

ダストカウンターシステムの開発

Development of Dust Counter System

平岡忠志^{*1}, 脇田美幸^{*2}, 長尾綾子^{*2}, 後藤仁^{*2}
武知康逸^{*3}, 森本真理^{*3}, 服部宏祐^{*4}, 寺田賢治^{*4}

Tadashi Hiraoka, Miyuki Wakita, Ayako Nagao, Hitoshi Goto
Yasuichi Takechi, Mari Morimoto, Kousuke Hattori and Kenji Terada

抄 録

異物が付着し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目視検査結果を正答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。

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一般に空気清浄度と表面清浄度の測定で行われている。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まで対応している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 Dust Sampler(DS)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いため、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。

ここで、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。さらに、検査時間が1枚当たり数分かかることも課題となっている。

本研究では、異物が付着し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。

2 方法

2・1 ダストカウンターシステムの構成

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。開発したシステムは異物が付着した粘着シート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。これは 600dpi の光学解像度があり、Auto Document Feeder(ADF)の機能、自作ソフトウェアによるスキャナ制御機能、非可逆圧縮画像でない画像の出力機能を持つ。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

*1 機械技術担当, *2 NTT-AT クリエイティブ(株)

*3 (株) オプトピア, *4 徳島大学

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。

最後に、対応するパソコンの OS は Windows7 または Windows8 とした。

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

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 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、外枠の細線化した粘着シート Dust Sampler White (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 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。

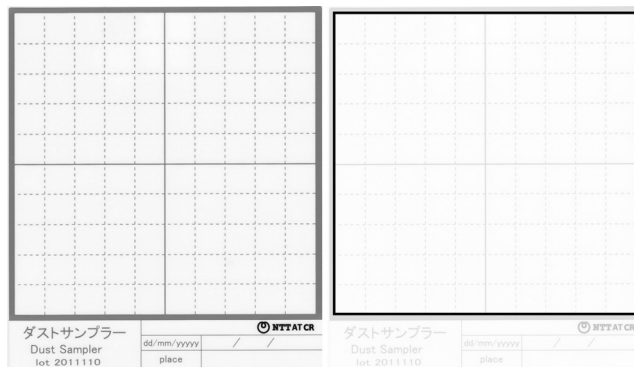


図1 DS (Dust Sampler)

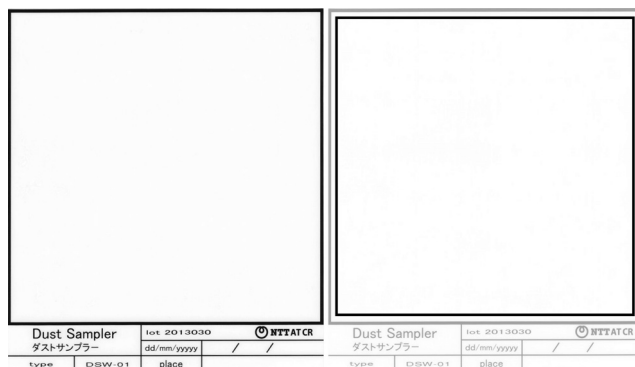


図2 DSW (Dust Sampler White) -01

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。

fi-6110 で粘着シートをスキャンすると、異物の濃淡により、異物周辺の色のにじみが増加する現象が確認された。粘着シートの検査範囲の色を白としたため、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。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ににじみの影響による2値化後の異物の形状変化を示す。上段は原画で、中段と下段では別の閾値を用いて各画素を2値化している。中段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。下段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。可変閾値法を利用すると、図3の中段右、下段左のような2値化結果が得られる。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誤検出する問題がでた。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ず、ソフトウェアによる除去が必要となる。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で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分類した。図4に気泡の例を示す。

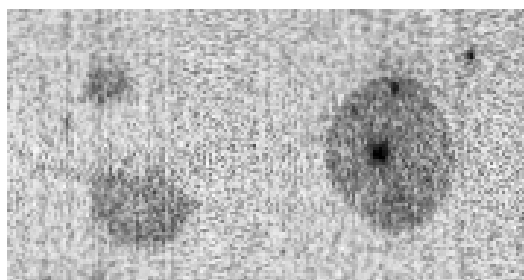


図4 気泡

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

3・1 検出結果の評価方法

図6左を検査員が作成した正答の画像とし、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。

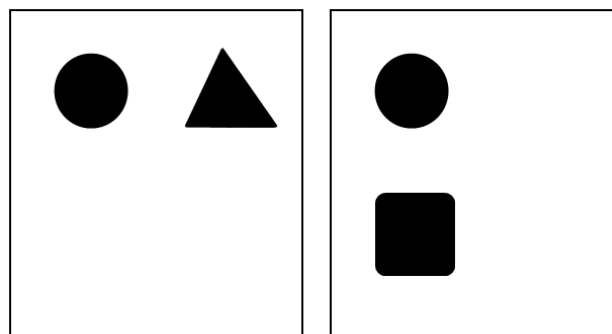


図6 検出結果画像（左：検査員，右：システム）

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。

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

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

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

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 DSW-01 のサンプルは、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 番のスキャン画像を図 7 上段に、その拡大画像を図 7 下段に示す。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。気泡などの誤検出が少なくなるようにこの設定にしたが、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方法を考案する必要がある。

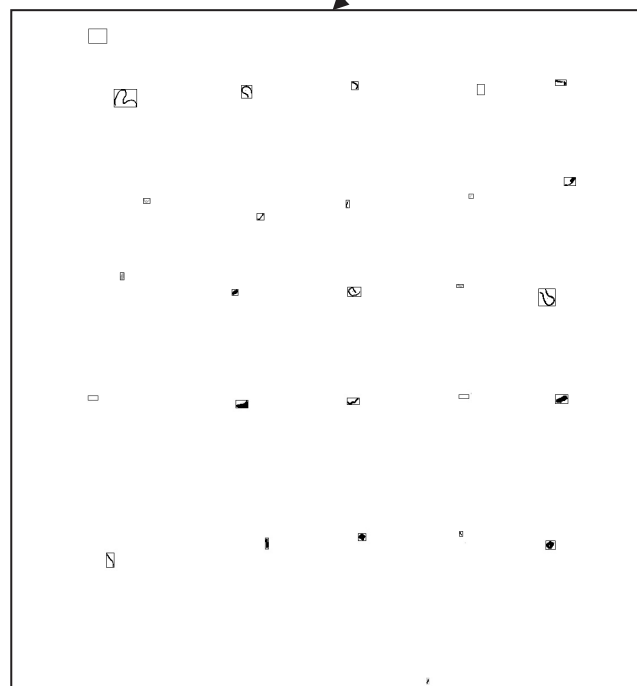
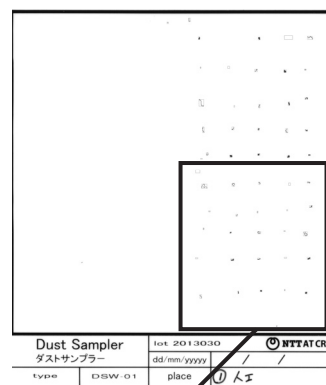


図 7 検出例

表 2 異物に塗られた色と異物サイズの関係

青色	300 μ m 以上 400 μ 未満
緑色	400 μ m 以上 500 μ 未満
赤色	500 μ m 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)

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。

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

4. まとめ

異物が付着し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、目視検査結果を正答として、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。気泡などの誤検出が少なくなるようにこの設定にしたが、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方法を考案する必要がある。

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，(社)日本空気清浄協会，10p. (2006)