

マルチスペクトル画像による欠陥検出手法の研究

A Method of Defect Detection Using Multi-Spectral Images

柏木利幸*, 大恵俊一郎**
Toshiyuki Kashiwagi, Shunichiro Oe

抄 録

コントラストの低い欠陥を高精度に検出するために、マルチスペクトル画像入力装置を設計・製作し、マルチスペクトル画像を用いた新しい検出方法を開発した。この装置は、スキャナーのように1ラインごとに画像をスキャンして2次元の画像全体のスペクトルを取得する。1ライン分のスペクトルデータは、ライン上の各点の位置情報とスペクトル情報をもつ2次元の画像で、全データはこれにスキャン方向の位置データを蓄積した3次元のデータとなる。このデータより必要な帯域の画像を切り出すことでマルチスペクトル画像を作成し、さらに、マルチスペクトル空間を構成して欠陥検出を行った。コントラストの悪い複数のサンプルを作成して実験を行った結果、欠陥に適したスペクトルを選択することで、本手法は、カラー画像を用いた検出方法に比べて、かなり検出能力が高く、照明のわずかなムラや撮像系のノイズまでも検出できることが分かった。

1 はじめに

工業製品における欠陥検査は、製品の歩留まりや信頼性の面からも年々検査基準が厳しくなる傾向にある。このような欠陥はコントラストが悪く目視でも熟練者でなければ識別困難な場合が多い。県内でも、プラスチック、革、紙、繊維、金属表面などの検査はほとんど目視により行われてきたが、これらは連続した緊張を要する単純作業であり、検査員の個人差や体調、検査基準の変動、見落としなどが問題となっており、自動化が強く望まれている。

そこで、このような低コントラスト欠陥の検出を行うために物質本来のスペクトル情報を画像化して、その画像をもとに欠陥検出を行う手法を開発した。この手法は、これまでにカラー画像を利用して開発してきた手法を拡張し、新たにマルチスペクトル画像用に最適化を行ったものである。

これまでのマルチスペクトル画像を利用した外観検査に関する研究では、正常品の分光スペクトルを予め求めておき、これと、検査対象物の分光スペクトルを比較する方法が、プリント基板の検査などに利用されている。

また、取得したスペクトルの差分（微分）を求めることにより検査対象物のスペクトル分布が適正で

あるかを判断する手法も提案されている。

しかしながら、このような正常部分と欠陥部分の差分を求める手法では、低コントラスト欠陥の場合はその差分が非常に小さくノイズなどの影響を受けやすいという欠点がある。

開発した手法は、マルチスペクトル画像の各画素値を成分とするベクトルの出現頻度を比較することにより正常部と欠陥部を識別する。これは、正常部分は、欠陥部分に比べてその領域が大きいいため、正常部分のベクトルの出現頻度は高く、欠陥部分のベクトルの頻度は低いという特徴を利用している。

このため、特徴量を個々に比較する従来の手法に比べて、本手法は安定して低コントラスト欠陥の検出が行える。

これまでも、このような考え方にに基づき、カラー画像のカラー値を特徴量として欠陥を検出する方法を提案してきたが¹⁾⁻³⁾、新たに複数のスペクトル画像を用いることで、低コントラスト欠陥の検出精度をかなり高めることができた。

コントラストの悪い複数のサンプルを作成して実験を行った結果、欠陥に適したスペクトルを選択することで、本手法は、カラー画像を用いた検出方法に比べて、かなり検出能力が高く、照明のわずかなムラや撮像系のノイズまでも検出できることが分かった。

*企画情報課, **徳島大学

2 検出原理

全ての物には、何らかの色（スペクトル）情報があり、物質に光を当てると、各波長の透過量や反射量は物質により異なる。色の帯域（スペクトル）ごとに、これらの情報を取得すれば、物質本来の色の特徴量を正確に知ることができる。そこで、物体の色情報を RGB の画像情報ではなく、マルチスペクトルの画像情報として捉えれば、人間が見分けにくい色の識別や低コントラスト欠陥の検出が可能となる。しかし、マルチスペクトル画像は、スペクトルの数だけ画像があり、カラー画像の R 成分、G 成分、B 成分の 3 枚の画像に比べて情報量のはるかに多く、通常の処理方法では膨大な計算時間がかかる。これまでに、微妙な色の違いを検出する新しい処理方法「色の均一性評価手法」¹⁾や複数の特徴量を効率的に処理する「特徴空間を用いた欠陥検出手法」²⁾を開発しており、マルチスペクトル画像に対してもこれらの手法は有効である。

検査スペクトルを任意の m 個のスペクトル帯域に分け、 m 枚のマルチスペクトル画像を作成し、各画素位置ごとに m 個のスペクトル強度で構成されるマルチスペクトルベクトル \mathbf{p} を求める。 \mathbf{p} は $p_1 \sim p_m$ の m 個のスペクトル強度を用いて次のように表される。

$$\mathbf{p} = (p_1, p_2, \dots, p_m)^t \quad (1)$$

ここで、 t は転置を表す。これより、各点が頻度情報を有するマルチスペクトル空間を作成すると、正常部分はスペクトル分布が似通っているため、マルチスペクトル空間ではほぼ同じ位置に固まってプロットされるが、欠陥部分はスペクトルがわずかに

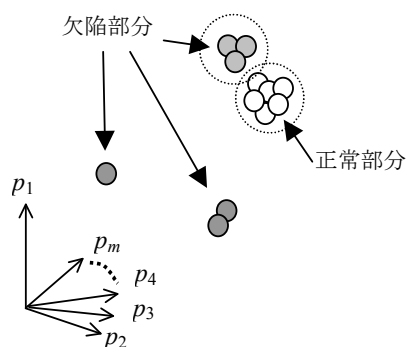


図1 マルチスペクトル空間における正常部分と欠陥部分の分布

異なるため、正常部分とは少し離れた位置にプロットされる。この時、プロットされた点の頻度に着目すると正常部分は頻度が高く欠陥部分は頻度が低い。この時の様子を図1に示す。この図では、頻度の高いものほど明るく、低いものほど暗く表示している。したがって、マルチスペクトル空間において頻度の高い領域は正常部分、頻度の低い領域は欠陥部分と判定できる。実際には、マルチスペクトル画像の各画素値を成分とするベクトルの出現頻度を表す頻度画像を作成することにより、2次元画像上で欠陥位置を簡単に特定できる。

3 マルチスペクトル画像入力装置

マルチスペクトル画像入力装置を設計・製作し、この装置の制御とマルチスペクトル画像の表示、解析が行えるプログラムを開発した。この装置はスキャナーのように1ラインごとに画像をスキャンして2次元の画像全体のスペクトルを取得する。1ライン分のスペクトルデータは、分光器を通過することにより、ライン上の各点の位置情報とスペクトル情報をもつ2次元の画像データで、全データはこれにスキャン方向の位置データを蓄積した3次元のデータ（以後、3Dキューブと呼ぶ）となる。制御プログラムは、マルチスペクトル画像入力装置を制御して、この3Dキューブの取得を行う。図2に1画面分のスペクトルデータ（3Dキューブ）の取得イメージを示す。作成したプログラムは、取込のライン数、取込速度、原点復帰などの制御が行える。図3にマルチスペクトル画像入力装置の外観図を、図4に製作したマルチスペクトル画像入力装置を示す。

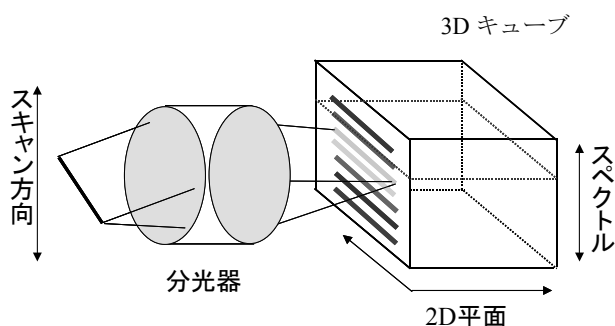


図2 マルチスペクトル画像取得方法

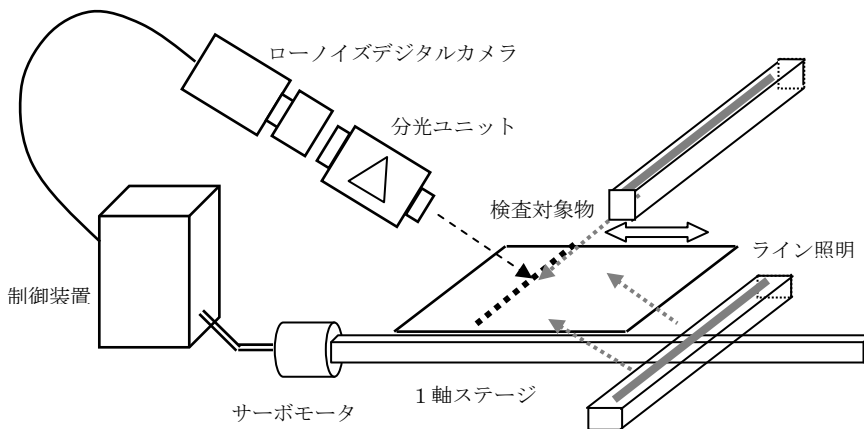


図3 マルチスペクトル画像入力装置外観図



図4 マルチスペクトル画像入力装置

また、表示プログラムは、この3Dキューブより、必要な帯域の画像を切り出すことでマルチスペクトル画像を作成し、解析プログラムは、マルチスペクトル画像より多次元マルチスペクトル空間を作成し、欠陥検出を行うことができる。

この時、取得したデータは、カメラの感度や照明の分光分布の影響を受けるため、標準白色面を用いてスペクトルデータの正規化を行っておく必要がある。x行y列の正規化データ $NormData(x,y)$ は次式により計算する。

$$NormData(x,y) = \frac{OrgData(x,y) - Dark(x,y)}{White(x,y) - Dark(x,y)} \quad (2)$$

ここで、 $OrgData(x,y)$ は、x行y列の取得スペクトルデータ、 $Dark(x,y)$ は、x行y列の暗電流、 $White(x,y)$ は、x行y列の標準白色面からの反射スペクトルデータを表す。

4 擬似カラー表示方法

マルチスペクトル画像入力装置より得られるデータは、スペクトルデータなので、人間の知覚に合うカラー画像で表示するプログラムを作成した。これにより取得したデータが適正なものであるかどうか目視で確認することができる。

カラー画像で表示するためには、取得したスペクトルデータをR、G、Bの3刺激値に変換する必要がある。一般にはスペクトル情報からRGB値を計

算するには、いったんXYZ表色系の等色曲線よりXYZ値を計算し、その後RGB値に変換する。分光エネルギー分布を $L(\lambda)$ とすると、XYZ値は次式により求められる。

$$\begin{cases} X = \int L(\lambda)x(\lambda)d\lambda \\ Y = \int L(\lambda)y(\lambda)d\lambda \\ Z = \int L(\lambda)z(\lambda)d\lambda \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 $x(\lambda), y(\lambda), z(\lambda)$ は、波長 λ に関する分光感度を表している。

また、求めたXYZ値よりRGB値への変換は次式により行った。

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.9104 & -0.5338 & -0.2891 \\ -0.9844 & 1.9985 & -0.0279 \\ 0.0585 & -0.1187 & 0.9017 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (4)$$

カラー文字をカラープリンタにより印刷し、照明の種類を変えてカラーカメラで撮影した画像を図5(1)、(2)に、同じサンプルを同じ照明でマルチスペクトル画像入力装置により撮影し擬似カラー表示した結果を図6(1)、(2)に示す。

これらの結果を見ると、マルチスペクトル画像入力装置より取得したマルチスペクトルデータで作成した擬似カラー画像は、照明の種類が異なっても照明の影響を受けずに、カラー表示が適正に行えていることが分かる。

5 欠陥検出方法

2章で説明したとおり、マルチスペクトル空間で



(1) ハロゲン



(2) 蛍光灯

図5 カラー印字文字のカラーカメラによる撮影画像



(1) ハロゲン



図6 カラー印字文字のマルチスペクトル

欠陥部分の頻度は低く、正常部分は頻度が高い。したがって、マルチスペクトル空間内の頻度を比較することで欠陥部分と正常部分を区別できるが、マルチスペクトル空間内でこれを行うことはデータ量が大きく現実的でない。そこで、まず、 m 枚のマルチスペクトル画像 $NormData(x,y)$ からなる配列 $F(x,y)$ を作成すると $F(x,y)$ の x 行 y 列の各要素は、式(1)で示されるベクトルを成分に持つ。つぎに、 $F(x,y)$ の各要素を全て図1のマルチスペクトル空間にプロットし、このマルチスペクトル空間より得られる頻度情報を、 $F(x,y)$ の各要素と入れ換えた頻度画像 $g(x,y)$ を作成する。頻度画像は、マルチスペクトル画像の各要素の位置情報と出現頻度を画像化している。さらに、取得したマルチスペクトル画像にノイズが多い場合は、複数枚の $F(x,y)$ から複数枚の $g(x,y)$ を作成し、この平均頻度画像を使用する。

作成した頻度画像において、欠陥部分と正常部分を区別する頻度の閾値を d とし、 d 以下の頻度を濃淡表示した画像 $g_d(x,y)$ を頻度特徴検出画像と呼ぶ。 $g_d(x,y)$ は、欠陥部分の特徴を表す画像となる。

6 実験結果

実験ではまずカラープリンタによりカラー印刷した図7、図8のようなサンプルの色ムラ検出実験を行った。図7の被写体には目視ではほとんど認識できない程度の色差で文字やパターンが描かれている。図7の被写体から図9～11の3つのマルチスペクトル画像を作成し、検出した結果を図12に示す。また、同じサンプルをカラーカメラを用いて同じ手法で検出した結果を図13に示す。

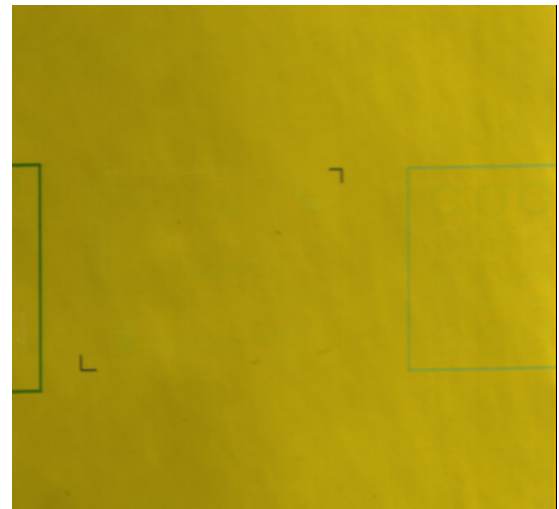


図7 色ムラサンプル画像



図8 黒塗りサンプル画像

これらを比較するとマルチスペクトル画像を用いた方が明らかに精度良く検出可能なことが分かる。さらに、4枚のマルチスペクトル画像 (446.69 - 476.05nm, 513.53 - 522.90nm, 616.58 - 625.95nm, 719.63 - 729.00nm) を用いて検出を行った結果を図

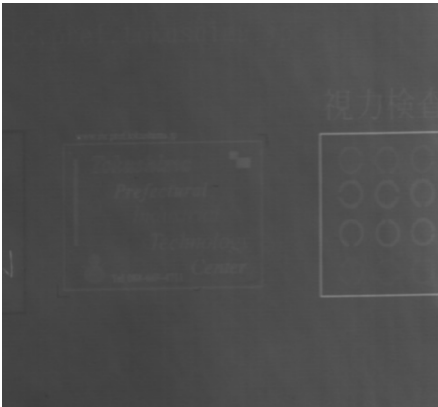


図9 マルチスペクトル画像1
(446.69 - 513.53nm)

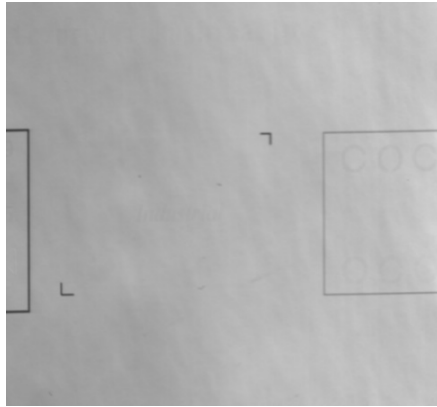


図10 マルチスペクトル画像2
(560.37 - 607.21nm)

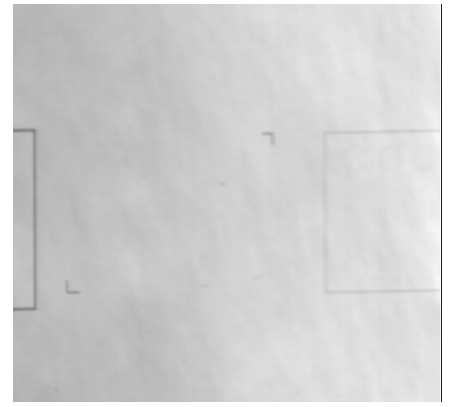


図11 マルチスペクトル画像3
(700.89 - 747.73nm)



図12 マルチスペクトル画像 (m=3) より検出

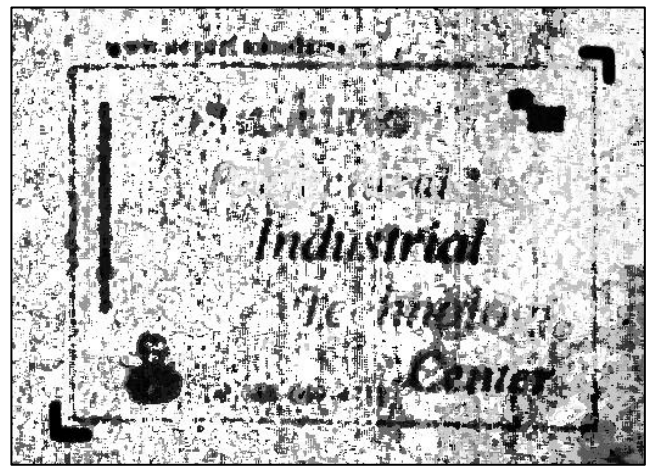


図13 カラー画像より検出

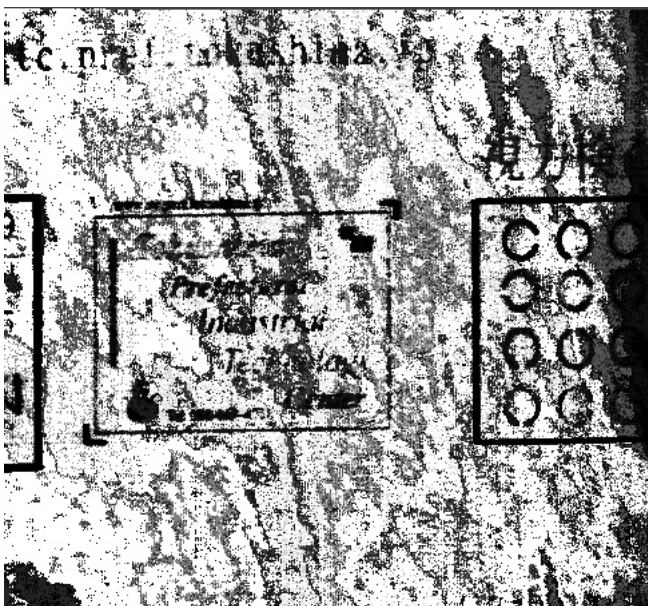


図14 図7の検出結果 (m=4)

14に示す。図12に較べると、わずかな光のムラ

がかなり強調されて検出されていることが分かる。このように、マルチスペクトル画像の数を増やしていくと、欠陥に対してより過敏となり検出不要なものまで検出してしまうこともある。

また、図8の黒塗り部分にはカラー文字を印刷しているが、目視ではほとんど判別できない。図8のマルチスペクトル画像を用いて検出した結果とカラー画像を用いて検出した結果をそれぞれ図15、図16に示す。カラー画像では黒インクで塗られた部分がうまく検出できていないが、マルチスペクトル画像による検出結果では、照明ムラの影響があるものの黒塗り部分の文字が確認できる。

このように、マルチスペクトル画像を用いると、目視では検出困難な欠陥まで検出パラメータを変更することで検出可能である。

7 まとめ

コントラストの低い欠陥を高精度に検出するため



図 15 マルチスペクトル画像 ($m=3$) による検出結果

に、マルチスペクトル画像入力装置を設計・製作し、マルチスペクトル画像を用いた新しい検出方法を開発した。開発した手法は、マルチスペクトル画像の各画素値を成分とするベクトルの出現頻度を比較することにより正常部と欠陥部を識別する。これは、正常部分は、欠陥部分に比べてその領域が大きいいため、正常部分のベクトルの出現頻度は高く、欠陥部分のベクトルの頻度は低いという特徴を利用している。

このため、特徴量を個々に比較する従来の手法に比べて、本手法は安定して低コントラスト欠陥の検出が行える。しかも、複数のスペクトル画像を用いることで、低コントラスト欠陥の検出精度をかなり高めることができた。

コントラストの悪い複数のサンプルを作成して実験を行った結果、欠陥に適したスペクトルを選択することで、本手法は、カラー画像を用いた検出方法に比べて、かなり検出能力が高く、照明のわずかなムラや撮像系のノイズまでも検出できることが分かった。

実際に県内の企業で生産しているプラスチック製品の欠陥検出実験を行ったところ、人間では感知で

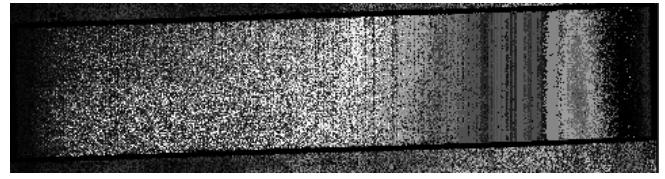


図 16 カラー画像による検出結果

きなかった製造上の微妙なムラまで明確に検出することが可能であった。

謝辞

本研究の種々の実験にご協力いただいた徳島大学大学院工学研究科卒業生の長澤信太郎氏に感謝いたします。また、マルチスペクトル画像入力装置の設計・製作にご協力いただいた(株)松浦機械製作所に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 柏木利幸・大恵俊一郎:「色の均一性評価手法」, 第 14 回外観検査の自動化ワークショップ講演論文集, pp.73-78 (2002)
- 2) 柏木利幸・大恵俊一郎:「特徴空間を用いた欠陥検出手法」, ビジョン技術の実利用ワークショップ講演論文集, ViEW2003, pp48-53 (2003)
- 3) 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, Vol.124, No.3, pp.666-671 (2004)