

# 2次元動画像を用いた フィルム欠陥検査技術

住友化学株式会社

工業化技術研究所

廣瀬 修  
尾崎 麻耶

## Advanced Visual Inspection Technology with 2-Dimensional Motion Images for Film-shaped Products

Sumitomo Chemical Co., Ltd.

Industrial Technology & Research Laboratory

Osamu HIROSE

Maya OZAKI

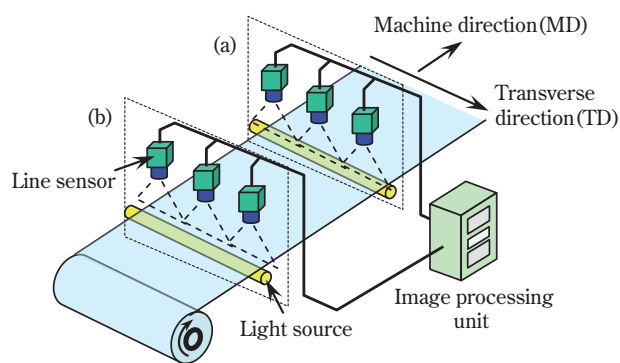
This paper presents an advanced technology for visual inspection of film products. Usually, line sensor is used to inspect defects in web-shape products such as long films. However, one-dimensional image data captured via line sensors always includes restrictive optical information about defects. Therefore, inspection performance is limited. With the advantage of using area sensors, two-dimensional images containing more optical information can be obtained. The authors have established a novel imaging procedure which is based on two-dimensional motion images. The experimental results show that the new image processing framework enhances the appearance of defects. The authors also achieved an in-line web inspection system for film manufacturing lines.

### はじめに

本稿は、2次元動画像を用いた外観検査技術を解説する。エリアセンサによって得られる2次元動画像を用いることにより、従来法と比較して機能・性能ともに向上させたウェブ検査システムを構築した。

長尺フィルムなどのウェブ状製品の的外観検査には、従来、ラインセンサが用いられている。1次元の撮影領域を製品上で走査することにより製品全域にわたる画像を取得し、この画像中から傷や異物などの欠陥を抽出する。Fig. 1は一般的なウェブ検査装置の構成を表す概念図である。多くの場合、ラインセンサの撮影位置が固定されており、検査対象が搬送されることにより長尺製品の全域が検査される（一般に、検査対象物としては樹脂フィルム・紙・ガラス・銅板などのさまざまな製品があるが、本稿では簡単のため、以後、“フィルム”と表記する）。

ラインセンサを用いた検査技術には、機能の面において、性質の異なる種類の欠陥をカバーできないという課題があった。その主原因は撮影領域が1次元に固定されるという点にある。撮影領域が固定であるため、撮影時の光学条件も固定される必要がある。一方、現実にはさまざまな形態の製品欠陥が存在し、検出に適す



**Fig. 1** Traditional web inspection system  
Camera group (a) and (b) indicate  
bright-field mode and dark-field mode  
respectively.

る光学条件がそれぞれ異なる（たとえば、透過光か反射光か、明視野撮影か暗視野撮影か、など<sup>2)</sup>。ラインセンサを使用する場合、いずれか1つの条件を選択しなければならない。そのため、取得画像から得られる情報は一部の欠陥に限定されたものになってしまう。

また、ラインセンサを用いた検査には、その検査性能を維持するために高度なウェブハンドリング<sup>3)</sup>技術が必要であるという実用上の課題もあった。欠陥検出

に供する画像を得るために、カメラ・フィルム・光源の相対位置を精度よく維持する必要がある。たとえば情報端末のディスプレイに用いられるフィルムの場合、その要求精度は数10 $\mu\text{m}$ 程度以下であることが多い。カメラと光源を固定することは容易であるが、フィルムを精度よく搬送するためには大がかりな装置と熟練した運転技術が必要であった。

2次元動画画像によるウェブ検査技術は従来法の課題を解決しうる手法である。

本研究では、まず、2次元動画画像から欠陥を抽出するための「ライン合成積算 (Line Composition and Integration; LCI)」と称する画像処理アルゴリズムを立案し効果を確認した<sup>4)</sup>。これは、明視野から暗視野を含む多くの光学条件を1度に処理する手法である。

次に、2次元動画画像をリアルタイムに処理するためのハードウェア構築を行った。ラインセンサと比較して2次元動画画像はデータ量が膨大であるため、ソフトウェアでの実装ではリアルタイム処理 (ここでは実際のフィルム製造速度に追従可能な処理時間を指す) は困難であった。そこで、キャプチャボードが搭載するFPGA (Field Programmable Gate Array; 書き換え可能な大規模集積回路の一種) の中で一連の画像処理を行うことによりリアルタイム性を実現した。

本稿では、まず従来法の課題を述べ、これに対してエリアセンサを用いることの利点を示す。次に動画画像から欠陥を抽出する画像処理アルゴリズムを解説する。続いて実験結果を示し、さらに、光線追跡シミュレーションによる欠陥画像のCG生成について述べる。最後に本技術を搭載したインラインウェブ検査システムを概説し、まとめとする。

## 従来の課題

### 1. 一般的なウェブ検査装置の構成と概観

ラインセンサを用いた一般的なウェブ検査装置の構成はFig. 1に示したとおりである。ラインセンサの撮影領域をフィルムの搬送方向に対して横方向 (Transverse direction; 以下TDと表記) とし、1台または複数台のラインセンサを配置してフィルムの全幅をカバーする。長尺フィルムはその長手方向 (Machine direction; 以下MDと表記) に概一定速度で搬送される。ラインセンサは同一の直線状領域を連続的に繰り返し撮影しており、フィルムが搬送されることによりフィルム全域にわたる撮影・検査を可能にしている。TD解像度は各カメラの視野幅を画素数で除した値で決まる。一方、MD解像度はフィルムの搬送速度をスキャン速度 (単位時間当たりの撮影回数) で除した値で決まる。通常はTD解像度とMD解像度とを一致させることが多い。

### 2. 観測系における技術課題

ラインセンサを用いた検査技術には、単一の観測系では性質の異なるさまざまな種類の欠陥を撮影できないという課題がある。その主原因は撮影領域が1次元に固定されるという点にある。撮影領域が固定であるため、撮影時の光学条件も1種類に固定されなければならない。

一方、フィルムに生じる欠陥はその種類によって検出に適する光学条件が異なる。一例として、代表的ないくつかのフィルム欠陥に対して、透過光源を用いて光学条件を変えて撮影した画像の比較をFig. 2に示す。光源とカメラは対向して設置されており、光源領域の半分を覆うように直線状のナイフエッジをもつ遮光板を配置している。図には、暗視野・エッジ上・明視野という3通りの方法で撮影した画像を掲載した。ここで、暗視野とは光源からの光を直接には観測しない撮影方法、エッジ上とはナイフエッジとラインセンサの撮影領域を一致させる方法、明視野とは光源からの光を直接受光する方法をそれぞれ指す。この中で、欠陥Aは明視野条件下では周囲の光に消されて視認できないが、暗視野またはエッジ上での画像では鮮明に撮影されている。逆に、欠陥Bは明視野でのみ観測可能である。また、欠陥Cは明視野・暗視野ともに欠陥の視認は困難であり、唯一エッジ上での画像にのみ欠陥が確認できる。

われわれがラインセンサを用いる場合、これらの光学配置のうちいずれかを選定してラインセンサと光源とを固定しなければならない。したがって、異なる型の欠陥をカバーするためには複数の検査装置を使用する必要がある。Fig. 1はこのうち明視野と暗視野の2系列を設置した例である。

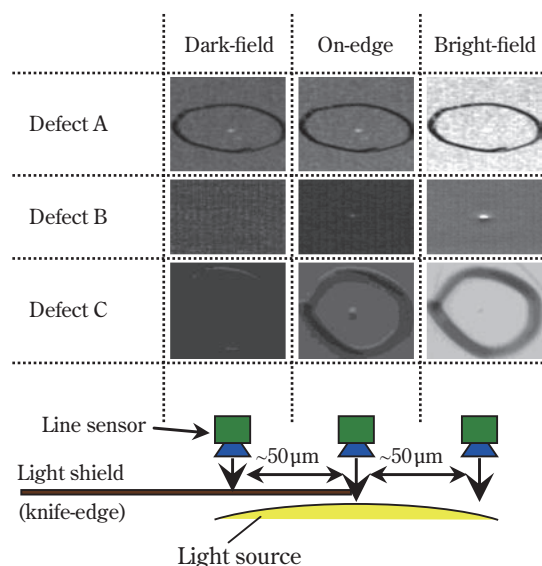


Fig. 2 Various observation methods for different types of defects

### 3. ウェブハンドリング技術への要求精度

ラインセンサを用いた検査には、その検査性能を維持するために高度なウェブハンドリング技術が必要であるという実用上の課題がある。前節ではFig. 2を用いて3種類の撮影方法を示した。実際にはこれら撮影方法の違いによるカメラ位置の差は50 $\mu\text{m}$ 程度であることが多い。そのため、欠陥検出に供する画像を安定して得るためには、カメラ・フィルム・光源の相対位置をそれよりも1桁以上の高い精度で維持する必要がある。

通常、カメラと光源との相対位置を精度よく固定することは比較的容易である。実際には、光源位置を先に決定し、次に、3軸ないし5軸程度の光学ステージを用いてカメラのアライメント調整を行うという手順が用いられる。しかし、カメラ・光源との相対位置を精度よく維持しながらフィルム等のウェブ製品を搬送することはきわめて困難である。フィルムのような長尺の製品は、搬送中にわずかな反りやばたつきが発生しやすい。これらの現象は外観検査に重大な影響を与える。そのため、現実の製造ラインでは大がかりなフィルム搬送装置と熟練した運転技術を駆使してフィルム搬送を行っているが、それでもフィルムの変形を完全に抑制することは困難な場合が多い。

ウェブ搬送の重要性を示すひとつの例として、フィルムのわずかな反りが画像に与える影響をFig. 3を用いて説明する。ここでは反射光による撮影の例を挙げている。反射の場合においても、多くの欠陥は光源像のエッジ上、すなわち明視野と暗視野の境界領域で観測されることが多い。図中(a)は、フィルム面を所定の平面に維持できた場合におけるカメラ・光源との相対配

置、観測画像例、および欠陥部位の画像の輝度プロファイルを示したものである。この状態では、欠陥部のみにおいて周辺部よりも高い輝度値が得られており欠陥検出が可能である。これは、フィルムに映った光源像のエッジに沿うようにラインセンサの撮影位置をあわせることができているためである。一方、同図(b)はフィルムが反りをもつ場合の取得画像例と輝度プロファイルを示している。このとき、本来直線状であるべき光源の像が大きく歪んでいる。このため、ラインセンサの撮影位置と光源像のエッジとが画像の左半分では大きく離れ、また右側領域では交差して光源像が直接撮影されるという現象が生じている。

フィルム面の反りの許容値 $\theta$ は光源像に対する撮影位置ずれの許容値 $a$ と光源距離 $d$ によって決まる。たとえば、Fig. 4に示す光学配置において位置ずれ許容値が $a = 50\mu\text{m}$ 、光源距離 $d = 200\text{mm}$ の場合、 $\theta = \tan^{-1}(a/2d) \approx 0.007\text{degree}$ 程度である。これは通常のウェブハンドリング技術では実現が困難な量である。

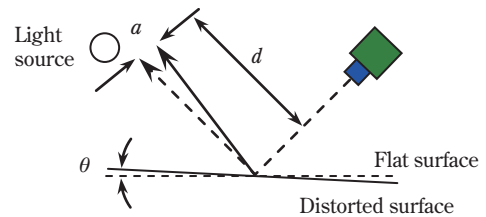


Fig. 4 Deviation of line sensor view due to film distortion

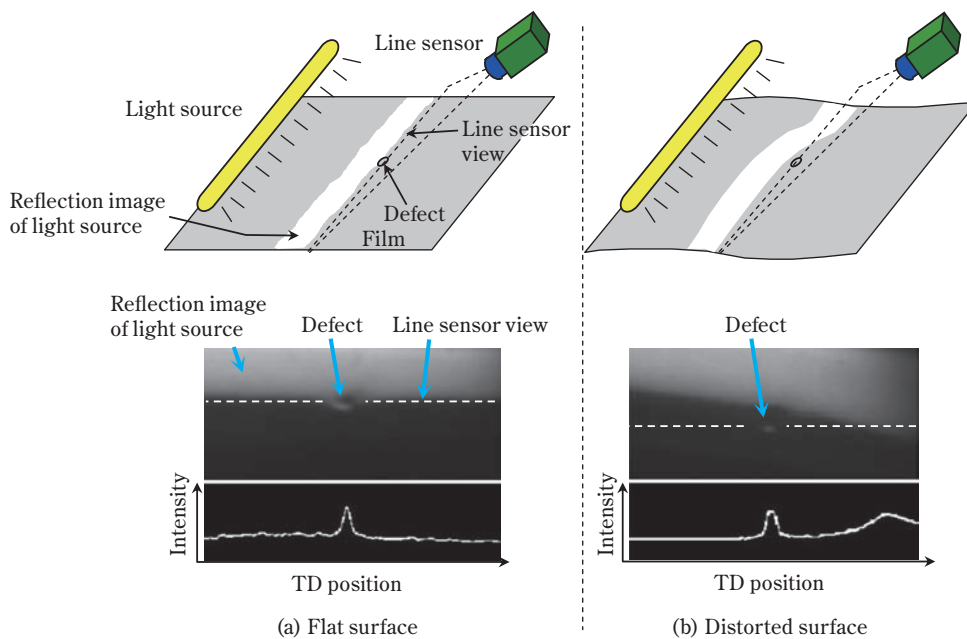


Fig. 3 Film distortion and its adverse affect on observation of a defect  
Each lower plot shows intensity profile on a dashed line (line sensor view) in the upper image.

## エリアセンサを用いたウェブ検査技術

本章では、本研究の開発対象であるエリアセンサを用いたウェブ検査について概説する。機器構成はFig. 5に示すとおりである。基本的には従来のラインセンサをエリアセンサに置き換えた形となっている。

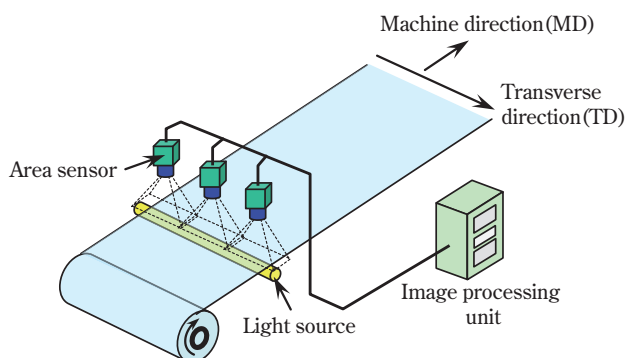


Fig. 5 2-dimensional web inspection system

### 1. ラインセンサとエリアセンサの違い

ラインセンサは、Fig. 6 (a)に示すように、1ラインを繰り返し撮影して映像信号を出力する。フィルムが一定速度で移動することによりフィルム全域にわたる撮影が可能となる。したがって、欠陥が撮影される機会はラインセンサの撮影位置を通過する瞬間のみである。ラインセンサのスキャン速度（単位時間あたりの撮影回数）はカメラの駆動条件によって決まる。ごく一般的なカメラとして、たとえば、クロック周波数40MHz、スキャンレート（撮影1回あたりの露光時間に相当）10,000パルスにて駆動した場合、毎秒4,000スキャンの撮影が可能である。

一方、エリアセンサは1回の撮影にて1枚の2次元静止画像（フレーム）を得ることができる。一般に動画とは、多数のフレームを時系列に取得したものを指す。Fig. 6 (b)はこの様子を概念図で表したものである。エリアセンサが単位時間あたりに出力するフレーム数を一般にフレームレートと呼び、通常、FPS値（Frames Per Second）で表現される。

### 2. エリアセンサがウェブ検査に用いられない理由

一般に、ウェブ製品のインライン検査にはラインセンサが用いられることが多い。その主な理由としてエリアセンサのフレームレートが十分でないことが挙げられる。1画素あたりの出力速度（ピクセルクロック）を比較するとエリアセンサとラインセンサとの間で大きな差は見られない。しかし、ラインセンサの出力画素数がおおよそ10,000×1画素程度であるのに対し、比較的画素数の少ないエリアセンサでも100万画素（1,000×1,000；1メガ

ピクセル）以上を有している。このため、エリアセンサのフレームレートとしては数10～数100FPSのものが多く、この値は、一般的なラインセンサのスキャン速度と比較して1/10～1/100程度である。

エリアセンサをウェブ検査に用いるためにはラインセンサのスキャン速度と同等のフレームレートで2次元動画画像を取得し、かつそれをリアルタイムに処理する必要がある。しかし、従来はこれを満たすエリアセンサが存在しなかった。また、リアルタイム処理を行うためにはソフトウェアでは限界があった。そのため専用のハードウェアを構築する必要があるが、それはコストの面で困難であった。これらのことから、エリアセンサを用いたウェブ検査の事例は報告されていない。

近年は、ユーザによる画像処理ハードウェアの構築が、まだ限定的ではあるが、ある程度可能になってきた。そのため、将来はウェブ検査の分野にもエリアセンサの活用が増えていくものと予想されている。

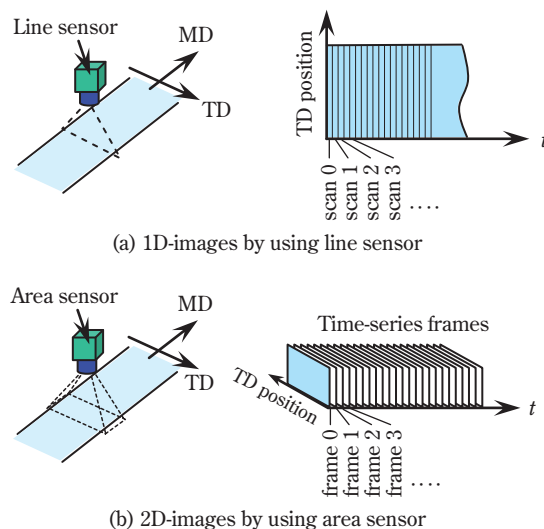
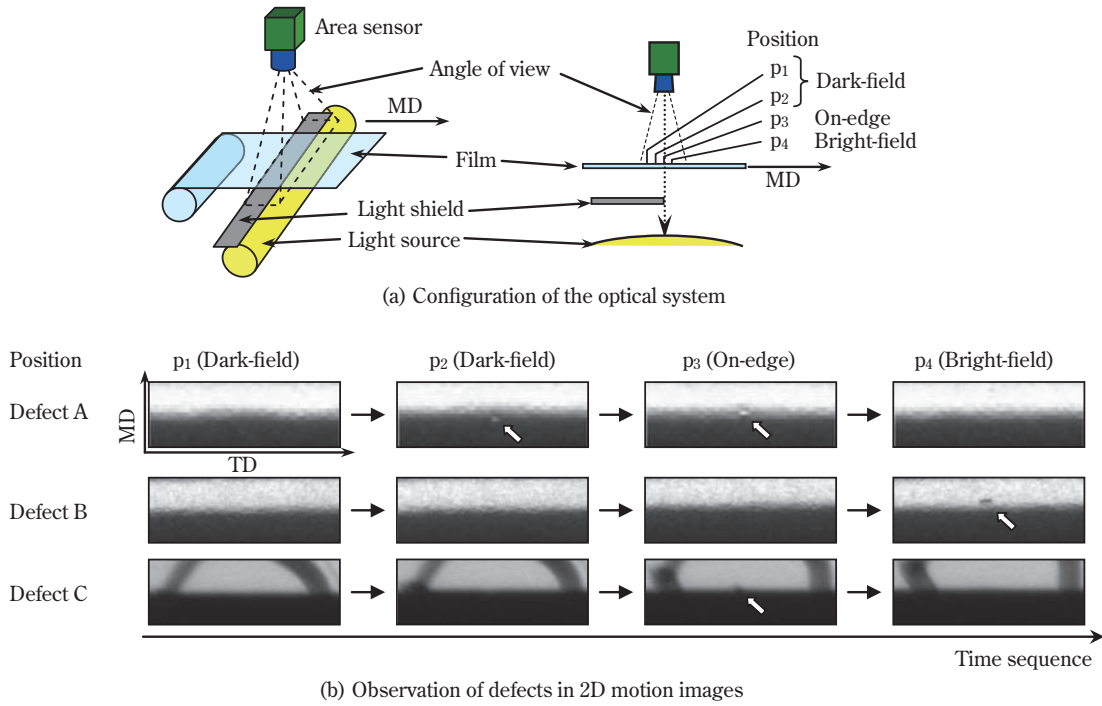


Fig. 6 Comparison of image constructions

### 3. 欠陥検査に2次元動画画像を用いることの利点

2次元動画画像の最大の利点は欠陥の見え方の経時変化を観測できるという点にある。Fig. 7 (a)はウェブ検査に適した2次元動画画像を得るための機器配置の一例を示している。フィルムは図の左から右方向へ搬送される。カメラ視野の半分が暗視野、残り半分が明視野となるように光源と遮光板が配置される。この配置によれば、1つの欠陥はまずカメラ視野内の暗視野領域に進入し、遮光板のエッジをまたいで明視野領域へ進行し、やがてカメラ視野外へ出る。この間の取得画像には、同一欠陥に対して暗視野から明視野に遷移するさまざまな光学条件下での観測画像が含まれている。実際の欠陥の観測例をFig. 7 (b)に示す。ここで、 $p_1$ から $p_4$ はFig. 7 (a)に示した各位置を示している。位置 $p_1$ ,  $p_2$ は暗視野、



**Fig. 7** Examples of defect images by using an area sensor

$p_3$ はエッジ上、 $p_4$ は明視野領域にそれぞれ相当する。欠陥Aは暗視野位置 $p_2$ からエッジ上 $p_3$ にかけて視認できるが明視野位置 $p_4$ では見えなくなっている。逆に欠陥Bは明視野位置 $p_4$ でのみ観測できる。また、欠陥Cはどの観測位置にあっても欠陥自体は視認されず、エッジ上を通過する際にエッジのゆがみが観測されている。この欠陥Cを従来のラインセンサを用いて検出することは前章で述べたフィルムの反りの影響により困難である。2次元動画画像を用いることにより、エッジのゆがみの時間的な変化という新たな情報を取得することができ、これに基づく欠陥検出が可能になると考えられる。

**2次元動画画像から鮮明な欠陥画像を生成するLCI技術**

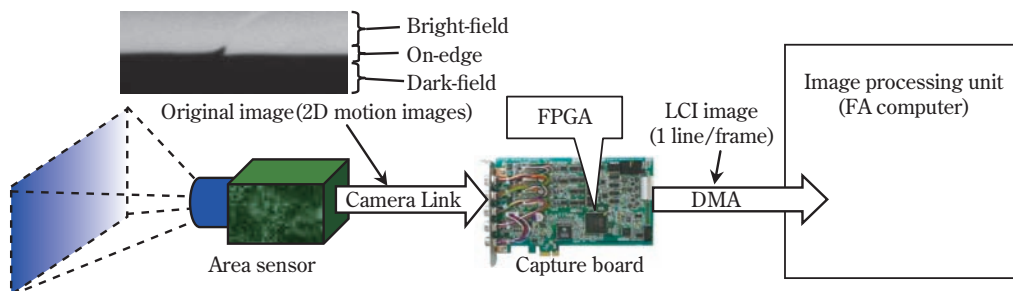
本章では、2次元動画画像に含まれる欠陥情報を感度よく抽出する手法として筆者らが開発した“LCI ; Line

Composition and Integration” と称する画像処理技術を説明する。

**1. 基本コンセプト**

2次元動画画像において、ある1つの欠陥に関する情報は連続する複数のフレームに含まれている。しかも、どのフレームにより多くの情報が観測されているかは欠陥の種類によって異なっていることを2,3章で述べた。したがって、より多くの欠陥を検出するためには個々のフレームに対して画像処理を行うのではなく、個々の欠陥が含まれる全フレームを処理対象としなければならない。

しかし、全てのフレームに対して従来法と同等の画像処理を行うことは実用上困難である。それは、画像処理エンジンに搭載しなければならないリソースが膨大となり、フィルム等の検査を考える場合にはコスト面で現実的ではないためである。



**Fig. 8** Conceptual diagram about LCI

そこで本研究では、動画画像に含まれる欠陥情報のみを抽出して情報量を圧縮することを試みた。本手法の概念図をFig. 8に示す。エリアセンサが出力する2次元動画画像（原画像）を直接処理するのではなく、連続する複数フレームの画像から欠陥情報を抽出し、それを1ラインに集約して画像処理エンジンに出力する。この集約された画像をLCI画像と呼ぶこととする。この操作により複数のフレームに離散していた欠陥情報が1枚のLCI画像に集約されるので、従来法と比較して鮮明な欠陥画像を得ることが可能となる。また、LCI画像のみを処理対象とすることにより、単位時間あたりに処理しなければならないデータ量を従来のラインセンサと同等の量まで削減することができる。

## 2. LCIの原理

LCIの処理の流れは、Fig. 9に示すように、ライン合成・オペレータ演算・画像積算という3つのステップで構成される。以下に、各ステップの処理手順を述べる。

### (1) ライン合成

原画像の毎フレームから同一ラインを抽出して時系列に再配置するという操作を「ライン合成」と呼ぶこととする。Fig. 9において原画像(a)を各ラインに分解し、別途確保したメモリブロックに格納することにより、ライン合成画像(b)を生成する。この操作により、ラインセンサを用いて同じ箇所を撮影した場合とほぼ同等の画像を得ることができる。このようにして得られた複数のライン合成画像は、照明に対する撮影位置がカメラ解像度に等しい距離だけ異なる画像とみなすことができる。特に、Fig. 7 (a)の光学配置の下では、これらの画像は明視野領域から暗視野領域に移行する過程のさまざまな光学条件下の画像を含んでいる。

### (2) オペレータ演算

各ライン合成画像に対し、適宜オペレータ演算を行う。この目的は、続く画像積算に先立ち、欠陥によって生じた輝度変化の符号を統一することである。例え

ば微分オペレータであれば輝度勾配の絶対値を使用する。このようにする理由は、欠陥によって生じる輝度変化の正負は光学条件によって異なるためである。同じ欠陥が、明視野画像中では黒く、暗視野画像中では白く撮影されるようなケースは実際によく見られる。符号なしとすることにより、欠陥信号が積算時に相殺されることを回避する。

### (3) 画像積算

オペレータ演算後の各画像を、被検査体の搬送による位置変化を補正しながら積算することにより最終のLCI画像を得る。ライン合成画像を格納するメモリブロックはFIFO（先入先出）メモリとしており、オペレータ演算の対象領域（Fig. 9 (b)の中で‘}’で示した範囲）を適宜シフトすることにより、ライン合成画像間で被検査体（フィルム）の撮影位置を一致させることができる。この一連の手順により、1フレームにつき1ラインのLCI画像が出力される。

## 3. LCIの実装

LCIは、ソフトウェア・ハードウェアいずれの上でも実行することが可能である。しかし、ウェブ検査への実利用を考えると、高いフレームレートで出力される2次元動画画像をリアルタイムに処理しなければならない。したがってソフトウェアでの実行は現実的ではなく、なんらかのハードウェア上への実装が望ましい。本研究では、使用するハードウェアとしてFPGAを選択した。既にFig. 8で示したように、キャプチャボード上に搭載されているFPGA上にLCIを実装した。このようにすることにより、使用するカメラやソフトウェアとLCIとを分離することが可能であり、LCI機能を有する汎用ボードとして容易に転用することができる。

LCIは分解・遅延・四則演算などの処理を時系列に行うのみで画像生成を完結できる。そのため、回路デザインはきわめてシンプルである。しかし、画像データを時系列に並べるといった性質上、リソース（とくにFIFOメモリ）を多用するという短所がある。通常、

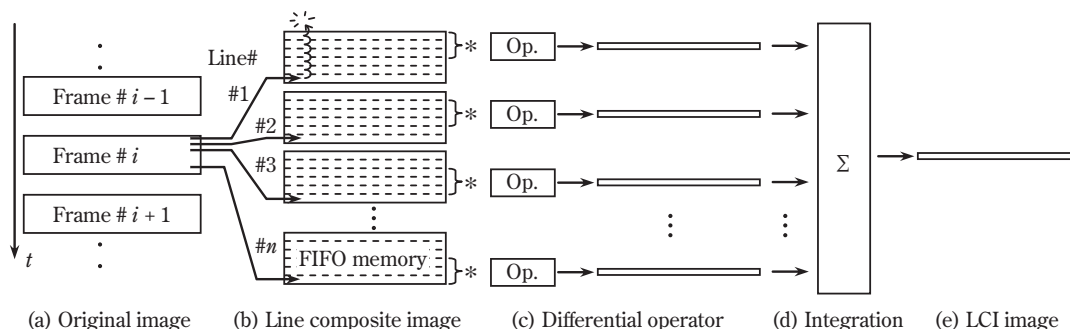


Fig. 9 LCI procedure

FPGAがもつメモリ容量はパソコンの増設メモリなどと比較するときわめて限られている。そのため、必要に応じて画像サイズ（積算ライン数）やパラレルリズム等を適切に選定する必要がある。

実験

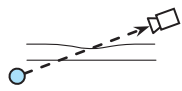

1. 観測画像例

ここでは比較のためフィルム面に生じる代表的な2種類の欠陥についての観測例を示す。これらは従来法ではそれぞれ検出に適する観測条件の異なる欠陥である。欠陥の特徴をTable 1にまとめる。これらのうち凹み欠陥はこれまでに示したいずれの観測方法でも安定した検出が困難であり、光源の透過像の歪みによってのみ観測が可能な欠陥である。

各欠陥の観測例をFig. 10およびFig. 11に示す。これらの図中、(a)は原画像のうち欠陥がエッジ近傍を通過中のフレームを抜粋したものである。これらを見ても欠陥は発見されない。(b)は生成したライン合成画像の

中から欠陥の視認性がよいものを抜粋したものである。欠陥は淡く観測されているが正常領域（地合）と比較して十分な輝度差は得られていない。(c)はLCI画像である。LCI画像においては欠陥と地合との輝度差が大きく観測されている。これらの欠陥は従来法では検出に適する観測条件がそれぞれ異なる欠陥であるが、LCIでは同一の観測系にて検出が可能である。

Table 1 Defect samples

Defect type	Slight concave	Particle
Typical size	Height : 1 μm	Less than 100 μm in diameter
	Width : 1mm or more	
Observation method	Distortion of transmitted image	On-edge
		

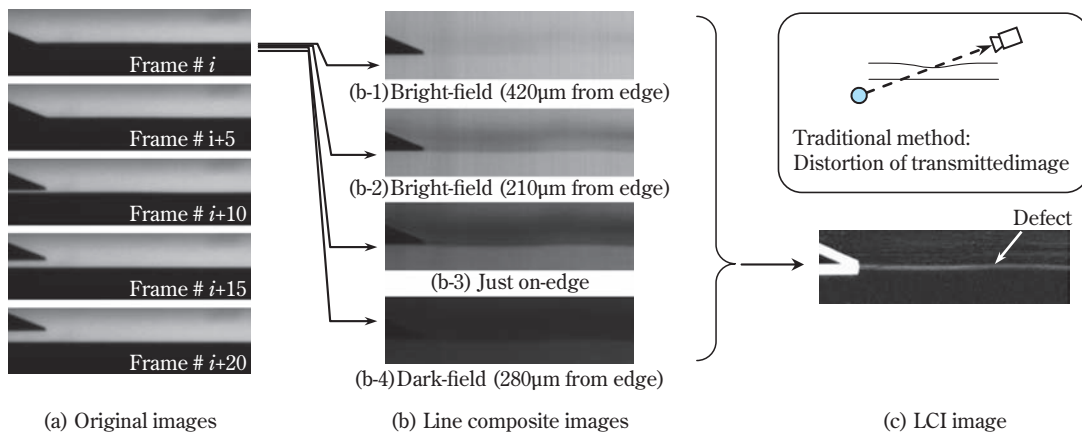


Fig. 10 LCI experimental result (Defect type: Slight concave)

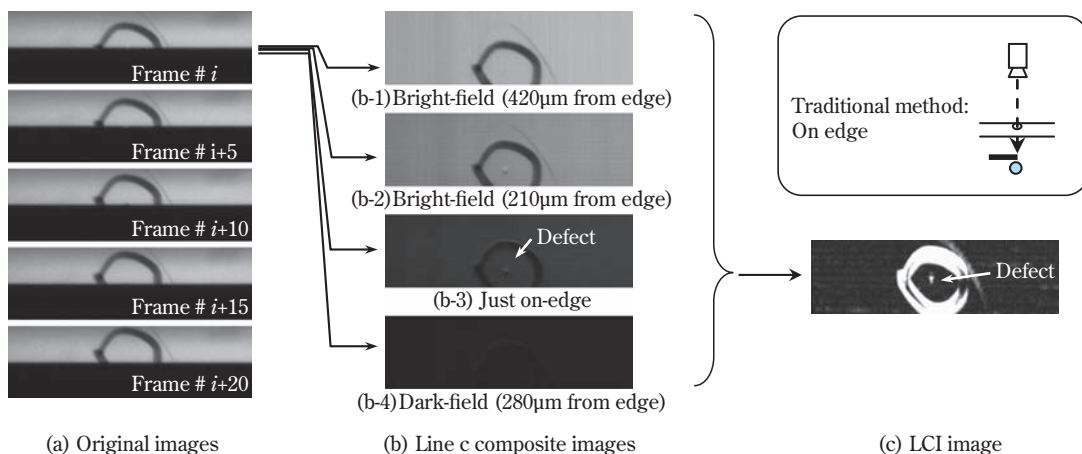

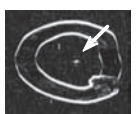

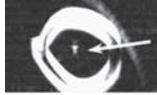


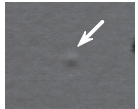



Fig. 11 LCI experimental result (Defect type: Particle)

## 2. 従来法との比較

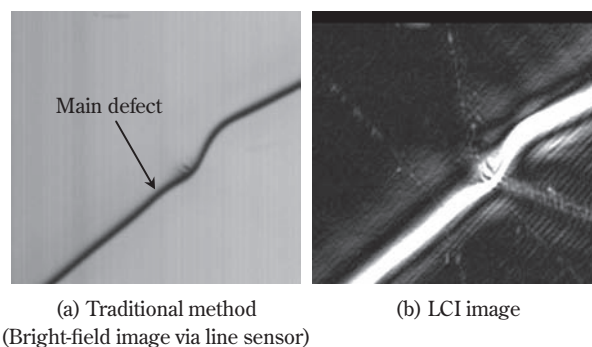
比較のため、同一欠陥をLCIと従来法とでそれぞれ撮影した画像をFig. 12に示す。従来法は欠陥の種類によって適する観測条件が異なるため、欠陥ごとに条件が異なっている（ここで、従来法においては、画像の明るさをカメラの撮影可能範囲内に収めるために露光時間またはレンズの絞りを調整している）。一方、LCIの観測条件は欠陥によって変更はしておらず一定である。これらの結果から、従来法では複数の検査装置が必要であった製造工程において、装置の数を削減できる可能性を示している。

Defect and observation method	Traditional method	LCI image
Convex defect (Dark field)		
Particle 1 (On edge)		
Slight concave (Distortion of transmitted image)		
Particle 2 (Bright field)		

**Fig. 12** Comparison of defect images between LCI and traditional methods

## 3. 表面微細構造の可視化

別の欠陥形態である微細表面欠陥の観測例をFig. 13に示す。欠陥は、主欠陥として高低差10 $\mu\text{m}$ 程度の凹凸がスジ状にあり、その近傍に高低差0.1 $\mu\text{m}$ 程度の微細な凹凸が分布しているものである。同図(a)はラインセンサを用いて明視野条件下で撮影したものである。従来法では主欠陥のみが検出されており近傍の微細構造は観測されていない。一方、同図(b)はLCIにより撮影した画像である。これを見ると、主欠陥近傍の凹凸が縞状に撮影されていることが分かる。この結果は、従来法では可視化が困難であった微細構造の観測が可能であることを示している。通常、フィルム表面の微細構造を観測するためには、たとえば光干渉等の原理を利用した3次元計測器が必要であった。しかし、精密な3次元計測をインラインで行うことは機械的に困難であり、抜き取りによるオフライン計測に限られていた。LCI画像をモニタリングすることにより、製品全面にわたる微細構造の可視化が可能である。このことは製造



**Fig. 13** An example of LCI image observed film surface with complex shape

プロセスの診断・改善にも活用できる可能性を示唆している。

## 光学シミュレーション

本章では、撮像面からフィルム面を経て照明面にいたる光線追跡を行うことにより、LCIによる欠陥観測画像のCGを生成する手法を述べる。

### 1. シミュレーションによる画像合成の意義

製品検査をインラインで実用化する際には、対象とする欠陥の検出能力を定量的に評価することが必要である。検出能力は、通常、収集された欠陥サンプルを用いて実験的に評価されることが多い。しかし、カメラ・フィルム・照明の配置をさまざまに変化させた観測実験を網羅的に行うことは効率的ではない。また、製品に生じる全ての種類の欠陥についてさまざまな大きさの実サンプルを収集することは事実上困難である。そのため、実際には入手されていない形状の欠陥に対してシミュレーションにより観測画像を生成することができれば有効である。これにより、限られた実験結果を補間することが可能となり、実験の効率化を図ることができる。

### 2. 座標系の定義

シミュレーションに使用する座標系をFig. 14のように定義する。光軸を $z$ 軸とし、平面 $z=0$ 上に撮像面をおく。 $x$ をフィルムの横方向 (TD) とし、 $y$ を搬送方向 (MD) とする。レンズは主点間距離 $\Delta H$ の厚肉単レンズとし、各種収差は無視する (本シミュレーションの目的である実験結果との比較および補間のためには、収差を考慮しなくても有効なシミュレーション結果が得られた)。フィルムは厚さ $T_f$ の平行平板とし、平面 $z=z_f$ 上に配置する。焦点面を $z=z_f$ で表す。焦点面は撮像面とレンズ位置、レンズ焦点距離から一意に決まる。光源は面光源とし平面 $z=z_s$ 上に配置する。この面内で



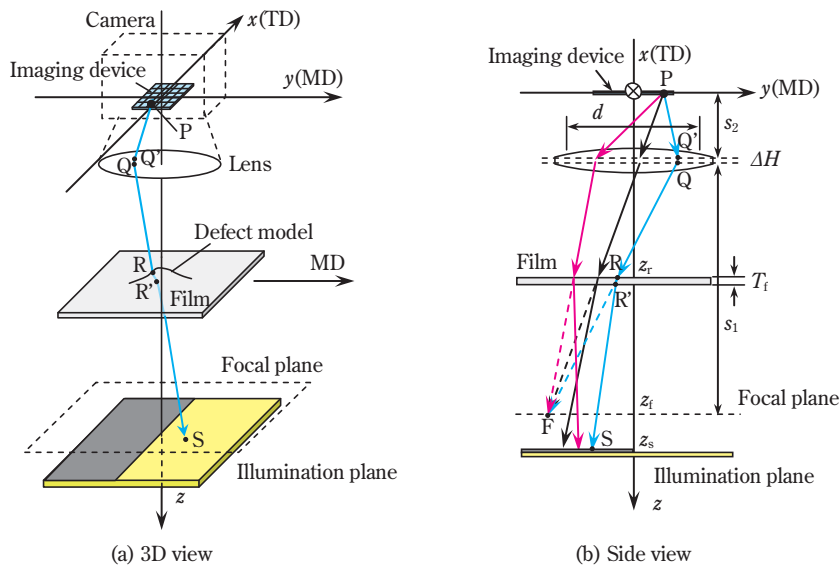


Fig. 14 Coordinate system for LCI simulation

の輝度分布によって任意の照明パターンを表現する。ここではLCIを対象とするため、 $y < 0$ の領域を遮光した(輝度値をゼロとした)光源モデルを用いる。

### 3. CG生成の手順

欠陥観測画像のCGは次のような手順により生成することができる。まず、撮像面上の点Pを定め、点Pからレンズの開口内へ向かう多数の光線を設定する。同一の点Pから出射した光線はレンズ開口面上の点Qの位置にかかわらず結像面 $z = z_f$ 上の1点Fに向かう。その途中、各光線はフィルム面に入射し、欠陥の有無によって表面および裏面での屈折、あるいはフィルム内部での減衰等の作用を受けた後、フィルム面を通過して光源面へ向かう。各光線が光源面に達する点をSとし、点Sでの光源輝度値を積算することにより、撮像面上の点Pの受光量を計算することができる。この計算を撮像面全域にわたって繰り返すことにより、エリアセンサが出力する1枚の2次元動画画像を生成することができる。さらに、フィルムの搬送速度に応じた距離だけフィルムをMD方向に移動させながら2次元動画画像を繰り返し生成することにより、搬送されるフィルムを連続撮影した2次元動画画像を生成することができる。

### 4. 光線追跡<sup>5), 6)</sup>

#### (1) 結像系の決定

レンズの焦点距離を $f$ 、主点間距離を $\Delta H$ とする。また、撮像素子サイズを $r_0$ とする。このとき、取得される画像の解像度 $r$  [m/pixel]を決めると光学配置が一意に定まる。レンズの収差を考慮していないので撮像面の1点Pから出射した光線は全て同一点 $F(x_f, y_f, z_f)$ に結像する。結像点Fは

$$\text{拡大率} \quad M = \frac{r}{r_0} = \frac{s_1}{s_2} \quad (1)$$

$$\text{レンズ公式} \quad \frac{1}{f} = \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} \quad (2)$$

より、

$$\left. \begin{aligned} x_f &= -M \cdot x_p \\ y_f &= -M \cdot y_p \\ z_f &= s_1 + s_2 + \Delta H \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

で与えられる。ここで、 $s_1$ はレンズの物側主点からフォーカス面までの距離、 $s_2$ は撮像面 $z=0$ からレンズの像側主点までの距離をそれぞれ表す。

#### (2) 欠陥による作用

フィルム面への光線の入射位置Rはレンズ面への入射点Qおよび結像点Fから求められる。光線の入射位置の近傍に欠陥が存在する場合、Fig. 15に示すように、フィルム内部で光が遮断されたり(Ray1)、フィルムの表面凹凸によって異なる方向に光が曲げられたり(Ray2)といった作用が生じる。本シミュレーションでは光線の強度に係数 $k$  ( $0 < k < 1$ )を掛けることによって遮光作用を表す。また、フィルムの表面・裏面での屈折をそれぞれの位置でのフィルム面の法線ベクトルを用いて計算する。

欠陥の表面形状モデルとしては、たとえば、次式のようなガウス関数を用いる。

$$z = g(x, y) = Ae^{-2\frac{x^2+y^2}{\sigma^2}} \quad (4)$$

ここで、 $A$ の値によって欠陥の凹凸の高さ(負値の場合

は深さ) を表し、 $\sigma$ によって平面寸法を表現する。

曲面 $z=g(x, y)$ 上の点 $(x, y)$ における法線ベクトルは、 $x$ 方向および $y$ 方向の接線ベクトルの外積により次のように求められる (Fig. 16参照)。

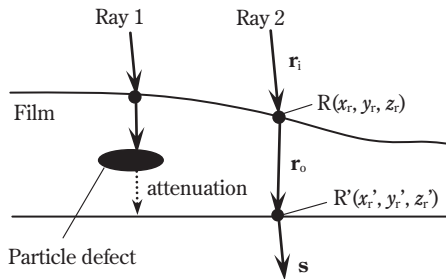


Fig. 15 Variation of rays affected by defects

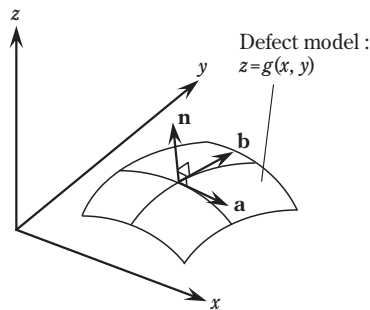


Fig. 16 Defect model and its normal vector

$$\mathbf{n} = \left( -\frac{\partial g}{\partial x}, -\frac{\partial g}{\partial y}, 1 \right) \quad (5)$$

次に、光線がフィルムを通過する際の光線経路を求める。空気中からフィルム面に入射する光線の方向単位ベクトルを $\mathbf{r}_i$ 、入射点における境界面の法線単位ベクトルを $\mathbf{n}$ 、屈折後の光線の方向単位ベクトルを $\mathbf{r}_o$ として次のように表記する (Fig. 17参照)。なお、フィルム裏面から空気中への光線経路についても同様に計算される。

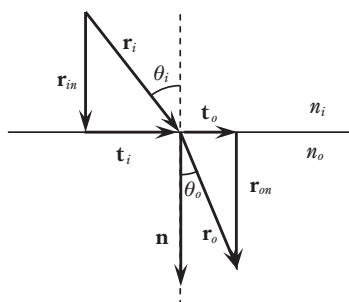


Fig. 17 The change of ray direction at the medium boundary surface

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{r}_i &= (x_i, y_i, z_i) \\ \mathbf{r}_o &= (x_o, y_o, z_o) \\ \mathbf{n} &= (x_n, y_n, z_n) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

入射角を $\theta_i$ 、各媒質の屈折率を $n_i, n_o$ とすると、境界面を通過した後の光線の方向 $\mathbf{r}_o$ はスネルの法則をベクトル表現することにより次式で求められる。

$$\left. \begin{aligned} x_o &= \frac{n_i}{n_o} x_i + \left( S_o - \frac{n_i}{n_o} S_i \right) x_n \\ &= \mu x_i + \Gamma x_n \\ y_o &= \mu y_i + \Gamma y_n \\ z_o &= \mu z_i + \Gamma z_n \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

where

$$\begin{aligned} \mu &= n_i/n_o \\ S_i &= \mathbf{r}_i \cdot \mathbf{n}, S_o = \mathbf{r}_o \cdot \mathbf{n} \\ \Gamma &= S_o - \mu S_i \\ &= \sqrt{1 - \mu^2 + \mu^2 S_i^2} - \mu S_i \end{aligned}$$

式(7)を用いてフィルム表面および裏面における光線経路の変化を計算することにより、光線がフィルムを透過する位置の座標と光線の方向 (Fig. 15中の点Rおよびベクトル $\mathbf{s}$ ) を求めることができる。

### (3) 光源面への光線到達点の計算

前節で求めた点R'およびベクトル $\mathbf{s}$ より、光源面への光線到達点Sを求めることができる。ただし、光の回折限界により、撮像面上の点Pから出射した1本の光線が光源面上の1点Sに到達するわけではない。一般に、収差の無いレンズであっても、1点から出射した光が結像面に集光されるときスポット径は次式で与えられる。

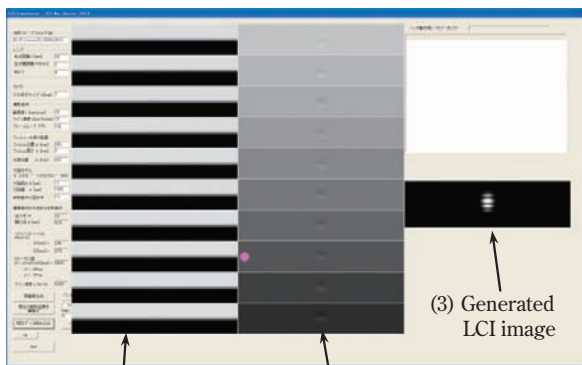
$$d_s = 2 \times 1.22 f \lambda / d \quad (8)$$

ここで、 $\lambda$ は光源の波長、 $f$ はレンズの焦点距離、 $d$ は開口径である。本シミュレーションでは結像面の位置とは無関係に光源を配置しているため、結像面と光源面との距離に応じて回折によるスポットの拡がりを補正している。この光線の出射点Pでの受光量は、点Sを中心としたスポット領域の平均輝度値を用いて計算する。点Pから出射した全ての光線について、この平均輝度値を積算することにより、点Pの総受光量を求めることができる。

## 5. シミュレーション結果

光線追跡シミュレーションにより生成した観測画像およびそれらを基に生成したLCI画像の例をFig. 18に示す。この例では、欠陥モデルとしてフィルム表面に発生した凸状欠陥を用いた。欠陥形状をガウス関数で

表し、欠陥高さを1 $\mu\text{m}$ 、欠陥幅（ガウス関数の $2\sigma$ ）を1mmとした。図中、(1) Original CG（原画像）はフィルム位置を搬送速度に応じた距離だけMD方向にシフトさせながら繰り返し生成した2次元動画画像である。実際には1枚のLCI画像を生成するため100フレーム程度の原画像が必要であるが、この図ではそのうちの10フレーム分を表示している。次に、(2) Line composite images（ライン合成画像）は原画像中の毎フレームから同一ラインを抽出して時系列に再配置したものである。これらのライン合成画像に対してオペレータ演算を行ったのち積算することにより、(3)のLCI画像が生成される。比較のため、シミュレーションに用いたモデルとほぼ同一形状の欠陥サンプルを実際に撮影し、LCIを実装した画像処理ボードによって生成された画像を同図(b)に掲載する。これらを見るとシミュレーションにより実際の欠陥の取得画像と類似したCGが生成されていることが分かる。



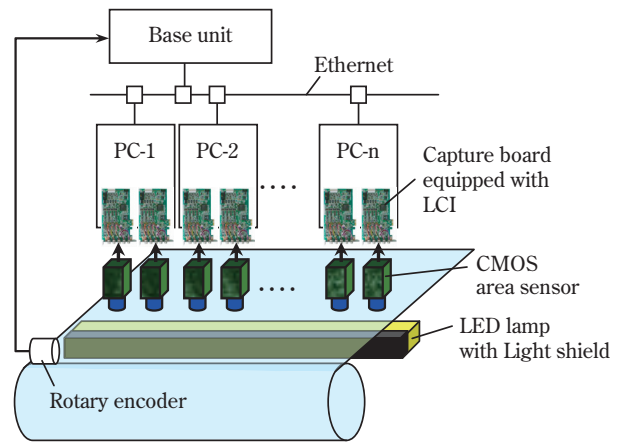
(1) Original CG (10frames) (2) Line composite images (3) Generated LCI image  
(a) Simulation result  
(b) Experimental result  
(Observed image of actual defect sample)

**Fig. 18** Comparison between simulation and experimental result  
Defect model: Convex defect (defect height 1 $\mu\text{m}$ , defect width 1mm)

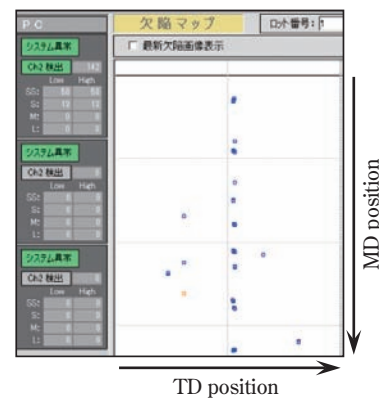
### インラインウェブ検査システムの開発

開発したインラインウェブ検査システムの構成をFig. 19に示す。

処理エンジンは、親機となるコンピュータ（PC）1台とこれの制御下で稼動する複数の子機PCから構成されている。各子機はLCI機能をもつ画像入力ボードを搭載している。画像入力ボードは、エリアセンサから1フレームの画像を取得する度にボード上のFPGAにてLCI



(a) Configuration of in-line inspection system



(b) An example of defect detection map

**Fig. 19** In-line web inspection system by using area sensors equipped with “LCI technology”

処理を実行し、生成されたLCI画像のみを子機のメモリへDMA転送する。したがって、子機が受け取る画像は1フレームあたり1ラインである。これにより、2次元動画画像を扱う検査装置でありながら、従来のラインセンサ方式と同等のデータ処理量にて検査を実現することが可能となっている。各子機は取得したLCI画像から欠陥情報を抽出して親機へ信号を出力する。親機は、画像処理は行わず、各子機から集約した欠陥情報に基づいて欠陥マップを生成し、表示・警告・保存・検査データの分析等を行う。

光源には画像処理用LED照明を使用し、MD方向に明視野領域と暗視野領域をもたせるため光源面に遮光板を配置した。カメラにはCMOSエリアセンサを選定した。CMOSセンサには画像取り込み領域を任意に設定できる利点がありLCIに適している。カメラ位置と撮影時の解像度が既知であるので、TD方向の世界座標（ここではフィルム上の絶対位置を意味する）は画像から容易に得ることができる。

また、MD方向の世界座標を得るためにロータリーエンコーダを使用している（ロータリーエンコーダは

1回転あたり既定のパルス数を出力する信号発生装置であり、連続搬送されるウェブ状製品の距離計測に一般的に用いられる)。

以上のように、本検査装置は従来のラインセンサをベースとしたウェブ検査装置とほとんど同じ機器構成で実現可能である。2次元動画像処理をなんらかのハードウェア上に実装する必要があるが、これ以外に特別な搬送装置や特殊なカメラ・画像処理エンジン等を用意する必要はない。これは、既存の検査装置の更新を考えるうえで大きな利点である。

Fig. 18 (b)は、本検査システムにより実際にフィルムを検査し生成された欠陥マップの一例である。本検査システムはこのほか、マウス操作によりマップ上で指定した欠陥情報のポップアップ表示・欠陥サイズによる分類・検査情報のデータベース化等の機能を有している。また、オプションとして欠陥部位へのマーキング機能をもたせることも可能である。

## 結言

2次元動画像を用いたインラインウェブ検査技術を紹介した。撮像装置としてエリアセンサを使用することにより、従来のラインセンサでは得られなかった欠陥の見え方の変化という情報を取得した。この動画像情報から欠陥を抽出するアルゴリズムとしてLCIという手法を確立し、さらに、LCIアルゴリズムをキャプチャボード上へ実装することにより2次元動画像のリアルタ

イム処理を実現した。本技術により従来法では検出が困難であった欠陥の検出が可能となることをいくつかの実験例により明らかにした。また、光線追跡シミュレーションによりLCI画像のCGを生成し、実験結果とよく一致することを示した。限られた欠陥サンプルによる実験結果とCGとを併用することにより、実験データの補間が可能となり、光学配置の最適化や検査性能評価を効率よく行うことが可能となることを述べた。さらに、本技術を搭載したインラインウェブ検査システムを開発し、実際のフィルム製品の製造条件下にて十分な検査性能を有することを確認した。

## 引用文献

- 1) 日本工業出版編, “産業用カメラの選び方・使い方”, 日本工業出版 (2012).
- 2) 増村 茂樹, “マシンビジョンライティング基礎編”, 日本インダストリアルイメージング協会 (2007).
- 3) 橋本 巨, “ウェブハンドリングの基礎理論と応用”, 加工技術研究会 (2008).
- 4) 広瀬 修, ビジョン技術の実利用ワークショップ講演論文集, 2009, 223.
- 5) F. Jenkins and H. White, “Fundamentals of Optics”, McGRAW-HILL (1957).
- 6) 早水 良定, “光機器の光学I - 光学系の基礎と設計-”, オプトメカトロニクス協会 (1988).

## PROFILE



廣瀬 修  
*Osamu HIROSE*

住友化学株式会社  
工業化技術研究所  
主席研究員  
博士 (工学)



尾崎 麻耶  
*Maya OZAKI*

住友化学株式会社  
工業化技術研究所  
研究員