回路パターン検出信号のモジュレーション補正法*

原 靖 彦** 土 井 秀 明** 柄 崎 晃 一***
飯 田 正† 南 谷 法 宏†† 野 原 稔††

Modulation Compensation of Detected Circuit Pattern Signals

Yasuhiko HARA, Hideaki DOI, Koichi KARASAKI, Tadashi IIDA, Norihiro MINATANI and Minoru NOHARA

When a circuit pattern is detected by an image sensor, degradation of the modulation of the detected image is inevitable. For automatic detection of defects in a pattern by image processing, a less degraded image is desirable. This paper presents a simple method to restore degraded modulation of a detected image. The method is intended for a practical image processing system. Its feature is that modulation compensation can be performed in real-time by a hard-wired logic circuit, so it can be implemented as a relatively simple circuit.

Key words: signal recovery, compensation of modulation, detection of pattern, pattern inspection, automated visual inspection

1. は じ め に

プリント配線パターンなどの回路パターンの欠陥を自動検査¹⁾するために、検出した回路パターン画像を2値化し、画像処理により欠陥を検査することを考える。正確な検査を行うためには2値化したパターン形状はもとのパターンの形状を忠実に再現していることが望ましい。検出パターンの形状を劣化させる要因としては、検出時に生じる検出信号モジュレーションの劣化がある。これは検出器および光学系等の空間周波数特性によって生じる。このようなモジュレーションの劣化を補正する手段は、信号回復法として研究が行われている。よく知られている手段としては空間周波数空間において高周波成分を強調する逆フィルタを適用する手法がある。また、信号回復用のフィルタを検出画像空間に適用(畳み込み積分)する手法がある²⁾。両者は演算を空間周波数空間で行うか、実空間で行うかの違いであり、互いに等価な手法である。前者はフーリエ変換により空間周波数特性を求めねばならない。後者はフィルタの内容が複雑になりがちである。これらの信号回復手法は、リアルタイムで処理を行わせようとすると、複雑な回路を作らねばならない。

本研究で提案したモジュレーション補正法は、厳密な信号回復手法を目指すのではなく、実用的見地から必要とされる範囲で信号の補正を行うことを目的とするものである。処理がリアルタイムで行えること、かつ、その回路が比較的簡単に実現できることを念頭におき開発を行った。

2. モジュレーション補正法

対象画像はXY平面上にあり、各点(X, Y)の濃度を $p(X, Y)$ とする。なお、対象画像は図1(a)に示すように配線ラインパターン、ランドと呼ばれる電極パターンおよび基材部分からなるものとする。パターン部分は暗く、濃度 $p(X, Y)$

は0に近く、また、基材部分は明るく、 $p(X, Y)$ は大きな値を持つものとする。パターンに挟まれた基材部分を「ギャップ」と称する。図1(b)は同図(a)のA-A'線上の濃度分布を示す。

検出光学系および検出器からなる検出手段により、このパターンを検出し、かつ記憶した画像を $f(m, n)$, $m=0, \dots, M$, $n=0, \dots, N$ とする。この画像は空間的にサンプリングされて画素情報として記憶されたものである。検出画像 $f(m, n)$ は検出に伴う信号の劣化を含んでいる。この劣化にはノイズの付加のほか、信号モジュレーションの劣化がある。ここで信号モジュレーションの劣化は、点広がり関数 $h(q, r)$, $q=0, \dots, Q$, $r=0, \dots, R$ によって記述できるものとする。また、この点広がり関数 $h(q, r)$ は正規分布関数によって記述されるものとする。

以下、簡単のために、取り扱う座標は検出や演算によって変化せず常に (m, n) で表されるものとする(従って、原画像を $p(m, n)$ で表す)。

検出された画像 $f(m, n)$ は、原画像である対象パターン画像 $p(m, n)$ と点広がり関数 $h(q, r)$ の畳み込み積分で表される。

$$f(m, n) = (1/M \times N) \times \sum_{q,r} h(q, r) \times p(m-q, n-r) \quad (1)$$

すなわち検出パターン $f(m, n)$ は点広がり関数 $h(q, r)$ による原画像 $p(m, n)$ の劣化像である。

(a) Detected pattern, $f(m, n)$ (b) Signal waveform along the line A-A'

Fig. 1 Example of a printed circuit pattern

* 原稿受付 平成7年2月2日

** (株)日立製作所生産技術研究所(横浜市戸塚区吉田町292)

*** (株)日立製作所コンピュータ事業本部製品企画本部(東京都品川区南大井6-27-18)

† (株)日立製作所汎用コンピュータ事業部(秦野市堀山下1)

†† 日立画像情報システム(株)(横浜市戸塚区吉田町292)

 (a) Signal waveforms of the original pattern, $p(m, n)$, the detected pattern, $f(m, n)$ and the redegraded pattern, $g(m, n)$

 (b) Modulation compensation coefficient, $k'(m, n)$

 (c) Signal waveforms of the detected pattern, $f(m, n)$ and the modulation compensated pattern, $p'(m, n)$

Fig. 2 Modulation compensation (Example for a 10 pixel gap)

本モジュレーション補正法では、検出パターン $f(m, n)$ を点広がり関数 $h(q, r)$ によって再度劣化させ、その画像を $g(m, n)$ とする。すなわち、

$$g(m, n) = (1/M \times N) \times \sum_{q,r} h(q, r) \times f(m-q, n-r) \quad (2)$$

次に、これと検出画像 $f(m, n)$ との比 $k'(m, n)^{-1}$ をとる。

$$k'(m, n)^{-1} = \frac{g(m, n)}{f(m, n)} \quad (3)$$

この比 $k'(m, n)^{-1}$ は、点広がり関数 $h(q, r)$ による画像劣化の度合を反映していると言える（この比を劣化係数と名づける）。

本方法では劣化係数の逆数 k' をモジュレーション補正の係数として検出画像 $f(m, n)$ に乗じる。すなわち、補正を加えた画像 $p'(m, n)$ は、次のように求まる。

$$p'(m, n) = k'(m, n) \times f(m, n) \quad (4)$$

この処理は、次のように考えることができる。もし、原画像 $p(m, n)$ が知れていれば（これは通常不可能なことだが）、これと検出画像 $f(m, n)$ との比

$$k(m, n)^{-1} = \frac{f(m, n)}{p(m, n)} \quad (5)$$

を求めれば、検出画像 $f(m, n)$ から、次のように原画像 $p(m, n)$ が求まる。すなわち、

 Fig. 3 Assumed point spread function, $h(q, r)$

 (a) Signal waveforms of the original pattern, $p(m, n)$, the detected pattern, $f(m, n)$ and the redegraded pattern, $g(m, n)$

 (b) Modulation compensation coefficient, $k'(m, n)$

 (c) Signal waveforms of the detected pattern, $f(m, n)$ and the modulation compensated pattern, $p'(m, n)$

Fig. 4 Modulation compensation (Example for a 10 pixel line)

$$p(m, n) = k(m, n) \times f(m, n) \quad (6)$$

式 (6) は当然の結果であるが、式 (4) は、式 (6) において、原画像 $p(m, n)$ を検出画像 $f(m, n)$ に、検出画像 $f(m, n)$ を再劣化画像 $g(m, n)$ に読み代えて補正係数 $k'(m, n)$ を計算したものと言える。この方法によると画像を改善することができることは明らかであるが、厳密な画像の復元はできない。しかし、画像処理を応用する立場からは、このような画像復元法で十分に効果を達成することができると考えられる。

以上の経過を図 2 によって示す。図 2 (a) に原画像 $p(m, n)$ の信号を示す。原画像は線幅 10 画素のギャップとする。濃度はギャップ部で $p(m, n) = 1.1$ 、それ以外で濃度 $p(m, n) = 0.1$ であるとする。これを検出した画像 $f(m, n)$ を同図 (a) に示す。 $f(m, n)$ は仮定された点広がり関数 $h(q, r) = (1/2\pi\sigma^2) \times \exp[-(q^2 + r^2)/2\sigma^2]$ によって劣化された画像である。 $h(q, r)$ は、 27×27 の画素範囲を有し、 $\sigma = 4$ である。図 2 (a) に示した画像信号 $g(m, n)$ は $f(m, n)$ を $h(q, r)$ によって再劣化した画像である。図 2 (b) は、検出信号 $f(m, n)$ と $g(m, n)$ から求めた補正係数 $k'(m, n)$ を示す。同図 (c) は、補正された検出画像 $p'(m, n)$ を示す。 $p'(m, n)$ は検出信号 $f(m, n)$ に比べてピーク P が高くなり、かつ、パターン端 E 近の信号の立上がり急峻になっていることが分かる。この理由は同図 (b) に示す補正係数 $k'(m, n)$ の波形を見れば分かる。 $k'(m, n)$ は検出信号 $f(m, n)$ のピーク P 付近で $k'(m, n) > 1$ 以上となり、

(a) Plots of the peak levels

(b) Plots of the trough levels

$f(m, n)$: Detected pattern
 $k'(m, n)$: Modulation compensation coefficient
 $p'(m, n)$: Modulation compensated pattern

 Fig. 5 Plots of peak and trough levels of modulation compensation coefficients, $k'(m, n)$, and compensated pattern $p'(m, n)$, vs. line and gap widths

Eを境に $k'(m, n) > 1$ および $k'(m, n) < 1$ となっているからである。

図4に幅10画素のラインパターンの場合の信号補正例を示す。内容的には図1の場合と同様である。同図(c)に示すように谷部Tの値がより小さくなり、モジュレーションが改善されている。

図5(a)は、ギャップについて横軸に線幅をとり、検出信号 $f(m, n)$ 、補正係数 $k'(m, n)$ および補正係数 $p'(m, n)$ のピーク値をプロットしたものである。補正係数 $k'(m, n)$ はパターン幅が10から5画素付近で極大値をとり補正効果が最大となる。また、 $k'(m, n)$ はパターン幅の増減に伴って減少し、1に近い値となることが分かる。図5(b)は同様にラインパターンに対するこれらの谷部値をプロットしたものである。ラインパターンに対して補正係数は25から20画素付近で極小になり補正効果が最大となる。本方法によると、パターン幅およびギャップ幅の小さい領域で（高空間周波数領域で）自然に補正係数が小さくなるので、ノイズを不必要に増幅することはない。

点広がり関数として、図3に示す分布を仮定して、補正実験を行った。図6および図7はその例を示すものである。図6(a)、図7(a)は検出パターンの画像 $f(m, n)$ 、図6(b)、図7(b)はそれぞれ画像 $f(m, n)$ のA-A'、B-B'線上の濃度分布を示す。図6(c)、図7(c)はモジュレーション補正を実行した画像 $p'(m, n)$ の濃度分布を示す。図6(a)のギャップ部Gおよび図7(a)のラインパターン部Dのモジュレーションが改善されていることが分かる。

3. ハードウェア回路と規模の縮小

本方法による補正をハードウェアでリアルタイムに実行することを考える。この場合、図8に示す回路で検出画像 $f(m, n)$

 (a) Detected pattern, $f(m, n)$

(b) Signal waveform along the line A-A'

 (c) Signal waveform of modulation compensated pattern, $p'(m, n)$ along the line A-A'

Fig. 6 Example of modulation compensation (I)

 (a) Detected pattern, $f(m, n)$

(b) Signal waveform along the line B-B'

 (c) Signal waveform of modulation compensated pattern, $p'(m, n)$ along the line B-B'

Fig. 7 Example of modulation compensation (II)

Fig. 8 Realtime convolution circuit

から $(Q+1) \times (R+1)$ 画素の局所画像を半導体記憶素子 M1 で切り出す³⁾。この記憶素子 M1 から並列に配線を取り出すことにより、切り出した局所画像の内容を画素ごとに取り出すこ

Values of the pixels $a_0, \dots, a_7$ of the function, h_1 are $h(q, r) \times 81$.
 Values of the pixels $b_0, \dots, b_7$ of the function, h_1 are $h(q, r) \times 9$.
 Values of the pixels $c_0, \dots, c_7$ of the function, h_1 are equal to $h(q, r)$.

Fig. 9 Abbreviated point spread function, h_1

とができる。また、点広がり関数 $h(q, r)$ は $(Q+1) \times (R+1)$ 画素の記憶素子 M2 にあらかじめ用意されており、同様に配線が取り出されている。次に、記憶素子 M1 および M2 から取り出された配線について、対応する画素同士の値を乗じてすべての和を取る演算回路を設ければ、一点の畳み込み積分を得ることができる。図 8 に示す回路は、時系列の画像信号 $f(m, n)$ が入力するにつれて、1 画素ずつシフトしながら順次 $(Q+1) \times (R+1)$ 画素の局所画像の切出しを行うので、 $f(m, n)$ のすべての画素に対して畳み込み積分が実行されることになり、劣化画像 $g(m, n)$ を得ることができる⁴⁾。

局所画素の切出しを $R=26$, $Q=26$ の大きさで行った場合、以上の回路では一点の畳み込み演算を求めるのに 27×27 画素すなわち 729 画素の記憶素子から並列に配線を取ることになる。ハードウェアの縮小を実現するために広がり関数 $f(m, n)$ として図 9 に示す計 25 個の代表点の画素のデータで代えることを試みた。点の取り方は中央で密に外側で粗にとった。これは点広がり関数 $f(m, n)$ は中央で高く、外側で低いので中央部分による寄与が高いことに対応するものである。

代表点画素を採用して、上記シミュレーションを行ったが、全画素を用いた場合と比べて、モジュレーションの差は 2% 以下であり、実効的な差はなかった。

このように代表点を用いることにより、大幅な回路規模の縮小に成功し、本方法の実用的有効性を確認できた。

4. モジュレーション補正特性の調整

以上、モジュレーション補正法について述べてきた。次に本モジュレーション補正法のもう一つの特徴について述べる。それは本補正法は、補正係数 $k'(m, n)$ を修正することによって、ギャップおよびラインに対する補正の効果を調整することができることである。すなわち、補正係数 $k'(m, n)$ は、1 以上のときギャップ検出信号のピークが高くなるように働き、また、1 以下のとき、ラインパターン検出信号の底部が低くなるように働くので、これに注目することにより、調整が可能となる。

具体的には、補正係数 $k'(m, n)$ を調整した補正係数 func

Fig. 10 Modification of modulation compensation characteristics

($k'(m, n)$) に置き換える。 $\text{func}(k'(m, n))$ は、 $k'(m, n)$ の値の大小や、正負に応じて値を変えるものとする。図 10 はこの例を示す。図 10 (a) は検出信号波形 $f(m, n)$ と再劣化画像 $g(m, n)$ の信号波形を示す。図 10 (b) は $k'(m, n) \leq 0$ のとき、 $\text{func}(k'(m, n)) = 1$, $k'(m, n) > 0$ のとき、 $\text{func}(k'(m, n)) = k'(m, n)$ と置いた場合の補正係数を示す。このとき補正画像 $p''(m, n)$ は、図 10 (c) に示すようにギャップのピーク部に対してはモジュレーション補正はこれまでどおりに行い、ライン底部に対してはモジュレーション補正を行わないことになる。この調整によって、ラインパターンおよびギャップに対するモジュレーション補正効果に違いを持たせることができる。例えば、図 10 (a) で信号を 2 値化した場合のライン幅 L_f およびギャップ幅 G_f と、図 10 (c) の場合のライン幅 $L_{p''}$ およびギャップ幅 $G_{p''}$ を比較すると、ライン幅 $L_{p''}$ は L_f に比べて狭くなっていることが分かる。

プリント配線パターンはギャップとラインパターンに対する検出信号のモジュレーションが異なる例である。図 11 (a) および図 12 (a) は検出画像 $f(m, n)$ を 2 値化した画像 $f(m, n)_{th}$ を示す。図 11 (b) および図 12 (b) はモジュレーション補正を行った画像 $p'(m, n)$ の 2 値化画像 $p'(m, n)_{th}$ を示す。図 11 (c) および図 12 (c) は調整した補正係数 $\text{func}(k'(m, n))$ を用いて補正を行った画像 $p''(m, n)$ の 2 値化画像 $p''(m, n)_{th}$ を示す。これらの画像を比較すると、図 11 (a) ではギャップの G 部が狭くなっている (図 13 参照)。図 11 (b) ではラインパターン欠陥部 D の幅が太って見える。これらの現象はギャップに対する信号モジュレーションの劣化とラインパターンに対

Fig. 11 Result of modified modulation compensation (I)

Fig. 12 Result of modified modulation compensation (II)

する劣化の度合いが異なるからである。図 11 (c) および図 12 (c) は、上述の補正係数の調整を行い、ギャップ、ラインパターンともバランス良い画像を得た例である。図 13 はギャップ G 部の画像 $f(m, n)_{th}$ および $p''(m, n)_{th}$ の拡大図を示す。 $p'(m, n)_{th}$ と $p''(m, n)_{th}$ はほぼ同形状である。

以上示したように、本モジュレーション補正法によって、検出したパターンの形状をより正確に再現することができるようになった。この技術によって信頼性の高いパターン検査を実現

Fig. 13 Enlarged shapes of gap G of patterns, $f(m, n)_{th}$ and $p''(m, n)_{th}$

することができた⁵⁾。

5. 結 言

回路パターンを検出した画像は原画像と比べて信号モジュレーションの劣化がある。この検出画像のモジュレーションの劣化を改善する補正手法を開発した。

- (1) 画像劣化を表す点広がり関数を仮定し、これによる検出画像の劣化度合から補正係数を求めて、信号モジュレーションを補正した。
- (2) 本補正法は信号回復自体を目的とするのではなく、画像処理を応用する場合に、検出信号の劣化による影響を低減することを目的とするものである。
- (3) 本補正法をリアルタイムで実行する比較的簡単な回路を考案した。
- (4) 本補正法は、ギャップとラインパターンとでモジュレーション劣化特性が異なるような場合にも、補正特性を調整することにより対応可能である。

参 考 文 献

- 1) 原 靖彦：プリント基板パターンの欠陥検査，計測と制御，26, 4 (1987) 327.
- 2) 河田 聡，南 茂夫：科学計測のための画像データ処理，CQ 出版社，(1994) 第 8 章.
- 3) M. Ejiri et al. : A Process for Detecting Defects in Complicated Patterns, Computer Graphics and Image Processing, 2, (1973) 326.
- 4) 谷内田正彦：コンピュータビジョン，丸善，(1990) 第 11 章 2 節.
- 5) 原 靖彦，土井秀明，柄崎晃一，飯田 正，古谷貴史，北村茂樹，南谷法宏，品田 聡：設計パターンとの比較による高精度プリント基板パターン検査装置，精密工学会誌，59, 6 (1993) 993.