(\Delta_\eta) \\ (\Delta_\xi \neq 0 \text{ or } \Delta_\eta \neq 0) \\ C(0, 0) &= \sigma_s^2 + \sigma_r^2 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

および

$$\begin{aligned} \hat{C}_\xi(\Delta_\xi) &= \sigma_{s,\xi}^2 e^{-K_\xi \Delta_\xi^2} \\ \hat{C}_\eta(\Delta_\eta) &= \sigma_{s,\eta}^2 e^{-K_\eta \Delta_\eta^2} \\ \sigma_s^2 &= \sigma_{s,\xi} \sigma_{s,\eta} \end{aligned}$$

とする。  $\hat{C}_\xi, \hat{C}_\eta$  のパラメータ  $K_\xi, K_\eta, \sigma_{s,\xi}, \sigma_{s,\eta}$  は, 標本相互相関関数  $C_\xi, C_\eta$  から最小 2 乗法で決定する。図 5 に  $\hat{C}_\xi(\Delta_\xi)$  のあてはめ例を示した。

表 8 に各実験, 各走査での画像座標  $x, y$  に含まれる雑音の標準偏差の推定量  $\sigma_{r,x}, \sigma_{r,y}$  を示した。この表および表 4, 5 を参照して次のことがいえる。

AD—残差  $v_x, v_y$  には画像座標と写真座標の測定

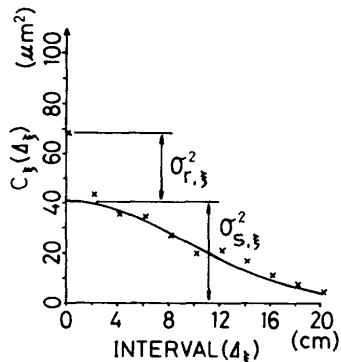


図 5 共分散関数と無相関雑音分散の推定例 (OD,  $N=1, k=1$ )

Fig. 5 Estimation of a correlation function and a variance of uncorrelated noises (OD,  $N=1, k=1$ ).

表 8 各走査ごとの画像座標に含まれる無相関雑音の標準偏差の推定量

Table 8 Estimated standard deviations of uncorrelated noises contained in image coordinates for each scanning.

機種	実験番号 $N$	走査番号 $k$	雑音標準偏差 ( $\mu\text{m}$ )	
			$\sigma_{r,x}$	$\sigma_{r,y}$
AD	1	1	5	5
		2	5	6
		3	6	6
	2	1	5	5
		2	5	7
		3	3	5
	3	1	3	4
		2	3	5
		3	3	5
OD	1	1	5	6
		2	5	6
		3	6	5
	2	1	4	5
		2	6	6
		3	6	6
	3	1	7	7
		2	7	7
		3	6	7
ND	1	1	8	10
		2	8	11
		3	7	8
	2	1	9	10
		2	8	9
		3	6	9
	3	1	11	11
		2	8	10
		3	10	9

誤差が含まれている(式(6)).  $\sigma_{r,x}, \sigma_{r,y}$  が  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  RMS であり, 写真座標の測定誤差が  $3 \mu\text{m}$  RMS 程度であることから実質上画像座標は信号のみであり, 無相関雑音を除去した画像座標間をなめらかに内挿すれば歪は除去できる。

OD— $\sigma_{r,x}, \sigma_{r,y}$  は  $7 \sim 8 \mu\text{m}$  RMS 程度であり, 測定誤差以外の高周波歪を持っている。この無相関雑音が正規分布すると仮定すれば, ほぼ  $3\sigma_r$  の変動を考慮しておけばよいから  $25 \mu\text{m}$  の画素幅で  $\pm 1$  画素の位置精度に補正されると期待できる。

ND— $10 \mu\text{m}$  RMS の雑音量があり, これを除去するには少なくとも  $1 \text{ cm}$  間隔以下の高い密度の

ゾーが必要であるが、 $50\ \mu\text{m}$  の画素幅であれば  $2\ \text{cm}$  間隔のリゾーでも  $\pm 1$  画素内の精度に補正できると期待できる。

## 5. 結論と考察

国内でよく知られている透過型ドラムスキャナ 3 機種について位置精度を検査した。検査は位置の再現性（機械的安定性）と幾何学的歪に分けて行い、全般的に次の結果を得た。

- ディスプレイで観測する限り、画質や位置の乱れはないので画素幅 ( $25\ \mu\text{m}$ ) オーダの高周波歪は無視できる。
- $2\ \text{cm}$  格子での観測では両者の位置精度とも機種ごとに大きく異なる。
- 位置再現性を低下させる原因は、機械の振動とフィルムの密着不完全である。後者はドラムの回転による加力でフィルムが浮くためである。
- 機械の安定性以外の幾何学的歪の原因は主としてフィルム装着時に入る不規則変形である。しかもドラムの円周方向の方が軸方向よりも大きな歪が入る。
- 位置再現性、幾何学的歪とも同じ機種が最も良く、前者で  $3\ \mu\text{m}$  RMS, 後者で  $12\ \mu\text{m}$  RMS (軸方向),  $18\ \mu\text{m}$  RMS (円周方向) の歪があった。この機種ではフィルムの周囲を固定せずに、全体をカバーで圧着させるようになっているため、フィルムを貼り付ける際の初期歪が解除されたために良い結果を得たと推定できる。ただしそのためフィルムは走査中に動く欠点がある。上記の位置再現性の値はそれを除いた値である。
- 両歪を抑制するには、理想的には、加工度の良いドラム内面に軽い減圧でフィルムを均質に圧着できるようにするのがよい。
- 今のままの機構であれば、多くの場合の計測用画像

の分解にはリゾーマークが必要である。位置精度の良い機種では  $2\ \text{cm}$  間隔のリゾーではほぼ歪を除去できると予想された。位置精度の悪い機種でも  $50\ \mu\text{m}$  の画素幅をとれば  $\pm 1$  画素に補正できる。これは写真測量のフィルム計測には使えないが、地形図の分野には許容できる程度の精度である。

## 参 考 文 献

- 1) 岡村定矩: PDS マイクロデンシトメータ, 天文月報, 1981年2月, pp. 54-56 (1981).
- 2) 森 忠次, 服部 進, 印南亮一, 国金博和: ドラム走査型微小濃度計の位置精度検査法について, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 23, No. 1, pp. 24-35 (1984).
- 3) 森 忠次, 服部 進, 政宗尚之: 画像処理システムの使用例 (ドラムスキャナの位置精度検査に則して), *Reports of Research and Development, Okayama University Computer Center*, Vol. 2, No. 2, pp. 1-22 (1984).
- 4) 尾上守夫: イメージプロセッシングの振興と標準化, 情報処理, Vol. 21, No. 6, pp. 645-659 (1980).
- 5) Mikhail, E. M.: *Observations and Least Squares*, pp. 393-426, A Dun-Donnelley Publisher, New York (1976).

(昭和 61 年 12 月 10 日受付)

(昭和 62 年 11 月 11 日採録)



服部 進 (正会員)

昭和 25 年京都市生。昭和 51 年京都大学大学院修士課程修了。土木工学専攻。工学博士。岡山大学工学部助手を経て、現在東京大学生産技術研究所助手。写真測量とくに計算機による自動図化、人工衛星による地形図作成に興味を持つ。写真測量学会、土木学会各会員。