量子化を考慮した微分対向フィルタによる 粘着シート上の異物検出*

平岡 忠志** 佐藤 雄隆*** 岩田 健司***

Foreign Material Detection on an Adhesive Sheet using Differential Facing Filter in Consideration of Quantization

Tadashi HIRAOKA, Yutaka SATOH and Kenji IWATA

This paper presents differential facing filter (DFF) in consideration of quantization for detecting foreign materials on an adhesive sheet. DFF is a binary filter for determining the target pixel is a foreign object or not. The determining method is based on gradient directions of two pixels. The two pixels consist of the target pixel and the facing pixel. Basically, if gradient directions of the two pixels are facing each other, DFF determines the two pixels are a foreign object. Otherwise, DFF determines the two pixels are other. However, DFF without consideration of quantization has a spatial quantization problem to select the facing pixel. Therefore, DFF in consideration of quantization select the facing pixels in horizontal direction and vertical direction. In experiments, we demonstrate that this method is capable of discriminating between foreign materials and others. We test our method on several data sets made by ourselves. The results show that our method achieves better performance compared to adaptive thresholding.

Key words: foreign material detection, differential facing filter, spatial quantization problem

1. はじめに

ものづくりに不可欠なクリーンルームの清浄度の管理には、空気清浄度および表面清浄度が用いられる。空気清浄度は空間中の粒径毎の個数で定義され、表面清浄度は対象表面上の粒径毎の個数で定義される¹⁾。空気清浄度の測定にはパーティクルカウンタが用いられ、0.1~5 μm 程度の浮遊性の小さな異物を測定対象としている。一方、表面清浄度の測定には粘着シートやシリコンウェハが用いられ、数十 μm 以上の沈降性の大きな異物を測定対象としている。粘着シートを用いた測定はクリーンルームの人の出入り口付近に出現する沈降性の大きな異物の管理法として需要がある。粘着シートを利用した表面清浄度の測定では、異物を粘着シートに捕獲後、検査員が目視により異物を粒径毎に分類し、個数を調べる作業がある。これには多くの時間を要すほか、作業員の疲労の問題もある。また、他の様々な目視検査と同様に、検査員間、あるいは同じ検査員であっても日によって分類基準がバラつく問題がある。そこで、我々は粘着シートと市販スキャナおよびパソコンを用いて自動的に異物を検出するシステムを開発するために、照明ムラ等の不良条件下であっても安定に微小（異物を楕円近似したときの長軸が300 μm 以上）な異物を検出するアルゴリズムを開発した。本論文では、開発した異物検出アルゴリズムとその性能評価について述べる。

粘着シートの背景は白色で、異物を捕獲後、その状態を維持するために透明保護フィルムを貼付する。このため、白色に近い異物の検出が困難であること、粘着シートと保護フィルムの間の気泡を異物と誤検出することが問題となる。また、保護フィルム

の折れ、画像中の場所毎の明るさのムラも問題を難しくする。

このような異物の検出を目的とした従来法としては、可変閾値法^{2)~4)}がある。閾値を画像の部分ごとに動的に決定することで明るさのムラの影響を抑えることができるが、背景色に近い色の異物を検出し、かつ保護フィルムの折れを誤検出しないように閾値をコントロールすることは容易ではない。また、気泡の誤検出の抑制は別途後処理を考える必要がある。Abdellahらは、大津の2値化とモルフォロジーを利用して異物候補画素を検出し、幾何特徴を利用して異物を検出する方法を提案した⁵⁾。しかし、2値化とモルフォロジーを利用する方法では異物と気泡の領域が連結し、異物サイズが実際よりも大きく検出されることがある。また、面積、周囲長、長さ等の幾何特徴で異物と気泡を判別することは困難である。柏木らは、カラーヒストグラム空間を利用して頻度画像を作成し頻度の低い部分を欠陥とする手法を提案した⁶⁾⁷⁾。しかし、気泡の頻度はサンプル毎に異なるため、この方法によっても異物との分類は困難である。

我々は、画像中の明るさのムラ、さらに保護フィルムの折れや気泡の影響を抑えながら、背景色に近い異物も人間の目視検査に近いレベルで検出することを実現するために、異物と気泡のエッジを局所的に画素レベルで分類する微分対向フィルタを考案した。

以下、第2章でシステムの概要および画像処理上の問題点を述べる。第3章では量子化を考慮した異物検出アルゴリズムについて詳細に説明する。第4章では可変閾値法と提案手法を比較し、提案手法の有効性を実証する。最後に第5章で本論文をまとめる。

2. システムの概要

本研究で用いる粘着シートはNTT-ATクリエイティブ株式会社のダストサンプラーDSW-01である。図1左にDSW-01の外

* 原稿受付 平成26年7月11日

掲載決定 平成26年9月30日

** 正会員 徳島県立工業技術センター（現、徳島県商工労働部新産業戦略課；徳島県徳島市万代町1-1）

*** 産業技術総合研究所（茨城県つくば市梅園1-1-1中央第2）

Fig. 1 Scanning images of DSW-01

観を示す。DSW-01のサイズは104mm×120mmである。検査範囲は黒色の外枠と白地の境界から1mm内側の領域で100mm×100mmのサイズである。DSW-01の厚みは0.21mmであり、ベース基材に異物サンプリング用の粘着剤が塗布され、その上に異物保護用に透明フィルムが貼られる。クリーンルームにおいても人や物により大きな異物が運びこまれる可能性があり、DSW-01は主に人や物が頻繁に通過する場所で利用される。そのような場所で保護フィルムをはがしたDSW-01を床の上などに24時間程度放置し異物を採取する。異物採取後、保護フィルムを貼り戻し、保管後、計測を行う。計測時には、まずDSW-01の異物を付着させた面を市販のフラットベッドスキャナ（富士通株式会社製fi-60F）によって画像化する。なお、スキャナのガラス上面にはAnti-Glare(AG)/Anti-Reflection(AR)シートを貼った。これは保護フィルムとガラス上面の反射光による干渉縞の防止、および保護フィルムがガラス上面に密着することで発生する明るさのムラを防止することが目的である。

実際の画像の例を図1(a)に示す。スキャンした画像には、場所により明るさが異なるという問題がある。また、DSW-01のベース基材と保護フィルムの間へ空気が混入すること、保護フィルムが折れること、保護フィルムに指紋が付着すること等の問題もある(図1(b))。さらに、検出対象の異物は背景色と近い色であったり、気泡中に異物があつたり、気泡上に異物がある場合がある(図1(c))。

3. 異物検出アルゴリズム

画像に微分フィルタを適用する方法は異物の検出のために有効であるが、気泡のエッジ、保護フィルムの折れ、指紋を誤検出する問題もある。提案するアルゴリズムは、基本的に異物付近に勾配方向が対向するエッジが観測されること、気泡のエッジ付近などにはそのようなエッジが観測されないことを利用して異物検出を行う。しかし、スキャナの解像度の制約により、異物は小さなもので数ピクセル程度に量子化されており、精度良く異物を検出するためにはフィルタの実装に工夫が必要となる。

3.1 微分対向フィルタ

図2に微分対向フィルタの概念図を示す。画像中の点 $p = (x_p, y_p)$ から点 p の勾配方向 θ に距離 d だけ離れた点 $p' = (x_{p'}, y_{p'})$ とする。背景が白色のシートであるので、点 p の勾配方向 θ は明度が低下する方向となる。図2のように点 p および点 p' が異物の両端に位置するとき、点 p と点 p' の勾配強度は等しく、それらの勾配方向は向かい合うことが期待される。これは、通常のスキャナは斜光照明で異物には影が現れるが、検出対象の異物はクリーンルーム付近の異物で、厚みのある異物はほとんどない

Fig. 2 Basic concept of the differential facing filter

Fig. 3 Spatial quantization problem

ため、また異物が柔らかく厚みのある白色の粘着シートに埋まるため、スキャナの斜光照明による影はほとんどないからである。したがって微分対向フィルタを以下のように定義する。

$$f = m \times M \times \theta \quad (1)$$

$$M = \exp(-(m - m')^2 / \sigma_m^2) \quad (2)$$

$$\theta = \exp(-d\theta^2 / \sigma_\theta^2) \times \text{sign}(D) \quad (3)$$

$$d\theta = \begin{cases} \theta - \theta' + \pi & \text{if } \theta \leq \theta' \\ \theta - \theta' - \pi & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

$$D = \sin\theta \times (y_{p'} - y_p) + \cos\theta \times (x_{p'} - x_p) \quad (5)$$

ここで、 m と m' は、それぞれ点 p と点 p' の勾配強度、 θ と θ' は、それぞれ点 p と点 p' の勾配方向である。また、 σ_m^2 と σ_θ^2 は重み関数 M と θ の分散である。 f は点 p の画素に微分対向フィルタを畳み込んだ結果であり、 M は点 p と点 p' の勾配強度の近さを示す重み関数、 θ は点 p と点 p' の勾配方向が向き合っているかを示す重み関数である。重み関数 θ については、 D の符号が掛けられる。このとき、点 p を通り、方向が $v = (\sin\theta, \cos\theta)$ である有向直線に対して、 $D > 0$ ならば点 p' は右側、 $D < 0$ ならば点 p' は左側にある。また、図2のように xy 座標系は時計回りにとる。よって、点 p と点 p' の勾配強度が等しい場合は $M = 1$ 、点 p と点 p' の勾配方向が互いに向かい合う場合は $D > 0$ より $\theta = 1$ となり、点 p の微分対向値 f は m となる。また、 $M = 1$ かつ点 p と点 p' の勾配方向が互いに背を向けている場合は $D < 0$ より $\theta = -1$ となり、点 p の微分対向値 f は $-m$ となる。さらに、点 p と点 p' の勾配強度が異なるほど $M = 0$ に近づき、また点 p と点 p' の勾配方向が近いほど $\theta = 0$ に近くなり、点 p の微分対向値 f は0に近づく。

各画素について微分対向値 f を算出した後、点 p と点 p' の間の画素を点 p と点 p' の微分対向値 f で埋める処理を行う。しかし、解像度600dpiで幅0.1mm程度の繊維状異物を検出する場合、量子化の問題により勾配方向が一致しない問題が発生する。図3(a)に少し傾けた幅3画素程度の直線を、図3(b)に各画素の勾配方向を示す。例えば、点 p と点 p' の距離 $d = 3$ としたとき、点 a から見た対向画素は点 b であるが、点 b から見た対向画素は点 c となり、互いの対向画素は一致しない。

Fig. 4 Flowchart of the differential facing filter in consideration of quantization

3.2 量子化を考慮したフィルタアルゴリズム

上記のように量子化が問題となる場合は一般的には何らかのモデルを近似することによりサブピクセル処理がなされるが、実際にはアルゴリズムやパラメータの調整次第となり、常に良い結果を得ることは困難であり、処理時間が増加する問題もある。そこで、我々は画素単位の高速且つ高精度な異物検出アルゴリズムを考案した。

図 4(a)に量子化を考慮した微分対向フィルタアルゴリズムのフローチャートを示す。このアルゴリズムの入力はグレースケール画像、出力は異物かどうかを示す 2 値画像である。まず、グレースケール画像を縦横方向について、それぞれ微分する。次に、2 枚の微分画像それぞれについて、各画素 g を閾値 $th1$ により以下のように 3 値化する。

$$t1 = \begin{cases} 1 & \text{if } g > th1 \\ -1 & \text{if } g < -th1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

ここで、微分対向フィルタの定義の重み関数 M を忠実に再現しようとする、微分画素に上限と下限の閾値 2 つを用いて 5 値化する方法が適当であるが、下限の閾値のみで 3 値化しても結果はほとんど変わらないため、本稿では 3 値化する方法を採用した。また、3 値化の結果を $t1$ とする。さらに、3 値化処理と並行して、微分画像を用いて各画素の角度を計算しておく。

最後に 3 値画像 2 枚と角度画像 1 枚を用いて、各画素について点 p と点 p' が対向しているかどうかを判定し以下のように 2 値化する。

$$f = \begin{cases} 1 & \text{if } t1p = -1 \text{ and } t1p' = 1 \text{ and } |d\theta| < th\theta \\ & \text{(assign 1 from } p \text{ to } p') \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

ここで、 $t1p$ と $t1p'$ は点 p と点 p' の 3 値画像の値を示す。また、各画素について、3 値画像の点 p の値が -1 かつ点 p' の値が

Fig. 5 Profiles of the foreign material and the air bubble

1 かつ角度画像の点 p と点 p' の勾配方向の差の絶対値が閾値 $th\theta$ よりも低ければ、点 p から点 p' までの画素を 1 とし、その他の場合は点 p の画素を 0 とする。この処理を縦横で行い、2 枚の和集合をとり最終の 2 値画像を得る。

量子化を考慮しない先の方法では点 p' を画像中の点 p から点 p の勾配方向 θ に距離 d だけ離れた点としていたが、ここでは縦方向については点 p' を点 p から y 軸正方向に距離 d だけ離れた点とし、横方向については点 p' を点 p から x 軸正方向に距離 d だけ離れた点とする。例えば、図 3(b)の b を点 p 、距離 $d = 3$ とすると、縦方向については下方向に 3 だけ離れた点 a を点 p' とする。このようなアルゴリズムの場合、逆に点 a の対向画素は必ず点 b となる。すなわち上下・左右対称形であるので、それぞれ一方向（下方向および右方向）のみを計算すればよい。

3.3 気泡の除去

図 5(a)に異物の画像と、図 5(b)に横軸を位置、縦軸を明度とした断面図を、同様に図 5(c)に気泡の画像を、図 5(d)に断面図を示す。断面図は図 5(a)(c)の画像中の縦方向の黒線部分のもので、黒線上端が断面図左端、黒線下端が断面図右端に対応する。断面図の横軸方向に 10 画素毎に、縦軸方向に明度 10 毎にそれぞれ補助線を引いた。

異物と異なり、気泡のエッジには周辺より明るい部分(図 5 黒丸)が安定に存在する。したがって、図 4(a)のアルゴリズムの微分処理と対向判定処理の間に 3 値化と背向判定の処理を加え、図 4(a)を図 4(b)のように改良する。なお、背向とは対向とは逆に勾配方向が互いに背を向いている状態を表す。

追加した 3 値化処理では閾値を $th2$ とし量子化を考慮したフィルタアルゴリズムと同様の処理を行う。また、3 値化の結果を $t2$ とする。背向判定では縦横 2 枚の 3 値画像を用いて、各画素について点 p と点 p' が背向しているかどうかを以下のように判定する。

$$b = \begin{cases} 1 & \text{if } t2p = 1 \text{ and } t2p' = -1 \\ & \text{(assign 1 to } p \text{ and } p') \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

ここで、点 p' の選択方法は図 4(a)の対向判定と同様に、縦方向の 3 値画像を用いる場合は点 p' を点 p から y 軸正方向に距離 d だけ離れた点とし、横方向の 3 値画像についても同様とする。また、 $t2p$ と $t2p'$ は点 p と点 p' の 3 値画像の値を示す。具体的には、各画素について、3 値画像の点 p の値が 1 かつ点 p' の値が -1 であれば、点 p と点 p' の画素を 1 とし、高ければ点 p の画素を 0 とする。

Fig. 6 Post-processing

Fig. 7 Flowchart of the post-processing

対向判定では、背向判定の結果を利用し、式(7)を以下のように変更する。

$$f = \begin{cases} 1 & \text{if } t1p = -1 \text{ and } t1p' = 1 \text{ and } |d\theta| < th\theta \\ & \text{and } b = 0 \text{ (assign 1 from } p \text{ to } p') \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

つまり $b=0$ かつ 3 値画像の点 p の値が 1 かつ点 p' の値が 1 かつ点 p と点 p' の勾配方向の差の絶対値が閾値 $th\theta$ よりも低ければ、対象画素から対向画素までを 1 とし、その他の場合は対象画素を 0 とする。

3.4 後処理

図 6(a)の画像に図 4(b)のアルゴリズムを適用した結果が図 6(b)である。異物の微分値の低い領域や異物中の気泡領域は、異物が途切れて検出されることがある。また、気泡のエッジに特徴的に存在する周辺より明るい部分についても、同様に途切れて出現することがあり、除去処理に影響を及ぼす。この問題に対応するために、後処理を加える。

図 7 に後処理の流れを示す。入力はグレースケール画像と微分対向フィルタを適用した画像で、出力は異物か否かを示す 2 値画像である。まず、グレースケール画像の勾配強度を算出し、閾値 $th3$ で 2 値化する。次に 2 値画像をラベリングし、各連結成分について図 4(b)にて出力された 2 値画像が $\geq 2\%$ 以上であればその連結成分を残し、それ以外であれば消去する。最後に膨張収縮処理をして連結成分を成形し、異物と背景の 2 値画像を得る(図 6(c))。

3.5 計算コストに関する考察

図 4(b)のアルゴリズムでは計算量の多い角度計算をしていたが、方向の算出に三角関数を用いずに右か左か(下か上か)のみを算出することで、検出性能を落とすことなく計算時間を短縮できる(図 4(c))。図 4(b)と図 4(c)のアルゴリズムによる計算時間の比較表を表 1 に示す。角度計算と対向判定の計算時間が減少し、合計時間は約半分に減少した。なお、実験に用いた CPU は Intel Core i7-4770K 3.5 GHz で開発には Visual Studio 2010 C#を用い、CPU や GPU の並列処理は一切していない。処理対象は 2580×2958 画素のグレースケール画像で、パラメータは $th1 = 60$, $th2 = 30$, $d = 3$ とした。

また、図 8(a)の画像について、 $th\theta = 10^\circ$, 30° とし図 4(b)のアルゴリズムを適用した結果を図 8(b),(c)に、図 4(c)のアルゴリズムを適用した結果を図 8(d)に示す。 $th\theta = 10^\circ$ では未検出の纖

Table 1 Computation time Fig.5(b) and Fig.5(c)

	With angle calculation [ms]	Without angle calculation [ms]
Differential	230	230
Angle calculation	359	0
Three-level thresholding by th1	46	46
Three-level thresholding by th2	51	51
Backing determination	38	38
Facing determination	92	50
Total time	816	415

Fig. 8 Comparison between Fig.5(b) and Fig.5(c)

維部分が多いが、 $th\theta = 30^\circ$ では十分に繊維を検出できた。今回の画像の場合、図 4(c)のアルゴリズムを適用した結果は $th\theta = 30^\circ$ とし図 4(b)のアルゴリズムを適用した結果とほぼ等しい。したがって、図 4(c)のアルゴリズムは、しきい値設定が不要で且つ計算速度が速いということになる。

次に粒子状の異物を詳細に検出する設定とする場合、対向判定に用いる点 p と点 p' の距離 d を異物のサイズに応じて変化させる必要がある。例えば、 $d = 3, 4, \dots, 10$ とする場合は 8 回の検出処理が必要となり、8 倍の処理が必要となる。しかし、複数の距離 d に対応させるには図 4(c)のアルゴリズムのうちの 1 つである対向判定の処理を、各画素について 1 つの距離 d の対向画素と対象画素を用いて対向判定した処理から、各画素について複数の距離 d について処理するように複数回の対向判定を行う処理へ変更するだけでよい。これは、図 4(c)の対向判定以外の処理は異物の大きさに影響されないためである。ここで、対向判定に用いる閾値 $th1$ による 3 値画像の画素値 $t1$ は 0 (式(6)参考)となることが多く、この場合は対象画素が $t1p = 0$ であるため、複数回の対向判定を行う必要がない(式(9)参考)。このため、計算時間の増加はわずかなものとなる。例えば、 $d = 3$ とした場合の対向判定処理時間は 50ms であり、 $d = 3, 4, \dots, 10$ とした場合の対向判定処理時間は 110ms であった。

最後に、背向判定に用いる点 p と点 p' の距離 d も様々な気泡のサイズに対応するために値に幅を持たせた方がよい。ただし、気泡のエッジの幅は異物ほど大きく変化しないため、 $d = 1, 2, 3$ とすればよい。この場合も計算時間の増加は少なく、 $d = 3$ とした場合の背向判定処理時間は 38ms であり、 $d = 1, 2, 3$ とした場合の背向判定処理時間は 55ms であった。

4. 実験と考察

提案手法の有効性を実証するため、可変閾値法^{2)~4)}と提案手法による実験結果を比較した。また、提案手法の問題点を検証するため、誤検出例と未検出例を挙げ、考察を行った。

可変閾値法は、対象画素値 s とその周辺の平均値 $mean$ と閾値 $th4$ を用いて、対象画素の結果 f が異物 1 か背景 0 かを以下のように判別する手法である。

Fig. 10 Results of foreign material detection and air bubble detection

Fig. 9 Comparison between adaptive thresholding and our method

$$f = \begin{cases} 1 & \text{if } \text{mean-s} > \text{th4} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

本稿では平均値 *mean* を算出するための窓サイズを 101×101 とし、閾値 *th4* を 30, 70 と 100 の 3 種類とした。提案手法のアルゴリズムには、図 4(c)と図 7 を組み合わせたアルゴリズムを用いた。微分処理には縦方向と横方向の 3×3 のソーベルフィルタを用いた。3 値化の閾値は *th1* = 50, *th2* = 30 とし、背向判定の距離は *d* = 1, 2, 3 とし、対向判定の距離は *d* = 3, 4, ..., 10 とした。また、2 値化の閾値は *th3* = 50 とし、残留判定の閾値は *z* = 40% とした。スキャナの設定は 600dpi, シャドウ 0, ハイライト 255, ガンマ 0.2 とし、できるだけ背景色に近い異物をコントラスト良く撮影できるようにした。

図 9(a)(e)(i)の原画像に対して可変閾値法を適用した結果を図 9(b)(c)(f)(g)(j)(k)に示す。(b)(f)(j)は閾値を低め (*th4* = 30) に、(c)(g)(k)は高め (*th4* = 100) に設定した。また、提案手法を適用した結果を図 9(d)(h)(l)に示す。図 9(a)-(d)に折れに対しての適用結果を示す。可変閾値法では折れが強く検出されていることがわかる。これに対し、提案手法では折れがほとんど検出されていないことがわかる。これは対象画素と対向画素の勾配方向が対向し、かつ両画素の勾配強度の絶対値が閾値 *th1* を超えるという強い拘束が働いているためである。しかし、折れ付近にある異物には感度良く反応しており、折れと異物を区別するための対向判定の処理が有効に機能していることがわかる。図 9(e)-(h)

Fig. 11 Quantitative comparison

に気泡のエッジに対しての適用結果を示す。可変閾値法では閾値により気泡のエッジが検出されたり、異物が検出されない問題がある。しかし、提案手法では異物のみが検出されており、気泡除去のアルゴリズムが有効に機能していることがわかる。図 9(i)-(l)に図 9(e)とは別の気泡のエッジに対しての適用結果を示す。提案手法では気泡が検出されずに 7 個の異物が検出されている。しかし、可変閾値法では、閾値が低い場合は気泡が検出され、閾値が高い場合には背景色に近い色の異物が検出されない。この例でも提案手法は可変閾値法よりも異物の検出に有効であることが示された。

次に、図 10(a)に主に繊維状の様々なサイズの異物と気泡を含む粘着シートの原画像を、図 10(b)に提案手法を用いて異物を検出した結果を、図 10(c)に背向判定結果をそれぞれ示す。図 10(b)の結果から、様々なサイズ・色の異物が気泡の誤検出なしに良好に検出されていることがわかる。なお、ノイズ様の微小な異物も多数検出されており、これに対応する異物を肉眼で図 10(a)上に確認することは困難であるが、これらの大半は検査員も異物として判定しており、微小かつ背景色とのコントラストが低い異物が正しく検出されたものである。図 10(c)より、図 4(c)の背向判定により気泡が正しく検出されていることがわかる。

さらに、定量的な方法で可変閾値法と提案手法の検出性能を比較した結果を図 11 に示す。評価対象の画像は異物数を 10~200 個程度持つ粘着シートをスキャンしたものであり、全部で 15 枚ある。それぞれの画像を可変閾値法 (AT: Adaptive Threshold-

Fig. 12 Examples of false positive and false negative

ing)と提案手法(DFF: Differential Facing Filter)にて異物を検出し、それらの結果画像をあらかじめ人手により作成しておいた正解画像と比較することで正検出(TP: True Positive)数、誤検出(FP: False Positive)数、未検出(FN: False Negative)数を算出した。ここで、正解画像は実際の検査員が現物を顕微鏡で確認しながら、原画像の各画素を異物の存在する画素と存在しない画素にペイントソフトウェアで塗り分け、2値画像としたものである。それぞれの手法において、結果画像の異物の連結成分に対し正解画像の異物の連結成分の重複面積が10%以上である場合は正検出としてTPにカウントし、そうでない場合は誤検出としてFPにカウントした。また、正解画像の異物の連結成分に対する検出結果の異物の連結成分の重複面積が10%未満の場合は未検出としてFNにカウントした。最後に正検出数、誤検出数、未検出数より適合率($\text{Precision} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FP})$)と再現率($\text{Recall} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FN})$)を算出し、散布図に打点した。閾値 $th4$ が30, 70と100の可変閾値法と提案手法の4つの方法でそれぞれ15枚の画像を処理したので、打点数は合計60点となった。適合率は誤検出が少ないほど1に近づき、再現率は未検出が少ないほど1に近づく。可変閾値法の閾値 $th4$ が30の場合は適合率が低く誤検出が多いことがわかる。これは保護フィルムの折れや気泡のエッジ等が誤検出されていることが原因である。また、閾値 $th4$ が100の場合は再現率が低く未検出が多いことがわかる。これは背景とのコントラストの低い異物が検出されていないことが原因である。さらに、閾値 $th4$ が70の場合にも適合率と再現率は十分ではない。逆に、提案手法の場合は適合率と再現率の両方が可変閾値法よりも高い値を示している。これより提案手法は折れや気泡のエッジの誤検出防止、背景色に近い色の異物の検出に効果があることが示された。

最後に誤検出と未検出の例を図12に示す。(a)(d)の原画像に提案手法を適用した結果を(b)(e)に、背景判定結果を(c)(f)に示す。(b)は誤検出の例であり、中央の赤い繊維状の異物と同時に線状の気泡が検出されている。また、その気泡の左側に丸い微小な気泡が2つ検出されている。(c)の背景判定結果を確認すると、前者の気泡は図4(c)のアルゴリズムである程度検出されていることがわかるが、除去されなかった画素が、その後の図7の後処

理で連結されたものと考えられる。後者の気泡は背景判定結果で全く検出されていないことが確認できる。この気泡は画像を注視しても判断が極めて困難なもので、目視検査の場合でも現物をいろいろな角度から観察したり、保護シートの気泡部分を手で押したりして確認する必要がある。したがって、画像のみを用いた判別は困難であると考えられる。(e)は未検出の例であり、中央の気泡中の異物が検出されていない。この気泡は厚みのある異物のために発生したものである。厚みのある異物の場合、異物の形状や表面の状態により一部に強く光る箇所が発生する。そのため、(f)のように背景判定で気泡と判定され、未検出となる場合がある。このケースも目視検査であっても判別が困難な例であり、また出現頻度が低いので、検出対象としないこととした。

5. まとめ

粘着シート上の異物を検出するため、量子化を考慮した微分対向フィルタを考案した。画素単位の処理アルゴリズムによって高速且つ良好な異物検出を可能にした。気泡の局所的な特徴に着目し、画素単位で気泡を除去するための背景判定処理を考案し、気泡の影響を低減した。さらに、繊維状の異物が途切れて検出される問題を残留判定などの後処理を加えて解決した。また、わずかな計算時間の増加で様々なサイズの異物を検出できるように処理を加えた。可変閾値法と提案手法を比較した結果、提案手法は折れや気泡のエッジなどの誤検出防止に役立つこと、背景色に近い色の異物の検出に役立つことを示した。今後は、本手法を実際に現場で用いながら、より多くのデータを用いた評価を行う。また、提案手法は画像中から一定以上の勾配強度の勾配方向が向かい合う2画素を高速に検出する手法であり、本論文で扱った厚みの少ない異物の検出のほか、ドーム照明や同軸照明のように、異物の影が映らない方法で撮影された画像中の異物や欠陥の検出にも適していると考えられる。今後は今回扱った対象以外への応用についても検討する。

参考文献

- 1) 社団法人日本空気清浄協会 基板表面汚染物質の測定方法指針原案作成委員会：クリーンルーム及び関連する制御環境中における粒子状汚染物質に関する表面清浄度の表記方法および測定方法指針，JACA，42 (2006)。
- 2) D.Bradley, G.Roth: Adaptive Thresholding Using the Integral Image, Journal of Graphics Tools, 12, 2 (2007) 13。
- 3) 平岡忠志, 脇田美幸, 長尾綾子, 後藤仁, 武知康逸, 森本真理, 服部宏祐, 寺田賢治: 市販スキャナを用いたダストカウンターシステムの開発, ビジョン技術の実利用ワークショップ2013講演論文集(CD-ROM), (2013)。
- 4) T.R.Singh, S.Roy, O.I.Singh, T.Sinam, Kh.M.Singh: A New Adaptive Thresholding Technique in Binarization, IJCSI International Journal of Computer Science Issues, 8, 6 (2011) 271。
- 5) H.Abdellah, E. abdelmajid, B. Abdenabi and R. Ahmed: Defects detection and extraction in textile imageries using Mathematical Morphology and geometrical features, Journal of Signal Processing Theory and Applications, 1 (2012) 1。
- 6) 柏木利幸, 大恵俊一郎: カラーヒストグラムを用いた色の不均一部分検出手法, 電学論C, 124, 3 (2004) 666。
- 7) 柏木利幸, 檜垣真二, 宮脇俊幸, 大恵俊一郎: 単層薄膜のむらの視覚化手法, 電学論C, 130, 9 (2010) 1530。