

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

Development of Dust Counter System Using Commercial Scanners

○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‡‡

Tadashi Hiraoka†, Miyuki Wakita‡, Ayako Nagao‡, Hitoshi Goto‡

Yasuichi Takechi‡‡, Mari Morimoto‡‡, Kousuke Hattori‡‡, Kenji Terada‡‡

†: 徳島県立工業技術センター, hiraoka@itc.pref.tokushima.jp

‡: NTT-AT クリエイティブ株式会社, m.wakita@ntt-atcr.co.jp, r.nagao@ntt-atcr.co.jp, h.gotoh@ntt-atcr.co.jp

‡‡: 株式会社オプトピア, y-takechi@optpia.co.jp, m-morimoto@optpia.co.jp

‡‡‡: 徳島大学大学院先端技術科学教育部, hattori-kosuke@iss.tokushima-u.ac.jp, terada@is.tokushima-u.ac.jp

概要: 異物が付着された粘着シートから市販スキャナとパソコンを用いて自動的に異物を検出し、粒径毎個数を算出するダストカウンターシステムを開発した。目視用に作成した粘着シートには検査員が数えやすいように罫線が印刷されているが、これが検出率低下の原因となるため、罫線が印刷されていない粘着シートを開発した。粘着シートに保護フィルムを貼り合せたときに発生する気泡が検出率低下の原因となるため、気泡の微分値と形状の特徴を利用して異物と気泡の判別をした。20枚のサンプル粘着シートを用意し、検査員の答えを正しいものとして、システムの検出性能を評価したところ、20枚の平均値は精度 97.6%、再現率 79.7%、F 値 87.1%であった。

<キーワード> クリーンルーム, スキャナ, 粘着シート

1. はじめに

ものづくりに不可欠なクリーンルームの管理は空気清浄度と表面清浄度でされる。空気清浄度は空間中の粒径毎個数で定義され、0.1~5 μ m程度の浮遊性の小さな異物を対象としている。これらはパーティクルカウンターで測定できるが500 μ m程度の大きな異物測定には対応していない。一方、表面清浄度は対象表面上の粒径毎個数で定義され、空気清浄度で扱う小さな異物から500 μ m超の重力により沈降する大きな異物にも対応している[1]。このような大きな異物に対応した表面清浄度測定用の粘着シート「ダストサンプラー(DS: Dust Sampler)」が製品化されている。これはベース基材のシート上に粘着剤が塗布されたもので、そこに異物を捕獲し、透明の保護フィルムを貼ることで異物の保存が可能である。クリーンルームのエアシャワーの出入口付近は大きな異物が出現しやすく、このような粘着シートによるクリーンルーム管理の需要がある。

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、個数を調べるという作業がある。複数の検査員の分類基準はそれぞれ異なり、また同じ検査員でも日によって分類基準が異なる。また、検査時間が1枚当たり数分かかることも問題である。

本研究では、異物が付着された粘着シートから自動的に異物を検出し、正確かつ迅速に粒径毎個数を算出するシステムを開発することを目的とする。以下、第2章ではダストカウンターシステムによる異物検出方法について述べ、第3章ではその性能評価結果を述べ、第4章で本論文をまとめる。

2. 方法

本章ではまずダストカウンターシステムの構成を述べる。次に、粘着シートの改良について述べる。最後に、ソフトウェアによるにじみ対策、気泡対策、繊維状異物対策について述べる。

2-1. ダストカウンターシステムの構成

粘着シート DS のほかに、ダストカウンターシステム

をスキャナとソフトウェアとパソコンの3つより構成した。後でもう一度詳細に示すが、粘着シートは目視検査用のDSからスキャナ検査用のDSW(Dust Sampler White)-01に変更した。これはDSの罫線の影響により誤検出と未検出を抑えることができなかったためである。開発したシステムは異物が付着したDSW-01をスキャナで画像化し、画像処理により異物の粒径毎個数を算出するものである。

ダストカウンターシステムのスキャナとして富士通株式会社のfi-6110を用いた。600dpiの光学解像度があること、Auto Document Feeder(ADF)の機能があること、自作ソフトウェアでスキャナが制御可能であること、非可逆圧縮画像でない画像を出力することが選択理由である。ADF機能があると、粘着シートを数十枚セットしスタートボタンを押すだけで自動的に検査結果が得られ、効率的な業務ができる。スキャン条件を表1に示す。気泡の誤検出や色ムラが問題となるため、画素値が少しホワイトアウトするような条件でスキャンした。

ソフトウェアとしては、異物検出と粒径毎個数算出機能、粒径毎個数と日付の管理機能等を開発した。これについての詳細は後で示す。

最後に、パソコンは客先のものを利用することにし、販売価格を抑えた。Windows7またはWindows8がインストールされたパソコンに対応させた。

表1 スキャン条件

画像タイプ	24bit カラー
解像度	600dpi
明るさ	105
コントラスト	128
シャドウ	10
ハイライト	230
ガンマ	1.6
自動傾きサイズ検出	あり

2-2 . 粘着シートの改良

粘着シートDSの大きさは縦横120mm×104mm、厚み0.25mm(スキャン時)で、検査範囲は100mm×100mmである。白地のベース基材のシート上に粘着剤が塗布され異物捕獲後に透明の保護フィルムが貼られる。異物の粒径は300 μ m以上のものが検出対象であり、粒径は異物を楕円近似したときの長軸方向の長さである。300 μ m以上400 μ m未満、400 μ m

以上500 μ m未満、500 μ m以上と3段階に分けて数を算出する。また、目視検査員が粒径毎個数を数えやすいように罫線(内側の実線と破線)が印刷されている。検査範囲の内と外の境界は、外側の太さ2mmの水色実線と白地の境界の直線である。図1左に粘着シートDSを、図1右にDSの検査範囲を示す。検査範囲は黒矩形で囲まれた部分で、背景にDSを薄く示した。

DSを利用した自動計測では罫線付近や外枠(外側の太い実線)付近の背景色(白色、水色)に近い色の異物を誤検出または未検出することが多い。この対策として、罫線の除去、外枠の細線化をした粘着シートDSW-01を開発した。大きさは縦横120mm×104mm、厚み0.21mmである。100mm×100mmの検査範囲から上下左右1mmあけて太さ1mmの実線の外枠を印刷することで外枠付近の未検出・誤検出を減らした。また、気泡対策として、粘着剤を弱粘着タイプとし、気泡を指の腹等で押し出しやすくした。しかし、気泡内に異物がある場合は押し出すことができず、ソフトウェアによる気泡対策が必要となる。図2左に改良したダストサンプラーDSW-01を示し、図2右にDSW-01の検査範囲を示す。検査範囲は濃い黒矩形で囲まれた部分で、背景にDSW-01を薄く示した。

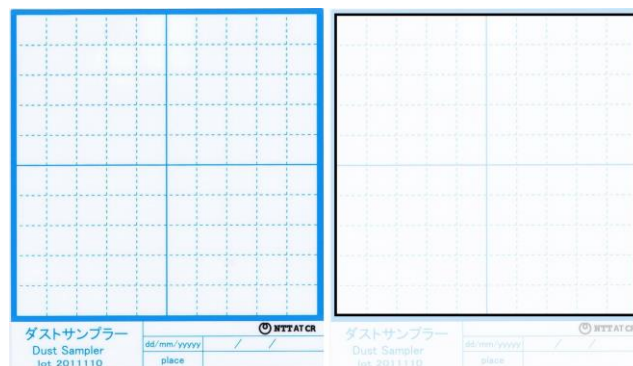


図1 DS (Dust Sampler)

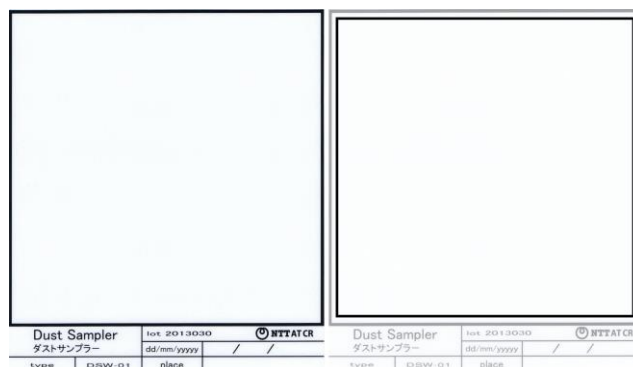


図2 DSW (Dust Sampler White) -01

2-3. にじみ対策

異物検出と粒径毎個数算出機能の入力はスキャン画像で、出力は粒径毎個数と結果画像である。処理の流れは、検査範囲決定処理、異物検出処理、異物粒径測定処理、粒径毎個数算出処理の4つで、異物検出処理が検出性能を決定する重要な処理である。以下では異物検出処理について説明する。

fi-6110で粘着シートをスキャンすると、異物の濃度とサイズにより、異物周辺の色のにじみが変化する現象が確認された。異物の色が黒のときやサイズが大きいときはにじみが大きく、異物の色が白に近いときやサイズが小さいときはにじみが小さかった。にじみの原因はレンズのボケによるものと考えられ、市販スキャナを改良することは困難なので、ソフトウェアで対応した。

固定閾値法では異物の大きさや形状が変化し正確に検出できないため、可変閾値法で異物を検出した。図3のにじみの影響による2値化後の異物の形状変化を示す。上は原画で、中と下では別の閾値を用いて各画素を2値化している。中では左の異物が検出できていないが、右の異物は期待通りの大きさおよび形状が検出できている。下では左の異物は期待通りの検出結果であるが、右は期待より少し大きく形状も変化してしまった。

可変閾値法は、各画素について局所領域(実験では 41×41 画素、スキャナ解像度600dpiより $1/600$ インチ/画素 = $42 \mu\text{m}$ /画素)の平均を利用して閾値を変化させ、にじみムラ等に対応する方法である。局所領域の平均を算出するために積分画像を利用して計算速度を向上させた。



図3 にじみの影響

2-4. 気泡対策

粘着シートと保護フィルムの中の気泡を異物と誤検出する問題がある。粘着シートの粘着材の粘着力

を弱くすることで気泡を抜けやすくしたが、厚みのある異物の場合は気泡を抜くことができない。また異物がない気泡を全て追い出すことは手間である。このため、ソフトウェアによる気泡除去が必要となる。

気泡の特徴としては、エッジ強度が低いこと、アスペクト比が1に近いこと、形状が半円もしくは円とその内側は周囲よりも暗いことである。可変閾値法を用いているため、気泡が外枠付近にある場合は半円となり、それ以外にある場合は円となりやすい。そこで、2値化、ラベリング後の連結成分に閾値以上のエッジ強度がなければ気泡候補とした。次に気泡候補のアスペクト比が1から大きく外れていれば、それを気泡候補から除外した。最後に気泡候補周辺領域から気泡色に近い画素の割合を調べ、その割合が大きい場合は気泡とし、異物候補から除去した。図4に外枠付近の気泡の例を示す。

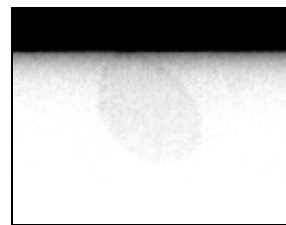


図4 外枠付近の気泡

2-5. 繊維状異物対策

細く白(背景)色に近い繊維状の異物の場合、検出した異物が途切れることが問題となる。細線化、2つの端点の接線方向の差、端点間の距離を利用して2つの異物を補間する処理を適用した。図5左は原画で、図5中は原画を2値化、細線化後、端点の接線方向を求めたものである。図5右のように2つの接線方向の角度差が小さければつなぎ処理を入れる。



図5 繊維状異物のつなぎ処理

3. 結果

本章では検出結果の評価方法について述べ、次

に評価結果と画像事例を示し、最後に計算速度を示す。

3-1 検出結果の評価方法

図6左を検査員が作成した正当の画像とし、円と三角が検出されているとする。図6右をシステムが検出した結果画像とし、円と四角が検出されているとする。円、三角、四角の外枠は粘着シートの縁を示す。円のようにシステムで陽性と予測した連結成分が正しい場合を True Positive (TP), 三角のようにシステムで陰性と予測した連結成分が間違いである場合を False Negative (FN), 四角のようにシステムで陽性と予測した連結成分が間違いである場合を False Positive (FP) とした。ここで、円の連結成分の重複率が 10% 以上であれば TP とした。検査員とシステムが検出した連結成分の面積は異なるため、それぞれを基準に重複率を計算し、その 2 つの平均を判断基準となる重複率とした。システムの性能としては、TP が多いほど良く、FN,FP が多いほど悪い。

さらに、TP, FN, FP を用いて精度 (Precision), 再現率 (Recall), F 値 (F-measure) を計算した。定義は以下のとおりである。

$$\text{Precision} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FP})$$

$$\text{Recall} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FN})$$

$$\text{F-measure} = 2 \times \text{Precision} \times \text{Recall} / (\text{Precision} + \text{Recall})$$

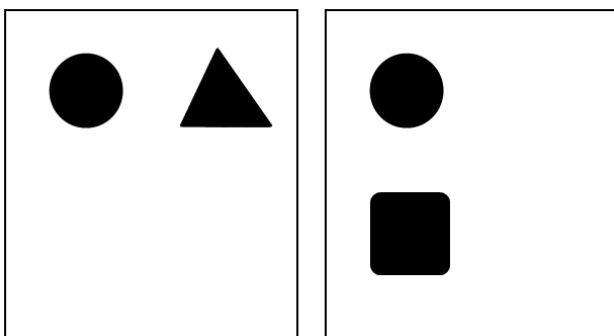


図6 検出結果画像(左:検査員, 右:システム)

3-2 評価結果と画像事例

ダストカウンターシステムの評価に用いたサンプル粘着シート DSW-01 は、異物の少ない(10 個程度/10,000mm²)シート 10 枚, 異物の多い(100 個程度/10,000 mm²)シート 5 枚, 人工的に作成した(50 個程度/10,000 mm²)シート 5 枚の合計 20 枚である。検

出例として人工シート 1 番のスキヤン画像を図7上に、その拡大画像を図7下に示す。異物に塗られた色はサイズを(表2), 異物を囲った枠は評価結果を示す(表3)。また、20 枚の評価結果を表4に示す。番号 1~10 が少ないシート, 番号 11~15 が人工シート, 番号 16~20 が多いシートである。20 枚の平均値は精度 97.6%, 再現率 79.7%, F 値 87.1%であった。システムの間違いのほとんどは FN, つまり未検出である。この原因は粘着シートを画像化する際に画素値が少しホワイトアウトするような設定にしたためである。気泡の誤検出や色ムラが問題となるためこの設定にした。今後、未検出を下げるためにはスキヤン時の設定を見直し、高性能な気泡と異物の識別器を設計する必要がある。

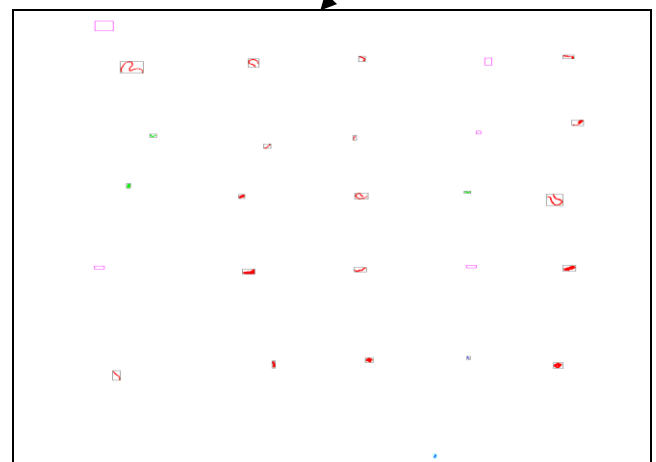
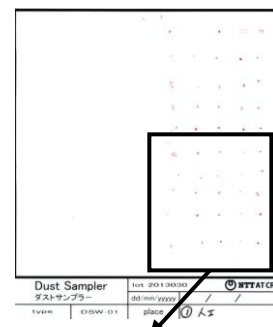


図7 検出例

表2 異物に塗られた色と異物サイズの関係

青色	300 μm 以上 400 μm 未満
緑色	400 μm 以上 500 μm 未満
赤色	500 μm 以上

表3 異物を囲った枠の色と評価結果の関係

黒色	TP(True Positive)
桃色	FN(False Negative)
水色	FP(False Positive)

表4 評価結果

番号	TP	FP	FN	精度	再現率	F 値
1	8	0	2	1.000	0.800	0.889
2	6	0	3	1.000	0.667	0.800
3	4	0	0	1.000	1.000	1.000
4	5	0	2	1.000	0.714	0.833
5	4	0	1	1.000	0.800	0.889
6	4	0	1	1.000	0.800	0.889
7	5	0	0	1.000	1.000	1.000
8	9	0	3	1.000	0.750	0.857
9	3	2	1	0.600	0.750	0.667
10	4	0	1	1.000	0.800	0.889
11	44	2	9	0.957	0.830	0.889
12	40	0	10	1.000	0.800	0.889
13	49	2	2	0.961	0.961	0.961
14	50	0	4	1.000	0.926	0.962
15	51	0	1	1.000	0.981	0.990
16	42	0	23	1.000	0.646	0.785
17	49	0	22	1.000	0.690	0.817
18	62	0	35	1.000	0.639	0.780
19	70	0	27	1.000	0.722	0.838
20	62	0	30	1.000	0.674	0.805
平均値				0.976	0.797	0.871

3-3 . 計算速度

ソフトウェアの計算速度は Intel Core i7-3930K 3.2GHz のCPU を搭載したパソコンで 1.1 秒/枚であった。スキャナ fi-6110 の読取速度が、600dpi, 24bit カラーという条件で 5.3 秒/枚であるのでソフトウェアの計算速度は十分といえる。

4. まとめ

異物が付着された粘着シートから自動的に異物を検出し、粒径毎個数を算出するダストカウンターシステムを開発した。目視用に作成した粘着シートには検査員が数えやすいように罫線(内側の実線と破線)が印刷されているが、これが検出率低下の原因となるため、罫線が印刷されていない粘着シートを開発した。粘着シートに保護フィルムを貼り合せたときに発生する気泡が検出率低下の原因となるため、気泡の微分値と形状の特徴を利用して異物と気泡の判別をした。20枚のサンプル粘着シートを用意し、検査員の答えを正しいものとして、システムの検出性能を評価

したところ、20枚の平均値は精度 97.6%、再現率 79.7%、F 値 87.1%であった。

開発したダストカウンターシステムの間違いのほとんどは異物の未検出であった。この原因は粘着シートを画像化する際に画素値が少しホワイトアウトするような設定にしたためである。気泡の誤検出や色ムラが問題となるためこの設定にしたが、今後、未検出を下げるためにはスキャン時の設定を見直し、高性能な気泡と異物の識別器を設計する必要がある。最終的には未検出と誤検出(精度と再現率)のバランスは、用途に応じてユーザが制御できるようにする。

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, No.42, 2006.