燃料電池セパレータの微小欠陥検出のための 帯型偏光撮像系・帯型 KIZKI 処理検査装置*

青木 公也** 山本 一輝*** 竹内 佑介† 白村 佑真†
伊藤 毅†† 近藤 考司†† 川尻 浩右††

Development of Automatic Visual Inspection System for Fuel Cell Separator Plate

Kimiya AOKI, Kazuki YAMAMOTO, Yusuke TAKEUCHI, Yuma HAKUMURA,
Takeshi ITO, Takashi KONDO and Kosuke KAWAJIRI

In this study, we propose an automatic visual inspection method for separator plates, which are precision-pressed components of fuel cells. In separator inspection, it is necessary to detect micro-defects (scratches, stains) on various flow channel patterns. Because it is a thin plate component, the separator may warp or twist during imaging. Also, it needs to be inspected at high speed. Therefore, we proposed a new image inspection method called "Banded KIZKI Processing" and combined it with a "landscape rectangle polarization camera" to achieve robustness and high-speed inspection. We have developed a prototype inspection system and have confirmed its effectiveness through experiments using actual workpieces.

Key words: fuel cell, visual inspection, polarization camera, Image processing, KIZKI processing

1. 緒 言

自動車産業界は脱炭素社会の実現に向け、イノベーション創出の取り組みを加速させている。その中で燃料電池車(FCV)の低コスト化につながる技術開発や、インフラづくりなどが進められている^{1)~4)}。本研究では、燃料電池の構成部品であるセパレータを対象とする外観検査の自動化を目指す。

燃料電池は、電解質膜、触媒層、ガス拡散層等をセパレータで挟んだ単セルをスタックした構造を持つ。各単セルの間にあるセパレータは、燃料ガスや空気を遮断する役割を果たす板状の精密プレス部品⁵⁾⁶⁾である。表面にはガスが流れる流路が作り込まれており、この形状や品質が燃料電池の性能を左右するため、全数検査が必要である。しかし、スタック中には数百枚のセパレータが存在し、かつ精密プレス部品であるため、微小欠陥(キズ、汚れ)の検出が必要であり、目視検査の負担は大きい。以上より、検査の自動化・高速化が求められている。

2. 研究課題と本研究の目的

図1にセパレータの例と、それを撮像した場合の模式図を示す。図1(a)ではセパレータの流路部をトリミングしている。流路部は基本的には周期的な凹凸パターンであるが、同一セパレータ内で凹凸のピッチが変化したり、機能的な工夫である局所的な変形パターンが存在したりする。模式図は、セパレータを撮像する際、凹凸の頂上部と谷部、その間の斜面部では適切な照明条件が異なることを表している。発生し得る欠陥はいくつか考えられるが、本研究では特に検出が困難な、微小凹凸欠陥や汚れを対象とした。解決すべき課題を以下にまとめる。

(a) Example of a flow path in a fuel cell separator

(b) Scratch visibility

Fig.1 Fuel cell separator

- ・流路は周期性パターンではあるが、周期変動や局所的な形状変化(ただし、一定方向には同様なパターンが分布している)を有する。また、流路進行方向が変化する場合がある
- ・薄板であるため、撮像時に反り・うねりが発生し得る
- ・欠陥は微小・幅細であり、かつ周期変動を有するパターンに紛れて存在する
- ・流路断面の頂上部、谷部、その間の斜面部について、面方向毎に適切な照明条件が異なる
- ・量産化のためには、ロバストでかつ高速な検査が必要である

図2に提案システムの模式図を示す。まず、周期変動を有するパターンに対応するためアルゴリズム面では、様々な背景パターンを抑制し、かつ微小欠陥を検出し得る「傷の気付き」処理⁷⁾(以降、KIZKI処理と表記)に着目する。

ここで画像特徴から、周波数解析を基本とするパターン除去処理^{8)~10)}も考えられるが、その場合は微小・不明瞭な欠陥信号の減衰は避けられない。また、基本パターンを登録することに

* 原稿受付 令和3年5月13日

掲載決定 令和3年9月28日

** 正会員 中京大学(愛知県名古屋市昭和区八事本町101-2)

*** 中京大学工学部

† 中京大学大学院工学研究科

†† トヨタ車体株式会社(愛知県刈谷市一里町金山100)

Fig.2 Proposed inspection system

Fig.3 Conventional KIZKI Processing

よる比較検査¹¹⁾¹²⁾も考えられるが、撮像時のワークの反り・うねりに起因する位置ズレによるパターンエッジの過抽出と微小・不明瞭欠陥の検出の間での感度設定のバランスが困難である。本研究では、パターンの周期性方向に適応することにより、微小・不明瞭な欠陥信号をより顕在化し、かつ高速処理が可能な帯型 KIZKI 処理を新たに提案する。

ハードウェア面では、欠陥信号を顕在化させるために偏光カメラ・照明¹³⁾を使用する。さらに、検査の高速性と撮像領域全体の照明条件の安定性の確保から、センサとして帯型カメラを採用する。

以上、帯型 KIZKI 処理と帯型偏光撮像系を組み合わせたセパレータ流路検査装置を提案する。

3. 帯型 KIZKI 処理

3.1 従来の KIZKI 処理⁷⁾と帯型 KIZKI 処理の概要

図 3 に KIZKI 処理⁷⁾の概要を示す。KIZKI 処理は、視覚生理機構のうち「周辺視」と「固視微動」に学んで開発された。具体的には、まず、入力画像に対して標準化格子による低解像度化を実行する。次に、生成された低解像度画像を、しきい値処理によって 2 値化する。2 値化方法は幾つか考えられるが、注目画素と、その上下または左右の画素との輝度差をしきい値処理する。格子の位相を、設定された格子の縦・横サイズ分まで順次シフトさせ、同様の処理を繰り返す。また、格子サイズを順次拡大し、同様の処理を繰り返す。それぞれの格子状態で得られた 2 値画像を入力画像の解像度における画素毎(設定されている格子ブロックの範囲)に投票する。最後に投票画像を正規化し、異常部と判断した画素(投票値が高い画素)を暖色系としたヒートマップを出力し、それを気付きマップと呼んでいる。

KIZKI 処理では、当てはめる標準化格子の各格子ブロックが

Fig.4 Intensity profile on flow paths

背景パターンの 1 周期分、つまりパターンの出現頻度がブロック間で等しくなる場合、背景パターンは均一化され、相対的に異常部が顕在化する。格子は正方形であり、背景パターンの周期・出現頻度に異方性がある場合は、より長い周期に正方形格子の一边の長さを設定することによって背景信号が抑制される。一方、格子サイズに対して欠陥が不明瞭・微小である場合、各格子内の画素値平均によって低解像度化するため、欠陥信号の影響が相対的に低くなってしまふ。また、格子サイズを大きくすると、現状のアルゴリズムでは計算時間が増大する。

そこで、KIZKI 処理において設定する標準化格子を、正方形ではなく、入力画像の背景パターンの変化方向に合わせて長方形(帯型)にすることを提案する。セパレータ流路の検査画像の場合、流路方向にはセパレータの反り・うねり、位置ズレ・回転が生じる。流路に直交する方向には、加えて局所的な良品パターンの変化が含まれる。図 4 に流路方向と流路に直交する方向の輝度分布の例を示す。なお、このセパレータ流路のトリミング画像は、後述の模擬ワークの偏光度画像である。グラフ(c)より、流路方向の輝度分布は変動が小さいことが分かる。一方、流路に直交する方向には、グラフ(a)より、流路の凹凸形状に起因する周期的な輝度変動が確認できる。またグラフ(b)は、流路途中にある局所的な形状変化部の輝度分布である。

ここで、前述の「パターンの出現頻度がブロック間で等しくなる場合、背景パターンが抑制される」という KIZKI 処理の特徴に着目すると、流路に直交する方向においては、流路凹凸パターンの 1 周期分を基本として格子サイズを設定することになる。流路方向には輝度変動が小さいことから、格子サイズを短く設定することができる。

3.2 帯型 KIZKI 処理のアルゴリズム

図 5 に提案する帯型 KIZKI 処理のアルゴリズムの概要を示す。図中の原画像は、処理対象となるセパレータ流路画像の一部で

Fig.5 Banded KIZKI processing

Fig.6 Polarization imaging system

Fig.7 Effect of polarization imaging system (Hexagon nut)

ここで、しきい値については方向別に設定する。流路方向は輝度変化が小さいことを想定するため、しきい値 th_v を高くする。一方、流路に直交する方向で格子間を比較する場合は、より大きな範囲を参照して低解像度化していることから、しきい値 th_h を低くする。参照方向毎に参照範囲に従ってしきい値を変更することにより、相対的な感度は参照方向・範囲に関係なく一定となる。注目画素が **popOut** 判定となった場合、元の解像度において対応する画素群に投票する。この処理を、格子状態を変更しながら繰り返すことは、従来の KIZKI 処理と同様である。

帯型 KIZKI 処理では、局所的に低輝度な異常部と高輝度な異常部を示す投票画像をそれぞれ出力する。つまり、投票画像は二枚になる。従来の KIZKI 処理では気付きマップによって相対値として異常部を顕在化していた。一方、本研究では正規化前の投票画像そのものを参照し、単純なしきい値処理によって欠陥を検出した。このことは、後述の撮像系の工夫によって、SN を高くできたことで実現できた。

最終的には、二枚の投票画像を 2 値化し、AND 演算して出力する。また、セパレータのスキャン過程において、帯型画像毎にその帯に欠陥が存在する場合、即座にアラートを発出することができる。

4. 帯型偏光撮像系

セパレータは板状部品であり、ラインセンサと搬送系を組み合わせることにより、高速な検査が見込める。これに対して、エリアカメラで撮像する場合は、ワークを静止して位置決めする必要がある。加えて、入力画像全域に渡って照明条件を一定にすることは、エリア画像よりラインセンサの方が容易である。以上よりラインセンサが有力であるが、微小欠陥の検出には搬送方向の連続した信号を総合的に処理する必要がある。そこで本研究では、ラインセンサではなく、搬送方向に幅をもった帯

あり、中央に欠陥が存在する。セパレータ流路検査画像の場合、流路方向にはノイズ、位置ズレ・回転による変動を含むが、輝度変動は少ない。一方、それと直交する方向には、流路による大きな輝度変化が存在する。また、局所的な良品パターンが存在する可能性がある。そこで図に示す通り、KIZKI 処理の標準化格子を流路方向には短く、それと直交する方向には長い帯型とした。ここで、良品特徴は流路方向においては相対的異常として検出されるが、変化している領域(良品特徴区間)に限れば、それは異常ではない。つまり、流路方向には格子サイズを短くすることによって、良品特徴の検出を抑制することができる。

帯型格子を設定し、格子ブロック毎に含まれる画素群の画素値平均を求め、長方形を画素とする帯型低解像度画像とする。図 5 より、ある格子状態(格子サイズ・位相)の際、背景の流路パターンは一様となり、欠陥部が顕在化する。この帯型低解像度画像に対してしきい値処理を適用する。図 5 の下段はしきい値処理の条件を示す。帯型低解像度画像の注目画素の画素値を r とする。 r と流路方向の隣接画素の輝度値 v_1 , v_2 との局所コントラストを算出し、しきい値 th_v より高い場合は検出する(**popOut**)。流路と直交する方向も同様である。図では局所的に輝度が高い場合を検出しているが、その逆も同様である。

Table 1 Effect of polarization imaging system (Actual separator)

型エリアカメラを採用する。一方、3.では、流路に直交する方向に長軸を持つ長方形格子を基本とする帯型 KIZKI 処理を提案した。この画像処理の入力画像は帯型でよく、帯型カメラでは入力画像が帯型になってしまうことが画像処理の制約にはならない。つまり「帯型カメラ」と「帯型 KIZKI 処理」は、それぞれ第一義の目的は異なるが、ハードとソフトの間で互いの仕様をまったく阻害せず、その組み合わせは検査のロバスト性と高速性において相乗効果を生むと考えられる。

一方、図 1(b)に示した通り、セパレータは表面に微細な凹凸による溝形状を持ち、面の向きによって適切な照明条件が異なる。これに対して例えば、面の向き毎に照射角度の異なる照明を設ける方法もあるが、順次点灯と複数回撮像が必要になり、検査速度が低下する。また、特に照射角度を斜めにして照明を設置すると、手前と奥で照度変化が生じ、欠陥検出能力に差ができてしまう。そこで本研究では、偏光撮像系^{13)~16)}の採用を試みた。具体的には、検査の高速性と微小欠陥の可視化を実現するために、帯型偏光カメラと偏光照明を組み合わせる撮像系を構築した。図 6 に撮像系の模式図を示す。セパレータの流路に直交する向きのパージ照明に、吸収軸(図中の横縞方向)を流路に直交する向きにした偏光子を組み合わせ、直線偏光させた光を流路溝部に照射する。その反射光を、入射角が $5 \sim 10^\circ$ となる正反射の関係に配置した偏光カメラで撮像し、偏光画像を生成する。偏光画像は、偏光度画像(直線偏光度)、偏光角度画像から成る¹³⁾が、本研究では偏光度画像を使用する。偏光度画像では直線偏光の度合いが高い箇所は明るく、低い箇所は暗くなる。微小欠陥は偏光度画像において局所的に陰影が異なる領域として可視化される。また、検査範囲を帯型に限定しているため、画像全域に渡って照明条件が安定している。以上より、セパレータ流路の溝の頂上部、谷部、斜面部を一組の撮像系で検査す

ることが可能であると考えられる。この仮説を実証するため実験を行った。

図 7 と表 1 に提案する撮像系での基礎実験の結果例を示す。図 7 は六角形ナットの各面を流路の溝の頂上部、左右斜面部に見立て、各面にキズを付与した。図 7(a), (b)は通常の撮像系で、照明条件を頂上部、斜面部にそれぞれ最適化して撮像した場合の画像である。(a)では頂上部のキズは視認できるが、斜面部は黒潰れしている。(b)では斜面部のキズは視認できるが、頂上部はハレーションしている。図 7(c)は提案した偏光撮像系での画像であり、いずれの面のキズも確認することができる。表 1 の実験では、実際のセパレータにキズを付与した。上段は非偏光の通常の検査画像、下段は提案する撮像系で撮像した偏光度画像である。非偏光画像については、照明から偏光子も外している。表中の赤丸内に付与したキズがあり、(A)と(C)は流路の斜面部、(B)と(D)は頂上部の輝度分布グラフである。ライン(D)に存在する頂上部のキズに関しては、非偏光画像において高いコントラストでキズ信号を捉えているが、同様に頂上部にあるライン(B)では信号が全体的に 255 以上で飽和している。一方、頂上部の信号が飽和しているにもかかわらず、ライン(A)と(C)の斜面部ではキズ信号を十分に捉えることができていない。これに対して偏光度画像では、いずれの箇所においてもキズ信号を確認することができる。

偏光子の吸収軸の角度によって直線偏光の方向は任意に設定できるが、本研究ではセパレータ流路検査に有効な直線偏光の方向を実験的に求めた。図 6 に示した撮像系において、照明に装着した偏光子の吸収軸の角度と、流路方向、入射面、直線偏光の方向の関係を図 8 に示す。実験の結果、図 6 および図 8 に示す通り、流路の溝の方向と直線偏光の向きの両方が入射面に平行になる条件が有効であった。図 9 は図 8 の上面図であり、

Fig.8 Relationship between the direction of linear polarization, the direction of the flow path, and the incident plane

Fig.9 Polarizer angle setting

Table 2 Comparison of polarizer angles

Polarized image	Intensity profile on the line A	Intensity profile on the line B	Intensity profile on the line C
<p>0 deg</p> <p>(A) (B) (C)</p>			
<p>90 deg</p> <p>(A) (B) (C)</p>			

パー照明に装着した偏光子の吸収軸の角度を表す。表 2 に図 9 に示す偏光子の角度が 0° の場合と 90° の場合の偏光画像の例を示す。 0° が図 6 および図 8 で示した、採用した設定である。(A)は流路の谷部、(B)は斜面部、(C)は頂上部の欠陥を含む。いずれも偏光子の角度が 0° の場合のほうが、欠陥信号が顕著になっていることが分かる。

5. 実験と考察

5.1 模擬画像を用いた実験

提案する帯型 KIZKI 処理の性質を確認するため、セパレータ流路を模擬して作成したテスト画像を用いて実験した。図 10 に使用した模擬画像の例を示す。模擬画像は流路を模した白黒の縦縞から成る。画像サイズは 1333×1109 画素で、白黒の縦縞は、黒の幅が 12 画素程度、白の幅が 8 画素程度である。赤丸の箇所に欠陥を模擬した黒点、スジと線状欠陥を付与した。図では、各欠陥を含む矩形領域①～⑥の拡大図も示している。点状欠陥は幅が 6 画素程度、スジ欠陥は幅が 1 画素程度である。青丸の縦縞を一つ置きに繋いだ H 型の領域は、流路における局所的なパターン変化を模しており、良品特徴部である。また、緑丸は、撮像時の反り・うねりを模して、縞を変形させた箇所である。この青丸や緑丸の領域のパターンの検出は抑制し、欠陥のみを顕在化するのが目的である。

Fig.10 Test image

図 11、図 12 に従来の KIZKI 処理と提案する帯型 KIZKI 処理による検出結果の例を示す。それぞれ、全体画像と拡大図は図 10 と対応し、異常部を赤とするヒートマップ表示である(気付きマップ)。表 3 に使用したパラメータをまとめる。ここで、それぞれのパラメータについては、流路や良品特徴等の検出は抑制し、かつ欠陥は検出できる値にそれぞれチューニングしている。KIZKI 処理では、流路パターンの検出を抑制するため、最小、最大の格子サイズを縦縞のピッチ付近に調整した。図 11 より、流路パターンを抑制し、6 個中 4 個の欠陥が顕在化していることが分かる。しかし、良品特徴や変形部も強く反応してしまっている。また、スジ状欠陥については検出できていない。一方、提案する帯型 KIZKI 処理では、横方向の最小、最大格子サイズ

Fig.11 KIZKI Map by the conventional KIZKI processing

Fig.12 KIZKI Map by the Banded KIZKI processing

Table 3 Parameter

Item	KIZKI	Banded KIZKI
Horizontal block size: Min	40pixel	22pixel
Horizontal block size: Max	49pixel	28pixel
Vertical block size: Min	3pixel	22pixel
Vertical block size: Max	3pixel	28pixel

Fig.13 Experiment results (Test image)

Fig.14 Test work pieces

Fig.15 Test work polarization images

を H 型の良品特徴部のピッチ付近に設定している。また、縦方向については、やはり H 型の良品特徴部の横棒の高さが 9 画素程度であることから、それよりも短いサイズの 3 画素に固定した。つまり、最大・最小の格子サイズは良品特徴部のサイズから決定することができる。図 12 より、良品特徴や流路パターンを抑制し、かつ全ての欠陥が顕在化していることが分かる。抑制された良品特徴部やうねりを模した縞変形部に紛れて存在する②、④の点状欠陥も検出されている。従来の KIZKI 処理と提案する帯型 KIZKI 処理による欠陥マップから、それぞれについて、できるだけ欠陥のみが検出できるしきい値で 2 値化した例を図 13 に示す。なお、2 値画像が見やすいように、背景を灰色、前景を白色とし、前景の輪郭は黒線とした(以後の検出結果

も同様である)。帯型 KIZKI 処理では欠陥のみ検出できている。以上より提案手法では、流路を背景として原画像では同じ濃淡レベルであるパターンの変化領域に対して、横方向の大域的な変化である良品特徴や反り・うねりを模した領域の検出は抑制し、かつ点状欠陥やスジ状欠陥は顕在化できることが分かる。

5.2 模擬ワークを用いた実験

試作した帯型偏光カメラと偏光照明から成る撮像系と、帯型 KIZKI 処理を組み合わせた場合の性能を確認するため、模擬ワークによる実験を行った。

図 14 に作製した模擬ワークの外観写真を示す。また、図 15 に試作した撮像系で得られた偏光度画像を示す。なお、実際は帯型画像が入力されるため、図 15 は撮像系における帯型領域の

Fig.16 Flow of the experiment

(a)Input image (Degree of polarization image)

(b)Detection results

Fig.17 Experiment result (Work piece 1-1)

(a)Input image (Degree of polarization image)

(b)Detection results

Fig.18 Experiment result (Work piece 1-2)

シフト量を鑑みて帯型画像を連続的に統合した画像である。模擬流路のピッチは 1.0mm である。ワーク 1 には図 15(a), (b) の青丸で示す通り、縦流路の途中に局所的な形状変化を模した H 型のパターンが横方向に並ぶ領域が二カ所存在する。H 型パターンの横棒の高さはそれぞれ 1.0mm, 0.25mm である。ワーク 2 は縦流路が途中から斜め流路に変化する場合を模した。ワ

(a)Input image (Degree of polarization image)

(b)Detection results

Fig.19 Experiment result (Work piece 2)

Table 4 Parameter

Item	value
Horizontal block size: Min	51pixel
Horizontal block size: Max	55pixel
Vertical block size	3pixel
Horizontal gray-scale threshold	2.5gradation
Vertical gray-scale threshold	6.0gradation
Vote count threshold	700votes

ーク上に模擬的に微小キズ、汚れを付与した。

図 16 に実験フローを示す。本実験では試作した撮像系で得られた帯型画像をいったん保存し、ソフトウェアではそれを連続的に読みだして帯型 KIZKI 処理を適用した。実験機では JAI 社の GO-5100MP-PGE を使用した。このカメラはエリア偏光カメラであるが、実験機では 2464×32 画素の帯型領域のみが出力されるようにセッティングを変更した。撮像分解能は 22.8 μm である。帯型カメラの縦幅とした 32 画素は、流路ピッチ、良品特徴部のサイズ、検出を想定する欠陥サイズとカメラ分解能を鑑みて、帯型 KIZKI 処理を実行するのに十分なサイズである。実運用時には専用のカメラを設計・製作する前提で、その際の搬送速度や各種カメラパラメータを満たせる条件で実験機を構築している。搬送方向に 32 画素の画像を撮像することになるが、必要な搬送速度に対して、カメラの FPS 値と露光時間においてバランスをとり、移動撮像でも画像がブレない条件で流路部を連続的に撮像することを想定している。これに対して実験機では、搬送方向に数画素ずつ重複させながらコマ送りで止めてワークを撮像した。

付与した欠陥は小さいもので 3 画素程度(約 0.07mm)、大きいもので 35 画素程度(約 0.8mm)の幅で撮像されている。また本節の実験では 60 枚の帯型画像を連続処理している。ワーク 1 については撮像位置を変えて 2 回、ワーク 2 については 1 回の撮像結果による実験結果例を示す。

Table 5 Dataset

Work type	Sample No.	Total number of images	Number of defect images
A	1	254	12
	2	254	12
	3	254	22
B	4	60	7
	5	60	7
Total		882	66

Table 6 Parameter

Item	value
Horizontal block size: Min	48pixel
Horizontal block size: Max	52pixel
Vertical block size	5pixel
Horizontal gray-scale threshold	3.0gradation
Vertical gray-scale threshold	6.0gradation
Vote count threshold for the work type A	780votes
Vote count threshold for the work type B	750votes

図 17～19 に処理結果の例を示す(図中(a)は図 15 の再掲である)。また、表 4 に実験に用いた帯型 KIZKI 処理のパラメータを示す。つまり、局所変形のサイズが異なったり、流路方向が変化したりしても、この程度であれば同一パラメータで検出することが可能であった。ここで、実際の処理は帯型画像毎で実行されて結果が出力されるが、それらを連続的に統合した画像を掲載している。

図 17、図 19 では、それぞれキズの 1 つが未検出となった。未検出欠陥はいずれも幅 3 画素程度で、一方は流路線に完全に重なっており、入力画像においても視認性がかなり悪い。また、図 19 では付与したキズ・汚れ以外にも複数の検出が見られる。ただし、偏光度画像を見ると意図的に付与したキズ・汚れ以外にも微かな陰影があり、図 19 の過検出位置は全てそれに当たる。これらの陰影は、実験時に意図せずに付着したゴミ・汚れであると考えられる。以上、未検出については撮像系の改良が、過検出についてはプロブ判定等の後処理が必要であると考えられる。

最後に撮像時のワークの位置決めについて考察する。板状ワークの検査において搬送系とラインスキャンを組み合わせる場合、撮像時の位置決め不良への対応が課題になる。図 17(a)～図 19(a)の入力された帯型画像を統合した偏光度画像をみると、全体として流路が 5° 程度傾いて撮像されていることが分かる。この傾きに対して帯型 KIZKI 処理においては、欠陥の検出と良品特徴の検出抑制の両方が実現できている。

5.3 実ワークを用いた実験

実際のセパレータを用いて実験した。実験方法と撮像系の実験機は 5.2、図 16 と同様である。ただし、撮像系における照明角度等のパラメータは若干調整している。表 5 にデータセットの内訳をまとめる。タイプ A と B は流路形状が異なるセパレータである。画像枚数は実験で検査範囲とした領域の帯型画像で

Fig.20 Effect of the polarization imaging system

の分割数を表し、欠陥画像枚数はその内で欠陥を含む帯型画像の枚数を表す。帯型画像のサイズは前節と同様、2464×32 画素である。欠陥は模倣的に付与したが、撮像画像上では幅が 3～25 画素程度(約 0.07～0.6mm)、長さが 5～100 画素程度(約 0.1～2.3mm)であった。欠陥は複数の帯型画像をまたぐ場合もある。また、表 6 に本実験での帯型 KIZKI 処理のパラメータを示す。

4.の表 1 でも示したが、あらためて図 20 に偏光撮像系の効果が確認できるグラフを示す。タイプ B のワークについて、グラフの横軸は、セパレータ流路部を検査開始端から順に帯型カメラで撮像した際の画像の番号(1 番から 60 番)である。縦軸は、各帯型カメラ画像に帯型 KIZKI 処理を適用した際の、画像中の最大投票値を示す。最終的な検出は、この投票値に対するしきい値処理となるため、欠陥を含む場合と含まない場合の投票値の差が大きいくほど、欠陥を含む帯型画像の検出が安定する。図 20(a)は非偏光撮像系、(b)は提案する偏光撮像系を用いた例である。グラフ中の赤丸が欠陥信号であり、欠陥を含まない帯型画像の最大投票数の平均値との差は、非偏光撮像系では-26～548 であった。「-26」は未検出を表す。一方、提案する偏光撮像系では 162～598 であり、しきい値処理による判定が容易になっている。

図 21 に欠陥の検出例を示す。(a)～(c)の各帯型画像例において上段から偏光度画像、気付きマップ、検出結果である。入力画像中では微小で不明瞭な欠陥像が顕在化し、検出できていることが分かる。なお図 21 の帯型画像は、処理画像が確認しやすいように、アスペクト比を調整して掲載している。

処理時間は 1 つの帯型画像当たり 17ms 程度(Intel®Core™ i7-8750H CPU@2.20GHz)であり、これには画像読み込みや結果画像のかき出しも含まれている。想定している実運用での処理速度に対して、現段階の目標値(汎用計算機において 20ms)は満たしていることを確認した。

Fig.21 Detection examples

Table 7 Summary of experimental results 1

Confusion Matrix		Actual classification			
		Defect image	Good image	Accuracy	0.960
Detection result	Defect image	45	20	Precision	0.692
	Good image	15	802	Recall	0.750
				F-measure	0.720

表 7 に表 5 に示したデータセットを用いた全ての実験の結果をまとめる。帯型画像毎に欠陥が含まれているか否かを判定した結果を混同行列にまとめた。正答率が約 0.96, F 値が約 0.72 であり、概ね良好な結果である。ただし、見逃しが 15 枚、虚報(欠陥が含まれていないが検出した場合)が 20 枚ある。表 5 に示した欠陥を含む帯型画像の枚数は、予め各帯型画像を実ワークと比較して目視にて判定し、計数したものである。実ワーク上の 1 つの欠陥は、連続する帯型画像で複数回撮像される。特に、帯型画像のスキャン方向において欠陥の端部しか含まない帯型画像について見逃しとなった。一方虚報については逆に、帯型画像のスキャン方向において、目視での判定より前後に広い範囲で NG 判定となる場合が殆どであった。以上を踏まえて、予め目視で判定しておいた欠陥を含む帯型画像に対して、欠陥毎に、それを含むいずれかの帯型画像が検出できている場合は見逃しとせず、かつその前後で余分に検出された帯型画像は虚報とせずに集計した結果を表 8 に示す。この場合、正答率が約 0.99, F 値が約 0.94 となる。試作段階としては十分な性能であると考えられる。ただし、この集計方法でも見逃し判定となった帯型画像が 2 枚あり、これは実ワーク上では 1 つの欠陥で、幅が 3 画素程度の細い線状欠陥であった。見逃しの要因は前述の模擬ワークを用いた実験と同様であった。

6. 結 言

本研究では、燃料電池のセパレータ流路検査を目的に、帯型偏光撮像系と帯型 KIZKI 処理を組み合わせた新たな外観検査装置を提案した。実サンプルの模擬欠陥について、高速・高精度で検出でき得ることを確認した。

今後は、N 増し実験によって検査速度や検出精度について適

Table 8 Summary of experimental results 2

Confusion Matrix		Actual classification			
		Defect image	Good image	Accuracy	0.990
Detection result				Precision	0.908
	Defect image	59	6	Recall	0.967
	Good image	2	815	F-measure	0.937

用限界を明確にする。また、帯型 KIZKI 処理における格子サイズ・感度の自動設定の方法、偏光画像のさらなる活用方法について検討する。

参 考 文 献

- 1) 日本自動車工業会:日本の自動車工業 2020(2020).
- 2) 日本自動車会議所:自動車産業インフォメーション「自動車業界挙げて「脱炭素」経団連「チャレンジ・ゼロ」, <https://www.aba-j.or.jp/info/industry/12880/>, 2021.05.10 アクセス.
- 3) 日本自動車研究所:平成17年度燃料電池自動車に関する調査報告書,(2006).
- 4) 加藤広章, 高橋健太郎:燃料電池自動車の市場導入に向けた開発と知的財産活動, 特許懇話会, 274(2014).
- 5) 守谷隆史:燃料電池自動車の開発と特許, 特許懇話会, 274(2014).
- 6) Mitutoyo Catalog: 精密測定機器ソリューション紹介—電動車×EV 計測編—, 11015.
- 7) 青木公也, 舟橋琢磨, 奥水大和, 三和田靖彦:周辺視と固視微動に学ぶ「傷の気付き」アルゴリズム, 精密工学会誌, 79,11(2013)1045.
- 8) 横山良雄, 川村成, 南貴雄: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, デンソーテクニカルレビュー, 8,2(2003)105.
- 9) 小野達矢, 梅津信幸, 乾正和, 清水勲:2次元フーリエ変換に基づく欠陥検出とその応用, 2010 年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集, (2010)423.
- 10) 清水勲, 鷗野克宏, 寺西隆夫, 齊川義則, 梅津信幸:物体透過光のフーリエ変換強度画像差分による画像差異検出, 光学, 41, 11(2012) 579.
- 11) 原靖彦:検査の概要及び配線パターン検査技術, 回路実装学会誌, 10,6(1995)424.
- 12) 前田俊二:半導体パターン欠陥認識技術の動向, 精密工学会中国四国支部(広島地区)講習会「画像処理技術の工学応用」(2008).
- 13) 特集 透明・黒色・反射・・・etc～可視の領域を広げる偏光カメラ, 画像ラボ, 30,7(2019)23.
- 14) 精密工学会 画像応用技術専門委員会編:画像処理応用システム 第2章画像計測・検査技術の基礎 (3)偏光を利用した画像形成, 東京電機大学出版局(2000)54.
- 15) 奥水大和 監修:目視検査の自動化技術, テクノシステム, (1995)169.
- 16) 小泉光義:LCD およびディスク部品の異物・欠陥検出技術, 精密工学会誌, 61,5(1995)605.