検出器感度ばらつきの推定によるリニアアレイセンサ 画像の強度補正法

本 間 弘 一*・坪 井 晃**・古 村 文 伸*

A Radiometric Correction Method of Linear-Array-Sensor Image
by Estimating Variations of Detector Characteristics

Koichi HOMMA*, Akira TSUBOI** and Fuminobu KOMURA*

A radiometric correction method for linear array sensor image is proposed. This method removes stripe noise pattern caused by the errors of detector characteristics of the sensor. In this method, mean and variance of output image are calculated for each detector. High-pass filters are applied to the statistics to estimate gain and offset errors of the detectors.

In this paper, power spectra of mean and variance of each detector are studied by assuming a 2-dimensional auto-correlation model for the original image. Based on the power spectrum models of the statistics, Wiener filters (least square filters) are derived. In the method the filter parameters are determined adaptively by the sensor image.

An experiment was made by simulating image of linear array sensor using a LANDSAT image. The stripes were removed in the corrected image and the decrease of the rms error of the image intensity showed the effectiveness of the method.

Key Words: linear array sensor, image processing, Wiener filter, radiometric correction, auto-correlation

1. はじめに

リニアアレイセンサとは、1列に並んだ多数の検出器からなり、1ライン分の画像を同時に入力する撮像

センサである。リニアアレイセンサは、ラインに沿った方向の機械的走査機構がいないなどの利点をもつため、リモートセンシング^{1),2)}を始め、多くの画像入力システムで用いられている。ところで、検出器の間に感度特性のばらつきがある場合には、画像に縞状の濃淡ノイズが重量し画質を劣化させる。画像の濃淡ノイズを除去することは、幾何学的歪みの補正^{3),4)}と並び、観測画像からの正しい情報抽出にとって、重要である。ノイズ除去の一般的画像処理方式としては、特定周波数成分除去のフィルタ処理⁵⁾、画像実空間での平滑化処理⁶⁾、スパイク状ノイズの置き換え処理⁷⁾、などがある。一方、ノイズの発生機構を考慮した補正方式としては、基準光源による検出器の校正⁸⁾、撮像画像による感度ばらつきの推定⁹⁾、などの方式がある。後者は、校正に誤差を生ずる場合、温度などの環境条件の変化により検出器感度のばらつき特性が変化する場合、校正を省略したい場合などに必要となる。

本論文は、撮像画像を用いた感度ばらつきの推定による、リニアアレイセンサ画像の強度補正方式に関するものである。

従来、複数の検出器の感度特性のばらつきを撮像画像から推定する手法は、衛星搭載センサである MSS (Multi-Spectral Scanner) の画像に対し用いられている⁹⁾。本手法では、各検出器について画像データの頻度分布を求め、それらのばらつきから、検出器感度のばらつきを推定する。MSS センサでは、少数の検出器により1画面あたり数千ラインの繰返し走査を行うため、各検出器に対する原画像の頻度分布は、等しいとみなせるからである。筆者らは、リニアアレイセンサに対しても、検出器別の画像データの平均や分散は検出器間でゆっくり変化するという前提で、それらの急激な変化をフィルタで分離し、検出器感度のばらつ

* (株)日立製作所システム開発研究所
川崎市麻生区王禅寺 1099

** (株)日立メディコ大阪工場 柏市新十倉二の1

* Systems Development Laboratory, Hitachi, Ltd.
Kawasaki

** Hitachi Medical Corporation, Kashiwa
(Received September 9, 1985)
(Revised January 10, 1986)

きに帰す方式を提案してきた¹⁰⁾。しかし、上記前提の平滑さが、画像の性質と統計計算に用いる画像ライン数に応じて、どう変化するか明らかにされておらず、フィルタ形状の決定法が得られていないという問題があった。

本論文では、まず検出器ごとの統計量の急激な変化から検出器感度のばらつきを推定するリニアアレイセンサ画像強度補正方式の基本的考え方を示す。つぎに、検出器別の画像統計量の空間周波数特性を、画像の2次元相関特性をモデル化し検討する。その結果をもとに、ウィナーフィルタによる2乗誤差最小な検出器感度ばらつきの推定について述べ、推定精度についても検討する。最後に、撮像画像自身からフィルタ形状を適応的に決定する方式を提案する。模擬画像を用いた補正実験の結果から、提案方式の有効性を示す。

2. 画像強度補正方式

2.1 リニアアレイセンサ画像

リニアアレイセンサによる撮像系の一つの例として、衛星による地球観測システムを、Fig. 1 に示す。直線上に並んだ多数の検出器は、センサを搭載した衛星の移動に合せ、1ラインずつの画像データを入力する。複数の検出器に感度特性のばらつきが存在すると、出力画像上にリニアアレイセンサと垂直方向の縞状のノイズが現れる。仏 SPOT 衛星搭載の CCD (Charge Coupled Device) リニアアレイセンサの一樣光源に対する出力測定値例では、1.5% 程度の検出器感度ばらつきが報告されている¹¹⁾。

Fig. 1 に示すように、 k 番目の検出器に関する j ライン目の出力画像強度を $x'(j, k)$ 、原画像すなわち

Fig. 1 A linear array imaging system and stripe noises on the image

検出器の理想入出力特性を仮定した出力画像の強度を $x(j, k)$ とする。各検出器の実際の特性が、理想的特性からばらつく量は微小であるため、出力画像 $x'(j, k)$ は、各検出器に関する次線形式で表わせる。

$$x'(j, k) = a(k)x(j, k) + b(k) \quad (1)$$

$$a(k) \sim 1, \quad b(k) \sim 0$$

ここで、 $a(k)$ 、 $b(k)$ は k 番目の検出器の特性のばらつき、すなわちゲイン誤差とオフセット誤差を表わす。 k 番目の検出器に関する N ライン分の出力画像の平均 $m'(k)$ と分散 $\sigma'^2(k)$ は、

$$m'(k) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x'(j, k) \\ = a(k)m(k) + b(k) \quad (2)$$

$$\sigma'^2(k) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \{x'(j, k) - m'(k)\}^2 \\ = a(k)^2 \sigma^2(k) \quad (3)$$

となる。 $m(k)$ 、 $\sigma^2(k)$ は、原画像の平均と分散である。実際の撮像画像の一例として Photo. 1 に示す、ランドサット衛星の MSS 画像について、画像強度をたて

Photo. 1
Example of image data

Fig. 2 Statistics of image intensity of Photo. 1 on vertical lines

方向に足し込み、平均、標準偏差を求め、Fig. 2 にプロットする。平均 $m(k)$ と分散 $\sigma^2(k)$ は、検出器番号 k に関して急激には変化しないことがわかる。統計計算に用いるライン数 N が大きいほど、この変化は滑らかになるといえる。したがって、出力画像 $x'(j, k)$ の平均 $m'(k)$ 、分散 $\sigma'^2(k)$ の k に対する変動の高周波成分は、検出器の感度誤差 $a(k)$ 、 $b(k)$ が原因であると考え、これらを高域ろ過フィルタにより求めることができる。

ところで、検出器感度誤差を、出力画像の検出器別画像統計量から、高域ろ過フィルタにより求めるためには、検出器別画像統計量の周波数特性を明らかにし、その結果を用いてフィルタ形状を決めることが必要である。特に、検出器別画像統計量の周波数特性は、画像の統計的性質と、統計量計算に用いるライン数 N に依存するため、それらをパラメータとしたモデル化が必要である。

2.2 検出器別画像統計量の特徴

画像の2次元自己相関関数の統計的モデルから、画像データ N ライン分の平均値の1次元自己相関関数を求める。 k 番目の検出器に関する原画像強度を $x(j, k)$ 、 N ラインの平均をあらためて $\bar{x}^N(k)$ と表わすと、

$$\bar{x}^N(k) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x(j, k) \quad (4)$$

である。2次元自己相関関数 $R(j, k)$ の定義、

$$R(j, k) = E\{x(s, t)x(s+j, t+k)\} \quad (5)$$

を用いて、 N ライン平均値の1次元自己相関関数 $R_N(k)$ を変形すると、

$$\begin{aligned} R_N(k) &= E\{\bar{x}^N(t)\bar{x}^N(t+k)\} \\ &= \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \{E\{x(i, t)x(j, t+k)\}\} \\ &= \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N R(j-i, k) \\ &= \sum_{j=-N+1}^{N-1} \frac{N-|j|}{N^2} R(j, k) \end{aligned} \quad (6)$$

となる。ここで、 $E\{\}$ は期待値を表わす。

一般に、画像の2点間の相関は、方向によらず、2点間の距離に応じて単調に減少する¹²⁾。したがって、入力画像強度の2次元自己相関関数 $R(j, k)$ は、原点で最大値をもち、原点からの距離に応じて単調に減少する関数となる。(6)式はこのような性質の関数 $R(j, k)$ を、Fig. 3 に模式的に示すように三角形の荷重関数を乗じ一方方向に加算することを意味する。一段に1次元自己相関関数 $R_N(k)$ は、やはり単調減少関数となる。

相関関数 $R(j, k)$ のモデルとして、指数関数的に減

Fig. 3 Weighted averaging of two dimensional auto-correlation function

Fig. 4 Two dimensional auto-correlation function of Photo. 1

少する(7)式を具体的に与え、 N ライン平均値の1次元自己相関関数 $R_N(k)$ 、およびそのフーリエ変換であるパワースペクトルを求める。なお、関数は簡単のため、変数 j 、 k に関し分離できるものとしている。 α 、 β は減衰係数、 K は定数である。

$$R(j, k) = K \exp(-\alpha|j|) \exp(-\beta|k|) \quad (7)$$

指数関数的に減少する相関関数は、マルコフ過程モデルに基づくもので、画像を統計的に扱う場合によく用いられる¹²⁾。実際の画像データ Photo. 1 についても、Fig. 4 に示すように、相関関数の指数関数的減少を見ることができる。(7)式を(6)式に代入すると、 N ライン平均値の自己相関関数 $R_N(k)$ は、 $r = \exp(-\alpha)$ として、

$$R_N(k) = K \left[\frac{1}{N} \frac{1+r}{1-r} + \frac{2}{N^2} \frac{(r^{N+1}-r)}{(1-r)^2} \right] \exp(-\beta|k|) \quad (8)$$

と求める。係数より、ライン数 N が十分大きい場合には、関数全体が $1/N$ に比例して減少することがわかる。また、 $\exp(-\alpha)$ が1に近い程、すなわち、 j 軸の方向の相関が強い程、その減少はゆるやかとなる。したがって、(8)式をフーリエ変換して得られるパワースペクトラム $Pm(v)$ もライン数 N について同様の性質をもち、

$$Pm(v) = \frac{Km}{(v^2 + \beta^2)N} \quad (9)$$

となる。 Km は定数、 v は空間周波数である。

各検出器に関する画像 N ライン分の分散値の1次元

自己相関関数についても、原画像に(7)式の自己相関関数を仮定して求めることができる。ここでは、画像強度 $x(j, k)$ の代わりに、その2乗値 $\{x(j, k)\}^2$ を考える。2乗画像の自己相関関数 $R_2(j, k)$ は、4次の項の期待値の関係式¹³⁾より、

$$R_2(j, k) = \{R(0, 0)\}^2 + 2\{R(j, k)\}^2 \quad (10)$$

と表わせる。したがって、パワースペクトラム $P\sigma^2(v)$ の形状は、平均値と同様 $K\sigma^2$ を定数として、

$$P\sigma^2(v) = \sigma_0^2 \delta(v) + \frac{K\sigma^2}{(v^2 + 4\beta^2)N} \quad (11)$$

となる。 $\delta(v)$ は、デルタ関数である。

2.3 ウィーナーフィルタによる感度誤差の推定

リニアアレイセンサ画像の、検出器別画像統計量の関係式(2)、(3)式において、原画像の統計量 $m(k)$ 、 $\sigma^2(k)$ の周波数特性を既知とし、検出器誤差 $a(k)$ 、 $b(k)$ を2乗誤差最小の意味で最適に推定する。

まず、(3)式から検出器ゲイン $a(k)$ を推定する。検出器ゲイン誤差 $\Delta a(k)$ を $\Delta a(k) = a(k) - 1$ により定義し、また、分散 $\sigma^2(k)$ をバイアス成分 σ_0^2 と変化成分 $\sigma_1^2(k)$ に分離し、 $\sigma^2(k) = \sigma_0^2 + \sigma_1^2(k)$ と表わす。通常ゲイン誤差 $\Delta a(k)$ は、設定ゲイン1に比べて十分小さい。また、(11)式より、ライン数 N を十分大きくとれば、バイアス成分 σ_0^2 が一定であるのに比べ、変化成分 $\sigma_1^2(k)$ は N^{-1} のオーダーで減少する。そこで、(3)式を、

$$\sigma^{2'}(k) = \sigma_0^2 + \sigma_1^2(k) + 2\sigma_0^2 \Delta a(k) \quad (12)$$

と線形化する。検出器ゲイン $a(k)$ を求めるためには、出力画像の検出器ごとの分散値 $\sigma^{2'}(k)$ から右辺第3項の $\Delta a(k)$ を推定すればよい。一般に、他の雑音信号と加算された信号を、2乗誤差最小で推定する演算は、ウィーナーフィルタで実現できる¹⁴⁾。そこで、検出器ゲイン誤差 $\Delta a(k)$ の推定は、以下の演算となる。

$$\begin{aligned} \Delta \hat{a}(k) &= \frac{1}{2\sigma_0^2} F^{-1} [H\sigma^2(v) F\{\sigma^{2'}(k)\}] \\ H\sigma^2(v) &= 1 - P\sigma^2(v)/P\sigma^{2'}(v) \\ \text{ただし、} H\sigma^2(0) &= 0 \end{aligned} \quad (13)$$

ここで、 F^{-1} はフーリエ(逆)変換を、 H はフィルタ係数を、記号 $\hat{}$ は推定値であることを表わす。つぎに、(12)式を変形した、

$$\frac{m'(k)}{\hat{a}(k)} = m(k) + \frac{b(k)}{\hat{a}(k)} \quad (14)$$

ここで、 $\hat{a}(k) = \Delta \hat{a}(k) + 1$

に対し、(13)式と同様のウィーナーフィルタを用いる。すなわち、

$$\begin{aligned} \hat{b}(k) &= \hat{a}(k) F^{-1} [Hm(v) F\{\frac{m'(k)}{\hat{a}(k)}\}] \\ Hm(v) &= 1 - Pm(v)/Pm'/a(v) \end{aligned} \quad (15)$$

と、オフセット $b(k)$ を推定できる。

(13)、(15)式で、各検出器のゲイン、オフセットの推定値 $\hat{a}(k)$ 、 $\hat{b}(k)$ を求めた後、出力画像1画素ごとに、次式で補正画像 $\hat{x}(j, k)$ を求め、検出器感度誤差による出力画像上のノイズを除去する。

$$\hat{x}(j, k) = \{x'(j, k) - \hat{b}(k)\} / \hat{a}(k) \quad (16)$$

2.4 フィルタ形状の検討と推定精度の評価

ウィーナーフィルタ(13)、(15)式の関数形状を(7)式の画像相関モデルに基づいて検討する。

まず、原画像に対する検出器別統計量の、空間周波数特性 $Pm(v)$ 、 $P\sigma^2(v)$ を、(9)、(11)式で与える。つぎに、ノイズを含む画像の検出器別統計量の周波数特性 $Pm'(v)$ 、 $P\sigma^{2'}(v)$ を、検出器誤差 $\Delta a(k)$ 、 $b(k)$ は無相関の白色雑音であると考え、(9)、(11)式に、周波数 v によらない一定パワー n_m^2 、 n_σ^2 を加算したものとする。

したがって、たとえば平均値に関するウィーナーフィルタの形状は、(15)式より、

$$Hm(v) = \frac{v^2 + \beta^2}{v^2 + (Km/Nn_m^2 + \beta^2)} \quad (17)$$

となる。

周波数特性 $Pm(v)$ 、 n_m^2 、フィルタ $Hm(v)$ の形状を模式的に Fig. 5 に示す。これらの模式的関係は、検出器別分散を用いた、ゲイン誤差の推定に関しても同様に成り立つ。検出器誤差の高い周波数成分は精度よく推定できるが、低い周波数については精度が下がる。パーシバルの定理から、各検出器誤差の推定誤差2乗和は、Fig. 5の斜線部分の面積 S に比例することがいえる。統計量を求めるライン数 N を大きくすると、フィルタ値が $1/2$ となる周波数 vc は小さくなり、推定誤差を表わす面積 S は、ライン数 N の $1/2 \sim 1$ 乗に比例して減少する。

2.5 撮像画像を用いたフィルタの設計

撮像画像、すなわち補正すべき画像自身を用いて、(13)、(15)式のウィーナーフィルタの形状を決定する。

Fig. 5 Wiener filter to estimate detector errors

ウィナーフィルタ式において、検出器感度のばらつきによるノイズを含む画像に対する検出器別の分散、平均の周波数特性 $P\sigma^{2'}(v)$, $Pm'(v)$ は、出力画像 $x'(j, k)$ の分散 $\sigma^{2'}(k)$, 平均 $m'(k)$ のフーリエ変換から推定できる。しかし、ノイズを含まない画像に対する周波数特性 $P\sigma^2(v)$, $Pm(v)$ を、出力画像から直接推定することはできない。そこで、原画像の 2 次元周波数特性の空間連続性を利用し間接的に推定を行う。検出器ごとの平均値の周波数特性は、2 次元フーリエ変換の定義から明らかなように、原画像の 2 次元周波数特性の v 軸 ($u=0$) 上の断面であり、原点付近を除いて、 v 軸と隣接するライン (たとえば $u=-1$) 上の断面とほぼ等しい。分散値に対しても、分散画像 $\{x(j, k) - m(k)\}^2$ について同様のことがいえる。2 次元周波数特性の ($u=-1$) 上の周波数特性は、荷重計算による分散と平均、

$$\sigma_1^2(k) \triangleq \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \{x(j, k) - m(k)\}^2 \left\{ \cos \frac{2\pi}{N} j + i \sin \frac{2\pi}{N} j \right\} \quad (18)$$

$$m_1(k) \triangleq \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x(j, k) \left\{ \cos \frac{2\pi}{N} j + i \sin \frac{2\pi}{N} j \right\} \quad (19)$$

の、1 次元パワースペクトラム $|F[\sigma_1^2(k)]|^2$, $|F[m_1(k)]|^2$ により推定できる。

ところで、原画像に対する荷重計算による平均、分散は実際に計算することはできないが、ノイズを含む出力画像 $x'(j, k)$ に対する、同一の荷重計算による分散 $\sigma_1^{2'}(k)$ は求めることができる。両分散の間には、

$$\begin{aligned} \sigma_1^{2'}(k) &\triangleq \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \{x'(j, k) - m'(k)\}^2 \left\{ \cos \frac{2\pi}{N} j + i \sin \frac{2\pi}{N} j \right\} \\ &= (1 + \Delta a(k))^2 \sigma_1^2(k) \end{aligned} \quad (20)$$

の関係が成り立つ。いま、ゲイン誤差 $\Delta a(k)$ は 1 に比べ、十分小さい白色雑音であり、また推定したい値自身であるため、フィルタ中の周波数特性 $P\sigma^2(v)$ の推定には、分散 $\sigma_1^2(k)$ のパワースペクトラムのかわりに、 $\sigma_1^{2'}(k)$ のパワースペクトラムをそのまま用いる、また、荷重計算による出力画像の検出器別平均値 $m_1'(k)$ は、 $m_1'(k) = a(k)m_1(k)$ (21) と表わされ、ゲインの推定値 $\hat{a}(k)$ で除すことにより、 $m_1(k)$ を推定できる。そこで、周波数特性 $Pm(v)$ の推定には $m_1'(k)/\hat{a}(k)$ のパワースペクトラムを用いる。

なお、通常分散値を求める際、計算処理システム上では、2 乗平均値から平均値の 2 乗を引くことにより、全画像データの記憶と繰返し読み出しを避けるように、(18) 式の荷重計算による分散値も、2 乗値の荷重平均と、荷重計算による平均値をもとに効率的に計算することができる。

Fig. 6 Two dimensional power spectrum of image data with random stripes

以上により、検出器感度のばらつきによるノイズを含む出力画像 $x'(j, k)$ から、ノイズを含まない原画像 $x(j, k)$ に対する検出器ごとの統計量の周波数特性を推定できた。なお、実際の画像データをフーリエ変換して求めた 2 次元パワースペクトラムは、滑らかではない。したがって、 v 軸上でのパワースペクトラムと隣接ライン上のパワースペクトラムからフィルタ式に従って得られる、ウィナーフィルタの形状も滑らかではない。そこで、前節の統計モデルに基づくフィルタ形状 (17) 式を最小 2 乗法によりあてはめ、滑らかなフィルタ形状を求める。

Photo. 1 の画像に加算的縞状ノイズを加え、2 次元パワースペクトラムを求めた例を、Fig. 6 に示す。縞状ノイズは、 u 軸上でつい立状に分布する。乗算的縞状ノイズも微小であれば、2 乗画像のパワースペクトラム上で同様の分布を示す。提案強度補正手法は、Fig. 6 に示す顕著なノイズ成分を周囲のパワースペクトラムから補間し、ノイズの低減を図るものであるとも解釈できる。ただし、膨大な 2 次元フーリエ変換、逆変換演算を要しないこと、統計モデルを用い補正精度の向上を図れることが、提案手法の特徴である。

3. 画像補正実験

検出器感度誤差を含むリニアアレイセンサ画像を、ランドサット衛星の MSS 画像データから模擬的に作り、提案方式による補正実験を行った。使用した MSS 画像は Photo. 1 に示したものである。画像のデータ点数は、たて横 2048 であり、1 画素 128 レベルである。Photo. 2 に、リニアアレイセンサの検出器感度むらを模擬して得た画像の一部を、拡大して示す。たて方向にランダムな縞模様が重畳している。比較的高レベルの画像強度をもつ陸域を強調し (a) に、低レベルの海域の縞模様を強調し (b) に示す。なお、検出器のゲイン $a(k)$, オフセット $b(k)$ の値は、平均 1.0 標準偏差 0.02, 平均 0.0 標準偏差 2.0 の白色雑音とした。

まず, Photo. 2 の画像データ $x'(j, k)$ に対し, 検出器ごとの平均値 $m'(k)$, 分散値 $\sigma^{2'}(k)$ と, (18), (19)式の荷重計算による平均値 $m_i'(k)$, 分散値 $\sigma_i^{2'}(k)$ を求める. つぎに, 検出器ゲイン誤差を推定するため, 分散値 $\sigma^{2'}(k)$, $\sigma_i^{2'}(k)$ より (13)式のウィナーフ

(a) the higher level contrast is enhanced (b) the lower level contrast is enhanced

Photo. 2 Simulated linear array image with stripe noises. An area in Photo. 1 is enlarged to show the stripes.

ィルタの演算を行う. **Fig. 7(a)**, **(b)**に, それぞれの分散値のパワースペクトラムを示す. **Fig. 7(a)**はノイズを含む画像に対する検出器別分散値の周波数特性 $P\sigma^{2'}(v)$, 同図**(b)**はノイズのない原画像に対する同周波数特性 $P\sigma^2(v)$ の推定値として用いられる. (13)式のフィルタ形状 $H\sigma^2(v)$ を, 同図**(c)**に示す. 前述の統計モデルに基づく関数を最小2乗法であてはめ, 平滑化したフィルタ形状も示す. **Fig. 7(d)**は, (13)式により推定した検出器ゲイン $\hat{a}(k) = (1 + \Delta\hat{a}(k))$ を真のゲイン $a(k)$ と比較し検出器 $k=1 \sim 120$ について示したものである.

つぎに, 検出器オフセットを平均値 $m'(k)$, $m_i'(k)$ より推定する. ただし, 平均値 $m'(k)$ については, 検出器ゲインの推定値 $\hat{a}(k)$ により除しておく. **Fig. 8**は, **Fig. 7** に対応するものである. 検出器別平均値のパワーが, 比較的小さい空間周波数から, ノイズのパワーより小さくなるため, フィルタ形状の立ち上が

(a) power spectrum of variance $\sigma^{2'}(k)$

(b) power spectrum of weighted variance $\sigma_i^{2'}(k)$

(c) Wiener filter

(d) estimated detector gain

Fig. 7 Estimation of detector gain.

(a) power spectrum of mean $m'(k)$ (b) power spectrum of weighted mean $m'_w(k)$

(c) Wiener filter

(d) estimated detector offset

Fig. 8 Estimation of detector offset

(a)

(b)

Photo. 3 Corrected image corresponding to Photo. 2

りが早い。その結果、オフセット推定精度も、Fig. 7 (d)のゲイン推定精度に比べ高いことがわかる。

このようにして推定した検出器ゲインとオフセットにより、(16)式で画像データを補正した。補正画像を Photo. 2 の未補正画像と対応させ、Photo. 3 に示す。原画像データとの RMS (Root Mean Square) 偏差は、未補正画像の 2.03 レベルから、補正後の画像で 0.59 レベルへと低下し、補正前の画像に見られた縦縞が消

えた。検出器の感度のばらつきを推定できたことにより、効果のある画像補正を行えたといえる。

4. おわりに

多数の検出器が直線的に並んだリニアアレイセンサによる画像の、検出器感度誤差に起因する縞状ノイズの補正方式を提案した。本方式は、検出器ごとに出力画像統計量を求め、原画像と検出器感度誤差の統計モデルに基づくウィナーフィルタにより、2乗誤差最小の意味で最適に各検出器の感度のばらつきを推定し、画像強度を補正するものである。提案方式により、ランドサット MSS 画像を利用して作成したりニアアレイセンサ模擬画像を補正し、その有効性を確かめた。なお、本文では、撮像系の例として衛星撮像システムを述べたが、提案方式はいかなるリニアアレイ型撮像系の検出器感度誤差の補正に対しても有効である。

最後に、本研究を進めるにあたりご助言とご討論を

いただいた，(株)日立製作所システム開発研究所川崎
淳所長，井原廣一副所長，春名公一部長，および研究
室各位に厚く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) M. Chevreil, M. Courtois and G. Weill: The SPOT Satellite Remote Sensing Mission, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 47-8 (1984)
- 2) K. Tsuchiya: Marine Observation Satellite (MOS)-1, Latin American Satellite Remote Sensing Regional User's Meeting, Sao Jose dos Campos, Brazil (1981)
- 3) H. Ihara, F. Komura, K. Homma, M. Kosaka, M. Takahashi and Y. Yamamoto: High Precision Modeling of Landsat Imagery Distortion, IGU Commission on Geographic Data Sensing and Processing (1980)
- 4) 古村，本間：衛星画像処理技術，計測と制御，24-3，234/241 (1985)
- 5) R. C. Gonzalez and P. Wintz: Digital Image Processing, Addison-Wesley Publishing Company, 218/219 (1977)
- 6) A. Rosenfeld and A. C. Kak: Digital Picture Processing, Academic Press, Inc. (1976)
- 7) 安岡，R. M. Haralick: リモートセンシング画像ピーク雑音の除去，国立公害研究所報告，第39号，119/128 (1983)
- 8) 桜井，木村，興石，倉益：可視近赤外放射計用CCDイメージセンサについて，第5回リモートセンシングシンポジウム資料 (1979)
- 9) Manual of Remote Sensing: I, American Society of Photogrammetry, 776/777 (1983)
- 10) 本間，坪井，久保：リニアアレイセンサの強度補正方式，第7回リモートセンシングシンポジウム資料 (1981)
- 11) SPOT IMAGE: SPOT NEWS LETTER, Aug. (1982)
- 12) W. K. Pratt: Digital Image Processing, John Wiley & Sons, 20/22 (1978)
- 13) 森下，小畑：信号処理，(社)計測自動制御学会，95/97 (1982)
- 14) H. C. Andrews and B. R. Hunt: Digital Image Restoration, Prentice-Hall, 132/140 (1977)