リング状光源を用いた IC リードフレーム表面の 欠陥検査システムの開発*

中 村 良 治** 榎 田 修 一***

Development of Defect Verification System of IC Lead Frame Surface Using a Ring-lighting

Yoshiharu NAKAMURA and Shuichi ENOKIDA

Recently, demand has grown for defect detection processes utilizing machine vision applications. This is especially needful for the abovementioned IC lead frames used in semiconductor manufacture, which require both high quality and miniaturization. In previous work, we proposed a detection method that assumes the variance in the intensity of oriented gradients in images that include defective areas will be larger than that found in acceptable areas. Therefore, there is a tendency to detect defects that has large variance in the local image. However, when conventional image processing methods are used for verifying a defect of deformation in flat parts, it was confirmed that the detection was difficult. Image processing methods using the surface normal direction is proposed in order to detect defect of deformation in flat parts. Since most of these methods use a fixed parameter, when these methods detect for various defects in industrial parts, there is a risk of missing a defect. In this paper, another defect detection method is proposed for detecting various defect sizes and defect types. This method determines appropriate block size based on median value of luminance dispersions calculated on several block sizes. In our experimental results, our proposal method can achieve good performance to detect defects in several sizes.

Key words: machine vision, defect detection, multiple light source imaging, IC lead frame

1. 緒 言

1.1 研究背景

半導体の一部である IC リードフレームにおいて、近年、微細化、高品質化が進んでおり、照明、撮影機器類の発展に伴い¹⁾、画像処理技術による不良の流出防止・早期発見の実現が期待されている²⁾。著者らはエッジの勾配分布を用いた欠陥検出手法を提案した^{3,4)}。他にも局所領域のみに注目し、その領域内での調和を乱すものが欠陥であるとの考えにて欠陥検出を実現しようとする試みもある^{5,6)}。しかし著者らが IC リードフレームに対し、文献 5)、6)の追実験を行ったところ、平坦部に発生する変形等の欠陥には著しく検出率が低下する等の問題点を確認した。

そこで平坦部の変形等の欠陥検出を実現する画像処理手法として、法線に注目した手法がある。具体的には、パターン照明の照射^{7,8)}や、強度の異なる照明の照射⁹⁾により検査対象の3次元形状を推定し、良品判定を実現する手法が提案されている。しかし、これらの従来手法では、取得した画像に対して画像特徴を算出するブロックサイズ等のパラメータを固定して検査処理が行われるものが多数である。そのため、実際に工業部品等に検査処理を適用する際は、その工程や発生する欠陥に合わせて、設計者がパラメータの設定を行う必要があるが、設定コストがかかる上、設定されたパラメータの影響によって大きく性能が左右される。また、実際の工業部品では、サイズ、種類等、様々な欠陥が発生するため、画像全体に対して同じパラメータ

(ブロックサイズ等)による検査では、欠陥を見逃すリスクを含んでいると言える。そこで同一部品上に発生するこれらの様々な欠陥に対応するには、欠陥のサイズ、種類によって検査に使用するパラメータを動的に変化させる必要がある。

1.2 目 的

本研究では、IC リードフレームに発生する欠陥サイズに注目し、様々な欠陥に対応する。ここで、サイズの小さな欠陥は、ブロックサイズの小さな欠陥検出器であっても、検出可能な高周波な信号変動であると考えられる。逆に、サイズの大きな欠陥は、ブロックサイズの小さな欠陥検出器では、検出が困難な低周波な信号変動であると考えられ、その信号変動を検出するためには大きなブロックサイズの欠陥検出器が必要であると考ええる。本論文では、欠陥検出器が検査エリア毎に勾配分布等の画像特徴を算出する際に使用するブロックサイズを欠陥のサイズに対して適切に自動決定する手法を提案する。検査全体の流れを図1に示す。検査処理は、2段階で構成される。1段階目の処理では、検査エリア毎に、全ての周波数帯における欠陥検出を粗く行い、疑わしい検査エリアは2段階目の検査へ回す(検査処理①)。またこの検査処理①の判定は、計算コストの軽い処理を採用する。2段階目では、欠陥位置を特定するため、検査処理①に比べ、計算コストの高い処理を行う。欠陥箇所を正確に特定するには、小さな領域で確認を行う必要があるが、単純に小さな領域で判定を行おうとすると得られる情報が少なくなる。そのため本研究では、複数光源で撮像した画像を用い、小さな領域でも判定できるよう情報を補うこととした。しかし、欠陥箇所の特定にあたって、高周波の情報(小さなブロックサイズに基づく検出結果)のみを使用するとノイズが多く含まれるリスクがあり、低周波の情報(大きなブロックサイズに基づく検出結果)のみを使用すると見逃しが多く発生するリスクが、

* 原稿受付 平成 27 年 5 月 11 日

掲載決定 平成 27 年 9 月 4 日

** 株式会社三井ハイテック(福岡県北九州市八幡西区小嶺二丁目 10 番 1 号)、九州工業大学(福岡県飯塚市川津 680-4)

*** 九州工業大学(福岡県飯塚市川津 680-4)

Fig.1 Flow of inspection processing of the proposed method

高くなる。そこで、ブロックサイズを一意に定めるのではなく、複数のブロックサイズの結果を重み付き線形和により統合し利用することによって、光学系の傾き等の影響を低減しつつ欠陥を特定する。この際、検査処理①で入力画像から直接得られた各周波数帯での数値（パワー）と、予め欠陥箇所を把握しているサンプルを用いた学習により、検査エリア毎にその工程で発生する欠陥に適応したブロックサイズと重みを自動決定する。

本研究では欠陥検出器として、正常部が平面で構成される IC リードフレームにおいて、欠陥部では、正常部に比べ表面の法線方向に傾きがあることに注目し、検査領域の法線方向とカメラ光軸の不一致が存在する箇所を欠陥と定義する手法を提案し、用いることとした。

2. 法線方向と観測される反射光の関係について

2.1 表面の法線方向と反射光

物体表面で観測される反射光の状態は、様々な反射モデルで表現され、その多くの反射モデルは、図 2 のように反射光を拡散反射成分と鏡面反射成分の和で近似する¹⁰⁾。

物体表面上のある点 x を観測するとき、拡散反射モデルとして、Lambert モデルが広く用いられ、式 (1) のように照明方向 L と法線方向 N のなす角の余弦に比例すると仮定される (図 3)。

$$i = \rho_d \max(0, N \cdot L) \quad (1)$$

ρ_d は拡散反射率である。

また、鏡面反射モデルとしては Phong モデル¹¹⁾があり、式 (2) のように照明方向の正反射 L' と観測方向 V のなす角 α の余弦のべき乗として近似される。

$$i = \rho_s \cos^n \alpha \quad (2)$$

ρ_s は鏡面反射率、係数 n は表面の粗さを表すパラメータである。

Lambert モデルで表される拡散反射成分も、Phong モデルで表される鏡面反射成分も、表面の法線方向により、観測できる反射光に変化が起こることがわかる。ここでカメラと物体までの距離を固定し、図 4 のように、光源と観測点 x までの距離 d 、光源と物体とのなす角 θ を固定した状態でカメラ光軸と観測点 x を軸として光源を回転させたとき、法線方向とカメラ光軸が一致する場合は光源が回転してもカメラに入力される反射光は同じであると仮定できる。しかし、法線方向とカメラ光軸が一致しないときは、各光源位置により、入力される反射光に違いが生じる。よって、光源を回転させ撮像したときの各画像を解析することにより、検査対象である平面の法線方向と、検査カメラの光軸が一致しているか、いないかを確認できると仮定できる。

Fig.2 Diffuse and specular reflection components

Fig.3 Angle parameters and vectors used for the reflection model

Fig.4 Light source and surface normal direction

2.2 欠陥部での表面法線に関する考察

これまで著者らが提案してきたエッジの勾配分布を用いた欠陥検出手法³⁾は、直線形状で構成される IC リードフレームにお

いて、図 5 に示すような 2 次元画像中で複数方向のエッジ勾配を持つ欠陥を対象としており、部品形状端面に発生する欠陥や強いエッジを持つ欠陥に対し有効性を示したが、図 6 に示すような、平坦部に発生する強いエッジをもたない欠陥、または直線形状の欠陥には不向きな面があった。そこで正常部が平面であるのに対し、図 6 に示すような欠陥は、表面の法線方向に傾きがあることに注目し、カメラ光軸に対して、検査領域の法線方向が不一致である箇所を欠陥と定義し、欠陥を検出する手法を適用する。欠陥部での 3 次元形状の表面法線方向の傾きのイメージを図 6 の下図に示す。

3. 検査手法

3.1 検査機器

検査機器の構成を図 7 に示す。複数の光源方向から撮像可能なように設計した。図 7 の下図のようにリング状 LED 照明を 90°分だけ開口し、異なる光源方向として、22.5°ずつ回転させ、計 16 方向の光源から撮像した画像を取得できる。図 8 に本撮像環境にて、光源を右側に配置し、白紙を撮像したときの明るさの分布を示す。図 8 のように、光源から近い位置で明るくなるため、光源の位置を変えたときにも光量が安定する中央付近のエリアを検査に使用する。今回の検査機器では、光量の安定領域は 10mm×10mm 程度であるが、今回使用したものよりも大きな照明を用いることで、安定領域の拡大は可能である。また 1 画素のサイズは 30 μ m 程度である。

3.2 法線方向とカメラ光軸の一致／不一致の特定

本論文では、異なる光源方向から撮像した複数の画像を用い、各画像に対して同一箇所での輝度の分散を算出し、欠陥を検出する方法を適用する。これは、正常部では、法線方向とカメラ光軸とが一致しているため、異なる光源方向から撮像した場合でも、カメラに入力される反射光の強度に変化が観測されないことに対し、欠陥部では、カメラ光軸に対し法線方向に傾きが存在するため、異なる光源方向から撮像した場合、カメラに入力される反射光の強度に変化が生じる。そこで異なる光源方向から撮像した画像を解析することで欠陥部の検出が可能であることに着目した手法である。本来、異なる光学条件にて撮像した複数の画像から形状推定を行う照度差ステレオ法等¹²⁾を実施すれば、欠陥部の形状を詳細に把握することで欠陥箇所の特定は可能であると予想される。しかし詳細な法線情報の取得は計算コストが大きく、また得たい情報は欠陥であるか否かであり、詳細な法線情報は必要ない。そのため、法線方向の傾きによる反射光の強度変化のみの特定を行う手法を適用することとした。

3.3 検査処理

検査処理は、2 段階で構成され、1 段階目の処理で、検査エリア毎に、欠陥を含むか否かの判定を行う（検査処理①）、その後、2 段階目の処理として、検査処理①で欠陥を含むとしたエリアに対して、欠陥とみなされる箇所を特定する処理（検査処理②）を行う。

3.3.1 検査処理①「検査エリア毎、正常／欠陥を判定」

検査処理①では検査エリア毎に欠陥を含むか否かの判定を行う。この判定に大域領域にて、周囲と比較し欠陥部の法線方向の傾きによる輝度変化領域を特定することで欠陥の判定を行う分散値 V_r を用いる。この V_r は大域領域（ブロックサイズ）内に、周囲とは異なる輝度値を持つ欠陥が存在していた場合に、ブロック内の分散値が大きくなるため、欠陥判定ができる。

N 個の光源方向（ $i=1, 2, \dots, N$ ）から撮像した画像

Fig.5 Defect with variance in the intensity of oriented gradients

Fig.6 Defects and surface normal directions

Fig.7 Imaging environment

When the light source is on the upper side, the area where light intensity is sufficient.

When the light source is on the right side, the area where light intensity is sufficient.

The light intensity is stabilized by the illumination source rotation.

Fig.8 Brightness distribution

毎にブロックサイズ（ s_r : V_r に使用するブロックサイズ）における輝度の分散を算出し、各画像の同一箇所での最大値を持つ画像の分散値をその箇所の V_r 値とする（図 9）。最大値を用いることで、欠陥に対して最も周囲との輝度差が大きい光源方向の結果を使用することができる。

 Fig.9 V_r calculation method

$$V_r^{(i)}(x, y) = \frac{1}{s_r^2} \sum_{x=1}^{s_r} \sum_{y=1}^{s_r} (I_{x,y} - \bar{I}_r)^2 \quad (3)$$

$$V_r(x, y) = \max_{i \in N} \{V_r^{(i)}(x, y)\}$$

$\bar{I}_r$ はブロック毎の平均値

検査領域をラスタスキャンし全画素に対し、式 (3) を用い、 V_r を算出する。

このとき、様々な周波数帯の欠陥に対応できるように、ブロックサイズを複数用意し、異なるブロックサイズ毎に、検査エリア中の V_r の最大値を算出し、その異なるブロックサイズ毎に持つ最大値から中央値を取得する。算出された中央値に閾値 Th_{p1} を用い、欠陥を含むか否かの判定を行う。

$$\text{median} V_r = \text{median}_{s_r} [\max_x \{V_r(x, s_r)\}] \quad (4)$$

$$\text{median} V_r > Th_{p1}$$

x : 画像中の位置

異なるブロックサイズ毎の最大値から、中央値を算出し利用することで、あるブロックサイズでは反応してしまうノイズの影響を除去できるとともに、欠陥が存在すれば、様々なブロックサイズでも V_r 値がある程度大きくなるとの考えから、ロバストに欠陥を含むか否かを判定できる。

3.3.2 検査処理②「欠陥とみなされる箇所の特定」

検査処理②では、検査処理①にて欠陥を含むと判定されたエリアに対して、欠陥とみなされる箇所を特定する。このとき、欠陥箇所を正確に特定するには、小さな領域で分散を算出する必要がある。領域を小さくして欠陥が計測できる指標が必要だが、検査処理①で使用した V_r 値は、1 方向の光源毎でブロックサイズでの分散値を算出するため、ブロックサイズを小さくし過ぎると、欠陥に対して十分な分散値が得られない。そこで、各光源方向で撮像した画像の同位置で、各光源方向に対して輝度の分散を求める V_d を用いる (図 10)。この V_d は各光源方向で撮像した画像間で分散を求めるため、ブロックサイズを最小 1 画素でも設定可能である。

N 個の光源方向 ($i=1, 2, \dots, N$) から撮像した画像にて同一のブロック毎 (s_d : V_d に使用するブロックサイズ) の分散値 V_d を算出する。

$$V_d(x, y) = \frac{1}{N \cdot s_d^2} \sum_{i=1}^N \sum_{x=1}^{s_d} \sum_{y=1}^{s_d} (I_{i,x,y} - \bar{I}_d)^2 \quad (5)$$

$\bar{I}_d$ はブロック毎の平均値

検査領域をラスタスキャンし全画素に対し、式 (5) を用い、 V_d を算出する。

 Fig.10 V_d calculation method

V_d は異なる照明条件により観測された各画像間の分散値を局所領域毎に算出することで、法線方向とカメラ光軸の一致度を推定可能である。一方、 V_d による局所領域の情報のみを判定に用いた場合はノイズの影響を受けるリスクがあり、また光学条件が理想的な状態 (カメラ光軸に対し、物体が水平に配置され、光源からの入射角が保たれた状態) にないとき、つまりカメラ・光源・IC リードフレームにわずかな傾きがあるときに、法線方向とカメラ光軸にずれが生じてしまい、正常な判定ができない (図 11)。そのため、分散値の算出を大域領域で行い、かつ光学系にわずかな傾きがあった場合でも、影響を受けにくい V_r 値 (V_r は画像毎にブロック内の分散を算出するため、光学系の傾きの影響が小さい) と線形和を行い使用する。 V_d 値と V_r 値をそれぞれの最大値で正規化し、 V_d 値と V_r 値の割合を決める係数 α と、検出レベルを決める Th を用いて欠陥箇所の特定を行う。

$$(1 - \alpha) \frac{V_d(x, y)}{\max V_d} + \alpha \frac{V_r(x, y)}{\max V_r} > Th \quad (6)$$

また V_d 値と V_r 値算出に用いるブロックサイズであるが、 V_d は局所領域での判定、 V_r は大域領域での判定を特性としていることから、図 12 のように $s_r > s_d$ となるよう設定する。

ここで検出には、 V_d 値と V_r 値算出に用いるブロックサイズセット (s_d, s_r)、 V_d 値と V_r 値の割合を決める係数 α 、検出レベルを決める Th の各パラメータの決定が重要になる。この各パラメータを決定するために、予め欠陥箇所を把握しているサンプルを用意し、正解として与えた欠陥領域から検出された領域の割合と、検出された領域に占める正解の割合の調和平均をもって評価値 f とし、この f 値を利用した学習により自動決定を行う (調和平均を用いることで一方が著しく低い場合の結果は低くなる)。このときブロックサイズセットの決定に、検査処理①で検査エリア毎に算出した $\text{median} V_r$ 値を用いる。 $\text{median} V_r$ 値が大きい場合には、高周波な画像特徴要素で構築された欠陥が存在すると考えられるため、小さなブロックサイズセットにて、より正確に欠陥領域を探し、 $\text{median} V_r$ 値が小さい場合には、低周波な画像特徴要素で構築された欠陥が存在すると考えられるため、大きなブロックサイズセットを用いて広い領域で欠陥領域を探す。学習の流れを示す (図 13)。

- (i) まず、ブロックサイズセット毎に α 値と Th 値を決定するため、学習用の欠陥サンプルを用い、ブロックサイズセット毎、 α を 0.0~1.0、 Th を 0.1~0.9 の範囲で変化させ、式 (6) により、欠陥とみなされる領域を検出し、 f 値を算出する。ブロックサイズセット毎に、全欠陥サンプルの f 値の平均: $\bar{f}$ を求め、 $\bar{f}$ が最大となる α 値と Th 値を採用する。

- (ii) 次に各欠陥サンプルに適するブロックサイズセットを決定するため、図 13 の(ii)のように横軸に $\text{median } V_r$ 、縦軸に f 値をとり、ブロックサイズセット毎に、各欠陥サンプルの $\text{median } V_r$ と、(i) で採用された α 値と Th 値における f 値でプロットし、 f 値が高くなるよう $\text{median } V_r$ 値にて各欠陥サンプルを分離できる閾値 Th_{p2} を求める。これにより、 $\text{median } V_r$ 値の Th_{p2} に対する大小で、ブロックサイズセットが決定される。
- (iii) (ii) で各欠陥サンプルに対して決定したブロックサイズセット毎で f 値の平均 $\bar{f}'$ を求め、 $\bar{f}'$ が最大となる α 値と Th 値をブロックサイズセット毎の最終的な α 値、 Th 値として採用する。

求められる検査精度により、(ii) (iii) の処理を繰り返す。

検査は、(ii) により求められた閾値 Th_{p2} によりブロックサイズセットを決定し、(iii) により求められた α 、 Th を用いて判定を行う。

4. 実験と考察

4.1 評価用サンプルと撮像画像

今回実験に使用したサンプルは、正常品 41 サンプル、欠陥品 64 サンプル（傷 (Flaw) ・打痕 (Dent) ・ムラ (Irregular plating) ・変形 (Deformation) 各 16 個ずつ）の計 105 サンプルである。図 14 に傷が中央にある IC リードフレームの全体を示す。各サンプルに対し、16 方向の光源から撮像を行い画像取得し、16 枚の画像において、検査処理①「検査エリア毎、正常/欠陥を判定」と、検査処理②「欠陥とみなされる箇所の特長」を行った。各光源方向から撮像したときの画像例を図 15 に示す。

4.2 学習によるパラメータの自動決定結果

学習により自動決定した各パラメータに基づいた欠陥検出結果を図 16~18 に示す。本実験では、提案手法の性能を確認する基礎実験であるため、ブロックサイズセットを大小 2 種の $(s_d, s_r) = (3, 9)$ と、 $(s_d, s_r) = (5, 25)$ (s_d と s_r は実験により適切に発見した値を用いた) とし、学習は 1 ループとした。各図は、上から、元画像/正解/(学習なしで) ブロックサイズセット “小” における $\bar{f}$ が最も高かったパラメータでの結果/(学習なしで) ブロックサイズセット “大” における $\bar{f}$ が最も高かったパラメータでの結果/学習あり (提案手法) にて自動決定されたパラメータでの結果を示している。図 16 は、提案手法により、ブロックサイズセット “小” に、図 17 はブロックサイズセット “大” に、自動決定された画像例であり、学習なしの各ブロックサイズセットの結果と提案手法の結果を比較すると、より欠陥箇所の特長が優れているブロックサイズセットに自動決定されていることがわかる。また、図 16 でより顕著であるが、学習あり/なしの画像を比較すると、学習ありの方が欠陥箇所の特長がより正確になっている。これは、 V_d 値と V_r 値の割合を決める係数 α と、検出レベルを決める Th も適正なものに変更されたことを示しており、提案手法の有効性を示した。しかし、ブロックサイズセットの決定に失敗した場合もあった。図 18 に、ブロックサイズセットの決定に失敗した例を示す。これらは提案手法により、ブロックサイズセット “大” に選択されているが、学習なしの画像をみるとブロックサイズセット “小” の方が欠陥箇所の特長が正確である。これらは予め用意した欠陥サンプルに特化した学習がなされた可能性があり、今後欠陥サンプルに特化しない学習手法について検討を行う必要がある。

Left : Ideal condition

Right : Lead frame inclining in relation to the camera

Fig.11 Proper and improper optical system alignments

Fig.12 Relation of s_r and s_d

Fig.13 Self-adjusting parameters

Fig.14 IC lead frame with a flaw

Fig.15 Multiple light source imaging

4.3 検査処理①「検査エリア毎、正常／欠陥を判定」の結果

4.3.1 実験条件

今回用意した全 105 サンプルに対して、 V_r 値を使用した検査エリア毎の正常／欠陥の判定を行った。ブロックサイズについては実験により適切に発見した値 $s_r = 9, 17, 25, 33, 41, 49$ を用いた。実験では、各欠陥サンプルに対して median V_r 値を算出し、正常／欠陥を判定する閾値を変化させ検証を行った。また今回のサンプルは、材料表面にヘアライン加工がされており、光源方向とヘアライン方向の関係により、図 19 のように各撮像画像で輝度差が生じるため、正常と欠陥を正しく分離できないことが事前実験でわかった。そのためヘアラインの影響が少ない、ヘアラインに対して平行に照射する光源方向（図 15 の光源方向 1, 2, 8, 9, 10, 16）のみを使用することとした。

Fig.16 Examples of "the block size set is small"

Fig.17 Examples of "the block size set is large"

Fig.18 Examples of failed selection

Fig.19 Hairline on surface and light source direction

4.3.2 結果と考察

欠陥検査実験において、欠陥の再現率が 100%で誤り受け入れが最小となる時の閾値と、適合率 100%で検出漏れが最小となる時の閾値の 2 通りで検査を実施し、提案手法の特性を解析する。再現率 100%で誤り受け入れが最小となるよう閾値を設定したとき、正常品 41 サンプル中、6 サンプルを欠陥として誤って受け入れた。誤り受け入れ（正常品）の例を図 20 に示す。これらを確認すると、画像中の一部に周囲と輝度差が生じている箇所が複数存在し、欠陥を敏感に受け入れる閾値設定のため過剰に反応していた。これらは、傷やムラといった欠陥と判別が付きにくく、見逃すリスクよりも欠陥として再検査を行った方が良いレベルであると考えられる。また、適合率 100%で検出漏れが最小となるよう閾値を設定したとき、検出漏れが欠陥サンプル 64 サンプル中、3 サンプルで発生した。検出漏れした欠陥サンプルを図 21 に示す。図 21 を確認すると、輝度差の小さい欠陥が検出漏れとなっていた。この 1 段階目の処理では、ある程度誤りを受け入れてでも、検出漏れをなくす閾値を設定し、不良流出防止を図る必要があり、実際の検査では、過剰検出側の閾値を用いた方が良く考える。誤り受け入れした正常品が、再検査を行った方が良いレベルであったことから、再現率 100%となった閾値での運用が適切であると言える。結果、実験で用いた種類もサイズも様々な欠陥に対して、提案手法は、正常／欠陥の判定に有効であると確認された。また検査を実施する工程によっては、誤り受け入れ低減を行う必要も考えられるが、検出漏れのリスクを考慮しつつ、閾値の調整により対応する必要がある。

4.4 検査処理②「欠陥とみなされる箇所の特定」の結果

4.4.1 実験条件

欠陥 64 サンプルに対して、欠陥とみなされる箇所の特定を行った。今回用意した 64 サンプルを 16 サンプルずつの 4 セットに分け、3 セットをパラメータ自動決定のための学習に用い、残りの 1 セットで検出の評価を実施する。学習と評価を行うデータセットを入れ替え、4 回の評価を実施した。また 4.3 節でも述べたが、今回のサンプルは材料表面のヘアライン加工の影響で、光源方向とヘアライン方向により、各撮像画像で輝度差が存在するため、今回は各画像にヒストグラムの平坦化処理を行い用いた。

4.4.2 結果と考察

データセットを入れ替え 4 回評価した結果、欠陥箇所の特定に成功した割合は 84.4%であった。特定に成功した画像例を図 22（上から、元画像／正解／検出結果）に示す。また正しく判定できなかった画像例を図 23 に示す。

本実験において、欠陥箇所の特定結果を、欠陥の種類毎で調査したところ、“変形”に関しては全てのサンプルについて正しく欠陥箇所が特定されたことを確認した。これは、3 次元形状

Fig.20 Examples of error detection images

Fig.21 Undetected images

Fig.22 Examples of successful detection images

Fig.23 Examples of error detection images

の表面の法線方向とカメラ光軸の一致／不一致に注目した本手法が、法線が大きく変化している変形という欠陥に対し、正しく機能したためと考えられ、本手法の有効性を確認することができた。その他の欠陥については、欠陥箇所の特定が正しく判定できなかったものが発生していた。

“打痕”と“ムラ”は共通した欠陥箇所特定の失敗傾向がみられ、図 23 に示す通り、欠陥箇所以外に広く過剰に反応している。この原因として、打痕に関しては急な法線の変化が存在するものの欠陥として特定すべきエリアが小さいもの、ムラに関しては正常部と判別ができる程の反射光の強度変化が観測できなかったものが、背景テクスチャの輝度変動との分離が難しく、これらの欠陥箇所を特定しようとすると欠陥箇所以外にも過剰反応したと考えられる。さらに性能を向上させるためには、変形といった広い領域で法線の変化を持つ欠陥とはパラメータを

別に設定する方法が考えられ、今後確認を行う。

“傷”については、図 23 のように欠陥箇所以外に過剰反応している箇所と、欠陥箇所の特定漏れが発生している箇所が存在した。法線方向とカメラ光軸との一致／不一致に基づく本手法では、傷のように線状に発生する欠陥は、材料表面のヘアライン加工と切り分けることが難しいことを示しており、本手法のみでは欠陥箇所の特定は不可能であると結論付ける。傷のような欠陥については、本手法のみではなく、我々が提案する文献 3) に示す画像処理手法等と組み合わせて、精度の向上を目指す必要がある。

5. 結 言

本研究では、IC リードフレームの平坦部に発生する様々なサイズの欠陥に対応するため、勾配分布等の画像特徴を算出する際のブロックサイズを適切に自動決定する手法を提案した。また、欠陥部の 3 次元形状の表面の法線方向の傾きに注目し、大域領域における法線方向の傾きによる輝度変化領域の特定と、局所領域における法線方向とカメラ光軸との一致度に基づく 2 つの検査手法を統合して用いることで、従来手法では正確な検出が難しい欠陥に対して有効に機能することを確認した。今後の課題として、学習が用意した欠陥サンプルに特化して行われてしまう問題に対する検討等が挙げられる。また、より多くの情報を統合した欠陥検出アルゴリズムの評価を行い、提案手法の特性をさらに解析することがある。その後、部品の平坦部を検査する本手法と、端面部の検査を行う画像処理手法との併用

による検査アルゴリズムを考案し、部品全体が検査可能な欠陥検査システムを開発する。

参 考 文 献

- 1) 長嶋千恵, 塚田敏彦, : 金属平板傷検査のための落射 照明光学系の開発, ビジョン技術の実利用ワークショップ 2012, OS4-H7, (2012).
- 2) 谷口慶治, 長谷博行・編: 画像処理工学 一応用事例編 - (6.1 部品の検査方式), 共立出版, (2005), 97.
- 3) 中村良治, 樹添政博, 榎田修一: コーナーエッジ検出を用いたマスターレス欠陥検査に関する研究, 画像電子学会研究会第 264 回研究会, 12-03-01, (2013).
- 4) 中村良治, 樹添政博, 榎田修一: コーナーエッジ検出を用いた欠陥検査とマスキング処理に関する研究, 第 19 回画像センシングシンポジウム, IS3-15, (2013).
- 5) 青木公也, 舟橋琢磨, 奥水大和, 三和田靖彦: 周辺視と固視微動に学ぶ「傷の気付き」アルゴリズム, ビジョン技術の実利用ワークショップ 2012, OS4-H3, (2012).
- 6) 劉偉, 北英樹, 岩澤剣, 三谷洋之: FPD 点灯検査用画像処理システムの開発, 動的画像処理実利用化ワークショップ 2005, (2005), 33.
- 7) 広瀬修, 石井明, 秦清治, 鷺崎一郎: パターン照明を用いたフィルム表面凹凸欠陥の検出, 精密工学会誌 **66**, 7, (2000), 1098
- 8) 森本吉春, 藤垣元治, 榎谷明大: サンプリングモアレ法による変位・ひずみ分布計測, Journal of the Vacuum Society of Japan Vol. 54 No. 1, (2011), 32
- 9) 田中一基, 新原良美, 池田浩志, 山田直樹, 木葉 博, 笹西和人: 塗装表面検査の自動化技術, 日本機械学会論文集 (C 編) **60**, 577, 論文 94-792, (1994), 309.
- 10) 向川康博: 反射・散乱の計測とモデル化, 情報処理学会報告書, Vol.2010-CVIM-172No.34, (2010).
- 11) B.T. Phong: Illumination for computer generated pictures, Proc. SIGGRAPH' 75, (1975), 311.
- 12) R.J.Woodham: Photometric method for determining surface orientations from multiple images, Optical Engineering, **19**, (1980), 139.