

カラーパターン投影法に基づくBGA 外観検査装置の試作

佐藤辰雄*・北山公也**

*機械電子部・**新鶴海興産株式会社

A Prototype Equipment Inspecting BGA Based on Color Pattern Projection Method

Tatsuo SATO* and Kimiya KITAYAMA**

*Mechanics & Electronics Division, **Shin Tsurukai Kousan Co.Ltd.

要旨

2次元の画像処理と3次元計測を併用し、BGA パッケージのはんだボール頂点の3次元座標を計測する外観検査装置を試作した。画像処理によりボールのXY位置を計測し、その中心付近の高さを3次元計測により計測するものである。画像処理と3次元計測には同一のカラー CCD カメラを使うことにより位置ずれは起こらない。3次元計測は、色相が直線的に変化する縞模様のカラーパターンを平行光で投影したカラーパターン投影法を用いた。距離の算出は、対象物体の凹凸に応じて生じるカラーパターンのゆがみ量を、基準面からの色相差で検出する方法を採った。この手法は対象物表面の分光反射率の違いなどにより誤差が発生するが、誤差の軽減法の検討を行うとともに、測定対象を BGA に、計測範囲をはんだボールの頂点付近に限定することで問題を回避した。また、全視野を一括計測できるので原理的に高速である。本検査装置は①特殊な光学系を必要とせず、②市販の CCD カメラが使用できるのでローコスト化が可能、③画像処理と3次元計測の併用で高速処理、等の特徴を有する。

1. はじめに

ICの製造では最終工程として電気的な性能検査の他に、外観検査を行うが、QFP などのパッケージについてはリードの浮きや曲がりといった項目について検査を行っており、これらのパッケージに対応した非接触の計測検査装置が多く開発されている。

しかし最近では高集積度 LSI のパッケージは、QFP から BGA または CSP へ移行しようとしている。BGA や CSP は IC リードに相当するはんだのボールをパッケージ底面に2次元に配置した構造となっており、ボール面の外観検査が必要となってきた。これらの検査は人手による目視検査ではもちろんだが、従来の画像処理手法で行う自動検査ではほとんど検査不可能で、特にボールの平坦度は計測が困難である。

一方、BGA パッケージに対応した検査装置も市販されるようになってきてはいるが、それらはいずれもレーザー変位計を搭載したもので、レーザースポットでボール面を2次元にスキャンするようになっており、ボール高さ方向の精度は高いものの、処理速度が遅く高価であるという欠点がある。

本研究は、画像処理に併用して、カラーパターン投影法に基づく3次元計測法を導入することで、ボール面をスキャンすることなく1度に計測することにより検査速度を高速にできる検査装置を試作したもので、以下これについて説明する。

2. 検査装置の概要

試作した検査装置は、モノクロ画像による画像処理と、カラーパターン投影法に基づく3次元計測とを組み合わせることにより、BGA のはんだボール面に関する検査を高速に行うものである。

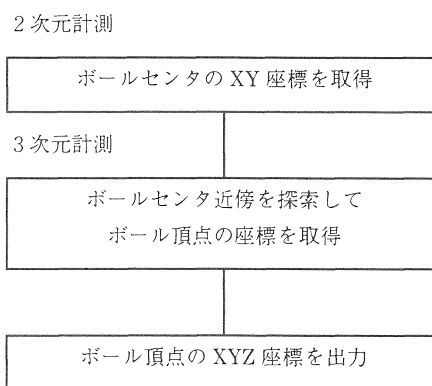


Fig. 1 検査装置の概要

カラーパターン投影法については、田島らが、Rainbow Range Finder(RRF)¹⁾と呼ぶシステムを提案している。これは回折格子によって分光した虹状の連続スペクトルパターンを対象物に照射し、それぞれ分光感度の異なる2種のセンサでスペクトル分布を求めて三角測量により距離を求めるものである。光学系やセンサが特殊であるが、本質的に対象物の表面の色の影響を受けにくいこと、一度に視野内の全面を計測できる等の優れた特徴を持っている。

一方本提案では、投影するカラーパターンを、通常の平行白色光源とカラーパターンを印刷したフィルタにより発生させ、受ける側のセンサも市販のカラー CCD カメラとすることにより簡略化した。これにより装置がローコストで製作できるとともに、照明光の強度を強くできる利点がある。

モノクロ画像は、通常の画像処理を行い、BGA のはんだボールの輪郭をとらえてその中心位置などを計測する。カラー画像では、カラーパターン投影法による距離計測を行い、はんだボールの頂点の高さを計測する。この時、モノクロ画像の取得とカラー画像の取得は同一の CCD カメラで行うため位置ずれは生じない。また、3次元計測時、カラーパターンを斜め方向から投影するときオクルージョンにより投影(計測)不可能な場所が生じるが、少なくともはんだボールの頂点は必ず計測可能なため検査の目的に関しては問題とはならない。

3. 三次元計測の原理

3.1. 計測原理の概要

計測の基本的な原理は光切断法と同じである。一本のスリット光を斜め上方から物体に投影し、それを直上から観察すると、物体の凹凸に応じてゆがんだスリット像が得られ、そのゆがんだスリット像のずれ量から物体の高さが計算できる。

視野内の全面を計測するためには、このスリット光を視野内全面にわたって走査する方法や、スリットの本数を増やす方法などが考えられるが、走査の場合には計測時間が遅くなり、複数スリットとすると一度に全面のスリット像が得られそうに思えるがスリット光とスリット像との対応関係が決定できなくなるなどの欠点が発生する。

この問題を解決するにはカラーパターン投影法が考えられる。色合いが連続に変化している縞模様のカラーパターン(Fig. 2)を投影し、それをカラーカメラで観測した像は、同じ色合いの部分を追跡すれば一本のスリットの像と同じになる。この追跡操作を様々な色合いについて行うことにより複数のスリット像を同時に得たのと同じ結果が得られ、結果として全面同時計測が可能となる。しかしこの操作は実際には繰り返し処理量が多くなり、処理が遅くなる。

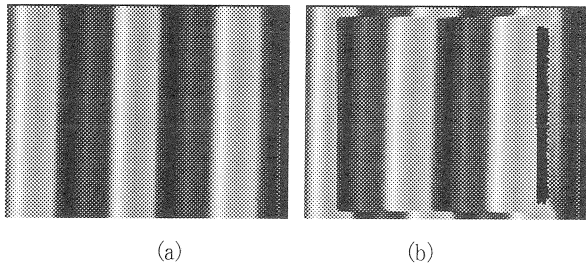


Fig. 2 カラーパターン像の例

(a) 白色基準面に投影したカラーパターンの像

(b) 基準面上に $27 \times 27 \times 2$ mm の白色平板状のブロックを置いたときのカラーパターン像

平行な縞模様のカラーパターンを斜め上から投影し、直上のカメラで観測すると、投影された平行カラーパターンの像は対象物の凹凸に応じてゆがみが生じている。このとき画像上の任意の点における色合いと、その点の基準面(高さ)における色合いの定量化ができれば、投影角と色合いの差の関係からその点における高さが計算できる。

3.2. 色相

色合いの表現のために色相(Hue)を導入する。色相の計算にはいくつかの方法があるようだが、ここでは次の式によりカラーカメラのRGB信号から計算で求める。

$$Min = \min(R, G, B)$$

$$R' = R - Min$$

$$G' = G - Min$$

$$B' = B - Min$$

$$H = \begin{cases} G'/(R'+G') & \text{if } Min = B \\ B'/(G'+B')+1 & \text{if } Min = R \\ R'/(B'+R')+2 & \text{if } Min = G \end{cases} \quad (1)$$

ここで H は色相で、 $0 \leq H < 3$ で循環するものとする。

3.3. 距離(高さ)の算出

高さの算出のため座標系を次のようにおく。即ち高さ方向を Z とし、投影光の中心線が $X-Z$ 面内で、カラーパターンの平行縞模様が Y 軸に平行になるようにする。この様子を Fig. 3 に示す。

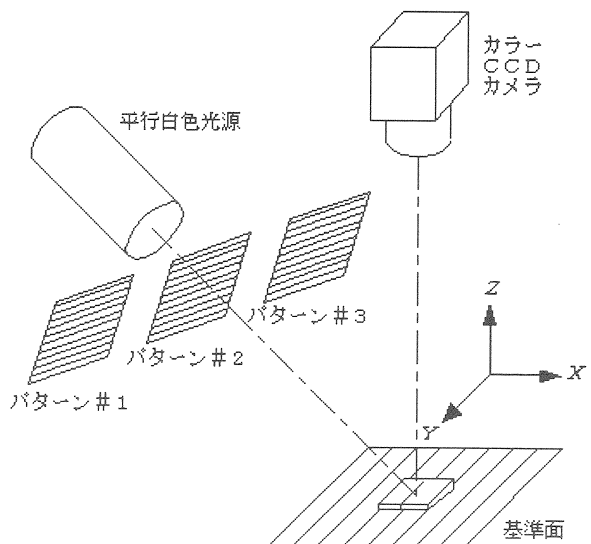


Fig. 3 光学系の配置の様子(計測範囲は基準面上 $30 \times 30 \times 5$ mm のエリア)

平行縞模様カラーパターンを投影するカラーフィルタは、色相が直線的に変化するように設計する。このときの任意の点の色相変化の勾配を次のように決める。

$$dH/dX = A \quad A: \text{const.}$$

このとき、対象物の凹凸に応じてゆがんだカラーパターン像

から計測した色相差 ΔH は次式により X 座標の変位 ΔX に変換される。

$$\Delta X = \Delta H / A$$

投影光が平行で投影角が θ とすれば、その点における基準面からの距離(高さ)は次式により求められる。

$$\begin{aligned} \Delta Z &= \Delta X \tan \theta \\ &= (\Delta H / A) \tan \theta \\ &= c \Delta H \end{aligned} \quad (2)$$

ここで係数 $c = \tan \theta / A$ は一定値である。したがって、ある点における高さは本来基準面に投影されたであろうパターンの色相からの色相差に比例する。そこで基準面位置を $Z = 0$ とし、この係数をキャリブレーションで求めておけば、投影角および投影パターンの色相変化の勾配はあらかじめ測定することなく高さが測れる。この様子を Fig.4 に示す。

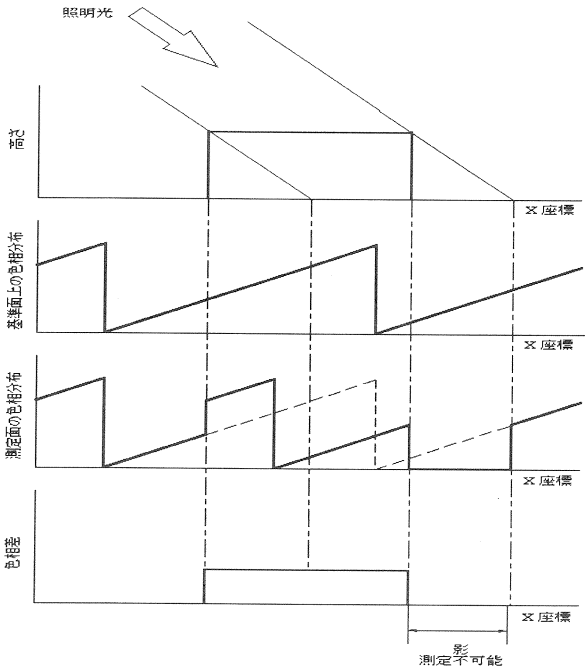


Fig. 4 距離算出原理

3.4. 測定対象の表面色の影響の軽減

このようなカラーパターン投影法では計測対象物の表面色の影響が問題となる。この影響を軽減するために、色相がそれぞれ循環的に $2\pi/3$ ずつずらした3通りの投影パターンを準備し、投影像を3回取り込む。このときそれぞれのRGB信号を (R_0, G_0, B_0) , (R_1, G_1, B_1) , (R_2, G_2, B_2) とし、次のようにして合成を行い、色相を算出する。

$$R = R_0 + G_1 + B_2$$

$$G = G_0 + B_1 + R_2$$

$$B = B_0 + R_1 + G_2$$

この操作により対象物体の表面色によりバイアスを与えられた

画像が、そのバイアスの影響を位相シフトすることにより軽減される。この処理手順とキャンセルされる様子を Fig.5, Fig.6 に示す。

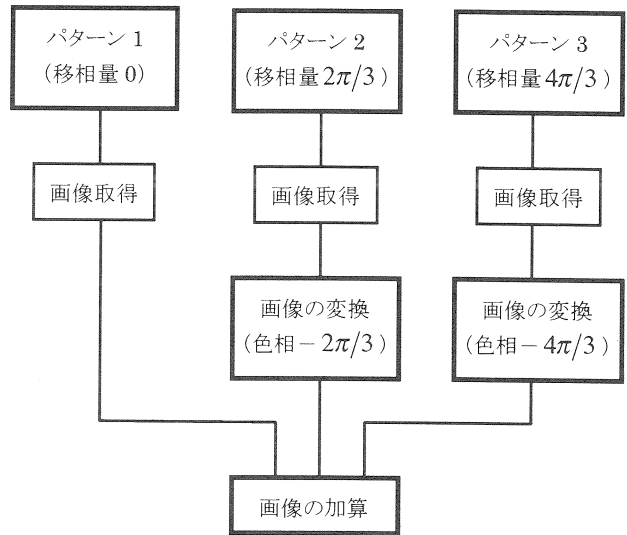


Fig.5 対象物の分光反射率の影響の軽減

このような操作はさらに複数回繰り返してノイズ等の影響を軽減することもできる。

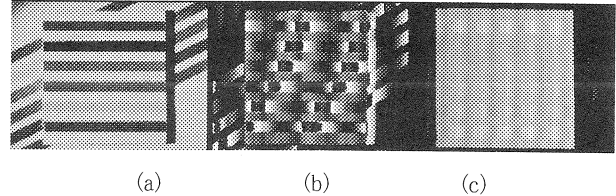


Fig. 6 色相ずらし処理の効果(距離画像での表示は、低いところを暗く、高い方を明るく表示してある)

- (a) 基準面に置いたの平板状のブロックのカラー画像
- (b) 色相ずらしをしないで計測したときの距離画像
- (c) 色相ずらしによりほぼ正しく計測された距離画像

3.5. BGAへの対応(金属表面における鏡面反射)

多くの3次元計測手法では表面が金属のような鏡面反射特性を持つ物体を計測することは一般にできない。しかし、はんだボールの場合は通常かなり酸化されているので完全な鏡面反射とはならず、散乱反射もかなりみられ、カラーパターンの色相を決定することが可能である。

鏡面反射特性を持つ物体の計測ではこのほかにも周囲の映り込み(2次反射)もある。形状によっては計測点での散乱反射成分より近傍からの2次反射成分の方が大きくなり、偽の距離(高さ)が計測される場合がある。

このような理由から、BGAを対象とする場合、全面にわたって正確な計測を行うことはできない。しかしここではボール頂点付近の高さ分布さえ得られればよいので、ボール中央部についてのみ高さ計測を行うものとする。中央部はほぼ平坦であり、2次反射の影響はあまり受けない。また、前述のようにボール

中心の座標取得には2次元の画像処理を用いるため、問題はない。

3.6. フィルタとカメラ分光感度の非直線性歪の軽減

カラーフィルタはそれを印刷するときの出力装置の特性により設計通りの色相が表現できていない。また、カメラの分光感度特性もRGBの境界での特性が直線的に減衰しているわけではない。これらの理由から、カラーフィルタの色相変化を直線に設計したにも関わらず、カラーパターンを撮影したときの画像から得られる色相の変化は直線とはならない。そこで、投影光の色相変化が基準面上で観測した時に直線となるように補正を行う。この補正データは、基準面上に白い平板を置いて得た投影画像の色相分布の回帰分析から求めた直線と、実際の分布との差から求める。

このようにして得た、白色基準面上に投影したカラーパターンの色相変化の例を Fig.7 に示す。

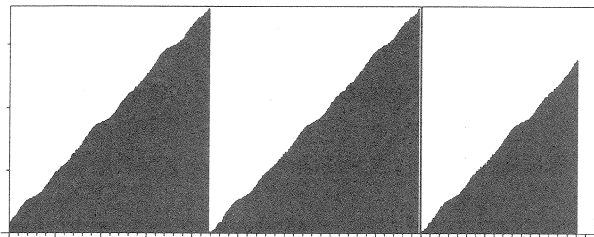


Fig. 7 白色基準面上に投影されたカラーパターン像から得られる色相変化の例

4. 実験

4.1. 試作した実験装置

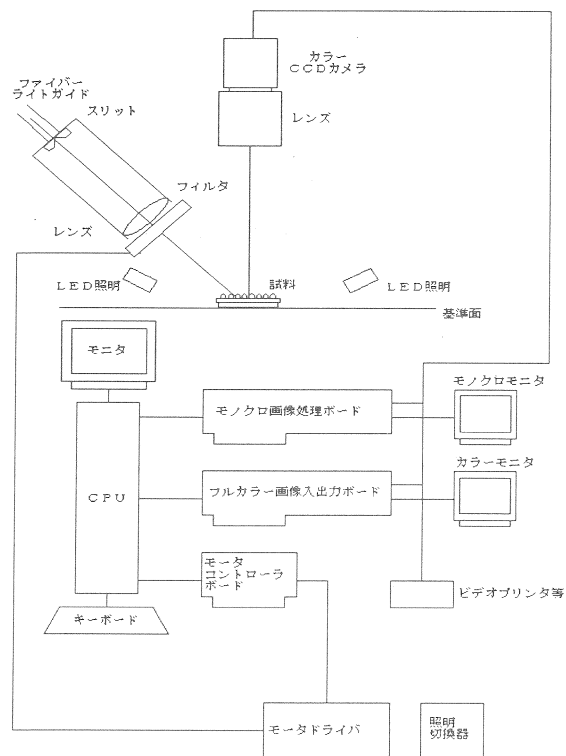


Fig. 8 試作した検査装置のハードウェア構成

試作した実験装置のハードウェアは、パソコンとモノクロ画像の入力ボード、カラー画像の入力ボード、カラーパターン投影用の光源とカラーフィルタ、モノクロ画像取得時のためのLED光源、カラー CCD カメラなどからなる。

2次元の画像処理を行う場合は、対象物の両サイド斜め上方からLED照明を与え、これをカラー CCD カメラにより真上から撮影し、モノクロ画像取り込みボードを経由してパソコンに取り込む。カラーカメラを使ってモノクロ画像を得るには、実際の対象物である BGA が、金属(はんだ)と黒または濃いグリーン樹脂からなるため、コントラスト比が得易いということでRチャンネルを使った。このときLED照明光も赤色とした。

3次元計測を行うときは、ライトガイドを経由して導入された白色光は、スリット及びレンズを通して十分な面積の平行光となり、さらにフィルタを通してカラーパターンとして対象物に投影される。これをカラー CCD カメラにより真上から撮影し、カラー画像取り込みボードを経由してパソコンに取り込む。

このように、モノクロ画像の取得とカラー画像の取得は同一のカラー CCD カメラで行うため、両者の間での位置ずれは生じない。カメラと投光器の周りの光学系部分の実際の様子を Fig.9 に示す。

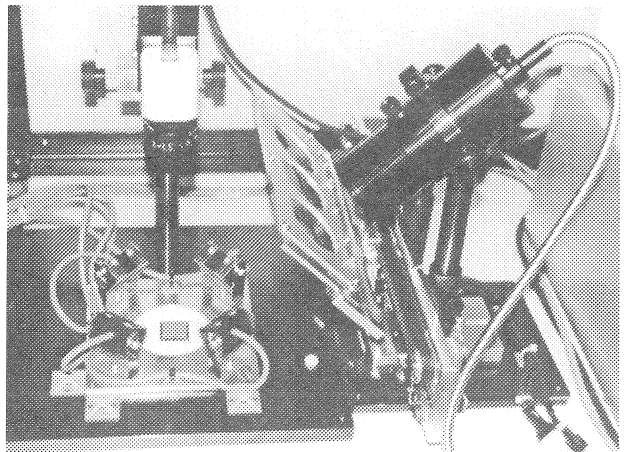


Fig. 9 カメラと投光器周りの光学系

4.2. 距離(高さ)計測の精度評価

距離計測精度の評価実験としては、カメラの視野に対して十分広い白色の平板(厚さ約 0.4mm 程度)を順に重ねてその高さを計測した。このとき、それぞれの高さについて5回計測し、その平均と標準偏差とで評価した。結果を Table1 に示す。

このときの標準偏差の平均は約 $50\mu\text{m}$ である。この結果から誤差範囲を $\pm 2\sigma$ と見積もれば、現状の測定精度はおおよそ $\pm 100\mu\text{m}$ とみなせる。

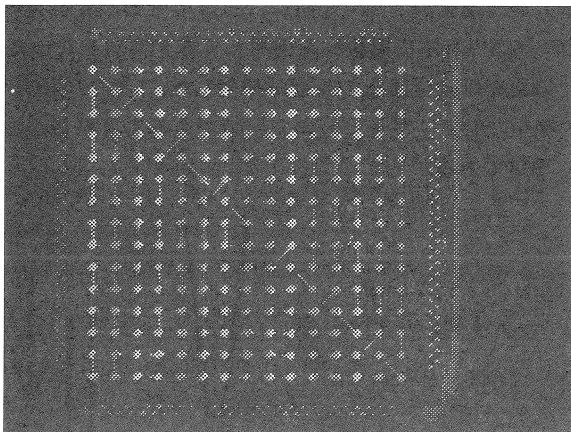
Table 1 距離(高さ)計測の実験結果

平板重ね枚数	測定値平均	測定値標準偏差
0	30	30
1	460	50
2	920	50
3	1380	50
4	1850	50
5	2300	60

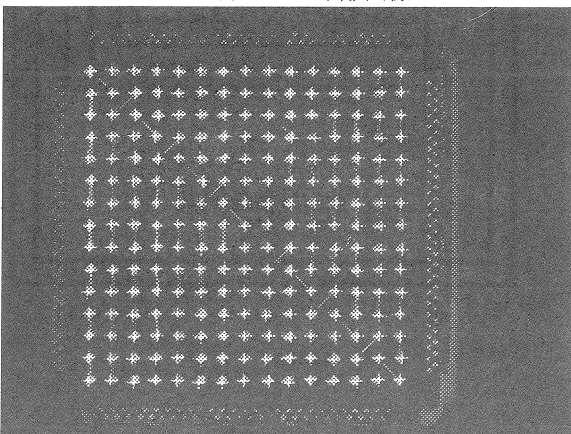
(単位: μm)

4.3. BGAの計測例

実際に BGA のボール面の計測を行った。3次元計測結果の距離画像を Fig.10 (a)に、またその上に2次元画像処理によって求めたボール中心のマークを重ねて表示したものを Fig. 10 (b)に示す。



(a)BGA の距離画像



(b)距離画像の上にボールセンター位置を重ねて表示

Fig. 10 BGA のボール面を計測した結果

4.4. 計測時間

現状の試作機では、一連の計測には約 20 秒を要している。ただし、この時間の大半は3種のカラーフィルタを交換するために要している時間であり、3次元計測の処理時間はおよそ 2.4 秒、2次元画像処理の時間はおよそ 1.2 秒である。使用した計算機は486DX2の 66MHz である。

5. 今後の課題

以上述べてきたように、現状の試作機では計測精度、処理速度ともに実用域には到達できなかった。

5.1. 距離計測誤差について

① パターン光投影像を取り込む段階で、対象物の色の影響(分光反射率の問題)を受けていることが大きい。これを改善するには、根本的に表面の色などの影響をキャンセルできる方法を考える必要がある。同時にカメラの分光感度もキャンセルできることが望ましい。

② 投影するカラーパターンのスペクトル分布の問題もある。この問題については、色表現が的確に行える方法を検討する必要がある。同時に、補正についても検討の余地がある。

③ 照明光源の平行度も問題となる。現時点では特に評価していないが、これを改善することも精度向上に寄与する。

5.2. 処理時間について

① 現状ではかなり遅いが、計算時間自体はあまり遅くはなく、この時間の大半は3種のカラーフィルタを交換するためにステッピングモータを駆動し機械的に移動するのに要している。したがって、投影パターンを電子的に換える等して高速化する必要がある。例えば、カラーフィルタの代わりに液晶投射器などを使用することが考えられる。

② 計算時間については処理をDSPで置き換える等すれば、さらに高速化できると思われる。

6. むすび

高密度実装用 LSI パッケージの BGA を対象とした検査装置を試作した。計測には、従来からよく使われている2次元の画像処理と、3次元計測を併用して処理の簡単化を計った。

3次元計測手法は、色相が直線的に変化する平行縞模様を用いることにより光切断法を拡張し、色相に着目して処理の簡単化を計った。この手法はカラーパターン投影法に属するものと考えられる。

また、いくつかの誤差要因についても、完全ではないが改善を試みた。今後は実用域までの精度向上が必須である。

なお、本研究は実践的研究者養成事業にて実施し、第8回「外観検査の自動化」ワークショップ^[3]にて発表したものを再掲したものである。

文 献

- [1] 田島譲二, 岩川正人, “Rainbow Range Finder による距離画像取得”, 信学論(D-II), J73-D-II, 3, pp. 374-382(1990)
- [2] 井口征士, 佐藤宏介, “三次元画像計測”, 昭晃堂(1990)
- [3] 佐藤辰雄, 北山公也, “カラーパターン投影法に基づく BGA 外観検査装置の試作”, 第8回「外観検査の自動化」ワークショップ, 精密工学会, pp100-105(1996)