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*

原 靖彦** 土井秀明** 柄崎晃一*** 飯田 正***
古谷貴史† 南谷法宏† 品田 聡† 北村茂樹†

Automated Inspection of Printed Circuit Board Patterns
Referenced to CAD Data

Yasuhiko HARA, Hideaki DOI, Koichi KARASAKI, Tadashi IIDA,
Takashi FURUTANI, Norihiro MINATANI, Satoshi SHINADA and Sigeki KITAMURA

This paper describes a system which automatically inspects defects in printed circuit patterns. The system is aimed to achieve the maximum defect detection capability, and has the function of automated recognition of fatality of detected defects. The system detects defects by comparing detected patterns with the patterns which are electrically-generated from CAD-data of the printed circuit patterns. Methods to accomplish the targets mentioned above are described: fluorescence detection method for exact pattern acquisition, modulation compensation method of detected signals, precise registration method of the two patterns, defects' fatality recognition method, etc.

Key words: inspection, defect detection, printed circuit board, image processing, pattern recognition

1. は じ め に

大型計算機のプリント基板はパターン幅 70 μm の銅配線が 600 mm $\times$ 800 mm の基板上に形成されている。配線パターンを完全無欠に作ることは難しく、製作後外観を検査する必要がある。パターンの外観検査の手法としては一般にパターンに特異な形状があるとこれを欠陥と判定する方式が広く用いられているが、正常なパターンに類似した欠陥を見逃すなどの制約がある¹⁾²⁾。

我々は、2つのパターンを比較して欠陥を検出するパターン比較法が最も高い検査性能を実現するものと考えて、この方式を開発してきた³⁾⁴⁾。しかしパターン比較法は、パターンを互いに精密に位置合わせすることが難しい。とくに大きなプリント基板の場合、基板の伸縮やひずみが大きく、またパターン寸法の公差もあるために、位置合わせは特に困難なものとなる。これらの困難を克服するための位置合わせ技術を開発

した。

開発した装置は、パターン比較法のなかでも最も高い検査信頼性を約束する設計パターンと検出パターンの画素ベースでの比較検査を実現している。このための設計パターンの発生法および欠陥を抽出する画像処理手法を開発した。また、汎用画像処理装置との協調により、検出した欠陥の致命性を判定することにより人に近い認識能力を実現することに成功した⁵⁾⁶⁾。その他、パターンを高い S/N 比で検出する蛍光検出法、検査対象パターン形状を正確に再現するための検出信号のモジュレーション補正法、微小な欠陥信号を検知するための 2 値化法を開発した。

2. パターン検出法および検出信号処理

本節では高い S/N 比でプリント基板パターンを検出する蛍光検出法、および検出信号からできるだけ正確な原信号情報（パターン形状）を再現するための画像処理法について述べる。

2.1 検出法

パターンを正確に検出するために、図 1 下部に示すように光ファイバ 1 を用いて超高圧水銀ランプ 2 からフィルタ 3 を通して紫色光を取り出し、基板パターン

* 原稿受付 平成 4 年 7 月 8 日

** 正 会 員 (株)日立製作所生産技術研究所 (横浜市戸塚区吉田町 292)

*** (株)日立製作所汎用コンピュータ事業部 (秦野市堀山下 1)

† (株)日立画像情報システム (横浜市戸塚区吉田町 292)

Fig. 1 Configuration of the inspection system

4を照明する。基材部（ガラスポリイミド）から発生する黄色の蛍光をフィルタ6を通してCCDリニアイメージセンサ（No. 1～4）で検出する。この蛍光検出法はパターン（銅）を「暗」、基材部を「明」として鮮明なシルエットの画像を検出することができる。画像の正確な検出は、この種の画像処理応用装置を成功させるためのかなめである。従来高速な蛍光検出はレーザ照明光を用いなければならなかったが⁷⁾、楕円反射球を用いた高能率なランプ光集光系、リニアセンサによる線状の検出部のみを照明する線形の光ファイバ出射口7、口径比1.6の明るい対物レンズ8および低ノイズのリニアイメージセンサ駆動回路・信号増幅回路を開発することにより通常光照明でも高速な検出に成功した⁸⁾⁹⁾。なおリニアセンサNo. 1～4は図1(a)に示すように、基板上の4つの線状部分を検出する。これを実現するために反射プリズム9を用いている。この配置によって光量の損失なしにリニアセンサNo. 1～4により1024×4=4096画素の検出が可能になる（半透鏡を用いると光量は半分になる）。2次元的にパターンを検出するためには、同図(a)に示すようにパターンを連続的にY方向に走査する。リニアセンサNo. 1～4の出力信号は3節に述べるように各々設計パターンと比較検査される。

2.2 シェーディング補正

検出信号は図1に示す前処理回路10により照明むらおよび検出器の感度のばらつきを補正する。これはあらかじめ検出した「暗」状態および「明」状態のデータから検出信号レベルの補正係数を計算し、これをもとに画素ごとに検出信号を補正するものである。補正は乗算器により係数をかけることによりリアルタイムで行う。これにより検出器の全幅にわたってほとんど一定レベルの検出信号を得た。

2.3 モジュレーション補正

基材は半透明であるために、図2(a)に示すように点照明に対して基材から発生する蛍光は広がった分布 D となる（点広がり関数 D ）。従って、基材からの蛍光の発生レベルは、注目点に照射した光量のみによって

決まるのではなく、その周囲に照射した光によっても決められる。このために図2(b)に示すように周囲に銅パターンがあると、蛍光の発生量が減る。このためにパターン間の間隔が狭くなると検出信号のモジュレーションが低下する（点広がり関数 D による検出信号の変換を F と呼ぶ）。その結果、図2に示す検出パターン V はもとのP.C.B.パターン U の形状を忠実に再現できなくなる。そこで検出パターン V に近似的な逆変換 F^{-1} を施して、もとのP.C.B.パターン U の信号に近い信号 V' を再現した。逆変換係数は、蛍光発生分布 D （点広がり関数）を試行錯誤的に想定して、この広がり関数 D を持つ変換 F によりなまった信号 $D \otimes V = S$ をもとめ、これと検出信号 V との比、 $C = V/S$ を逆変換係数とした（ $\otimes$ は畳み込み積分）。この方法により、点広がり関数 D と検出信号 V とから有効性のある信号補正を実現することができた。図2の下部に信号補正の例を示す。パターン間隔の狭い部分での検出信号のモジュレーションが良く改善されていることがわかる。厳密な逆変換では空間周波数空間での演算を行うことが必要であるが、本手法では単に画素ごとのかけ算 $V' = C \cdot V$ を行えば良い。このため補正はハードウェア回路によりリアルタイムで行うことができる。モジュレーション補正に

Fig. 2 Improvement of detected pattern signal

Fig. 3 Signal binalization method

よって、もとのプリント基板パターン形状を忠実に検出することが可能になった¹⁰⁾。本補正は図1の前処理回路10で行われる。

2.4 2 値 化

モジュレーション補正にかかわらず、微細な欠陥は図3左側に示すように、モジュレーションの小さな信

号の山（凸）あるいは谷（凹）として検出される。微細な欠陥を検出し、かつ回路パターン形状を正確に2値化するために次に示す2値化法を開発した。検出信号の0°方向の凹凸量を、図3(b)に示す画素配置について式(1)の $F_a(X, Y)$ により評価する。 $P(X, Y)$ は画素 (X, Y) の濃度、 λ は定数である。同様の

方式で $\alpha=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 計 4 方向に沿って求める。この $F_a(X, Y)$ の極大値 (あるいは極小値) がある値 F_{a0} を越えたとき、2 値化信号を出す。これと一定域値の 2 値化信号とを合成する。本演算の目的は微小なパターン欠陥信号を検知することにあるので、 λ は小さな値となり、通常 $\lambda=2$ 画素である。また、 F_{a0} は、信号ノイズが 2 値化されないで、かつ、微小欠陥が 2 値化される程度に小さな値を選ぶことになる。以上の 2 値化方式により微細なプリント基板パターンの情報を安定かつ正確に検出できるようになった¹¹⁾。本 2 値化は図 1 の 2 値化回路 11 で行われる。

$$F_a(X, Y) = P(X, Y) - \{P(X - \lambda, Y) + P(X + \lambda, Y)\} \quad (1)$$

3. 設計パターンの発生

欠陥の検出はパターンの検出信号と設計パターンとを比較検査して行われる。本節では比較検査を行うために、発生した設計パターンに施す画像処理法について報告する。

3.1 設計パターン発生原理 (図 1 参照)

設計パターンは、プリント基板パターンの原板であるフォトマスクを描画するための NC 設計データ 12 から作成する。NC 設計データはパターンをパターンの長さ、幅、位置等のベクトルデータとして記述している。ベクトルデータから 2 次元パターン (画素パターン) を作り出すために、ビットパターンジェネレータ BPG (図 1 の 13) を用いた¹²⁾。BPG はさらにフォトマスク検査機用として開発されたものと同じものを用いている¹³⁾。BPG はパターンのベクトルデータからリアルタイムで画素パターン (設計パターン) を時系列信号として発生する。パターンの発生速度は、10 MHz、画素サイズは $14 \mu\text{m}$ である。設計パ

Fig. 4 Division of pixel size of design data pattern

ターンは、微細な欠陥情報を含まないの、 $14 \mu\text{m}$ の粗い画素を用いて形状を表すことができる。

3.2 設計パターン信号の処理

BPG からの信号 (設計パターン) は 2048 画素ずつの時系列信号として出力する。他方、プリント基板パターンは前述のように 4 個のリニアイメージセンサ ($1024 \times 4 = 4096$ 画素、画素サイズ $7 \mu\text{m}$) により検出される。このため BPG 信号 (設計パターン) を 4 分割して各々の信号をリニアイメージセンサ検出信号と比較する。このとき、BPG 信号は図 4 に示すように画素の大きさを $1/4$ にして検出パターンと同じく 1 画素 $7 \mu\text{m}$ 、4096 画素の時系列にし、かつ境界をスムージングして比較を行う。このようにして形成した設計パターンは、検出パターンに比べて最大 2 画素の境界位置誤差を含むが、この誤差は後述する両パターンの位置合わせと、検査アルゴリズムにより吸収される。以上の処理過程を図 5 に示す。図 5 (a) は 2048 画素の BPG 信号を 512 画素 $\times 4$ の並列信号に分割したところを示す。これは図 1 の信号分割回路 15 によって行われる。同図 (b) は各々の分割された 512 画素の信号について、画素を 2 分割して 1024 画素にして、さらに、この 1024 画素の信号をレピートして画素の大きさを $1/4$ にした過程を示す。これは図 1 の画素サイズ分割回路 17 により行われる。これらの処理はリアルタイムで行われる。このように $14 \mu\text{m}$ 画

Fig. 5 Processing of design data signal

Fig. 6 Focus detection method

素を用いることによって、設計データ発生用 BPG の負担を下げるができる。発生速度も 10 MHz に抑えることができ、かつ検査は $7\mu\text{m}$ の細かい画素で、システムとしては 40 MHz の速度で検査を実行することが可能となった。

4. 自動焦点

本節ではプリント基板パターンという場所による光反射率の変化が大きい対象に対して光学的な自動焦点を実現するために用いた手法について述べる。

検出画素サイズを小さくして、光学系の解像力を増そうとすると、検出系の焦点深度が浅くなる。このために自動焦点が必要になる。自動焦点は、図 6 に示すように、照明光を斜めから観察して三角測量法で照明位置のずれ Δl から焦点ずれ ΔZ を検出する。スペースの関係で、イメージファイバを用いて画像を TV カメラ（図 1 の 18）に導き検出する。同図に示すフィルタは銅パターン部からの反射光量と、基材部からの蛍光量のバランスを取って、安定した検出信号レベルを得ることを目的としているもので、若干の照明光（紫色）を通し、かつ蛍光（黄色）を透過する特性を持つように工夫されている。この方式により、銅パターンと基材部の混在する対象物に対しても約 $\pm 100\mu\text{m}$ の焦点合わせを実現することができた。

5. 設計パターンと検出パターンの位置合わせ

伸縮があり、かつパターン寸法公差の大きいプリント基板では両パターンの位置合わせが難しい。これに対処するために以下に示す 2 段階の位置合わせ法を開発した。なお、プリント基板は周辺に附けられた穴をステージに設けられたピン

に挿入することにより、あらかじめ粗位置合わせが行われている（精度 $100\mu\text{m}$ 程度）。基板自体は大きいので検出視野で見え限り、回転方向のずれは、平行移動方向の位置合わせで吸収できるので、回転方向の位置合わせは行っていない。

5.1 基板伸縮の補正

プリント基板パターンは図 7 に示すようにリニアイメージセンサを基板に対して Y 方向に走査しながら検出する。さらにリニアイメージセンサは横方向に X_p ずつステップ送りされ、基板全体の検査が行われる。基板は $600\text{mm} \times 800\text{mm}$ の大きな有機材料であるために、製造工程で $100\mu\text{m}$ のオーダーで伸縮する。パターンの幅は $70\mu\text{m}$ であるので、何らかの手段で位置の補正を行わないと設計パターンと画素ごとの比較ができない、そこで次に示す手法を開発した。

【ステージ送り方向の補正】長さ L の設計パターンと、パターンは相似であるが長さが L' であるプリント基板パターンを画素比較する場合、両者の画素分割数 N は等しくなければ互に対応位置を比較できない。従って、両者の画素サイズは違ってくる。設計パターンの画素サイズを Δ 、基板パターンの検出画素サイズを Δ' とすると、 $L/\Delta = N$ 、 $L'/\Delta' = N'$ なる関係になる。 L' は基板によって変化するので、基板を検査するごとに位置決め用マークを用いて L' を測定して Δ' を変えて行かなければならない。 Δ' のサイズは基板パターンを乗せて走査するステージに付けられているリニアエンコーダの測定値によって決められる。リニアエンコーダには最小の測定単位があり（この場合 $1\mu\text{m}$ ）連続可変で画素サイズを設定することは困

 Fig. 7 Scanning mode of P. C. B., pixel size Δ' for P. C. B. and Δ for design data

Fig. 8 Alignment error detection and alignment of the image signals

難である。このため Δ' は通常 $7\mu\text{m}$ 、時々 $8\mu\text{m}$ に設定して検出を行う。例えば、 L' に $100\mu\text{m}$ の変化がある場合は 1000 回の $\Delta' = 7\mu\text{m}$ 画素検出に対して約 1 回の割合で $\Delta' = 8\mu\text{m}$ の画素で検出することにする。本方法では基板の伸び側にしか補正できないので、設計パターンの画素サイズ Δ を公差の上限に設定しておく。

【ステージステップ送り方向の補正】 この補正を行うために、リニアイメージセンサの横送りピッチ X_p を基板の伸縮に合わせて変化させる。変化量は検査前に測定して求めておく。

5.2 記憶画像の位置合わせ

上述の伸縮補正は、2つのパターンの粗位置合わせに相当する。検出・記憶されたパターン同士のリアルタイム位置合わせは次のように行う。図8に示すように設計パターンを局部切出し回路 M に展開して、切り出された画像の各記憶要素 m_i の内容と、検出信号の排他的論理和をカウンタで並列的に積算する。これは設計パターン記憶画像を2次元的にシフトしつつ、各シフト位置で2つのパターンの排他的論理和を積算したことに相当する。積算値が最小値であるカウンタを求めることにより、2つの画像が最も合致する位置が分かるので、このシフト位置から設計パターン信号を選べば2つの信号の位置合わせを行うことができる。なお、この積算と位置合わせは256画素ステージ送りごとに行う。本位置合わせは図1に示す信号ライメント回路19により行われる¹⁴⁾。

6. 欠陥候補点検出

検出パターンと設計パターンとを比較して欠陥候補

	Detected Pattern	Design Data Pattern	Detection Result	Operator Example
Original Pattern				Small Portion Extracting Operator
Operator Processed Pattern				

(a) Algorithm 1: Extraction of Small Portion and Comparison

	Detected Pattern	Design Data Pattern	Detection Result
Patterns and Processed Patterns			

(b) Algorithm 2: Matching of Detected Pattern with Swelled / Shrunk Design Data Pattern

Fig. 9 Algorithm for defect candidate detection

を検出する。欠陥候補検出のアルゴリズムはパターン線幅の公差に基づく両パターンの不一致を欠陥と判定せずに有害な可能性のある欠陥候補のみを検出するように工夫されている。比較は図1の信号比較回路20により行われる。

6.1 微細な欠陥の検出

図9(a)に示すようにパターン幅よりも微細なパターンを同図右側に示すオペレータ H_{BX} により抽出して、互いに存在を比較する。 H_{BX} は微細パターンを抽出するオペレータであり、I形の画素配置の上・下横方向の画素の内容がすべて(1)、縦形の画素配置の内いずれか1個以上の内容が(0)となれば「黒」の微細パターンがあると判定するものである。記号 H_{BX} において、 X は X 方向に長い微細パターンを検出しやすいことを意味する。このほかに Y 方向、 $\pm 45^\circ$ 方向の計4個のオペレータがある。 B は画素内容(0)すなわち黒微細欠陥を意味し、このほかに、 W すなわち白微細欠陥検出用のオペレータがある。この画像処理は図1の信号比較回路20によって行われる。本アルゴリズムにより、位置合わせ誤差よりも小さな欠陥(細い短絡欠陥など)が検出できる。また、正常な微細部は対応位置にあるので互いにキャンセルされて、誤って欠陥と検出しない³⁾。

6.2 大きな欠陥の検出

図9(b)に示すように設計パターンを公差分膨張縮退させて、外にはみ出した部分を欠陥と判定する。

Fig. 10 Criteria for fatal defect judgment

7. 欠陥の致命性判定

従来の欠陥検査装置では装置が指摘した欠陥候補を人が確認して真に致命的な欠陥かどうかを判定していた。本検査装置ではこの過程をも機械で行わせるべく以下に示す技術を開発した。

前述の欠陥候補点検出では、例えば図10に示すパターン変形はすべて欠陥と判定する。しかし電気回路としての有害性という観点からは、欠陥A1は付近にパターンがあるので短絡を生じる恐れがあり、致命度の高い欠陥である。欠陥B1はその恐れがなく欠陥としなくても差し支えない。A3も同様に致命的な欠陥である。このように図9の上の欄は致命欠陥、下の欄は非致命欠陥を示している。A2はラインの細くなった部分が長い欠陥、A4は細いライン上にあるピンホール欠陥である。A5は線幅が狭い欠陥、A6は大きい孤立欠陥、A7は大きなピンホール欠陥である。従来はこの区別は目視により行われていた。これを自動化するために欠陥の致命性を認識する方式を開発した¹⁵⁾。これは図1の右上部に示すように検出された欠陥候補点を中心とした部分画像(256×198画素)を汎用画像処理装置(HIDIC-IP/200, 図1の23)に入力して、詳細な画像処理を施して欠陥の致命性を認識するものである。使用する部分画像は、検出パターン、設計パターン、欠陥候補パターンの3種類である。各々の部分画像は部分画像バッファBUF(図1の22)を介して汎用画像処理装置に入力される。BUFは3×512面を有し、欠陥候補が検出されるごとに部分画像が記憶されていく。汎

用画像処理装置は一組の部分画像の処理が終わるごとに、次の部分画像の処理を行う。

欠陥の致命性の認識は、図11に示すように行われる。まず設計データパターンから、パッドの画像および配線ラインを抽出する。次に欠陥候補と抽出パッド画像、および抽出ライン画像との位置関係から、欠陥のタイプを分類し(パッド上欠陥、孤立欠陥、ライン上・付近欠陥)、

おのおの詳細に致命性判定処理するエリアを決める。汎用画像処理装置による欠陥の致命性の判定は欠陥の面積、大きさ、パターンの幅・ギャップ長等により認識する。汎用画像処理装置は、検査処理回路本体とは独立したクロック信号で動いており、致命性の認識のために約2000ステップのソフト処理が必要であるので処理速度自体は低い。しかし致命性処理画面の大きさは小さいので、約0.5sで1欠陥候補の処理がすむ。画像の処理は欠陥候補のみであるので仮に20個の欠陥候補があった場合、致命性判定に要する時間は $20 \times 0.5 = 10$ sである。装置本来の検査時間は4.5min/枚であるので、致命性判定処理はこの時間の中で終わる。従ってこれにより装置全体としての検査時間が遅くなることはない。

8. 検査装置

以上の技術を総合して検査装置を開発した。図12に装置の外観を示す。本装置は従来の装置に見られる

Fig. 11 Process of defect fatality recognition

Fig. 12 Developed inspection system

(a) Hairline Defect with Width Approximately 7 μm

(b) Detected Hairline Defect

Fig. 13 Example of detected defect

ように正常パターンに類似した欠陥を見逃す¹⁶⁾ことなく、有害な欠陥のみを検出することができる。幅7 μm の短絡欠陥、パターン幅の異常、パターンの変形などの欠陥を高精度に検出可能である。検査時間は4.5 min/600×800 mmである。図13に検出した欠陥の例を示す。同図(a)は幅7 μm の微細な欠陥の例、同図(b)はこれを検出した2値化像を示す。

9. 結 言

最高度の検査信頼性を実現することを目的としてプリント基板パターン検査用技術を開発した。このために設計データと実物パターンを比較することを基本方針とした。検出信号のモジュレーション補正法、微小欠陥信号の2値化法、伸縮のある基板パターンと設計パターンとの位置合わせ法、検出した欠陥候補の致命性の認識法等を開発し、これらの技術を総合して検査

装置システムを完成した。従来の検査装置に比べて欠陥の見逃し、誤検出の少ない最高水準の検査性能を実現することができた。これは従来装置との検査結果比較により確認したものである。従来装置は文献¹⁶⁾に示すように多くの欠陥見逃しのあることが確認できた。本装置によって初めて検査速度、検査性能、欠陥形状認識を含めて、人間の能力を大きく越えることができたといえる。

最後に本検査装置を開発する上でご尽力頂いた日立精工(株)古川孝次氏ほか、(株)日立エンジニアリングサービス金井一郎氏ほかの方々に感謝の意を表します。

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) 安藤護俊ほか，プリント配線板外観検査技術の動向，サーキットテクノロジー，**3**, 5 (1988) 312.
- 3) Y. Hara et al.: Automatic Inspection System for Printed Circuit Boards, IEEE Trans. on PAMI, PAMI-5, 6 (1983) 623.
- 4) Y. Hara et al.: A System for PCB Automated Inspection Using Fluorescent Light, IEEE Trans. on PAMI, **10**, 1, (1988) 69.
- 5) 原 靖彦ほか：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（方式），1991年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，J 07 (1991) 357.
- 6) 土井秀明ほか：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（装置），1991年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，# J 08 (1991) 357.
- 7) 原 靖彦ほか：Ar レーザ照明による蛍光検出方式高速プリント基板パターン検査装置，電子情報通信学会創立70周年総合全国大会，# 2533, # 2534 (1987) 7-133.
- 8) 原 靖彦ほか：リニアセンサと通常光照明によるプリント基板パターンの蛍光検出，1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，# H 58 (1990) 1117.
- 9) 原 靖彦：蛍光を利用した画像検出とその応用，精密工学会誌，**56**, 8 (1990) 1381.
- 10) 土井秀明ほか：パターン欠陥検出用蛍光分布補正方式，1991年電子情報通信学会春季全国大会，# D-582 (1991) 7-294.
- 11) 土井秀明ほか：プリント基板パターン検査における画像2値化法，電子情報通信学会春季全国大会，# D-266 (1989) 7-248.
- 12) 原 靖彦ほか：設計データとの比較によるレチクルパターン検査，計測自動制御学会論文集，**20**, 12 (1984) 1135.
- 13) 仲畑光蔵ほか：マルチ DSP 並列処理によるプリント基板マスク検査用二次元パターン高速発生回路，電気学会論文誌 D, **110**, 7 (1991) 781.
- 14) 原 靖彦ほか：LSI ウェハアルミ配線パターン検査自動化の研究，電子通信学会論文誌，**J69-C**, 4 (1986) 385.
- 15) 土井秀明ほか：プリント基板パターン欠陥の致命性判定法，1990年電子情報通信学会秋季全国大会，# D-347 (1990) 6-376.
- 16) 長谷川堅一：光学式外観検査装置の現状と問題点，第10回プリント回路学会セミナー資料，(1991) 33.