多層回路板製造工程におけるビアホールの3次元形状計測

宮下 宏明*, 金田 一*, 小川 毅彦*

Three Dimensional Shape Measurement of Via-Holes for the Production of Multi-Layers Circuit Boards

Hiroaki MIYASHITA*, Hajime KANADA* and Takehiko OGAWA*

* 拓殖大学大学院工学研究科電子情報工学専攻 (〒193-0985 東京都八王子市館町815-1)

* Dept. Electronics and Information Engineering, Graduate School of Engineering, Takushoku University (815-1 Tatemachi, Hachioji-shi, Tokyo 193-0985)

Abstract

In multi-layer printed circuit boards, many through-holes and via-holes coexist for electrical connection. This paper considers the three dimensional shape measurement of a via-hole and its environmental surface by using a laser displacement meter. The dispersion of the obtained data is caused by the affection of measuring surface. We make smoothing of the measurement data by the two methods of moving average and polynomial approximation. The usefulness of our approach is verified by experiment results.

Key Words: Shape Measurement, Via-Holes, Printed Circuit Boards, Laser Measurement

1. はじめに

情報通信分野, デジタル家電を始めとする電子機器の小型・軽量化, 高速化, 低消費電力化などの技術革新はめざましく, これに使用されている重要な部品である電子回路の多層回路板のさらなる高密度化, 高信頼性などが要求されている。中でも半導体における端子の高密度化, 多ピン化が進むにつれて, 多層回路板実装技術はビルドアップ工法が主流となってきた。この工法は, 導体層と絶縁層をビアホールと呼ばれる微小穴により層間接続して配線の高密度化・高速化を実現する方法である。ビルドアップ配線板の構造例として, ビアホールを形成した後でこれを導体で充てん(ビアフィリング)してから積層するものと, 円錐状の導体を形成(ビアポスト)した後で絶縁層を貫通させて積層するものがある^{1),2)}。ところが, 基板にビアホールを形成する工程で, ビアホール周辺の形状に歪みが生じる。このため, 充てんする前にビアホールを形成した基板の検査をすること, またビアホールのサイズを分解能 $1\mu\text{m}$ の精度で計測することが求められる。以上のことから, 多層回路板のビアホールとその周辺形状を精密に計測することは重要であり, これは多層回路板実装において信頼性に影響を与える課題である。

一方, レーザ光は収束性があり, 容易に細くビームを絞ることが可能なため, 非接触, 高精度計測が期待できる。レーザ式変位計は, 三角測量の原理に基づいてレーザ光により非接触で物体の距離, 寸法形状などを計測するものである^{3),4)}。しかし, レーザ式変位計の用途によっては計測面

の変化(傾き, 光沢, 凹凸など)の影響や信頼性の面で利用者の十分な満足を得るまでに至っていない。著者らは, LSIパッケージのリードの外観検査にレーザ式変位計を用いる方法の研究を行ってきた^{5),6)}。計測データのばらつきは移動平均処理によって除去することができ, 分解能 $3\mu\text{m}$ の精度で計測できることを実験で確認している。

そこで本研究では, レーザ式変位計により多層回路板ビアホールとその周辺部の3次元形状計測実験を行う。中心深さの直径が $200\mu\text{m}$ のビアホールが多数存在する製造工程中のプリント配線板を実験に用いた。プリント配線板は光沢があるため非接触で高精度に計測することは難しい物体である。目標とする計測精度を分解能 $1\mu\text{m}$ に設定し, 計測データのばらつきを除去するためのソフトウェア処理の方法について検討する。

2. レーザ式変位計による形状計測実験

実験装置は, レーザ式変位計, 3軸制御装置(パルスステージコントローラと3軸スージ), コンピュータの3つの部分からなる。実験装置のシステム構成図をFig. 1に示す。レーザ式変位計のセンサヘッドは3軸ステージのZ軸に取り付けられ, 制御装置を介してコンピュータで駆動制御されると同時に, レーザ式変位計の設定およびデータ入出力制御もコンピュータで行う。センサヘッドと3軸ステージの計測部の外観写真をFig. 2に示す。センサヘッドの重さは 260g で, センサヘッドを支持する板状物体には軽い材料で振動が生じにくい形状のものをを用いた。これらの重さに対して, 3軸ステージには十分剛性のある中央精機製の

Fig. 1 Schematic construction of the measuring system

Fig. 2 Measuring stage used for the laser displacement meter

ステージを用いた。また、Fig. 2に示すように3軸ステージは除振台の面に直接取り付けられている。

三角測量の原理に基づくレーザ変位計に、キーエンス製LE-4000形を用いた。LE-4000形の測定面上におけるレーザ光の光スポット径は、約 $30\mu\text{m}$ の円形である。計測面までの基準距離が 30mm であり、 $\pm 5\text{mm}$ の変位を分解能 $0.1\mu\text{m}$ まで、サンプリング周波数 2kHz で測定することができる。変位計のセンサヘッドを移動させるためにX軸、Y軸、Z軸の3方向に独立して、 $1\mu\text{m}$ ステップで移動可能なパルスステージを使用した。この3軸パルスステージはステージコントローラで駆動され、各軸方向に一定速度で移動させることができる。この実験装置を用いてプリント配線板のビアホールを精密に計測する。実験に用いた基板はビアホールの中心深さの直径が $200\mu\text{m}$ のプリント配線板であり、多数のビアホールが直線状に並んだサンプル基板を用いた。そのプリント配線板の外観写真とビアホール部の拡大写真をFig. 3に示す。

計測箇所と計測の手順をFig. 4に示す。同図において、①X軸方向に1ライン分 2mm/秒 の速度で走査し、1ライン終了したら、②元の位置に戻してから③Y軸方向に一定間隔($1\mu\text{m}$)移動して、次のラインの走査を繰り返す。これにより、3次元の自動計測が可能になっている。図上の

Fig. 3 Photograph of the used printed circuit board

Fig. 4 Measured area and movement of the sensor head

説明では、①の矢印と②の矢印が一致していないが、実際の計測では一致している。計測箇所は、同図の拡大図のように、ビアホールが1列に並んだ部分である。同一箇所を3回計測した。測定範囲はX軸方向に 9mm 、Y方向に 1mm の範囲を計測した。1回分の取得データ数は 9000×1000 個、データ間隔はX軸、Y軸ともおおよそ $1\mu\text{m}$ である。これら3つのデータをコンピュータに送り、汎用プログラムMatlab⁷⁾によってグラフ化した。それぞれの計測データには、計測台の影響と思われる傾きが表れたため、傾き補正を行った。傾き補正後のデータを原データ(OSD: Original Shape Data)、X軸方向の1ライン分のデータをラインデータと呼ぶことにする。1回目に計測した原データをFig. 5に示す。同図では、見やすくするため 1000×500 個のデータを等間隔に抽出して表示してある。X軸方向に直線状に並んで見られる楕円形のものが、基板に形成されたビアホール

Fig. 5 Drawing of the original shape data of the circuit board

Fig. 6 Partial drawing of the original shape data shown in Fig. 5

である。楕円形になっているのはX軸とY軸のスケールが異なるためである。さらに、X軸4.1~4.9 mm、Y軸0.1~0.9 mmの1つのビアホールと周辺部を表示したものをFig. 6に示す。データ数は801×801個であるが、同図では等間隔に500×500個のデータを抽出して表示してある。

3. ソフトウェア処理

データのばらつきを抑える方法として一般に移動平均がある。そこで、ビアホール周辺の形状を詳細に把握したいため2次元の移動平均処理を行った。その方法は、まずY軸方向に並んだ1つ1つのラインデータに対し、それぞれX軸方向に移動平均処理を行い、次に、X軸方向の処理を施したデータを用いて、Y軸方向に移動平均処理を行う。このとき移動平均間隔 D はX軸方向、Y軸方向ともに $D=129\mu\text{m}$ （データ数129個）とした。移動平均処理後のデータを移動平均データ(MASD: Moving Average Shape Data)と呼ぶことにする。紙数の都合上2回分の移動平均データについて、Fig. 6と同一範囲のデータを抽出したグラフをFig. 7に示す。

次に提案するソフトウェア処理は多項式近似を用いる方法である。データ全体の変化に合う曲線を p 次の多項式 $f(x)=a_px^p+a_{p-1}x^{p-1}+\dots+a_0$ によって表す。しかし、ビアホールの形状が複数みられるラインデータ全体に処理を施すと、 p の値によっては処理後のデータは大きくうねりを描き、目的とする形状とならない。そこで、1つのラインデータについて算術平均値を求め、平均値を基準に基準値より上側の曲線と下側の曲線にデータを分割し、各曲線の

(a) First measurement

(b) Second measurement

Fig. 7 Drawing of the shape data with moving average

データごとに多項式近似処理を施す方法で行ってみた。この場合も移動平均処理と同様に2次元の処理を行った。まずY軸方向に並んだ1つ1つのラインデータに対し、それぞれX軸方向に上記の方法で処理を行い、次にX軸方向の処理を施したデータを用いて、Y軸方向に上記の方法で処理を行う。このとき最大近似次数 p はX軸方向、Y軸方向ともに $p=9$ とした。処理には科学技術計算ソフトMatlab⁷⁾を用いた。Matlab⁷⁾の多項式近似に用いられるpolyfit関数で多項式の係数ベクトル $A=[a_p, a_{p-1}, \dots, a_0]$ の要素を求め、次に polyval 関数により $f(x)$ の値を算出した。多項式近似処理したデータを多項式近似データ(PASD: Polynomial Approximation Shape Data)と呼ぶことにする。計測2回分の多項式近似データについて、Fig. 6と同一範囲のデータを抽出したグラフをFig. 8に示す。移動平均処理よりも小さなばらつきが抑えられていることが目視で確認できる。ここでもビアホール周辺の形状には歪みが見られ、プリント配線板にビアホールを形成する際に生じたものと考えられる。

4. データのばらつきとソフトウェア処理の評価

計測精度を確かめるためには、精度を保証する基準が必要となる。例えば、同一ライン計測を多数回行い、この多数回分のデータの平均値を、精度を保障する基準とすることなどが考えられる。また、データのばらつきを定量的に評価する方法に標準偏差がある。標準偏差は、データの平均値を基準として、個々のデータの基準値からのずれ量から算出する。しかし、本研究で計測したラインデータは、

(a) First measurement

(b) Second measurement

Fig. 8 Drawing of the shape data with polynomial approximation

プリント配線板の平坦部とビアホール形状データであるため、1ライン分のラインデータ全部の平均値は意味を持たない。そこで、本論文では原データやソフトウェア処理後のデータについて、3回分計測した3つのデータについて2つずつの相関関係を算出することにした。

比較したい2つのデータ、 $a_{i,j}, b_{i,j} (i=1,2,3,\dots,N_x, j=1,2,3,\dots,N_y)$ としたとき、その2つのデータのずれ量を $(a_{i,j}-b_{i,j})$ とし、ずれ量の算術平均 m_j を基準とすることにした。 m_j を用いることによって比較する2つのデータの平均的なずれを補正することができる。すなわち、2つのデータ間の差の偏差 σ を次のように表すことにする。

$$\sigma = \frac{1}{N_y} \sum_{j=1}^{N_y} \sqrt{\frac{1}{N_x} \sum_{i=1}^{N_x} \{(a_{i,j}-b_{i,j})-m_j\}^2} \quad (1)$$

ここで、 m_j は2つのデータの差の算術平均であり

$$m_j = \frac{1}{N_x} \sum_{i=1}^{N_x} (a_{i,j}-b_{i,j}) \quad (2)$$

となる。上式において、 N_x はX軸方向のデータ数で $N_x=9000$ 、 N_y はY軸方向のデータ数で $N_y=1000$ である。しかし、移動平均データの相関関係を求めるにあたって、移動平均は移動平均間隔 D によって、データの両端 $(D-1)/2 \mu\text{m}$ の処理ができなくなる。そこで、本論文では移動平均処理において $D=129 \mu\text{m}$ としたので式(1)、式(2)の変数 i と j を、各々 $i=65, \dots, N_x-64, j=65, \dots, N_y-64$ として算出した。

式(1)の偏差によって、2つのデータ間のばらつきを知る目安となる。原データ、移動平均データ、多項式近似データのそれぞれについて、式(1)、(2)を用いて算出した結果をTable 1に示す。同表中の数字は、1回目、2回目、3回目の測定を表す。原データではばらつきの平均が $3.5 \mu\text{m}$ 程度みられるのに対し、移動平均データや多項式近似データでは $0.3 \mu\text{m}$ 程度まで抑えることができた。また、原データおよび移動平均データと多項式近似データの3つのデータから、それぞれのデータでビアホールの形状を示す $Y=0.556 \text{ mm}$ のラインデータを比較したグラフがFig. 9である。多項式近似データは移動平均データよりも少し偏差 σ の値が大きいが、Fig. 9の目視検査により小さなばらつきが抑えられていることがわかる。

Table 1. Comparison among the three shape data

	[μm]		
	1-2	1-3	2-3
Original	3.391	3.746	3.823
Moving average	0.284	0.443	0.405
Polynomial appo.	0.289	0.446	0.407

(a) X=5.0~5.8mm

(b) X=5.0~5.2mm

Fig. 9 Partial drawing of the original shape data and two shape data shown in Fig. 7(a) and Fig. 8(a)

Fig. 10 Partial drawing of the moving average shape data for repeatability

Fig. 11 Partial drawing of the polynomial approximation shape data for repeatability

Fig. 12 Partial drawing of the two shape data at $Y=0.554$ mm, $Y=0.555$ mm, $Y=0.556$ mm, $Y=0.557$ mm and $Y=0.558$ mm shown in Fig. 7(a) and Fig. 8(a)

次に、Fig. 10, Fig. 11は計測1回目～3回目の移動平均データ、多項式近似データについて、 $Y=0.556$ mmのラインデータのピアホールを部分拡大したものである。各データの変位の差が $1\mu\text{m}$ 程度みられる。この差は、レーザ式変位計のヘッドを移動、停止の繰り返しによるZ軸方向の位置決めにずれが生じるものと考えている。このZ軸方向の平均的なずれを補正すれば、計測3回のデータ間の差が

いずれの位置においても $1\mu\text{m}$ 以内に収まっている。 $Y=0.556$ mm以外のラインデータについても同様であった。さらに、精度の確認として1回目に計測したMASDとPASDのラインデータの中から、 $Y=0.554\sim 0.558$ mmの範囲を $1\mu\text{m}$ 間隔で5つのラインデータを抜き出して表示したグラフがFig. 12である。グラフの目視検査によりそれぞれラインデータの形状はほぼ等しく、計測の繰り返しによるデー

タのばらつきが $1\mu\text{m}$ 以内に抑えられていた。以上の方法により、平均処理後のデータについて分解能 $1\mu\text{m}$ の精度を確認できた。しかしながら、精度の検証にはさらに複数のプリント配線板について繰り返し実験が必要である。一方、移動平均処理した同図の(a)をみると $X=4.1\sim 4.4\text{mm}$ の間で小さな曲面の変動が除去しきれていない。この点から、同図(b)に示されている多項式近似処理の方が若干良いと言える。

5. まとめ

本研究では、レーザ式変位計を用いて製造工程中の多層回路板ビアホールの3次元形状計測実験を行った。計測データのばらつきを把握する尺度として偏差を用いた。また、計測データのばらつきを除去するソフトウェアには、移動平均処理と多項式近似処理の比較を行った。ビアホールごとに局所的に多項式近似処理を用いることで移動平均処理に見られる微小な曲面の変動を改善できることを確認した。また、目標とする計測精度の分解能 $1\mu\text{m}$ の可能性を実験データにより確認した。

本研究で用いたプリント配線板は、ビアホールの中心深さの直径が $200\mu\text{m}$ のサンプル基板であるが、ビアホールのサイズが微小化する傾向にある。現在、さらに小さなサイズのビアホールについての形状計測実験を行っている。

謝 辞

本研究の一部は、SMC社からの奨学寄付の援助を受けて行われている。記して謝意を表します。(2003.12.8-受理)

文 献

- 1) 盆子原 學, 高橋健司: “軽量化を実現する基盤・実装技術”, 電子情報通信学会誌, Vol. **84**, No. 11, pp. 803–810, 2001
- 2) 小山田仁子, 西中山 宏, 秋山未来, 三浦修平, 本間英夫: “ビアホール・スルーホール混在基盤への電気銅めっき”, エレクトロニクス実装学会誌, Vol. **6**, No. 3, pp. 228–233, 2003
- 3) 木村 博, 莊村泰治, 渡辺隆司: “歯牙形状の三次元計測(第二報) —レーザ変位計による測定精度について—”, 齒科材料・機器, Vol. **8**, No. 2, pp. 137–143, 1989
- 4) 金田 一: “三角測量法によるレーザ式変位計の高精度化 —測定面の影響について—”, 計測自動制御学会論文集, Vol. **27**, No. 8, pp. 853–860, 1991
- 5) 岡部健二, 金田 一: “レーザ式変位計によるプリント基板のIC実装検査”, 計測自動制御学会論文集, Vol. **34**, No. 9, pp. 1127–1132, 1998
- 6) 弓削田 聡, 金田 一, 小川毅彦: “ファインピッチLSIパッケージのリードのオンライン並び計測”, 電子情報通信学会論文誌C-II, Vol. **J82-C-II**, No. 11, pp. 641–644, 1999
- 7) 高井信勝: “MATLAB入門”, 工学社, pp. 96–97, 2000