

佐野 誠, 藤原義也, 檜垣和夫

Development of Image and Space Recognition System Applied FPGA Devices  
SANO Makoto, FUJIWARA Yoshinari, HIGAKI Kazuo

We examined the method for extracting the noise which is included for the image. Generally, the noise is extracted by comparing the gray level of the object image with gray level of the reference image, but we extracted the noise using frequency components of the reference image and the object image.

In order to design this method easily by hardware circuits, we also improved this method by geometry processing.

キーワード：ノイズ抽出，離散的フーリエ変換，位相スペクトル，振幅スペクトル，FPGA

## 1 緒 言

これまでのFA検査装置では，対象となるワークに対して製造工程により発生しやすい欠陥パターンをあらかじめ特定しておき，その特定した欠陥パターンを検出できるような特徴量を画像処理により求めることによって欠陥検査を行っていた。従って，検査アルゴリズムはワークに特有のものとなるので，対象のワークが変わればアルゴリズムの変更が必要となる。

特に印刷物の検査等のように，印刷工程によって生じやすいノイズはある程度特定することはできるが，印刷対象のパターン（画像）が変更になれば，網点やドクタライン等のノイズを有効に抽出するためには，アルゴリズムの変更が必要となる場合や，アルゴリズムの変更は必要なくても設定するしきい値を最適にするためのチューニングが必要になるなど，作業量が多大となったり画像処理に対する知識や経験が必要になったりする<sup>1)</sup>。

そこで印刷物の検査等を対象にして，ノイズ抽出のアルゴリズム設定でワーク毎に特化したアルゴリズムの変更やチューニングが不要になるような処理法を試みた。

本手法は，画像濃度値をそのまま利用するのではなく，周波数変換することにより，周波数領域での特徴量を用いて，チューニング不要となるアルゴリズムの可能性を追求した。

また，本手法を高速に処理するためには，FPGA等のハードウェアで実現させることが望ましい。そこでverilog-HDL設計のためのハードウェア向

きの処理についても検討した。

## 2 画像に含まれるノイズの抽出

ノイズを抽出する方法について考えてみる。本報告では，基準となる画像を参照画像  $f(x,y)$  と称し，参照画像と比較してノイズの有無を検査したい対象の画像を対象画像  $g(x,y)$  と称することにす

る。ノイズが対象画像に混入した場合，どの位置にどのようなノイズが入るのかは予め知ることにはできない。参照画像とノイズを含んだ対象画像を何らかの方法で比較することによりノイズを検出する。

一般的に考えられるのが，2つの画像の濃度値の差分を求める方法である<sup>2)</sup>。すなわち  $n \times n$  画素の参照画像  $f(x,y)$ ，対象画像  $g(x,y)$  に対して式(1)によりノイズ画像  $n(x,y)$  を求める。

$$n(x,y) = |g(x,y) - f(x,y)| \quad (1)$$
$$x = 0,1,\dots,n-1 \quad y = 0,1,\dots,n-1$$

画像を入力する CCD カメラやスキャナ等のレンズ，受光素子等の性能や外的要因等により，同じ画像を2回取り込んだ場合，得られる画像データは，1回目の画像データと2回目の画像データでは全く同じ数値データになることは期待できない（再現性の限界）。また対象画像を入力する際に，参照画像に対して  $x$  方向や  $y$  方向に位置ずれを起こしていると，単純に差分を取れば位置ずれによる影響がそのまま差分の結果に現れる。

そこで x 方向, y 方向に画像を平行移動して,  $f(x,y)$  と  $g(x,y)$  の差分絶対値の総和が最も小さくなるように画像を重ね合わせてから差分を求める方法が考えられる。ここでは残差法と称することにする。評価関数  $R(a,b)$  を式(2)のように定義する。

$$R(a,b) = \sum_{x=0}^{n-1} \sum_{y=0}^{n-1} \{g(x+a, y+b) - f(x,y)\} \quad (2)$$

$$-d \leq a \leq d, -d \leq b \leq d$$

ただし,  $a, b$  は整数,  $d$  は探索する位置ずれ幅を与える適当な正数である。このとき, 式(2)の  $R(a,b)$  を最小にする  $a, b$  が画像を重ね合わせるための位置補正となり, このときの差分絶対値



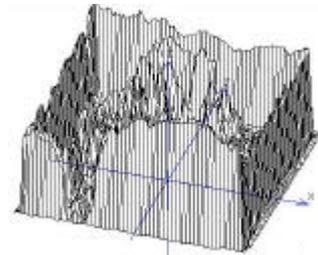
(a) 参照画像



(b) 位置ずれした対象画像



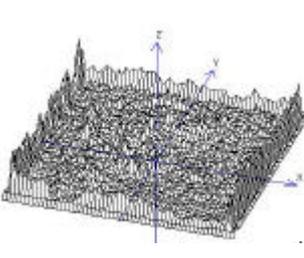
(c) ノイズ抽出結果  
(位置補正なし)



(d) (c)の立体表示



(e) ノイズ抽出結果  
(残差法)



(f) (e)の立体表示

図1 ノイズ抽出の例

を式(1)で求めたものがノイズ画像  $n(x,y)$  になる。

図1にノイズ抽出の例を示す。(a)は参照画像, (b)は位置ずれをした対象画像で, (c)は式(1)により求めた結果, (d)は(c)のノイズ結果を立体表示したものである。(e)は残差法によりノイズを抽出した結果であり, (f)はその立体表示である。なお, 画像のずれは x, y 方向への平行移動のみを考え, ねじれ(回転方向)のずれに対してはここでは考慮しないものとする。

ところで画像の濃度値をフーリエ変換すると, 画像の周波数成分(振幅スペクトルおよび位相スペクトル)の情報を得ることができる。また周波数成分を逆フーリエ変換すると濃度値を得ることができる。

画像のフーリエ変換において, 画像の濃淡情報が振幅スペクトル(振幅特性)によって表され, その濃淡の構造(分布)が位相スペクトル(位相特性)によって表されることが一般的に知られている<sup>3),4)</sup>。従って, ノイズを含んだ対象画像の場合, そのノイズの構造(分布)の特徴は対象画像の位相特性に現れることが考えられる。

本手法の特徴は対象画像の位相スペクトルに着目してノイズ抽出を試みるものである。

アルゴリズムを図2に示す。まず参照画像  $f(x,y)$  と対象画像  $g(x,y)$  に対してそれぞれ離散的フーリエ変換を行い, 参照画像の振幅スペクトル  $|F(n1, n2)|$  と, 対象画像の振幅スペクトル  $|G(n1, n2)|$ , 対象画像の位相スペクトル  $\phi_G(n1, n2)$  を求める。求めたそれぞれの周波数成分から, ノイズの周波数成分  $N(n1, n2)$  を以下のように算出する。

$$R[N(n1, n2)] = Amp \times \cos \mathbf{q} \quad (3)$$

$$I[N(n1, n2)] = Amp \times \sin \mathbf{q} \quad (4)$$

$$Amp = |G(n1, n2)| - |F(n1, n2)| \quad (5)$$

$$\mathbf{q} = \arctan \{ I[G(n1, n2)] / R[G(n1, n2)] \} \quad (6)$$

式(3)の  $R[N(n1, n2)]$  は,  $N(n1, n2)$  の実部を表し, 式(4)の  $I[N(n1, n2)]$  は  $N(n1, n2)$  の虚部を表すものとする。Amp は対象画像と参照画像の振幅スペクトルの差を表す。

ノイズの振幅スペクトルを対象画像の参照画像の振幅スペクトルの差として求め, ノイズの位相スペクトルについては対象画像の位相スペクトルをそのまま利用した。

求めたノイズの周波数成分  $N(n1, n2)$  を逆フーリエ変換することでノイズ画像の濃度値  $n(x,y)$  を求める。

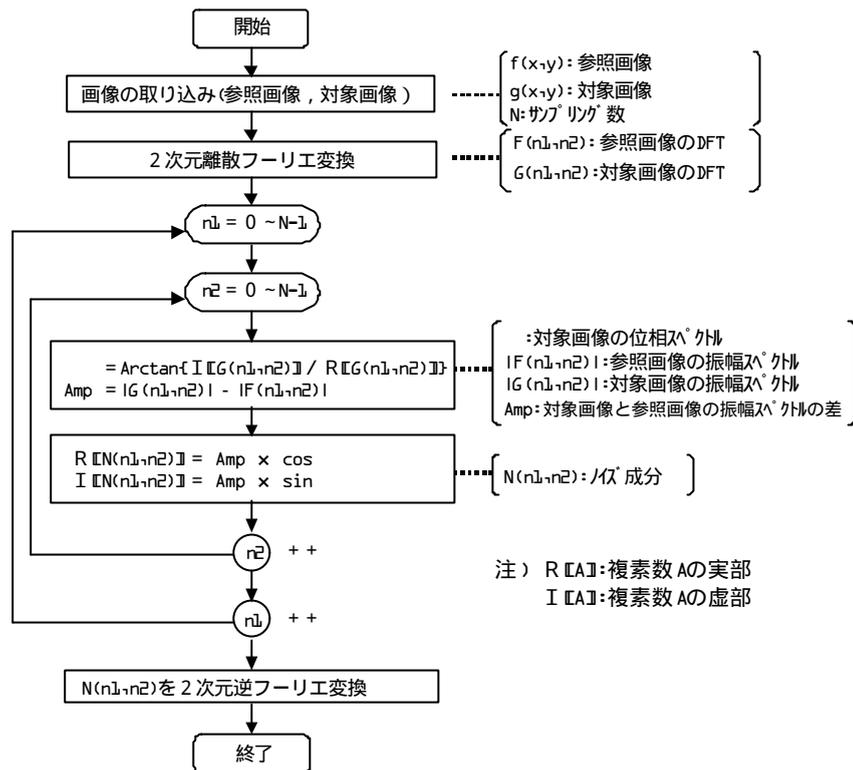


図2 本手法のアルゴリズム

### 3 シミュレーション

シミュレーションの方法について説明する。まずサンプル画像をプリンタで印刷して、それをスキャナにかけて画像取得したものを参照画像とする。次に、サンプル画像を再度スキャナに同じようにセットして画像取得したものを対象画像とする。ノイズはイメージエディタにより対象画像に加えた。Visual Basic でプログラミングしてシミュレーションを行った。本手法によるノイズ抽出と残差法によるノイズ抽出の結果を図3に示す。

図3のノイズ結果の表示について説明する。本手法は残差法と比較して、そのアルゴリズムの性質上、抽出結果の濃度値が全体的に低い値となって求まる。そこで、本手法と残差法の性能比較を視覚的にわかりやすくするために、対象画像に対して、それぞれの手法によって抽出されたノイズの最高値を濃度値100として正規化した。その結果を濃度値40をしきい値として、濃度値0~40の範囲をカットすることにより、濃度値40を0に、濃度値100を60として表示させた。

本手法と残差法で抽出したノイズの定量的評価を図4に示す。

グラフの横軸は、抽出したノイズの最高値を

100として正規化した濃度値である。縦軸はある正規化濃度値をしきい値としたときに、そのしきい値以上の濃度値をもった画素の総数を分母に、しきい値以上の濃度値をもった真のノイズ(イメージエディタで入力したノイズ)の画素数を分子として算出した真のノイズ抽出率を表す。すなわち、抽出したノイズのうち、真のノイズがどれくらい含まれているかをしきい値の関数として表している。

(a)を見ると本手法より残差法の方が低いしきい値で抽出率1になっているのでよい結果を得ているが、(b)においては本手法の方が低いしきい値で抽出率1になっており、(c)~(e)においても本手法の方がノイズ抽出率が高くなっている。特に(e)のように、ノイズが複数箇所に分散して発生するような場合には、本手法は残差法と比較して有効性が顕著に認められる。

シミュレーションの結果が、使用したサンプル画像や入力したノイズに依存している可能性も否定できないので、理論的解析やそれに基づく定量的評価について今後の検討課題としたい。

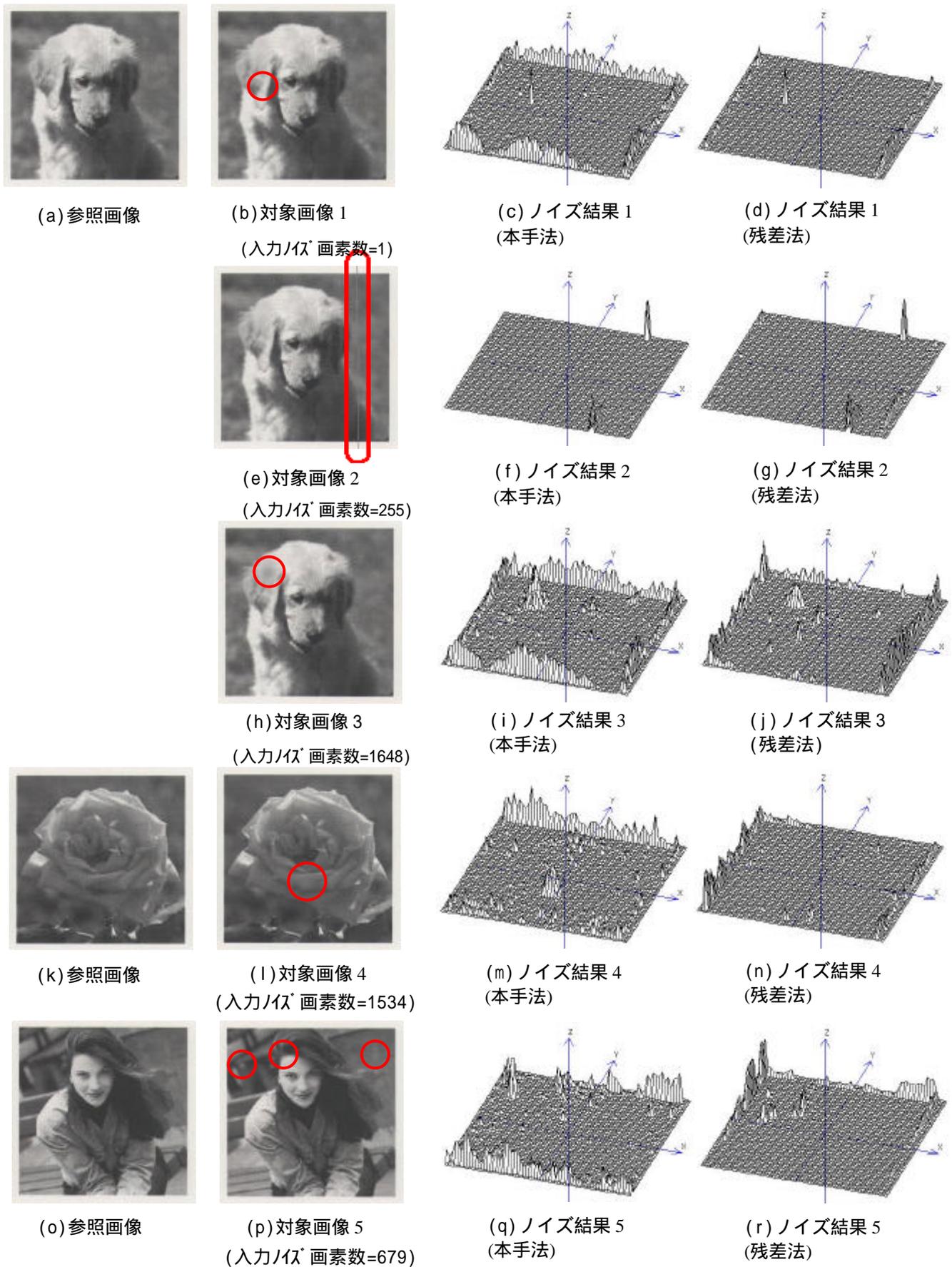


図3 シミュレーション結果

#### 4 ハードウェア設計の検討

本手法のアルゴリズムをハードウェアで実現する上で、距離算出について検討する。

と  $R[G(n1, n2)]$ ,  $I[G(n1, n2)]$  には図5に示すような関係があるので、式(3), (4)は式(7), (8)のように書き表される。

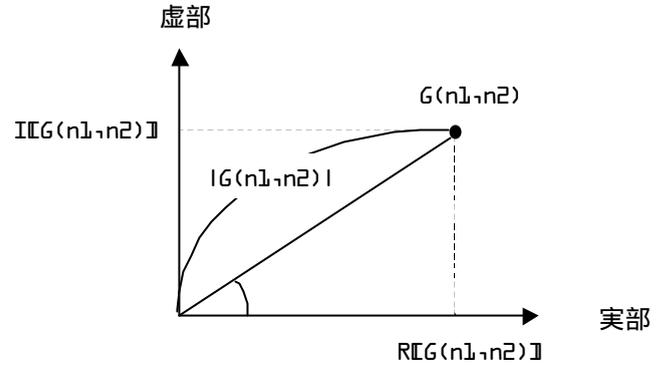


図5 と実部，虚部の関係

$$R[N(n1, n2)] = \frac{1 - |F(n1, n2)|}{|G(n1, n2)|} \times R[G(n1, n2)] \quad (7)$$

$$I[N(n1, n2)] = \frac{1 - |F(n1, n2)|}{|G(n1, n2)|} \times I[G(n1, n2)] \quad (8)$$

式(7), (8)では、式(9)のような絶対値（ユークリッド距離）を求めている。

$$|G(n1, n2)| = \sqrt{R[G(n1, n2)]^2 + I[G(n1, n2)]^2} \quad (9)$$

式(9)を見ると、掛け算を2回、足し算を1回、平方根を1回演算している。これをハードウェアで実現すると、回路規模が大きくなり、処理時間もかなりかかる。特に平方根は回路規模と処理時間とも負担が大きい。そこで、式(9)をそのまま演算するのではなく、絶対値の近似を求める方法を幾何学的に検討した。

2つの実数  $a, b$  があり、 $a > b$  であるとする。

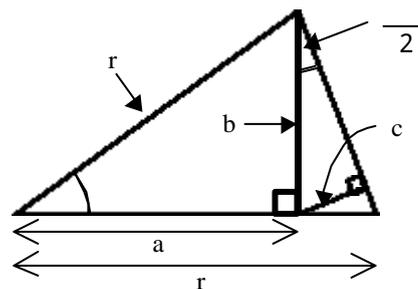


図6 幾何学的な検討

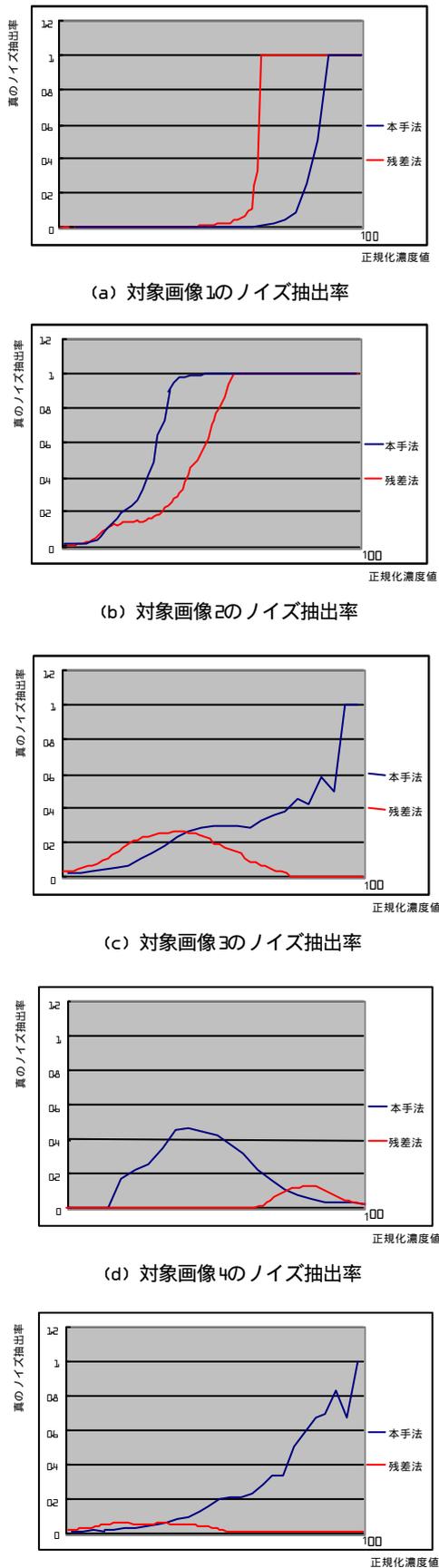


図4 ノイズ抽出率

このとき，

$$r = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (10)$$

の近似値を考える。図6の二等辺三角形において以下の関係が成り立つ。

$$c = b \times \sin \frac{q}{2} \quad (11)$$

$$r - a = \frac{c}{\cos \frac{q}{2}} \quad (12)$$

式(11)，(12)より

$$r - a = b \times \tan \frac{q}{2} \quad (13)$$

が成り立つ。ここで  $q < 45^\circ$  ( $a > b$ ) であり

$$\tan \frac{q}{2} \cong \frac{b}{2a} \quad (14)$$

が成り立つとみなせば，式(13)，(14)より

$$r \cong a + \frac{b^2}{2a} \quad (15)$$

となる。ここで  $a > b$  なので，

$$r \leq a + \frac{b}{2} \quad (16)$$

が求まる。

本研究では式(16)の右辺を  $r$  の近似値としてハードウェア設計することにした。右辺の割り算 ( $b/2$ ) あるいは掛け算 ( $1/2 \times b$ ) をハードウェアで実現する場合は、除算器や乗算器は必要ない。従って  $r$  を求めるための回路は加算器1個で実現できる。 $a > b$  の条件を満たすためには1個のコンパレータが必要になるので式(16)を求めるには加算器1個、コンパレータ1個で実現できる。

離散的フーリエ変換については、FFT (高速フーリエ変換) のアルゴリズムにより高速化を図っている<sup>5)</sup>。主なハードウェア仕様を表1に挙げる。

表1 主な仕様

| 主な仕様項目      | 仕様                  |
|-------------|---------------------|
| 入力画素数       | 256 × 256画素         |
| 入力データ幅      | 8bit (符号ビットなし)      |
| 振幅スペクトルデータ幅 | 25bit (符号ビット1bit含む) |
| 位相スペクトルデータ幅 | 25bit (符号ビット1bit含む) |
| 回転子データ幅     | 11bit (符号ビット1bit含む) |
| 積和演算パイプライン数 | 4段                  |

Verilog-HDL による設計は、年度内に終了することができなかった。一つの原因はFPGA デバイスの選定がなかなか進まなかったことがある。FPGA デバイスの回路規模や内蔵メモリ容量、ハードウェアコアの積算器を有するか、また有する場合にはそのビット幅、パッケージのピン数、さらには入手の容易さなどの検討項目により、ターゲットデバイス選定に変更が生じるたびに、デバイスの制限に応じたハードウェア設計の変更を繰り返したことが主な要因である。

## 5 結 言

印刷物の検査等を対象にして、対象画像からノイズを抽出する汎用的な処理法を、周波数成分を活用することにより試みた。

シミュレーションの結果、一般的な濃度値処理法である残差法と比較して、本手法の有効性が視覚的に確かめられた。特に、ノイズが複数箇所分散しているような場合にはその有効性が顕著に現れている。

本アルゴリズムをハードウェアで高速に処理するために、離散的フーリエ変換はFFT (高速フーリエ変換) のアルゴリズムによりHDL設計した。積和演算は4段のパイプライン制御により高速化を図った。また距離演算についてはユークリッド距離に変わるハードウェア向きの演算回路を採用した。

今後の課題としては、ノイズ抽出のメカニズムを理論的に解析して、本手法の有効性を定量的に示すことができるようにすることと、HDLによる設計を完成させることである。さらには、ねじれ方向の位置ずれに対して有効となるような手法も検討課題である。

本研究は、広島県産業科学技術研究所の岩田プロジェクトの皆様にご指導ご助言を頂きました。深く感謝いたします。

## 文 献

- 1) 栗原浩：印刷の知識，日本印刷新聞社，(2001.7)
- 2) 高木幹雄，下田陽久：画像解析ハンドブック，東京大学出版会，(1991.1)
- 3) 長橋宏：映像情報メディア学会誌，Vol.54，No.10(2000)，1408
- 4) 小林孝次他：画像ラボ，Vol.8，No.3(1997)，23
- 5) 三上直樹：アルゴリズム教科書，CQ 出版社，(1996.5)