静電容量型センサを用いた微細プリント配線板の欠陥検査システムに関する研究 —第2報 プローブ走査による非接触イメージング—

野口 祐智*, 斎藤 之男*, 角田 興俊*, 富田 英雄*

A Study of Defect Inspection System for Minute Printed Wiring Boards by Using Capacitance Type Sensor —The Second Report Non-Contact Imaging by Probe Scanning—

Masanori NOGUCHI*, Yukio SAITO*, Okitoshi TSUNODA*, and Hideo TOMITA*

* 東京電機大学理工学部 (〒350-0394 埼玉県鳩山町石坂)

* School of Science and Engineering, Tokyo Denki University (Ishizaka, Hatoyama, Saitama 350-0394)

概要 本論文では、プリント配線板パターンを検査するため静電容量プローブを用いてプリント配線パターンの非接触画像化を試みた。

そこで、5 μm の精度を持つ3軸位置決め装置の開発を行い、プリント配線板表面に沿って静電容量プローブを移動させる方法でプリント配線板表面の静電容量変化を画像にする仕組みを構築した。この結果、非接触状態での検出で幅200 μm 幅のパターンの画像化が可能となった。これにより本方式によるプリント配線板パターンの検査の基礎的な可能性を確認することができた。

Abstract

This paper discusses a capacitance probe that allows us to visualize wiring patterns on PCB without contacting the board directly.

We developed a positioning control mechanism that operates in three dimensions with 5 μm accuracy. Then, we used that system to move a capacitance probe precisely along the PCB surface.

We used the system to visualize wiring patterns using the capacitance change of the PCB surface. The system was able to make an image of 200 μm wide patterns in the non-contact condition. This shows the possibility of an inspection method that visualizes the wiring patterns on a PCB in a non-contact condition using a capacitance probe.

Key Words: Printed Wiring Board, Contact Less, Capacitance, Defect Inspection

1. はじめに

電子機器は、急速に小型化が進みさらに多機能化に拍車がかかっている。これらの機器では、少ないスペースに多くの機能を詰め込むことになり、装置を構成するプリント配線板 (Printed Wiring Board: PWB) にはプリントパターンや部品搭載用のパッドの微細化が要求されている。代表的な例として、スマートフォンでは従来の携帯電話の通話機能に加えホームページの閲覧やゲームなどファームウェア上で大きなプログラムを実行するため、高性能のCPUとメモリが搭載されている。このようなPWBでは、実装密度を上げるためプリントパターン間隙を狭くし、大規模で狭ピッチの部品を多数搭載する必要がある。また、従来テスト容易化対策のため用いていたテストパッドが伝送特性に悪い影響を及ぼす可能性があるため、プリントパターン上に設置することが困難になりつつある。部品搭載用のパッドに接触する方法もあるが、これも微細化が進んでいることから破損などの悪影響を避けるためできるだけ直接接触することを避けたい状況にある。この結果として、テスト用のプローブをテストパッドや部品搭載用パッドを介してプリントパターンに接触させるテスト方法は適用が難しく

なる傾向にあり、非接触かつ電氣的信頼性の得られる配線検査装置の開発が求められている。

2. 従来のプリント配線板の配線検査技術

PWBの検査技術として、配線そのものに電圧を印加し、プローブで電流を観測することで配線の異常を検出する電氣的な導通検査とプリントパターンから得られた映像データを画像処理することで、正常な配線板のデータと比較する外観検査に分けることができる。

2.1 導通検査

接触式の導通検査は、検査対象となるパッドに金属性テストプローブピンを接触させ、電圧を印加した際の電流値などから配線の欠陥を検出するものである。具体的には、PWB上のテスト用のテストパッドや部品搭載用の部品ピンのパッドに金属性テストプローブピンを接触させることで2ヶ所のパッド間が断線 (オープン) や短絡 (ショート) していないことを1つ1つ検査するものである。

テストデータは、配線の組み合わせを設計データから抽出し、オープン/ショート検査用データを作成している。このデータを用いてテストするテスト装置にはプローブピンを治具に固定してテストするベアボードテストと、複数

のテストプローブピンがPWB上を移動することで任意の配線間を測定するフライングプローブテストがある。

PWB上の配線に通電するため電気的信頼性は得られるが、電極部分にプローブが接触することでプリントパターンやパッドが剥離してしまう問題が生じている。

2.2 画像処理検査

画像処理による配線検査は、PWBに可視光やX線を照射することで得られた反射光や透過光を専用のカメラで画像データに変換し、同じピクセル（座標）のRGB値やグレースケール値を正常な配線パターンのマスターデータと比較することで異常を検出することができる。

1) 可視領域における配線検査

可視光を用いた配線検査は、一般的に外観検査と呼ばれている。

この方法は、CCDカメラを用いてプリントパターンを画像データとして取得する。この画像データを正常なプリントパターンの画像データと画像処理技術により比較することで、データの差分から欠陥を検出する方法である。

外観検査は、PWB表面の配線異常を検出することが可能であるが、内層配線の異常を検出することは難しい。

2) X線領域における配線検査

X線を用いた配線検査は、外観検査では見ることの出来ない領域の情報を取得するため、X線領域用のカメラを用いて、金属であるプリントパターンにより減衰した信号を撮影することで、実装部品により見るのでできない接合部や積層されたプリントパターンの断線や短絡を画像として取得し配線の異常状態を判断している。

2.3 電磁波によるオープン/ショート検査

石島¹⁾は、送信コイルと受信コイルを一つのプローブ先端に取り付け、プリントパターンに生じる交番磁界を受信コイルにより観察する。プリントパターン上部では、交番磁界が発生するため電流が生じるが、絶縁領域では交番磁界が生じないため受信コイルには電圧が生じない。この電圧の変化から断線や短絡といったオープン/ショート検査が可能となっており、非接触で最小30 μm の欠陥の検出に成功している。

2.4 既存の検査システムの問題点

先述のように、検査技術の特徴を分類すると導通検査は接触式であり、配線に信号を印加するため電気的信頼性が得られるが電極破損などの問題がある。また、外観検査やX線検査は非接触のため電極破損は起こらないが電気的信頼性が得られないなどの相反する特性を持っている。

本研究では、プリントパターンを外観検査のように非接触かつ、導通検査のように電気的信頼性が得られる検査装置の基礎実験を行い本方式の有効性を確認することを目的としている。特に、プリントパターン表面生じる微小な静電容量変化をイメージングすることで欠陥を検出するシステムの検証を行うことが主たる目的である。

3. プリント配線板表面の静電容量検出システム

3.1 実験用プリント配線板

検査対象となるパターンの幅は、高井らの報告²⁾によると15 μm 程度まで微細化が進むとされている。その一方で、JEITAのロードマップによると主流となっているパターン幅は、50 μm ～150 μm とされている。

そこで、基礎実験で使用するPWBは用途に応じてさまざまな配線幅が想定し、JEITAロードマップを参考に配線幅50 μm ～1mmのプリント配線板を製作することにした。実験において、接触式と非接触式で表面に生じる静電容量の変化を比較するため、はんだレジスト層は設けなかった。Fig. 1とTable 1は実験用プリント配線板とその仕様を示す。

3.2 3軸位置決め装置

検査プローブの位置決め性能は、最小配線幅である50 μm の1/10まで評価する必要があると考え、前報³⁾で開発した各軸が5 μm で位置決め装置を用いることにした。

この装置は、Moving bridge形状を採用することで垂直方向の変位が小さく、微細なプリント配線に対応でき、各軸をコンピュータ制御することで、容易にプローブの軌道を辿らせられ、同時にプローブ先端の相対座標値(X, Y, Z)とセンサの出力電圧(V)を記録する機能を有している。実験に使用した3軸位置決め装置をFig. 2に示し、仕様をTable 2に示す。

Fig. 1 3-D positioning equipment

Table 1. Specifications of 3-D positioning equipment

Article	Specific
Type	Moving bridge type
Stroke [mm]	X: 500, Y: 500, Z: 300
Linear-scale repeat accuracy [mm] (X,Y,Z)	± 0.02 (semi close loop) ± 0.005 (full close loop)
Driving method	Brushless motor + Ball screw
Specifications of brushless motor	X: 80 W Y: 100 W Z: 80 W

Fig. 2 PWB pattern used for experiment

Table 2. Specifications of PWB pattern used for experiment

Article	Specific
Line width [mm] (from the left)	1.0, 1.0, 1/2, 1/3, 1/5, 1/7, 1/10, 1/13, 1/15, 1/20
Travelling distance [mm]	80
Surface processing	No solder resist laminated
Pattern pitch [mm]	2.5

4. プローブによる容量検出実験

プリント配線板表面に生じる微小な静電容量を検査に用いるため、プリント配線板表面に沿ってプローブを移動させた際の表面に生じる静電容量を記録する。静電容量を測定するため、先行研究⁴⁾で開発した誘電体つきプローブを用いた静電容量の計測を行った。

誘電体つきプローブは、先端形状が円筒のスプリングプローブ先端に高誘電体材料を取り付けることで、配線との接触時は 60 pF の静電容量が生じる。プローブと配線表面生じる静電容量は LCR メータ（國洋電機製：KC-605）を用いて測定を行った。

測定は Fig. 3 に示すように 3 軸位置決め装置のワークステージ上にセットされたプリント配線板の表面に沿って測定した。実験条件は非接触にするため、プローブ先端とプリントパターン間の隙間を位置決め装置の最小分解能の 2 倍となる 10 μm (2 パルス) とすることで、1 パルスの誤った駆動信号を入力されてもプリントパターンとの接触が回避できると考えた。

また、X 軸方向（配線に対して直角方向）は、PWB 下部の精密 X-Y ステージを手動で 0.5 mm ごとに 26 mm の範囲（Fig. 2 の左端の配線を基準に、-0.5 mm～25.5 mm）の静電容量を測定した。Fig. 4 は、プローブを配線に接触させた際の静電容量と 10 μm 離れた際の静電容量を比較したものを示す。この実験結果から、プローブを接触させた場合、配線パターンの有無に応じて配線表面に生じる静電容量は大きく変化していることが分かった。空気を誘電体としている非接触の場合、プローブと配線パターン間に生じる静

Fig. 3 Scanning of PWB by positioning equipment to measure capacitance change

Fig. 4 Measured result of capacitance change of PWB pattern

Fig. 5 Probes used for measuring capacitance

Table 3. Comparison of calculated capacitance value and measured value [pF]

	Cylinder	V-type	Cone
Calculated capacitance	2.78	0.28	0.03
Average measured capacitance	1.57	0.30	0.03

電容量は非常に小さいが変化していることが確認できた。

5. 実験で使用したプローブ

本研究では、最小配線幅を 50 μm と設定しており、応答性のよいプローブの開発について前報で報告している。本報告においても、前報同様に、配線に対する応答性と先端に生じる静電容量の兼ね合いから、V 型プローブを実験に用いることにした。Fig. 5 と Table 3 は、前報で報告しているプローブ形状と隙間 10 μm における計算値と実測値を示す。

6. 静電容量プローブによる配線検出

前報³⁾では、ハートレー発振回路を用いた静電容量の変換回路を作成した。しかし、ハートレー発振回路では、微小な静電容量変化には対応が難しいため、市販されているC/Vコンバータモジュール（オメガ電子製）を用いた。

プリント配線板表面に生じる静電容量を測定するため、先に示した3軸位置決め装置と実験用PWBを用いて、追従実験を行った。先端に生じる静電容量を測定するため、前報で開発したプローブを3軸位置決め装置に固定を行い、Fig. 1に示すように配線に対して直行するようにプローブを移動させた際の接触時と非接触時の静電容量を測定した。

このC/V ConverterをFig. 6のようにプローブとPWB配線間に生じる静電容量を検出できるようにセッティングし、先の静電容量の測定実験と同様にプローブを接触して測定した場合とプローブとPWBの間を10 μ mに設定した非接触で測定した場合の出力電圧値を比較した。

Fig. 7は接触式と非接触式による実験結果の結果を示す。また、この結果から配線の無い部分は同じ電圧値を示

Fig. 6 Control system of experimental measuring equipment for 3-D positioning

Fig. 7 Measured result by C/V converter device

し、接触式の場合はHiレベル、非接触の場合は電圧上昇が確認されており、配線に対して接触式／非接触式においても電圧変化が得られた。

7. 走査型プローブによる配線イメージング

先に示したように、プリント配線板表面の静電容量と配線の有無はFig. 7により確認された。しかし、Fig. 7ではプリント配線板表面に欠陥が生じた場合、全てのデータを確認しなければ欠陥の有無を確認することができないため、正常なプリント配線板の配線デザインと容易に比較できるシステムの開発が必要と考えた。

本研究では、表面をFig. 8のように走査することで、表面に生じる静電容量を電圧値として記録でき、測定範囲を格子状に分割した際の電圧変化を正常な配線上の同じ座標における電圧変化と比較により、欠陥位置の特定ができると考えた。

具体的なシステムは、プローブ先端の座標(X, Y, Z)とC/Vコンバータによって得られた出力電圧(V)をスキャンした経路ごとにデータ化することにした。また、プリント配線板表面のマトリックス座標(X, Y)に出力電圧(V)をマッピングする機能が必要と考え、実現するため、Fig. 9に示すフローチャートを作成した。

このフローチャートは、配線に対して直角方向(X方向)に走査を行い、その際の座標データと出力電圧を1)ダイレクトデータ；Direct data (X, Y, Z, V)としてダイレクトデータ用のテキストデータが生成され、イメージングデータにするため、配線直行方向(Y方向)に移動する際に、2)マトリックスデータ；Matrix data (X-Y行列)化を行い、積層していくことで、マトリックスデータ用のテキストデータを生成することができた。

イメージングするためには、マトリックスデータ上の各座標と電圧値を画像データに変換する必要があるが、このプロセスをメインプログラムに取り込むことは難しいため、市販ソフトの機能を利用することにした。プロットす

Fig. 8 Probe scanning method for capacitance imaging

るプログラムは多数あるが、汎用性がある MATLAB (Math works 製) を用いることにした。これにより、マトリックスデータとして出力されたプリント配線板表面上に生じている静電容量を画像データとして Fig. 10 のように、配線的位置に対して濃淡の変化で静電容量の変化を示すことが可能になった。

8. 接触式／非接触式による配線イメージング

本研究で、3 軸位置決め装置、V 型プローブ、C/V コンバータを用いて、PWB 表面に生じる静電容量変化から配線の有無を確認するため、欠陥の無い実験用プリント配線板を接触式と非接触式による配線のイメージングを行った。

3 軸位置決め装置上のワークステージに、3 点支持の傾斜補正ステージと XY 精密位置決めステージをセッティングし、その上に Fig. 1 に示したプリント配線板を設置した。その際、電気マイクロメーター (Mitutoyo 製) を用いて、プリント配線板表面の傾きを確認し、傾斜補正ステージを用いて、プリント配線板の X 軸方向と Y 軸方向の測定範囲内が Z 軸方向に $5\mu\text{m}$ 以下になるよう調整を行った。

接触式の実験は、GND 端子に V 型プローブ先端が接触するように 3 軸位置決め装置を設定した。プローブの移動する方法として、X 軸方向 (プリントパターンに対して直角方向) は絶縁部分との境界を観察するためプリントパターンの左側 2.5mm の位置から測定を開始し、 $50\mu\text{m}\sim 1\text{mm}$ のプリントパターンが形成されている 25mm を経て、最小線幅である $50\mu\text{m}$ の右側 2.5mm の範囲とし、Y 軸方向 (プリントパターンに対して平行方向) は、 0.1mm ごとに 5mm の範囲を走査した。非接触式は、配線とプローブの間隔を $10\mu\text{m}$ に設定し、同じ範囲を走査させた範囲の静電容量変化を測定した。

Fig. 10 は、接触式による配線のイメージング結果を示す。このように、最小線幅 $50\mu\text{m}$ の検出に成功し、ノイズによる影響は見られないことが確認された。

Fig. 11 は、非接触による配線のイメージング結果を示す。このように、左から 4 本目 (配線幅: $1/5\text{mm}\div 200\mu\text{m}$) まで配線の有無を検出することが確認された。

Fig. 7 のように、ある Y 軸座標上を走査した結果からは、最小線幅の $50\mu\text{m}$ まで電圧変化が見られたが、今回の結果では最小配線幅のイメージングを行うことはできなかった。

9. 考 察

Fig. 11 から、はんだレジスト層を有していない PWB 表面に生じる静電容量変化を利用することで、プローブが非接触式であっても接触式と同様に配線のイメージングをすることが可能であることが示唆された。ただし、接触式に比べて非接触式による配線のイメージングを行ったところ、微細な配線パターンをイメージングするには至らなかった。これは、静電容量変化の応答性やノイズ、PWB 表

Fig. 9 Flow chart of positioning equipment control and capacitance imaging

Fig. 10 Result of imaging by contact probe scanning

Fig. 11 Result of imaging by non-contact probe scanning

面の傾きなどの影響が考えられるため実験条件の改善が必要であることがわかった。プリント配線板表面の傾きは、左右方向および前後方向両端で $5\mu\text{m}$ 以下に調整を行っているが、非接触式によるイメージ画像の結果から、配線板右下の色が濃く、左上の色が薄いことから、プリント配線板そのものの傾きによる影響を検討する必要がある。

10. まとめ

今回開発した手法を用いて、プリント配線板表面に生じる静電容量の分布から、配線の有無を検出することを試みた。

- 1) 3 軸位置決め装置と誘電体つきプローブを用いて、配線に対する静電容量の変化を実験により確認した、これにより、配線位置と静電容量に関係性があることを確認した。
- 2) 実験用プリント配線板表面に生じる静電容量を、3 軸位置決め装置、C/V コンバータと V 型プローブを組み合わせることで配線の位置と電圧値を自動的に記録するシステムの開発に成功した。
- 3) 接触式と非接触式により、静電容量変化によるイメージングを行った。非接触式では、 $200\mu\text{m}$ 幅の配線パターン上の不良を検出することに成功した。これにより、プリント配線板表面の傾きなどの影響を排除するための施策の効果を確認した。

本報告で、はんだレジスト層の無いプリント配線板上の配線を非接触で検出できる可能性が明らかになった。今後、実用化を行うためには以下の課題が考えられる。

- 1) はんだレジスト層のある場合のイメージング実験の

検討。

- 2) パターン接地されていない配線板への対応。
- 3) 微細なパターンを検出するために検出感度の向上。
- 4) 均一な感度を維持するため、プリント配線板の傾きを抑える機構を開発。

これらの課題を解決することで、実際に使用されているプリント配線板の本方式によるテストを可能にできると考えている。

(2012.10.3- 受理)

文 献

- 1) 石島康守：“非接触ベアボードテスト（電磁波による Open/Short 検査）,” 回路実装学会検査技術委員会 検査技術シンポジウム予稿集, 1996.7
- 2) 高井, 田村, 他：“ウェットエッチングによるマイクロファブリケーションと FAM による高密度プリント配線板,” 日立化成テクニカルレポート, 52, p. 17, 2009.1
- 3) 野口祐智, 斎藤之男, 角田興俊, 富田英雄：“静電容量型センサによる微細プリント配線欠陥検査システムに関する研究,” エレクトロニクス実装学会誌, Vol. 14, No. 3, pp. 212–219, 2011.5
- 4) 里見忠篤, 野口祐智：“プリント基板検査システムに関する研究,” 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 73, No. 731, pp. 1911–1916, 2007.7

著者紹介

野口祐智 (のぐち まさのり)
 斎藤之男 (さいとう ゆきお)
 角田興俊 (つのだ おきとし)
 富田英雄 (とみた ひでお)