

画像処理による走査型撮像系の走査振動推定方式†

加賀美 晃** 本間 弘一** 古村 文伸**

走査電子顕微鏡やリモートセンシングシステム等の走査型撮像系では、走査の乱れ（走査振動）によって画像が歪む。走査振動が正しく推定できれば、歪んだ画像中の画素を並べ換えることにより、補正画像を得ることができる。我々は、走査振動を走査方向と走査垂直方向の2成分に分け、それぞれの方向に対して、振動推定と歪み補正を行う画像処理方法を提案してきた。ところで既提案法は、走査振動の走査垂直方向成分の振幅が十分小さい場合に有効な方法であり、振幅が大きい場合には、振動推定精度が大幅に劣化し、歪み補正に利用できないという問題がある。我々はこの問題点を解決するため、ある注目する画素と走査垂直方向に並ぶ画素との2画素間の相関値を、2画素間の距離と正負の符号で重み付け、この値を注目する画素に関する複数の組合せについて加算することにより、注目する画素での走査振動の走査垂直方向成分を推定する方法を新たに提案した。ある走査振動を仮定して歪ませた模擬画像から、提案法を用いて走査振動を推定する実験を行い、推定精度が振幅の大きさに依存しないことを確認した。推定振動を用いて歪み画像を補正した結果良好な画質が得られ、歪み補正という目的に対し、提案法の推定精度が十分であることも確認した。

1. ま え が き

走査電子顕微鏡やリモートセンシングシステム等の走査型撮像系では、走査が振動すると画像は歪む^{1),2)}。この対策として従来は、二つの立場がとられてきた。一つは防振台や磁気シールド等の装置開発に見られるような、走査振動の原因を排除しようとするアプローチであり、他の一つは計測装置を利用して走査変動量を測定し、補正に利用しようとするアプローチである。しかし、一層の高画質化要求に応えるには、前出のアプローチだけではなく、画像処理を用いた高画質化のアプローチも有効と考えられる。我々は、歪んだ画像自身の相関情報を利用し、走査振動を走査方向と走査垂直方向の2成分に分け、それぞれの方向の走査変動量の推定と歪み補正を行う画像処理方法を提案してきた^{3),4)}。なお本論文では、走査変動量推定と走査振動推定とを同義の言葉として使用している。

ところで既提案方法は、走査振動の走査垂直方向成分の振幅が十分小さい場合に有効な歪み補正方法であり、振幅が大きい場合には、振動の推定精度が大幅に劣化し、歪み補正に利用できないという問題がある。

以下では、上記問題点の解決を目的として、ある注目する画素と走査垂直方向に並ぶ画素との2画素間の相関値を、2画素間の距離と正負の符号で重み付け、注目する画素に関するすべての組合せについて求めた

この値を加算することにより、注目する画素での走査振動の走査垂直方向成分を推定する方法を新たに提案する。また、提案法の有効性を確認するため、走査垂直方向の走査振動を仮定して模擬的に歪ませた画像から走査振動を推定し、振動特性と推定精度との関係を考察する。次に、推定した振動を用いて歪み画像を補正し、得られた画像の画質から提案法の振動推定精度が歪み補正に適するか否かも判定する。

2. 主軸方向投影法とその問題点

2.1 走査垂直方向成分推定の基本的考え方^{3),4)}

ある走査型撮像系を考え、走査の方向を x 方向とする。走査が乱れなければ、歪みのない画像 $g(x, y)$, $x = 1, \dots, M$, $y = 1, \dots, N$ が撮像される。いま、走査が走査垂直方向、すなわち y 方向に振動し、画像が歪んだとする。歪んだ画像を $g'(x, y)$ と表すと、歪んだ画像上の点 (x, y) と y 方向に n 画素だけ離れた点 $(x, y+n)$ との画素間相関値 r は、式(1)に示す走査方向に伸びた画像ライン片（走査垂直方向：1画素、走査方向： $L+1$ 画素）の空間平均により算出できる。

$$r = \frac{\sum \{g'(x+t, y) - \mu(y)\} \cdot \{g'(x+t, y+n) - \mu(y+n)\}}{[\sum \{g'(x+t, y) - \mu(y)\}^2 \cdot \sum \{g'(x+t, y+n) - \mu(y+n)\}^2]^{1/2}} \quad (1)$$

ここで、 t は整数値、 L は偶数値をとるものとする。また、

$$\mu(y) = \frac{1}{L+1} \sum_{t=1}^{L+1} g'(x+t, y)$$

であり、記号 \sum は t を $-L/2$ から $L/2$ まで順次変化

† An Estimation Method for Scan Vibration of Image Scanning System by Image Processing by AKIRA KAGAMI, KOICHI HOMMA and FUMINOBU KOMURA (Systems Development Laboratory, Hitachi, Ltd.).

** (株)日立製作所システム開発研究所

させて足し込むことを意味する。横軸に走査垂直方向相対距離 n 、縦軸に走査垂直方向絶対座標 y をとった平面上に、ある走査方向座標 x に関する画素間の相関値 γ の分布 $R(x, y, n)$ を考える。以下では、 $R(x, y, n)$ を濃淡図で表現したものを相関値マップと呼ぶものとする。走査が走査垂直方向に振動して画像が歪むと、本来は y に関し定常である $R(x, y, n)$ が変化する。我々は既に、変化した $R(x, y, n)$ から、走査振動の走査垂直方向成分 $\delta(y)$ を推定する方法を提案している^{3),4)}。

2.2 主軸方向投影法 (従来法)

従来法では、走査振動の走査垂直方向成分を次の三つのステップで推定する。

(1) 相関値マップの作成

式(1)を用いて相関値マップを作成する。図1の(a)は、振幅の小さい振動を仮定して歪ませた画像から作成した相関値マップである。これを模式的に示したものが同図の(b)であり、 $n=0$ 上に中心点を持ち、主軸の傾きが $1/2$ の楕円形状になっている。なお、参考のためこの相関値マップを作成するときに仮定した振動 $\delta(y)$ を付記した。 $\delta(y)$ の周期が同じならば、 $\delta(y)$ の振幅が大きいほど、相関値マップ中に現れる楕円の主軸が長くなり、かつ楕円の中心間距離が $\delta(y)$

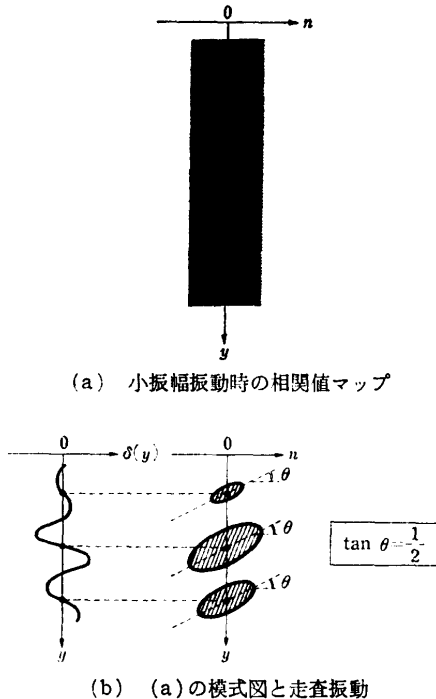


図1 相関値マップ
Fig. 1 Correlation values $R(x, y, n)$.

の周期と一致していることがわかる。したがって、 $R(x, y, n)$ を主軸方向に投影すれば、楕円の主軸の長さに比例し、かつ振動と同一の周期を持ったデータが得られる。

(2) 相関値マップの主軸方向投影

相関値マップの主軸方向の投影値 (主軸方向投影値) は、式(2)で求める。

$$S(y) = \sum_{n=-W}^W R(x, y+n/2, n) \quad (2)$$

ここで、 W は十分大きな正の定数である。

(3) 投影値からの振動推定

主軸方向投影値 $S(y)$ は、楕円の中心位置でピークを持ち、ピークの高さは楕円の主軸の長さに比例している。ところで、楕円の中心位置は $\delta(y)$ の零交差点に対応し、かつ $S(y)$ は相関値の次元 (無次元) で、常に正の値をとるため、投影値 $S(y)$ に以下の三つの後処理を加えて初めて振動量 $\delta(y)$ (長さ [画素] の次元) が推定できる。

- ① バンドパスフィルタ処理
 - 振動周波数近傍の情報だけを取り出す。
- ② $\pi/2$ 位相シフト
 - 初期位相のズレを補正する。
- ③ 比例計算処理
 - 投影値をスケール調整して、振動量への次元変換を行う。

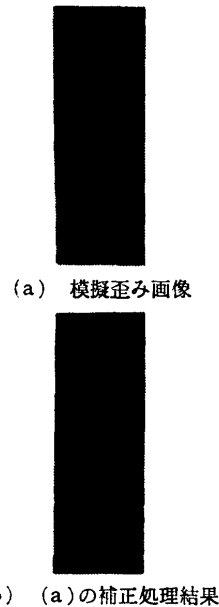


図2 従来法の問題点
Fig. 2 Correction result by the conventional method.

なお、投影方向が楕円の主軸方向であることから、(2)式を用いた本従来法のことを主軸方向投影法と呼ぶ。

2.3 従来法の問題点

走査垂直方向で隣接する画素は、その走査時間間隔が大きいために、二つの画素の走査が逆転しやすい。なぜなら、走査線が上方の画素を走査中に下方に振動し、一方、下方の画素を走査中に上方に振動することが一般の条件下で起こりうるからである。したがって、走査の逆転が頻繁に起こるような大きな振幅の走査振動を推定する方法が必要となる。

図2の(a)に走査垂直方向成分が大きい走査振動によって歪ませた模擬画像の一例を示す。これに従来法を適用して歪みの補正を試みた結果が同図の(b)である。歪みの補正が十分でないのは、振動推定が適切でないことが原因と考えられる。

3. 走査振動による相関値マップの変化

相関値マップを模擬作成し、走査振動により相関値マップがどのように変化するかを分析する⁵⁾。

3.1 歪みのない画像の自己相関関数

画像の統計的性質を表すものの一つに、自己相関関数がある。空間的に定常な画像ならば、自己相関関数は、画素位置に依らず、画素間距離の単調減少関数となることが実験的に確認され、指数関数によりモデル化されることが多い^{6),7)}。ここでも、歪みのない画像 $g(x, y)$ の自己相関関数を、(3)式で表すことにする。

$$\begin{aligned} \phi(m, n) \\ = \phi(0, 0) \cdot \exp(-\alpha|m|) \cdot \exp(-\beta|n|) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $\phi(0, 0)$ は平均電力である。 m, n はそれぞれ x 方向、 y 方向の画素を単位とした距離である。 α, β は画像ごとに異なる正数で、 $| \cdot |$ は絶対値をとることを意味する。

3.2 単振動による相関値マップの変化

走査が振動すれば、歪んだ画像 $g'(x, y)$ が撮像される。走査振動と相関値マップの変化との関係を分析するために、走査振動として走査垂直方向の単振動を仮定し、相関値マップを模擬作成する。ある x に関する走査振動の走査垂直方向成分 $\delta(y)$ は、

$$\delta(y) = a \cdot \sin((2\pi/T) \cdot y) \quad (4)$$

と表せる。ここで、 T, a はそれぞれ画素を単位とした $\delta(y)$ の周期と振幅である。このとき、歪んだ画像と歪みのない画像との間に、

$$g'(x, y) = g(x, y + \delta(y))$$

の関係が成り立つから、

$$\begin{aligned} R(x, y, n) \\ = \exp[-\beta \cdot | \{y + \delta(y)\} - \{(y+n) + \delta(y+n)\} |] \\ = \exp[-\beta \cdot | -n + a \cdot \sin((2\pi/T)y) \\ - a \cdot \sin((2\pi/T)(y+n)) |] \end{aligned} \quad (5)$$

となる。

以下に、振動の振幅の大きさ、ここでは走査の重複が起こる回数で相関値マップを分類する。走査が振動した場合の実際の走査位置 $F(y)$ は、本来の走査位置と走査変動分の和となるから、

$$\begin{aligned} F(y) \\ = y + \delta(y) \\ = y + a \cdot \sin((2\pi/T)y) \end{aligned}$$

と表せる。 y が任意の実数値をとりうると仮定して、 $F(y)$ の近接する極小点と極大点との大小関係から、周期 T と振幅 a との関係を導く。ただし、 y は実際には整数値しかとりえないため、以下の関係式は近似的に成立するものと考えられる。

(a) 走査が重複しない場合

走査が逆転しないためには、 $F(y)$ が単調増加関数であることが必要十分条件である。

$$\begin{aligned} F'(y) = 1 + (2\pi/T)a \cdot \cos((2\pi/T)y) \\ \geq 0 \end{aligned}$$

すなわち、

$$0 \leq a/T \leq 1/2\pi \quad (6)$$

(b) 走査の重複が3回起こる場合

このときの必要十分条件は、 $F(y)$ に極値 ($F'(y)=0$ の実数解: β) が存在し、かつ $F(y)$ の任意の極小点より、 $F(y)$ で y が減少する方向の二つ目の極大点のほうが大きくなる、すなわち、

$$F(\beta) \leq F(T-\beta) \quad (7)$$

が成立することである。ここに β は、式(8)中の α を用いて、 $\beta = (T/2\pi)\alpha$ と表せる。

$$\cos \alpha = -\frac{T}{2\pi a} \quad (8)$$

以上から、関係式(9)が得られる(付録参照)。

$$1/2\pi < a/T \leq 0.73 \quad (9)$$

以下、(c)と(d)の関係式も、(b)と同様の議論から求まる。

(c) 走査の重複が5回起こる場合

$$0.73 < a/T \leq 1.24 \quad (10)$$

(d) 走査の重複が7回以上起こる場合

$$1.24 < a/T \quad (11)$$

走査の重複により、相関値マップがどのように変化

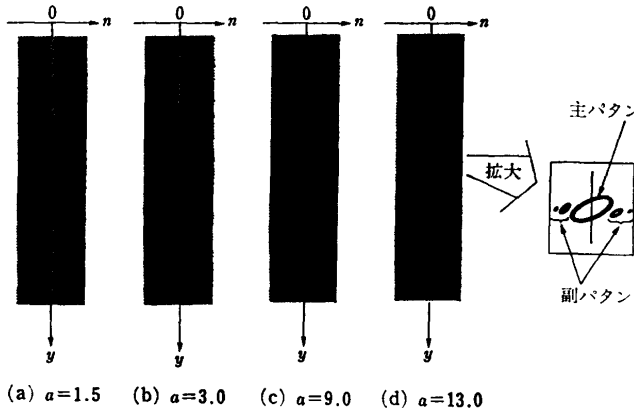


図3 相関値マップの模擬作成例
(すべて $T=10$ の場合)
Fig. 3 Simulated $R(x, y, n)$.

するかを観察する。図3は、 α を0.2とし、 a と T を上記(a)~(d)の条件で変化させて相関値マップを模擬作成した例である。従来法での考察どおり、 $n=0$ 上に中心点を持ち、主軸の傾きが1/2である楕円形状(以下、主パタンと呼ぶ)が出現し、その中心間距離が T を、また大きさの変化が a の変化を表しているように見える。しかし主パタンは、 a/T が0.73を越えると、大きさは変わらないものの、濃度は逆に淡くなり、代わって周辺に出現するパタン(以下、副パタン

と呼ぶ)が大きくなり始める。すなわち、振動が大きくなると画像が大きく歪むため、相関の高い点(歪みのない本来の画像では近くにあるはずの点)がさらに遠くに現れ、しかも相関値マップ上では主パタンとは別のパタンを集合形成する。これは、従来法では考慮していなかった現象である。なお、 α を変えた場合も、同様の現象が見られた。

4. 重み付け水平加算法の提案

4.1 従来法の適用限界

振幅の大きさによる従来法の精度低下の様子を観察するために、式(4)の a の代わりに、

$$a(y) = a(1 - y/N) \quad (12)$$

を用いて減衰振動を発生させ、相関値マップを模擬作成する。これに従来法を適用し、投影値を算出した結果を図4に示す。図中、(a)は仮定した走査振動(減衰振動)、(b)は相関値マップ、(c)は主軸方向投影値である。図に示したとおり、従来法では相関値(すべてプラスの値)を単純に加算するため、投影値はプラス方向に偏ったグラフとなる。これから、振動成分を抽出するために、前述のバンドパスフィルタ処理が必要になる。また同図より、振幅が大きくなると、投影値が振幅の変化に追従しなくなることもわかる。特に、振幅と周期の比が0.73を越える(走査の重複が5回以上起こる)場合には、投影値の乱変動が起こる。

4.2 重み付け水平加算法

4.2.1 相関値マップの断面プロファイル

大振幅振動に対する従来法の推定精度低下は、相関値マップの変化を、主パタンだけから抽出しようとしたことに原因があると考えられる。実際、3章で見た

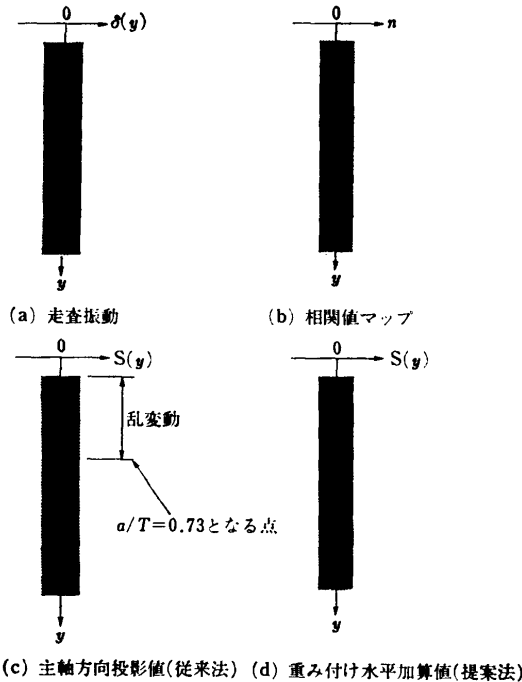


図4 従来法の適用限界
Fig. 4 Limit of the conventional method.

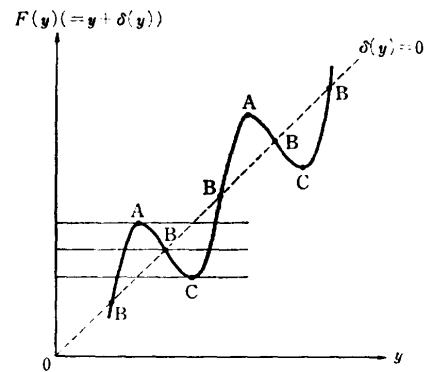


図5 走査振動の特徴点
Fig. 5 Special points of scan vibration.

ように、振幅と周期の比が 0.73 を越えると、その情報は主として副パターンに表現されるようになる。以下では、模擬作成した相関値マップと走査振動との関係を考察し、振動振幅の大きさに依存しない相関値マップの性質を抽出する。

(1) 振動の位相情報

図 5 から、振動の特徴的な三つの点、

A: 極大点

B: 無変位点

C: 極小点

で、それぞれその左右（撮像画像上では上下）の点との相関の分布が、

A: 右（下）方に偏る。

B: 左右（上下）対称となる。

C: 左（上）方に偏る。

ことがわかる。図 6 の相関値マップの断面プロファイルもその傾向を示しており、振幅の大小に関係なく成立している。

(2) 振動の振幅情報

振幅情報が、断面プロファイル上で強い相関を示す点の分布の広がりによって表現されていることが、同じく図 6 よりわかる。

4.2.2 断面プロファイルを利用した振動推定法

以上のように、相関値マップの断面プロファイルには、振幅と位相の情報が含まれている。断面プロファイルから、振幅と位相の情報を正しく抽出するには、

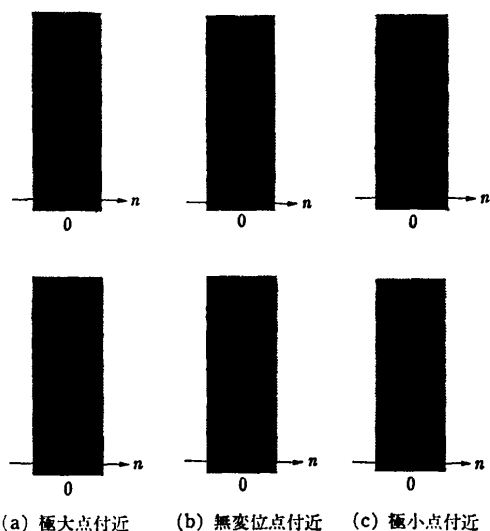


図 6 相関値マップの断面プロファイル
(上段は小さな振幅、下段は大きな振幅の場合)
Fig. 6 Profiles of $R(x, y, n)$.

下記が必要と考えられる。

① 振幅情報の抽出

断面プロファイルの両端にある相関情報を優先的に取り出す。

② 位相情報の抽出

断面プロファイルの中心から見て、強い相関を示す点があるのどちら側にあるのかを正負の符号で示す。

上記の考察に基づき、振幅の大小に影響されずに振動を推定する方法を提案する。まず、①の目的のためには、断面プロファイルの中心からの距離で絶対値が単調に増加する‘重み’を相関値に付けてやれば良い。また、②の目的のためには、断面プロファイルの右側で正、左側で負となる‘重み’を相関値に付けてやれば良い。そこで、以上の条件を満たし、かつ最も単純な $w(n)=n$ を相関値の重み付け関数として採用する。すなわち、式(2)の代わりに、相関値マップを式(17)で処理する。

$$S(y) = \sum_{n=-W}^W w(n) \cdot R(x, y, n) \quad (13)$$

ただし、重み付け関数を $w(n)=n$ とすることの最適性については、まだ検討中であり、ここでは議論しない。この提案法を従来法と区別して重み付け水平加算法、また式(13)の加算値 $S(y)$ を重み付け水平加算値と呼ぶ。提案法を図 4 の (b) と同じ相関値マップに適用した結果を同図の (d) に示す。図に示したとおり、提案法によれば、

- ① 振動の零変位点で $S(y)=0$
- ② 振動の極大点で $S(y)$ も極大値
- ③ 振動の極小点で $S(y)$ も極小値

となるため、振動と $S(y)$ の位相が同一になり、かつ、両者の振幅が比例関係にあることは、提案法の有効性を大変良く示している。このように、 $S(y)$ は振動の位相を保存しているため、従来法で必要とした $\pi/2$ シフト処理は不要である。残るバンドパスフィルタ処理と、比例計算処理のみを加えるだけで振動量 $\delta(y)$ が推定できる。

5. 提案法の評価実験

提案法が振幅の大小に依らず、振動を精度良く推定できることを実験で確認する。ところで、一般に振動推定精度は、対象画像の性質、すなわち画像の自己相関関数と走査振動の性質とに依存する。ここでは、ある走査型電子顕微鏡で撮像された歪みのない画像を、

原画像 $g(x, y)$ として固定的に用い (図 7 の (b)), 走査振動だけを種々に変化させて推定精度への影響を見ることにする。

5.1 実験方法

評価実験の処理フローを図 8 に示す。実験は、次の三つの処理を繰り返し、真の走査振動と推定振動とを比較し、精度を評価する。

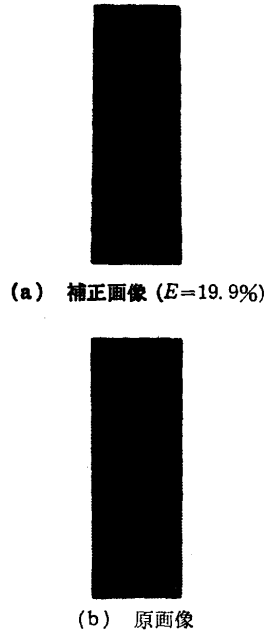


図 7 提案法を用いた歪み補正 (模擬歪み画像は図 2 の (a) と同じ)

Fig. 7 Correction result by the proposed method.

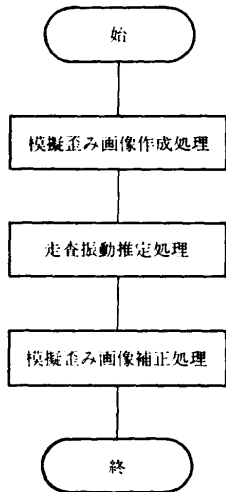


図 8 実験の処理フロー
Fig. 8 General flow chart of experiment.

(1) 模擬歪み画像作成処理

走査振動を模擬作成して、原画像をサンプリングし、歪み画像を作成する。ただし、原画像は整数座標点のデータしかないので、走査振動によりサンプリングされる非整数座標点のデータ $g(x_i, y_j)$ (歪み画像では整数座標点のデータ) は、以下のリニア補間法により算出する。

$$g(x_i, y_j) = \frac{(n-j) \cdot g(x_i, y_m) + (j-m) \cdot g(x_i, y_n)}{n-m} \tag{14}$$

ここに、 i は整数、 j は非整数、 n は j より小さい最大の整数、 m は j より大きい最小の整数である。

(2) 走査振動推定処理

提案法により、走査振動を推定する。

(3) 模擬歪み画像補正処理

推定振動を用いて、歪み画像をサンプリングし、補正画像を作成する。この場合のサンプリング方法も、基本的には (1) の場合と同じであり、補正画像中の整数座標点 (歪み画像中では一般に非整数座標点) のデータを、その点をはさむ最も近い歪み画像中の整数座標点のデータからリニア補間法により算出する。

なお、走査振動の模擬データ作成には、下記のシミュレータを用いる。

5.1.1 走査振動シミュレータ

走査電子顕微鏡のように、各種の機械的振動がランダムに床から伝わり、それに呼応して撮像系が自らの固有振動数で共振する場合を想定する。このとき、走査も撮像系の固有振動数近傍で振動するものと考えられる。撮像系自身のモデルとしては、変位する床においた一自由度のバネ・マス・ダンパ系を考える (図 9)。

床の変位を p 、マス、すなわち走査位置の変動分を q とすれば、運動方程式は次のようになる。

$$m\ddot{q} + \lambda\dot{q} + kq = \lambda\dot{p} + kp \tag{15}$$

ただし、 m はマスの質量、 λ はダンパの粘性抵抗の係数、 k はバネ定数である。式 (15) を、系の特性を表す

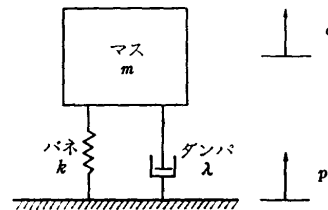


図 9 撮像系モデル
Fig. 9 Model of forced vibration.

パラメータを使った表現に変える。すなわち、 $\omega^2 = k/m, h = \lambda/2m\omega$ として、

$$\ddot{q} + 2\omega h \dot{q} + \omega^2 q = 2\omega h \dot{p} + \omega^2 p \quad (16)$$

と変形する。ここに、 ω は撮像系の固有角周波数であり、固有振動数 f とは $\omega = 2\pi f$ の関係がある。また、 h は撮像系の減衰定数であり⁸⁾、撮像系の振動の減衰の速さを表している。

機械的振動、すなわち床変位 $p(t)$ に白色雑音を仮定し、走査変位 $q(t)$ を求める。ただし、シミュレーションに用いる走査変位としては、平均値が M となる $q'(t)$ を用いる。

$$q'(t) = \left(M / \sqrt{\frac{\sum \{q(t)\}^2}{\sum \cdot 1}} \right) \cdot q(t) \quad (17)$$

この $q'(t)$ を 1 ラインの走査に要する時間ごとにサンプリングし、ライン番号 y の関数として表現したものが、前出の $\delta(y)$ である。

三つの特性パラメータ ω, h, M (振動振幅の大きさ) を変化させて作成した走査振動を表 1 に示す。走査速度は 20ms/line、すなわちライン走査の振動数 f_0 として 50 Hz を仮定した。

5.1.2 評価尺度

振動の比較を行う評価尺度として、真の走査垂直方向成分 $\delta(y)$ と、その推定値 $\delta'(y)$ との二乗誤差 E を用いる。 E が小さいほど、推定精度が良いといえる。

$$E = \frac{\sum_{y=1}^N \{\delta(y) - \delta'(y)\}^2}{\sum_{y=1}^N \{\delta(y)\}^2} \times 100[\%] \quad (18)$$

5.2 実験結果

5.2.1 走査振動の特性と推定精度との関係

表 1 の走査振動を用いて作成した模擬歪み画像から、振動推定を行った結果を表 2 に示す。以下に、走査振動の特性パラメータと推定精度の関係をまとめる。

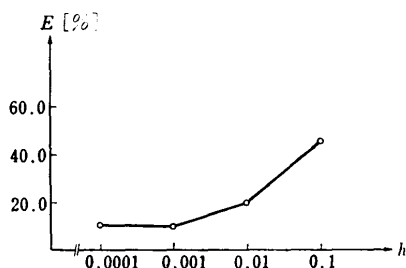


図 10 h と推定誤差の関係
($\omega=62.8, M=2.0$ の場合)
Fig. 10 h and E .

表 1 走査振動の模擬作成
Table 1 Simulated scan vibrations.

No.	h	ω	M (画素)	走査振動の波形
1	0.1	62.8	2.0	
2	0.01	62.8	2.0	
3	0.001	62.8	2.0	
4	0.0001	62.8	2.0	
5	0.001	12.6	2.0	
6	0.001	37.7	2.0	
7	0.001	87.9	2.0	
8	0.001	113	2.0	
9	0.001	138	2.0	
10	0.001	62.8	0.5	
11	0.001	62.8	1.0	
12	0.001	62.8	3.0	

表 2 実験結果
Table 2 Experimental result.

No.	E [%]
1	44.8
2	19.9
3	11.3
4	12.3
5	67.6
6	49.6
7	9.5
8	14.7
9	25.4
10	69.0
11	13.8
12	11.8

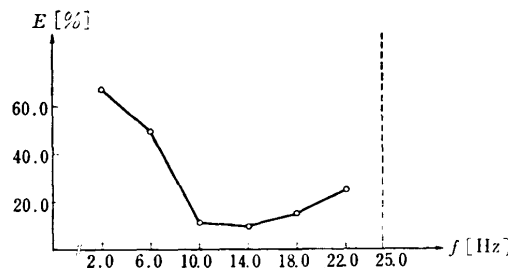


図 11 $\omega (=2\pi f)$ と推定誤差の関係
($h=0.001, M=2.0$ の場合)
Fig. 11 ω and E .

(1) 系の減衰定数 h と推定精度との関係 (図 10) 推定精度の h 依存性は高く, h が小さいほど精度が良くなる。ただし, $h=0.001$ 程度でほぼ飽和してしまい, 限界値が存在する。

(2) 系の固有角周波数 ω と推定精度との関係 (図 11)

系の固有振動数 f と ω とは $f=\omega/2\pi$ の関係にある。推定精度は f が,

$$f_{\min} \leq f \leq f_0/2 \quad (19)$$

を満たす場合は, あまり変化しない。ただし, f_0 はライン走査の振動数で, 50 Hz を想定した。このとき, f と前出の T とは $T=f_0/f$ (画素) の関係にある。 f_{\min} は f の低域限界値で f_0 に依存する。

(3) 振動の平均振幅 M と推定精度との関係 (図 12)

M が十分大きい (1.0 を越える) 場合は, M と推定精度との間に顕著な関係は見出せない。逆に, M が小さい (1.0 を下回る) 場合に, 推定精度の劣化が認められる。

5.2.2 推定精度と補正画像の画質との関係

上記で推定された振動情報で歪み画像を補正する実験を行った。図 7 は, 表 1 の No. 2 の走査振動で歪ませた画像 (図 2 の (a) と同じ) から $E=19.9\%$ で推定した振動情報で, 歪み画像の補正を試みた例である。振動の影響で歪んだ境界線のギザギザがほとんど目立たなくなっており, 形状観測の目的に対しては, この程度の振動推定精度でも, 歪み画像の補正が十分に行えることがわかった。

なお, 画像を変えて行った実験でも, 同様の結果が得られた。一般には, 特定パターンが少なく, したがって自己相関関数が式 (3) の理想形に近い画像ほど振動の推定精度は良くなった。

5.3 考 察

提案法の振動推定精度は, 推定の対象とする振動の

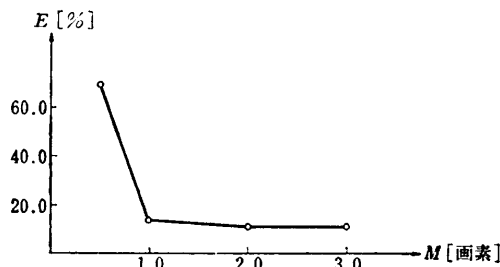


図 12 M と推定誤差の関係
($h=0.001$, $\omega=62.8$ の場合)
Fig. 12 M and E .

性質と画像本来の自己相関関数に応じて変動するが, 振幅の大小にはあまり影響されない。また, E で約 20% 前後の誤差であっても, 歪みの補正効果が十分に得られることを確認できた。なお, 従来法を適用した場合には, ほとんどの場合で E が 100% を越え, 歪み補正処理に利用してもかえって画質の低下が見られた。

以下, 前節の実験結果 (1)~(3) に対し, それぞれ考察を加える。

(1) h は推定精度に大きく影響する。 h が小さくなると共振が激しくなるため, その結果発生する振動の特定周波数成分への集中度が高くなる。これによって, バンドパスフィルタ処理時の, 真の振動成分と画像パターンやノイズなどの非振動成分との分離精度が良くなる。推定精度を向上させると考えられる。なお, h をある一定値より小さくしても推定精度が向上しないのは, 振動成分を切り出すバンド幅を, 一画素で表せる周波数幅より小さく設定できないからである。

(2) f は, 発生する走査振動の中心周波数となり, これも推定精度に影響する。ある一定以上の推定精度を保証する f に, 式 (19) に示す上下限が存在する理由としては, 以下が考えられる。

(a) 画像の自己相関関数は, 現実には画像自身の持つ特定のパターンの影響により揺らいでいる。この揺らぎは一般に低周波成分である。したがって, f が小さくなると, バンドパスフィルタ処理時に振動成分の分離精度が低下する。

(b) 走査垂直方向のサンプリング周期が $1/f_0$ であるため, 表現できる最高周波数が $f_0/2$ となる。したがって, $f_0/2$ を越える周波数の振動は直接推定できない。

上記 (a), (b) の対策としては, 以下が考えられる。

(a) 系の固有振動数 f に応じて, 走査速度を遅くさせる。これにより, 揺らぎの成分と振動成分との分離精度が高まる。なぜなら, 高周波域には揺らぎの成分が少ないからである。

(b) 1 走査ライン中の複数点でサンプリングし, それらを時系列でつなぐ。

(3) 振動の平均振幅が極端に小さい場合は, E が増大する。これは, 提案法が振動推定処理をすべて画素単位で行っていることが原因であると考えられる。画素以下 (サブピクセル) の単位で処理を行うこともできるが, 微小振幅時の精度劣化はあまり気にしなく

て良い。なぜなら、画像の歪みが微小であり、また振動推定誤差の影響も目に見えない程度になるからである。

6. むすび

本論文では、走査型撮像系に発生する走査振動の走査垂直方向成分を、振幅の大きさに依存せず精度良く推定する方法を提案し、提案法の精度検証実験とその考察を行った。

相関値マップの断面プロファイルから、強い相関を示す点の分布が振動の位相情報を、また分布の広がりから振幅情報を表現していることを見出した。これらの性質は、振動の振幅に依存しない。我々は、相関情報の断面プロファイルを構成する各データを、プロファイルの中心からの距離と方向（正負の符号）で重み付けて加算する振動推定法を新たに提案した。種々の走査振動を仮定して作成した模擬歪み画像から、提案法を用いて走査振動を推定し、推定精度が振幅の大きさに依存しないことを確認した。また、推定した振動を用いて歪み画像を補正し、その良好な画質から、歪み補正という目的に対し、提案法の振動推定精度で十分であることも確認できた。

本実験は一次元（走査垂直方向）の振動を仮定して歪ませた模擬画像を対象としたものであるが、現実の走査がいつもこのような特殊な方向にのみ振動するとは限らない。しかし、任意方向の振動であっても、本提案法の前段に、既提案法の歪みの走査方向成分の除去処理を組み合わせることにより、走査振動の走査垂直方向成分の十分な推定精度と歪み補正効果が得られるものと考えられる。

謝辞 本研究の機会を与えていただいた(株)日立製作所システム開発研究所 堂免信義所長、同所 春名公一副所長、中尾和夫第一部部長、明石吉三川崎分室長に深謝いたします。また、本研究の推進にあたり、御指導、御協力いただいた同社那珂工場の方々に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 日本電子顕微鏡学会関東支部編：走査電子顕微鏡の基礎と応用，pp. 102-108，共立出版（1983）。
- 2) 古村，本間：衛星画像処理技術，計測と制御，Vol. 24, No. 3, pp. 234-241（1985）。
- 3) 本間，加賀美，古村，古屋，飯泉：画像相関情報に基づく走査電子顕微鏡振動画像の歪み補正方式，第29回自動制御連合講演会，pp. 423-424（1986）。

- 4) Homma, K., Komura, F. and Furuya, T.: An Image Correction Method for Vibrated Scan of SEM, *Proceedings of International Workshop on Industrial Applications of Machine Vision and Machine Intelligence*, pp. 26-30 (1987).
- 5) 加賀美，本間，古村：画像処理による走査型撮像系の外乱推定方式，第36回情報処理学会全国大会論文集，pp. 1835-1836（1988）。
- 6) Pratt, W. K.: *Digital Image Processing*, pp. 20-22, John Wiley & Sons (1978).
- 7) 吹抜：画像のデジタル信号処理，pp. 128-130，日刊工業新聞社（1984）。
- 8) Meirovitch, L.: *Elements of Vibration Analysis*, pp. 422-427, McGraw-Hill Kogakusha (1975).

付 録

関係式(9)の右側の不等式の等号成立条件は、以下のごとく求める。すなわち、

$$\begin{aligned} F(\beta) &= F(T - \beta) \\ \Leftrightarrow T\alpha + 2\pi a \cdot \sin \alpha &= \pi \alpha \\ \Leftrightarrow \alpha + X \cdot \sin \alpha &= \pi \quad (X = 2\pi(a/T)) \\ \Leftrightarrow X \cdot \sin \alpha &= \pi - \alpha \end{aligned}$$

と式(8)，および $\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$ より、「式(A)と式(B)が同時に成立する」条件を求めれば良い。

$$\begin{aligned} \tan \alpha &= \alpha - \pi & (A) \\ X^2 &= (\pi - \alpha)^2 + 1 & (B) \\ \Rightarrow X &= 2\pi(a/T) \\ &= \sqrt{(\pi - \alpha)^2 + 1} \end{aligned}$$

式(A)より $\alpha \approx 3.2$ を得て式(B)に代入すれば、境界条件として $(a/T) \approx 0.73$ が得られる。

(平成元年3月30日受付)
(平成2年2月13日採録)



加賀美 晃 (正会員)

昭和35年生。昭和60年東京大学工学部精密機械工学科卒業。同年(株)日立製作所入社。システム開発研究所にて、電子顕微鏡画像処理システム、文書画像処理システムなどの画像処理システム、および流通業を始めとする戦略的ビジネスシステムの研究開発に従事。

**本間 弘一 (正会員)**

昭和 26 年生. 昭和 49 年東京大学工学部計数工学科卒業. 51 年同大学院修士課程修了. 同年(株)日立製作所に入社. システム開発研究所にて, 衛星地上局画像処理システム, ステレオ視覚システム, 電子顕微鏡画像処理システムなどの画像処理システムおよび戦略的企業情報システムの研究開発に従事. 現在同研究所新川崎分室主任研究員. 58~59 年 Purdue 大学客員研究員. 工学博士. IEEE, 計測自動制御学会, 日本リモートセンシング学会などの会員.

**古村 文伸 (正会員)**

1949 年生. 1971 年東京大学工学部航空学科卒業, 1973 年同大学院修士修了(航空学). 同年(株)日立製作所入社. 中央研究所にて道路交通システムの研究に従事, 1976 年より同社システム開発研究所にて衛星画像処理システム, 電子顕微鏡画像処理システム等の研究に従事. 現在同所企画室主任研究員. IEEE, 計測自動制御学会等の会員.