

# 特集 規則性評価による欠陥候補検出技術を用いた 外観検査自動化\*

## Visual Inspection System Utilizing Defect Suspecting Technique Based on Regularity Evaluation

横山 良雄

Yoshio YOKOYAMA

川村 成

Shigeru KAWAMURA

南 貴雄

Takao MINAMI

加藤 敏夫

Toshio KATO

A new visual inspection system is proposed for industrial products having repetitious innumerable patterns, for which the application of the conventional exhaustive method for every pattern is uneconomical. In the same way as the inspection workers' operation, this system first scans the whole area of a product and identifies the candidate portions suspected of being defective. Then only the limited patterns in those portions are checked in detail using a powerful lens and a conventional image-processing method. In order to determine the defect candidate portions, the product figure components, besides the specific frequency components proper to the regular repetitious patterns, are filtered out from the image signal in the spatial frequency domain utilizing 2D-FFT. The attenuated defect signals during this filtering procedure are effectively recovered by appropriate post-processing. Sufficient sensitivity is secured in an application to ceramic substrate inspection, whose operation time is reduced to 5% compared with the conventional exhaustive inspection method.

**Key words** : Machine vision, Visual inspection, Defect detection, Automation

### 1. はじめに

工業製品の品質保証の一環として作業員による目視外観検査に頼る場合が少なくないが、製品の微細化や高密度化に伴い検査作業自体が困難となり、検査品質の安定化や生産性向上を目的として画像処理技術を用いた自動化が期待されている。中でもプリント基板のパターン検査やIC、LSIなどの半導体検査等に関してはパターン外観検査という分野として数多くの研究がなされている<sup>1)</sup>。

これらの多くは何らかの良品マスタパターン画像を用意して、画像間比較により良品との違いを欠陥として検出する手法であり、原理的には比較的単純であるが、一般的に膨大な画像情報の処理が必要となり、高速化のための処理装置の工夫がなされている。しかしながら、通常このような高速画像処理装置は装置規模が大きくなり、実際に工業製品の目視外観検査自動化のための導入を進める上において経済的な課題が残ることも少なくない。

当社で生産している自動車排気ガス浄化用の触媒担体についても、パターン検査が必要と考えられる。現状の作業員による目視パターン検査作業を観察してみると、従来のパターン検査装置のようにすべてのパターンを個別に観察しているのではなく、全体を概観し、異常個所のみを詳細に検査している様子がうかがえ

た。この作業のように、全体を概観して異常候補箇所を特定できれば、特別な高速装置を導入することなく経済的な自動化が可能になると考えられる。ここで全体から欠陥候補位置を特定する手段が課題となる。

作業員は、一体どのように欠陥候補位置を特定しているか、という人間の認識過程についての考察も興味深い。今回はこの点については議論を避け、自動化の目的のため同等の機能を画像処理技術を用いて実現することとした。

以下では、まず今回検査対象とする製品を紹介し、作業員の検査作業に倣った2ステップ検査手法について概説する。次に、この検査システムで重要となる欠陥候補検出手法として、コンベンショナルな明るさ変化では検出できない欠陥に対し、パターンの規則性を活用し規則性異常箇所を候補位置として検出する手法について、テストの結果を含め報告する。

### 2. 検査対象

今回の検査対象となる、自動車排気ガス用触媒担体は、数千個の微細な貫通孔をもつ円筒状の構造体であり、その例をFig. 1に示す。この担体に、排気ガス浄化のための触媒を担持させて自動車の排気管内に設置されることにより、その内部を通過するガスを浄化する機能を発揮する。この触媒担体の製品の機能として

\*画像センシング技術研究会の了解を得て、第8回画像センシングシンポジウム講演論文集より加筆転載

は、排気ガスが内部を通過するときの抵抗が十分小さい貫通度を確保しながら触媒との接触面積が大きく、かつ所定の構造強度を有することが求められる。外形、寸法は、搭載される自動車の種類によって異なるが、その構造は、約0.1mmの隔壁によって構成された約1.0mm<sup>2</sup>の規則的な貫通孔群となる。

現在、この製品はセラミック成型、及び焼成により生産されており、その品質保証の一環として製造過程で発生する欠陥品を除去すべく、外観検査が行われている。微細構造を確認する必要があるため、目視による検査作業は目を酷使する過酷な作業となる。地球環境の保護が叫ばれる中、需要は増大し、性能向上のための更なる製品構造の微細化が進められている。その結果、作業者による外観検査が今後困難となる恐れがあり、作業環境の改善と生産性向上を進めるためこの工程の自動化が求められている。

外観検査項目の例をFig. 2に示す。「ゆがみ」は紙面に水平方向に応力が働いてセル隔壁が変形したものである。「よれ」は紙面に垂直方向に応力が働いて波打った状態になっており、端面から観察すると隔壁が厚くなったように観察される。

いずれの欠陥についても、製品ごとに、許容される変形寸法が決められている。

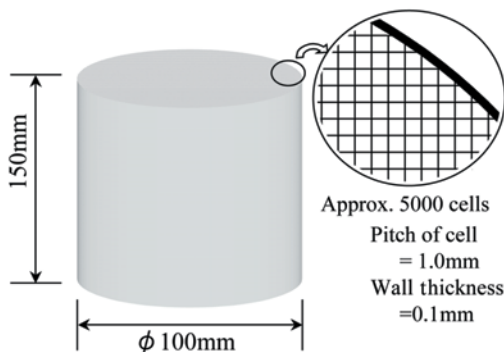


Fig. 1 Example of product

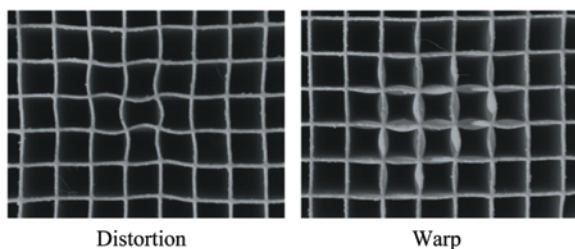


Fig. 2 Example of defect

### 3. 自動検査手法の構想

端面検査では、両端面の各開口セルについて規格に基づきわずかな寸法変化を計測する必要がある。検討の結果、セルを拡大して撮像し、Fig. 3に示すアルゴリズムで寸法変化を計測することにより、十分な精度で良否判別可能であることが確認できた。しかし、片面約5000個のセルについて、このアルゴリズムで検査するためそれぞれの開口セルを拡大撮像して触媒担体の端面全体をカバーするためには、TVカメラで片面あたり約185画面の画像入力・処理が必要となることが判明した。触媒担体の両端面を全面検査しつつ、必要な検査サイクルタイムを満たすにはコスト面に大きな課題を抱えることになる。

一方、検査員による作業を観察してみると、目視検査においては、全開口セルを個別にチェックしているわけではない。まず、端面全体を概観し、特に異常がなければそのまま良品として判断している。異常な個所を見つけた場合に、その部位を詳細に観察し、異常セルを計数するなどして良否を判別している。

そこで、この検査員の作業と同様に、低倍率で全体を撮像することにより異常個所を限定できれば、検査に必要な撮像画面数を大幅に削減できる。そこで、以下のようなステップで検査することを構想した。

Step 1 :

端面全体を低倍率で撮像し、この画像から欠陥候補個所を特定する。

Step 2 :

欠陥候補個所のセルを拡大して撮像し、高精度に変形量を測定する。

ここで、Step 2については、Fig. 3に示すようなアルゴリズムで実現可能であるため、Step 1の欠陥候補検出手法が課題となる。

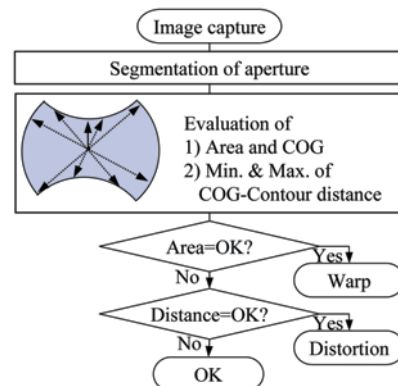


Fig. 3 Aperture inspection procedure

今回は、通常の工業用TVカメラを用いて端面の全体を撮像し、その画像から欠陥候補を特定することを試みることにした。いくつかの欠陥サンプルを用いて検討した結果、「よれ」については見かけ上セル板が厚く観察され (Fig. 2参照)、その部位の光反射量が増加することを利用して、局所的平均明度の尺度で欠陥部位が特定できた。一方、「ゆがみ」についてはこのような明度変化の尺度による部位特定は困難であった。

以下では「ゆがみ」のように明るさの尺度では特定が難しい欠陥に対して検出する手法について記述する。

## 4. 規則性評価手法

### 4.1 評価方式の選定

一般的な手法として、良品パターンを記憶しておき、画像間比較により相違部を検出するいわゆるパターン比較検査の考え方が用いられるが、この手法の弱点として、パターン間の位置あわせ誤差がそのまま検出力に反映されるという問題がある。今回の対象においてはパターン形状自体がサブピクセルの領域にあり、位置あわせは困難と考えられる。

一方、高度な規則性を持つパターン検査の分野では光学的フーリエ変換を利用した空間フィルタ方式による欠陥検査手法が用いられている<sup>2)</sup>。この方式は、パターン比較法のマスタを自前で生成し、周波数領域で差分をとる方式と考えることができ、上記位置合わせの課題が発生しないものと考えられる。近年のマイクロプロセッサの進歩により、今回のような比較的小規模の画像に対しては、デジタル画像上でのフーリエ変換でも高速に実現できるものと考え、2次元DFTによる空間フィルタ方式による候補位置検出を試みることにした。

### 4.2 規則成分除去による欠陥部位検出

空間フィルタ方式により、触媒担体の欠陥位置特定の可能性を評価するため、欠陥を含むモデル画像を生成し、シミュレーションによりテストを行った。

モデル画像の例をFig. 4に示す。担体のセル壁を表す格子模様を含む円形の画像内の、中央部と周辺部 (左上部) に「ゆがみ」に相当する擬似欠陥を設定した。欠陥はゆがみにより数セルにわたってセル壁の位置が0.5画素シフトした状態を想定している。

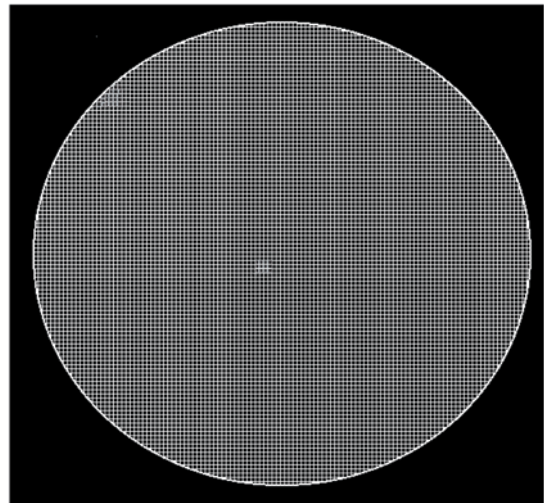


Fig. 4 Defect model

この画像に対し、空間フィルタ方式で規則成分を除去し、逆フーリエ変換した結果をFig. 5に示す。下部に付したグラフは、それぞれ周辺部及び中央部の欠陥部位を通る水平ラインA-B, C-D上の信号レベルを示す。

この結果から、中央部の欠陥についてはほぼ良好に欠陥部分の検出が可能であることが分かる。すなわち、規則パターンが除去され、その差分としての欠陥信号が保存されている。しかし、周辺部についてはセルの周期性が十分除去されておらず、欠陥信号を明確に特定することが困難であることが判明した。

このことは、触媒担体の製品形状の影響によるものと考えられ、この影響を排除して欠陥位置を検出する手法を検討したので以下に示す。

### 4.3 製品形状を考慮した規則性異常検出

今回の課題を以下のように定式化して考えることとする。触媒担体端面の入力画像を $g$ 、その中のセルの規則成分を $w$ 、断面形状を表す形状を $f$ 、欠陥部分を加法的に表現できるとして $d$ とすると、

$$g = f \cdot w + d$$

と表せる。ここで、右辺第一項  $f \cdot w$  を除去して、 $d$  を検出することが目的であり、実空間画像上でこれを試みるのがいわゆる画像間マスタ比較法になるといえる。前述したように実空間上では位置合わせが困難なため、周波数領域で自前のマスタとの差分をとることを考える。

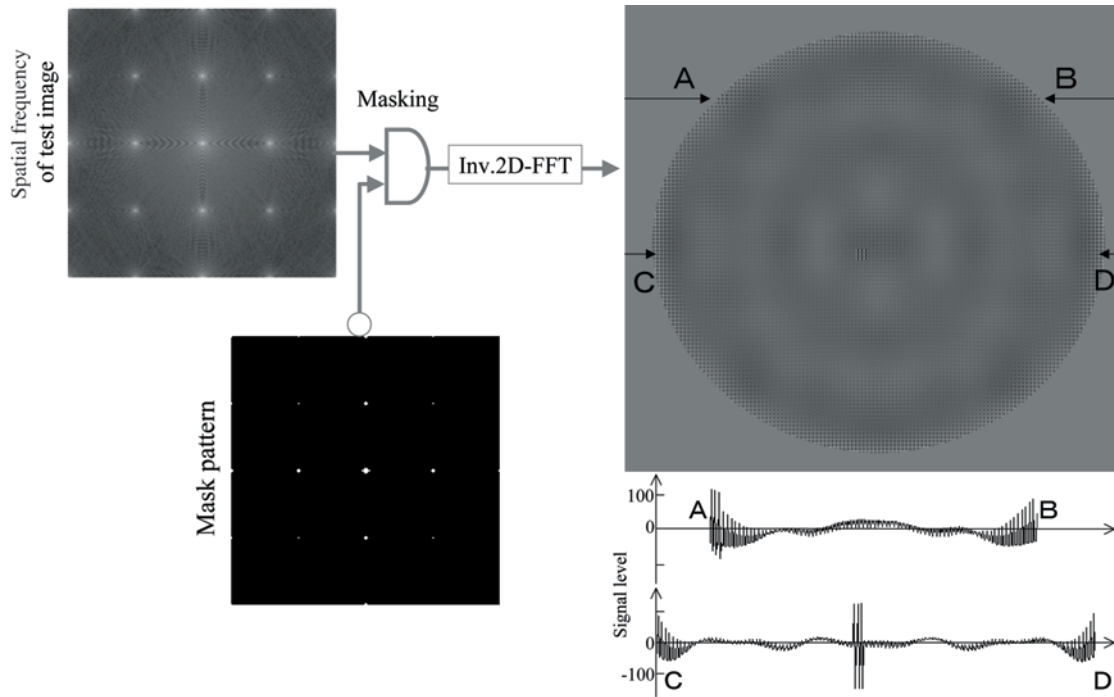


Fig. 5 Removal of regular component

各項のフーリエ変換像をそれぞれ大文字で表すと、

$$G = F * W + D$$

ここで、 $F$  は、今回は円形状のパターンの変換像であり、 $\text{sync}$ 関数状の断面を持つ信号となる。 $W$  は規則性を表す信号であり、周波数空間上で鋭いピークで現れる信号となる。記号“ $*$ ”はコンボリューション（畳み込み積分）であり、 $F * W$ は、 $W$ のもつ各ピークに $F$ の信号が重畳することになる。 $d$ は通常、空間的には微細な信号であり、欠陥成分 $D$ は広い周波数成分を持つことになる。ここで、 $F$ の影響が小さいときには、 $W$ のピーク領域を除去して逆変換することにより $d$ が再現できるが、今回は $F$ の影響が無視できない状況にあり、欠陥検出のためにはこれを排除することが必要と考えられる。

ここで、 $W$ が連続関数の場合、重畳した $F$ を除去することは困難であるが、今回の対象では $W$ は周波数空間内で離散的な位置にのみピークを持つ。そこで今回は $W$ の各ピークに重畳した $F$ の成分も合わせて除去することによる欠陥検出を試みることにした。

すなわち、 $W$ の各ピークを中心とした円形の領域を広くマスクすることにより、 $F * W$ の多くの成分を除去できる。しかしながら、このとき $D$ についても

多くマスクされることになるため、その影響についてシミュレーションで検討した。

その結果をFig. 6に示す。本方式により、担体端面の規則成分はほぼ完全に除去されていることが分かる。欠陥信号については、画像を見る限り極めてコントラストが悪いが、下に付した水平ライン上の信号プロファイルを見ると、中央部、周辺部ともに正常部とは異なり、やや振幅の大きい信号として検出されている。欠陥の本来の形状は留めておらず、この信号から原型を推定することは困難であるが、今回は欠陥候補位置を特定する目的のため、この信号を安定して検出することを更に検討した。

欠陥部位の信号波形を観察すると、極めて高周波の信号で構成されており、これは上記 $F * W$ の成分除去において、欠陥信号の主に低周波信号が除去してしまったものと考えられる。そこで、この高周波信号における正常部との僅かな振幅の差を画像処理手法で強調する後処理を検討した結果、逆変換後の画像を局所領域に分割し、領域ごとの信号分散値を出力する処理が有効であった。Fig. 6の画像に対して、 $4 \times 4$ 画素毎の局所分散処理を施した結果をFig. 7に示す。この後処理により、コントラストの低い欠陥信号のSN比が大幅に改善できることが示せた。

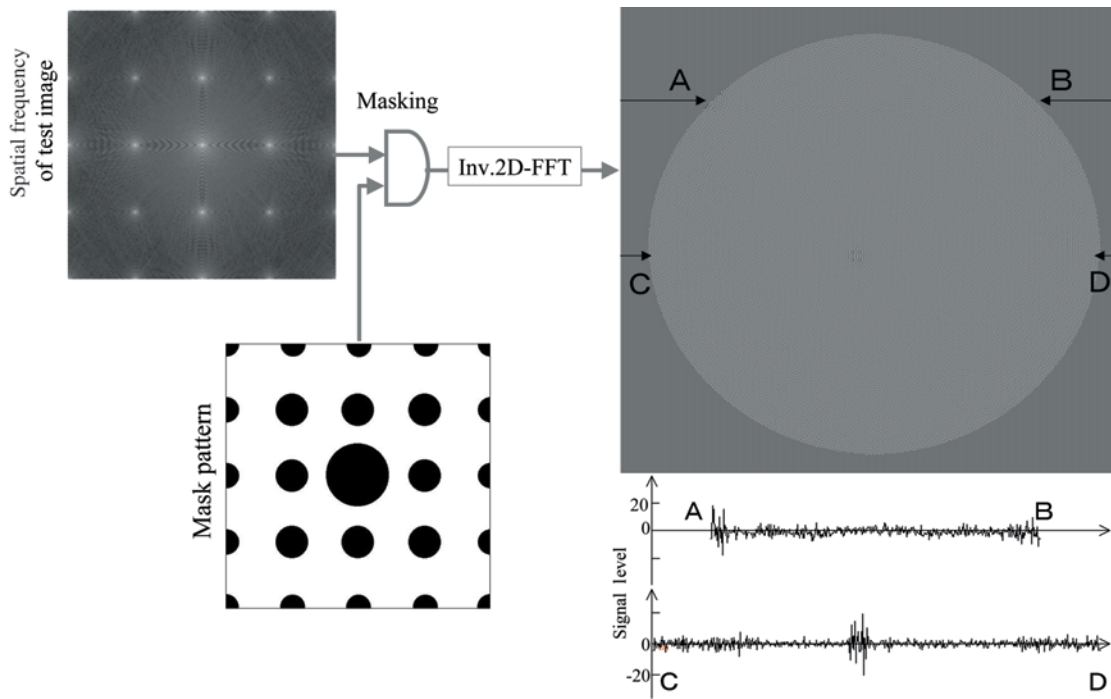


Fig. 6 Removal of product shape component

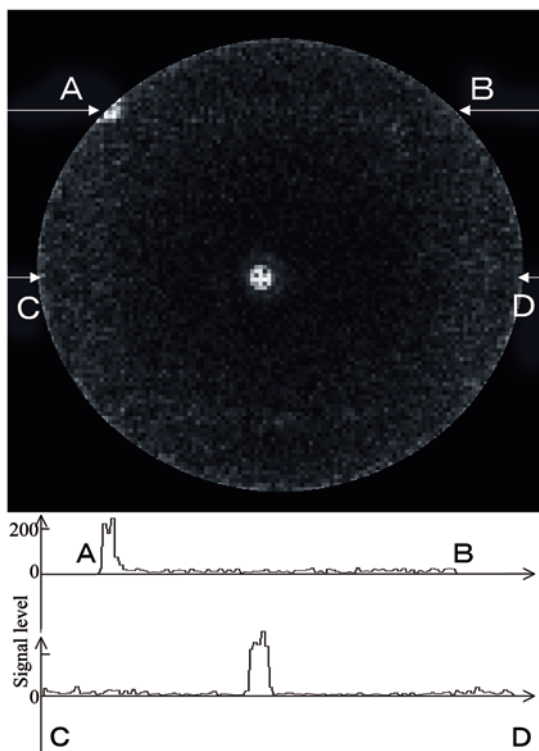


Fig. 7 Enhanced defect signal

## 5. おわりに

規則的パターンの経済的な欠陥検査手法として、2次元フーリエ変換を利用し、製品形状を考慮した規則成分除去と、微弱化した欠陥信号を強調する後処理の組み合わせにより、欠陥候補位置を検出する手法を提案した。

なお、本方式を当社製品の触媒担体の自動検査装置に組み込むことにより、検査に必要な画像処理時間を約1/20に低減可能となっている。今後は他の規則パターンを持つ製品（熱交換器など）の検査自動化へ展開を進めていく予定である。

### <参考文献>

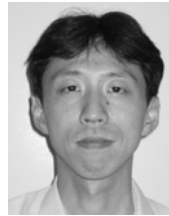
- 1) 原, “パターン外観検査の最新動向”, 1997年精密工学会春季大会講演論文集  
Novice Expert ratio Method, UPA 2002 (2002)
- 2) 北川, 林, “空間フィルタ方式による基板異物検査装置の開発”, 第39回計測自動制御学会講演会予稿集201 A-2



< 著 者 >



横山 良雄  
(よこやま よしお)  
生産技術部  
生産システム関連の画像計測技術  
開発に従事



川村 成  
(かわむら しげる)  
生産技術部  
生産システム関連の画像計測技術  
開発に従事



南 貴雄  
(みなみ たかお)  
セラミック製造部  
生産システムの開発，設計に従事



加藤 敏夫  
(かとう としお)  
ディーゼル噴射製造部  
生産システムの開発に従事