

位相シフト法インライン3次元外観検査システム

In-Line 3D Visual Inspection System Using Phase-Shift Method

野坂 健一郎* · 荒木 秀和** · 中原 智治*
Ken-ichiro Nosaka · Hidekazu Araki · Tomoharu Nakahara

生産工程の自動外観検査において、従来の2次元画像処理では検出が困難な欠け、凹み、膨らみ、反り等の欠陥検出や奥行方向の寸法計測を可能とするため、位相シフト法により直接3次元形状を計測する3次元外観検査システムを開発した。

このシステムのプロジェクタはワークの大きさに合わせて投影視野を変更できるレンズ交換式であり、かつLEDを光源に用いて長寿命化を実現している。また、信頼性評価関数を新たに考案して計測値の信頼性を確保するとともに濃淡境界部の計測誤差を改善するため、プロジェクタを二つ用いる構成を導入して計測誤差を96%軽減している。

A three-dimensional visual inspection system capable of direct 3D shape measurement has been developed by using a phase shift method for improving automated visual inspections in production processes, especially for enabling the detection of defects such as chipping, dents, swelling, warping etc that are difficult to detect by conventional two-dimensional image processing. Additionally, this system enables dimensional measurement in the depth direction.

The system's projector is built with a lens exchange design for changing the field of view according to the size of the object and an LED is used as a light source for ensuring long life. A reliability assessment function has been newly devised for ensuring the reliability of the measured values, and the configuration using two projectors is employed for improving measurement errors at contrast boundaries, thereby eliminating 96% of measurement errors.

1. ま え が き

従来、外観検査の自動化は2次元画像処理を応用して行われており、欠陥形状が2次元である汚れ、しみ等については安定した検出が可能である。また欠け、凹み、膨らみ、反り等の3次元形状となる欠陥検出時には照明方法を工夫して欠陥に起因する陰影を発生させ、この陰影を検出することにより間接的に欠陥の検出を行っている。しかし、欠陥の3次元形状にはさまざまなものがあることから、安定した検出が難しいため、検査閾値を安全側に設定することが多く、その結果歩留を悪くしている。とくに、緩やかに形状が変化する欠陥は陰影が付きにくく閾値設定を難しくしている。また、奥行方向の寸法計測ができないという問題もある。これらの問題を解決するために3次元形状を直接計測して検査ができる装置が望まれているが、処理時間、メンテナンス性、および導入コストのすべてを満足するも

のがなく、生産ラインにおける3次元検査は特殊な専用機を除き実現されていない。

3次元計測の方法にはさまざまなものがあるが、高い計測精度を安定して得られる方法としては光を投影して計測するアクティブ方式によるものが好ましく、これには光切断法、空間コード化法、位相シフト法、モアレ法がある¹⁾。なかでも位相シフト法は、投影強度を正弦波に変調した縞パターンを位相をずらしながら投影して計測する方法であり、全画素において計測値が得られること、比較的少数の画像から精度の高い計測ができること、計測範囲の調整が容易でさまざまなワークへの応用がしやすいことから当社では従来からこの方式を採用している^{2), 3)}。

プロジェクタを用いることによりこのような縞パターンを簡単に生成できるが、生産ラインでの使用を想定したものは市販されておらず、また生産ラインにおいてオフィス用を使用するのは投影範囲の設定、寿命、計測ヘッド設置

* 先行技術開発研究所 Advanced Technologies Development Laboratory

** 生産技術研究所 Production Technologies Research Laboratory

の自由度において問題がある。そこで筆者らは生産工程でのインライン検査に使われることを考慮し、レンズ交換が可能でLEDを光源とするプロジェクタを開発することにより、ワークの大きさに合わせて投影視野変更が容易、長寿命、計測ヘッドがコンパクトで設置の自由度が高いなどの特徴を有するインライン3次元外観検査システムを実現した。

この3次元外観検査システムを生産ラインにおける電子部品実装後のリード高さ検査に適用することにより、その有効性を確認している。

本稿では、次章で位相シフト法の原理を、3章で開発した計測システムの特徴を述べ、さらに4章で計測例、5章でリード高さ検査への応用事例を述べる。

2. 位相シフト法の原理

位相シフト法はステレオ計測と同じ三角測量に基づき距離を計測する方法で、ステレオ計測において片側のカメラをライン光投射光機に置き換えた光切断法と計測原理は同じである。光切断法は図1に示すように、物体に対してライン状のレーザー光を投光し、物体表面の形状に応じたライン光の像の歪具合から物体の3次元形状を復元するものである。光切断法の場合、1回の計測で1ライン分の計測しかできないため、画面全体の計測値を得ようとする、レーザー光の投光、撮像を画像の横方向画素数分行う必要があり、計測時間が長くなる。

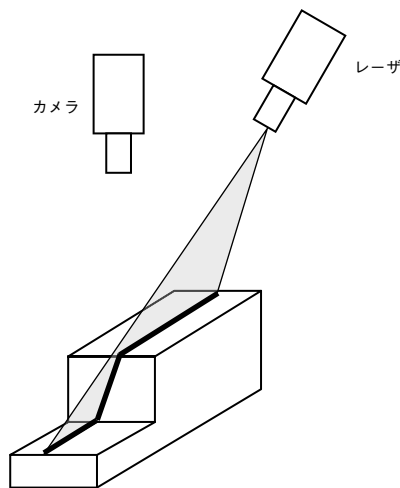


図1 光切断法の原理

一方、採用した位相シフト法は時間編解析法と呼ばれるもので、正弦波縞パターンをずらして撮像した画像を解析することにより距離を計測する方法である。位相シフト法では位相の異なる正弦波縞パターンの画像が最低3枚あれば3次元形状を復元することができるが、筆者らは4枚を採用している。このときの投影された正弦波縞パターンは、位相を $\pi/2$ ずつずらした4種類となる(図2)。

それぞれのパターンが投影された各画像の輝度値 $I_n(x, y)$ ($n = 0, 1, 2, 3$) は式(1)で表される。

$$I_n(x, y) = B(x, y) + A(x, y) \cos(\phi(x, y) + \frac{n\pi}{2}) \quad (1)$$

ここで、 $B(x, y)$ はバイアス成分、 $A(x, y)$ は撮像時の正弦波のコントラストの強さを表す(図3)。また、 $\phi(x, y)$ はその画素における正弦波の位相であり縞パターンの投影素子上の位置、すなわち、求める距離を表すものである。この位相 $\phi(x, y)$ は、撮像された4枚の画像の同一画素における輝度値から次式(2)で求められる。

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{I_3(x, y) - I_1(x, y)}{I_0(x, y) - I_2(x, y)} \right) \quad (2)$$

このように画像の画素ごとに正弦波の位相を求めることができる。

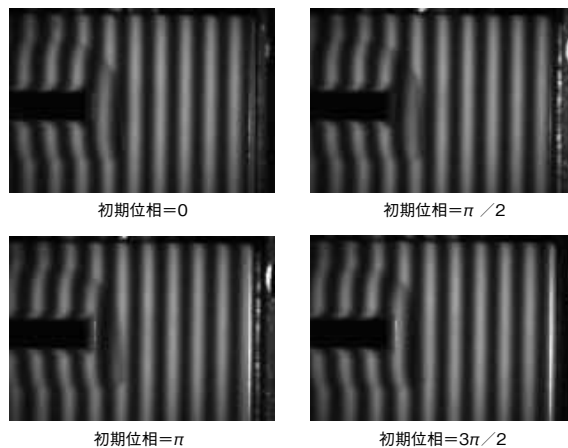


図2 縞パターンが投影された4枚の画像

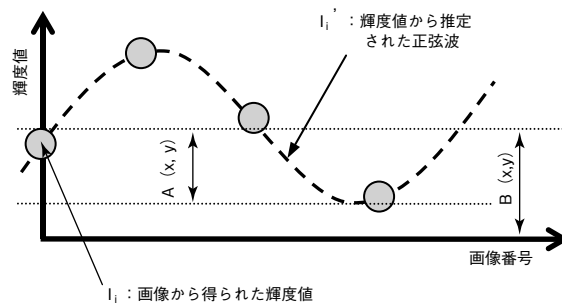


図3 位相φの復元

以下、距離を計測するための三角測量の原理について図4を使って説明する。投影する縞パターンはプロジェクタ内の投影素子上で生成され、正弦波の同位相である点は投影素子上のある1ラインに対応する。したがって、撮像素子上のある画素Pに対応する投影素子上の位相(線分

AB)の位置が得られれば、あとはカメラの光学中心座標 C_0 とプロジェクタの光学中心座標 P_0 から、直線 C_0P と平面 P_0AB の交点 Q として物体表面上の3次元座標を求めることができる。 C_0 および P_0 はキャリブレーション処理を行うことでその位置を取得することができる。キャリブレーションは機器の位置情報や計測システムの光学パラメータ(光学中心座標、焦点距離、アスペクト比、画素サイズ)を計測する処理で、位置関係が既知であるターゲットを計測して求めるものである。

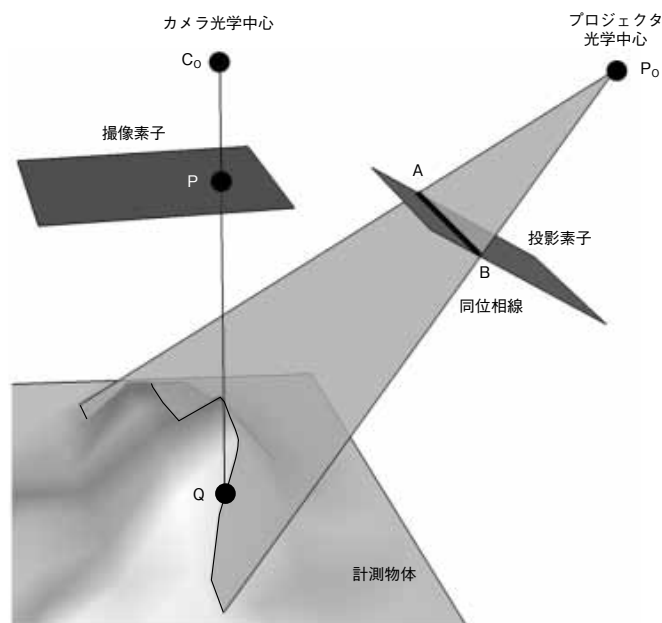


図4 3次元形状の復元

3. 3次元計測システム

3.1 計測ヘッド

位相シフト法の計測ヘッドはカメラ、プロジェクタ各1台ずつで構成される。このうちプロジェクタは検査用として独自に開発した。このプロジェクタの特徴は以下の2点である。

- (1) 計測視野を可変にするため、レンズ交換式にしている。
- (2) 長寿命化のためLED光源を採用している。

レンズマウントはFA用カメラの標準的なマウント方式であるCマウントを採用している。これにより、豊富なレンズのなかから適切なものを選択することが可能で、自由に計測視野を設定することができる。

また、広くFA用光源として使用されてきたハロゲンランプ光源の寿命が数千時間程度であるのに対し、LED光源の寿命は数万時間に及ぶ。たとえば寿命が4万時間であれば、24時間連続稼働でも4.5年交換不要であり、光源交換に伴うコストを大幅に低減できる。一方、LED光源の問題は光量が少ないことであるが、計測視野を適切に選択することによって生産ラインにおける検査では問題なく計

測を行うことが可能となる。近年はハロゲンランプ光源と同等の明るさをもつLED光源も登場してきており、LEDの光量の課題は次第に解決していくものと思われる。

開発したプロジェクタの構成を図5に示す。プロジェクタは、光源、インテグレート光学系、液晶、投影レンズによって構成される。図6に計測ヘッドの外観を示す。プロジェクタの寸法はW110×D150×H90mmであり、市販のプロジェクタと比較して場所を取らずコンパクトである。

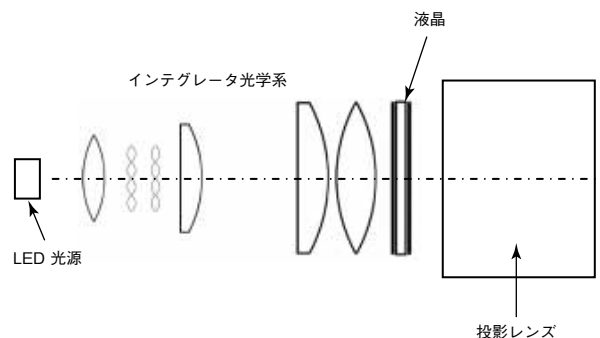


図5 開発したプロジェクタの光学系

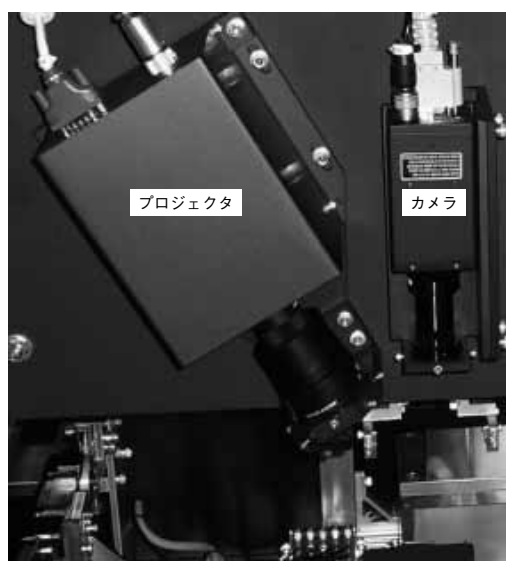


図6 開発した計測ヘッドの外観

3.2 計測信頼性の評価

位相シフト法では式(1)によって4枚の画像の輝度値から正弦波の形状を復元して位相を求めるが、輝度値の飽和や黒つぶれ、あるいは計算に伴う誤差などにより位相の値が大きくなる可能性があり、計測の信頼性が低下するおそれがある。

式(1)、式(2)、および観測値 $I_0 \sim I_3$ から、画素ごとに正弦波のパラメータ $A(x, y)$, $B(x, y)$, $\phi(x, y)$ と正弦波の推定値が求められる。この推定値と4枚の画像から得られた各観測値との誤差の2乗和を信頼性評価関数 S として式(3)で定義する。

$$S = \sqrt{\sum_{n=0}^3 \left[I_n(x,y) - \left\{ B(x,y) + A(x,y) \cos\left(\phi(x,y) + \frac{n\pi}{2}\right) \right\} \right]^2} \quad (3)$$

Sの値が大きいほど誤差が大きいことになり、信頼性の低い計測点であることを示す。これを用いて、Sが一定の値を超える場合の計測点を除外することで計測点の異常値を除去し、精度の高い計測結果を得ることができる(図7)。

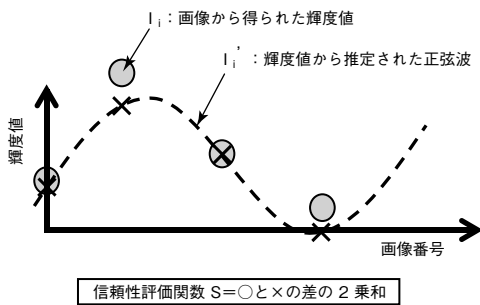


図7 計測信頼性の評価

3.3 キャリブレーション

カメラおよびプロジェクタのキャリブレーションは、計測空間中に位置関係が既知のターゲット点を多数配置して画像上で各ターゲット点の位置を計測し、画像上の座標と3次元空間の座標との関係から光学パラメータや光学機器の位置座標を求める処理である。通常、ターゲット点の計測は、平面上にターゲット点を配置した板の高さを変えながら複数回実施する。

しかし、検査装置として生産ラインに導入する場合、設備に組み込まれた状態でこのような作業を行うことは困難である。そこで、図8に示す段差付きキャリブレーションターゲットを開発した。このキャリブレーションターゲットは位置関係が既知であるターゲット点を3次元空間中に分布させて配置してあるため、1回の撮像でキャリブレーションを完了させることができる。作業に掛かる時間は、キャリブレーションターゲットの設置および取外しの時間を合わせても1分程度であり、生産現場での運用に適している。

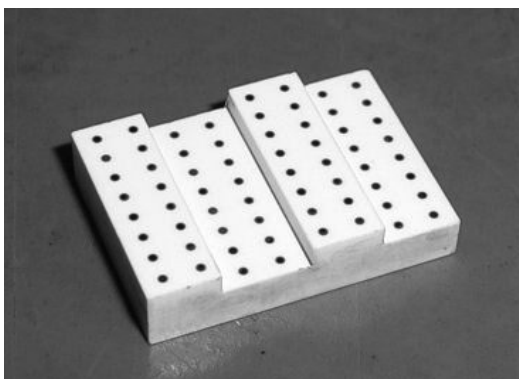


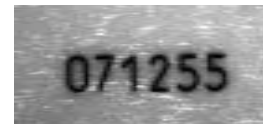
図8 段差付きキャリブレーションターゲット

3.4 濃淡境界部の誤差改善

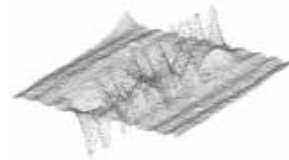
位相シフト法はカメラの画素ごとに独立して3次元座標を求めており、原理的には隣の画素の輝度値に影響を受けない方法であるが、実際の計測ではレンズ収差のため周囲の画素の輝度値が混ざり込み、とくに濃淡が大きく変化する位置ではそれによる計測誤差が生じる。

図9(a)はセラミックスの平面上に黒い文字が書かれているサンプルの外観、図9(b)はその通常計測結果の鳥瞰図である。文字の形に沿って計測誤差が発生していることが確認できる。

この問題を解決するため、カメラに対して線対称にもう1台のプロジェクタを配置して計測を行う、対称投影型計測ヘッドを開発した。対称投影型計測ヘッドでは、各プロジェクタを用いてそれぞれ独立に計測し、最後に計測値の合成を行い最終の計測結果とする。図9(c)が、対称投影型計測ヘッドを用いて図9(a)の対象物を計測した結果である。通常の計測結果を示す図9(b)に対して計測誤差は96%も低減している。



(a) 計測対象物



(b) 鳥瞰図 (通常計測)



(c) 鳥瞰図 (対称投影計測)

図9 濃淡が大きく変化する部分の計測誤差

4. 3次元形状計測例

開発した計測ヘッドを使用して計測した例を紹介する。

図10は当社コンセントのプラスチック成形部品の上面を計測したものである。コンセントの凹みの部分の形状や、文字の存在が3次元形状から確認できる。

図11はプラスチックのパッケージと金属の端子から成るコネクタの計測例である。プラスチック部分も金属部分も良好に計測ができており、コネクタ端子の高さ検査へ適用できる。

位相シフト法の計測精度は画像を用いるため計測視野の大きさに依存する。視野20×15mmで白いセラミックゲージを計測した場合、計測ばらつきは3σで4μm_{p-p}であった。

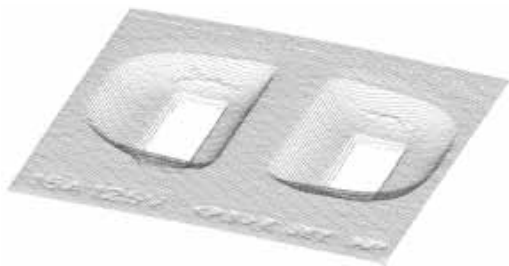


図10 コンセントの計測例

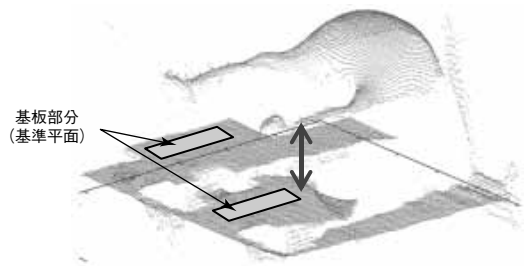


図13 リード高さ計測方法

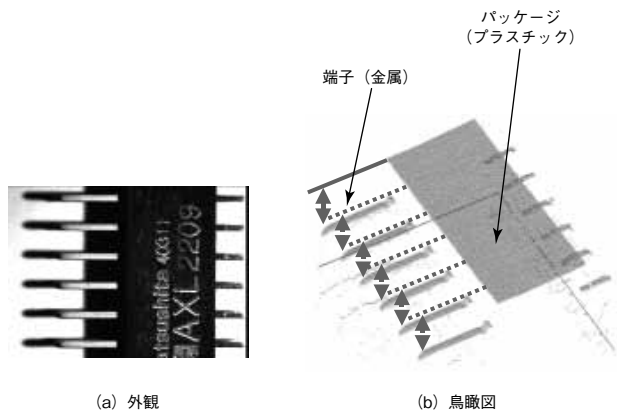


図11 コネクタの計測例

5. インライン3次元検査の例

位相シフト法を用いてインライン3次元検査を行った例を紹介する。電子部品のリード足が基板の端子に正しく溶接されているかどうかを調べるため、リード浮きの検査を行った。図12にリード足の溶接の可否とリード浮きの関係を示す。

また、図13にリード高さの計測方法を示す。リード周辺の基板の計測結果から基準平面の高さを算出し、基準平面からリードまでの高さを求める。

このような高さの検査は従来の2次元外観検査装置では側面から観測して計測することになるが、今回のようにリードが横に多数並ぶ場合は、カメラを配置することができず検査は困難であった。開発した3次元外観検査システムは、上面から撮像するだけで高さを計測することができるため、カメラの設置場所の制約もなくリード高さの検査が可能である。

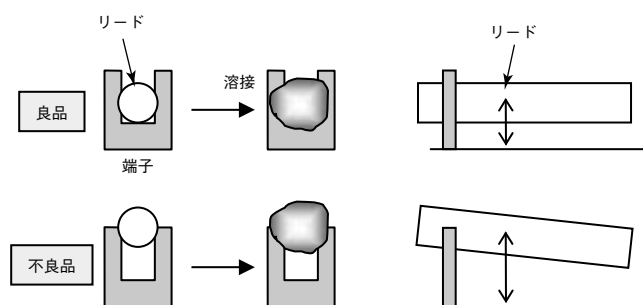


図12 溶接不良とリード浮きの関係

6. あとがき

生産工程の自動外観検査において、従来の2次元画像処理では検出が困難な欠け、凹み、膨らみ、反り等の欠陥検出や奥行方向の寸法計測を可能とするため、位相シフト法により直接3次元形状を計測する3次元外観検査システムを開発した。

このシステムのプロジェクタはワークの大きさに合わせて投影視野を変更できるレンズ交換式であり、かつLEDを光源に用いて長寿命化を実現した。また、信頼性評価関数を新たに考案して計測値の信頼性を確保するとともに濃淡境界部の計測誤差を改善するため、プロジェクタを二つ用いる構成を導入して計測誤差を96%軽減した。

今後、さらに計測精度の向上や処理の高速化を図り、3次元外観検査システムの適用範囲を広げていく予定である。

*参考文献

- 1) 吉澤 徹：最新光三次元計測，朝倉書店（2006）
- 2) 三高 良介，佐久間 祐治，細川 慎：目尻しわ三次元計測システム，松下電工技報，No. 67, p. 59-65（1999）
- 3) 三高 良介，濱田 長生：位相シフト法による高速高精度3次元計測技術，松下電工技報，No. 78, p. 10-15（2002）

◆執筆者紹介



野坂 健一郎
先行技術開発研究所



荒木 秀和
生産技術研究所



中原 智治
先行技術開発研究所