内視鏡型センシングと気付きアルゴリズムによる 自動車部品検査方式*

長嶋千恵** 青木公也*** 塚田敏彦** 三和田靖彦† 興水大和***

Automobile Parts Inspection through Endoscopic Image Sensing and "KIZUKI" Image Processing

Chie NAGASHIMA, Kimiya AOKI, Toshihiko TSUKADA, Yasuhiko MIWATA and Hiroyasu KOSHIMIZU

An inner wall surface inspection method for metal cylindrical parts of automobiles, such as engine cylinder bores, has been developed. This method is realized by combining a specialized optical system and image processing. The specialized optical system named "Endoscopic Camera" images the texture of the cylindrical inner wall surface. The specialized image processing named "KIZUKI" algorithm detects defects such as scratches from the successively captured images. In the optical system, a lens with a concave dome-shaped reflective surface was developed. This lens will allow not only obtaining an image of the entire circumference of the cylindrical inner surface with a single shot, but also coaxial incident illumination which highlights the scratches. "KIZUKI" algorithm is a technique inspired by the peripheral vision and the involuntary eye micro-vibration of the human vision architectures. It consists of three steps: first step for forming low resolution images by a variable re-sampling, and the second step for detecting relatively salient regions at each low resolution image, and the last step for integrating these regions. To evaluate the effectiveness of the proposed method, a cylinder sample with a known flaw size was measured. As a result, a scratch small as $0.16\text{mm} \times 2.0\text{mm}$ in size was detected, thus the validity of the proposed method was confirmed.

Key words: automotive cylindrical parts, inner surface inspection, imaging optical system, "KIZUKI" algorithm

1. 結 言

自動車は2～3万点の部品から構成されており、安全性・品質を保証するために生産工程では厳しい検査が行われている。自動車部品の多くは金属製で、その表面の傷は見栄えだけでなく、安全性・機能性能に大きな影響を与える場合があり、見逃すことが許されない欠陥である。これらの検査は目視により行われる場合もあるが、目視検査は高いレベルで集中力を持続させることが必要とされる重労働であることや、検査の客観性と定量化のために、自動検査の実現が望まれている。

エンジンシリンダや油圧シリンダなど、円筒形状部品内壁面の検査に対しても自動化への強い要望がある。円筒内壁面の傷は内部圧力の低下や、オイル漏れの原因となり見逃すことのできない欠陥である。円筒形状部品の内壁面を目視で検査するためには、筒内を覗きこみながら全周を観察することが必要とされ、検査の負担は大変に大きい。これを自動検査するためには、円筒内壁面の様子を精度良く撮像することが必要である。

円筒内壁面の形状計測や検査を行う方法について、これまでいくつかの方法^{1)～3)}が提案されている。松井ら¹⁾は、全方位レーザと全方位カメラから成るレンジファインダにより配管の3次元モデル生成を試みている。この方法をエンジンシリンダの傷検査に用いる場合、小さい傷を検出するためには投射光の間隔を細かくして撮像することが必要で検査領域での撮像回数

が膨大となり、検査に要する時間が課題となる。亀本ら²⁾は、細径長尺の鏡面加工された鋼管内面検査のために、拡散照明の反対側に可動焦点型ズームレンズを備えたカメラと設置し、鋼管内面をズームしてピントを変えながら撮像した画像から鋼管の曲がりや傷、内表面の荒れの不良を検出する方法を提案している。しかし、鋼管は貫通した穴を有するので照明の反対側から撮像を行う事ができるが、エンジンシリンダは片側から照明と撮像を行う必要があるため、この方式をそのまま適用することはできない。これに対して江崎³⁾は、シリンダ内へ平面鏡を挿入して検査面に垂直な同軸照明を行い、平面鏡を高速で回転させることによりシリンダ内壁面の傷を検査する装置を開発している。しかし、検査面に垂直に照明を行うための位置決めに非常に高い精度が求められ、そのために多くの時間やコストが必要となる。

検査結果から欠陥を認識する工程においても、生産工程での検査特有の難しさがある。検査対象の部品には加工により生じる部品表面の切削加工痕が存在するが、これらは刃具の使用状態により一様なものとは限らず、しかし欠陥ではないものなので、これらを欠陥としては検出しない認識能力が必要とされる。また、生産現場での計測・検査では、計測光学系の汚れや破損による影響への対応も重要な項目となる。定期的な計測機器の点検は実施されているが、波及する影響を最小限に抑えるために、撮像系におけるレンズの汚れや傷などを製品の欠陥として認識することが無いようにする工夫は重要である。

筆者らはこれまでに、金属平板の傷を際立たせて撮像するための落射照明光学系⁴⁾の開発を行い、シミュレーションと実験によりその有効性を検証してきた。これを円筒形部品の内壁面観察用に改良して、内壁面の全周を一度に撮像して傷を検査で

* 原稿受付 平成 27 年 5 月 8 日

掲載決定 平成 27 年 9 月 4 日

** (株)豊田中央研究所 (愛知県長久手市横道 41-1)

*** 正 会 員 中京大学 (名古屋市昭和区八事本町 101-2)

† 正 会 員 理化学研究所 (埼玉県和光市広沢 2-1)

き、光軸の傾きや位置決めに対してもロバストな光学系を開発した。この光学系を深さ方向へ走査させてシリンダ内壁面全体の撮像を行い、ツールマークなどの加工痕と傷などの欠陥を区別して検出する「傷の気付き」アルゴリズム⁵⁾を組み合わせ、エンジンシリンダ等の生産工程での自動検査に利用可能な検査方式を考案した。

本報告では、まず初めにシリンダ内壁面の傷などを際立たせて撮像する方法について説明し、円筒内全周を撮像するための光学系の設計について紹介する。そして、この光学系を用いたシリンダ内壁面の撮像方法として、光学系の傷の影響を減らし対象の傷のみを際立たせる撮像方法について述べる。次に、撮像された画像には切削による加工痕と検出すべき傷が混在しているため、傷のみを検出するための検査方法として採用した傷の気付きアルゴリズムについて説明する。最後に、シリンダサンプルの内壁面に大きさが既知のサイズの人工傷を施し、光学系にも傷を付与して、内壁面の傷のみを検出する評価実験の手順とその結果について説明し、考案した手法の有効性について報告する。

2. 検査光学系と撮像方式

2.1 検査光学系

金属光沢面上の傷を検出するためには、対象面に垂直に照明を行い反射光強度により傷の有無を検査する同軸落射照明方式が有用である。図1に示すように、正常な面からの正反射光は光軸方向に戻るが、傷部分からの正反射光は光軸と異なる方向に反射されて撮像素子に到達しないため、傷部分が暗く撮像される。

この同軸落射照明方式を用いて、ミラー等を回転させること

Fig.1 Metal surface defects inspection method by coaxial epi-illumination optical system

Fig.2 Entire circumference inspection by the conical mirror

Fig.3 Proposed lens shape

Fig.4 Photograph of the integrated inspection system

なくシリンダ内壁全周を撮像するためには、図2に示すような円錐ミラーをシリンダの中に挿入して上方からの照明光を内壁全周へ反射させる光学系が考えられる。しかし単純な円錐形状のミラーでは、円筒壁面の異なる深さにある点に対して上方からの入射光をそれぞれ垂直に投射し、その反射光を撮像素子の異なる場所に結像させる、ということが不可能である。そこで、円錐面ではなく図3に示すような凸非球面の反射面を用いることにした。さらに、円筒壁面に投射する光に一定の角度広がりを持たせてその反射光を集光するために、反射面の外側にトーリック屈折面を配置した。これにより円筒面の軸に対する撮像光学系の軸の横ずれや角度ずれの許容範囲が広がり、シリンダに対する光学系位置決めのロバスト性が向上する。そして、トーリック屈折レンズの底面をドーム状にくり抜き全反射を利用すると、凸非球面反射面とトーリック屈折面を一体化することができる。このトーリックレンズの各面の形状は、光学シミュレーションにて円筒壁面の深さ方向のできるだけ広い範囲を画質良く撮像できるようなパラメータを探索し、最適解を求めて決定した。具体的には、市販の光学設計ソフトウェア (ZEMAX) を用いて、円筒内壁面の深さが異なる5点におけるRMSスポット半径 (ある1点から角度広がりを持って出発した光線が撮像素子面に到達した時の位置のばらつき) を評価関数とし、この値が小さくなるようにDLS (Damped Least Squares) 法とハンマーアルゴリズムを用いて各光学面の形状や配置パラメータを最適化した。その結果をもとにアクリルを切削加工してトーリックレンズを製作した。このレンズに撮像のためのカメラと照明、同軸照明を実現するためのビームスプリッターを組み合わせ、図4に示すような撮像光学系を構築した。表1に、構築

Table 1 Specifications of the inspection system

Inspection area size	Entire circumference (8 mm width)
Testable cylinder diameter	60mm or more
Pixels	1280 x 1024
Spatial resolution (w/dia 60 mm cylinder)	Inner side: 0.079 mm/pixel Outer side: 0.065 mm/pixel
Axial alignment tolerance (w/dia 60 mm cylinder)	Decenter: 0.5 mm Tilt: 0.5 degree
Light source	LED (650nm)

した光学系の設計仕様をまとめて示す。1回の撮像による検査範囲は円筒内全周を深さ方向に幅 8mm で、検査可能な円筒の直径は 60mm 以上、撮像素子の画素数は 1280×1024 画素である。空間分解能は検査対象の円筒の直径によって変化し、直径 60mm の円筒の場合、円環の内側で 0.079mm/画素、外側で 0.065mm/画素となる。位置決めに許容される誤差も同様に、直径 60mm の円筒の場合、軸の横ずれ 0.5mm、軸の傾き 0.5 度である。照明光源には波長 650nm の LED 光源を用いている。

2.2 撮像と検査画像の生成方法

検査対象の撮像はシリンダ内面全体の画像を得るために、深さ方向へ光学系を移動させながら行う。このとき、ある撮像と次の撮像との間の移動距離を撮像画像の深さ方向の幅の 1/2 以下にして、前後の撮像で撮影範囲の半分以上をオーバーラップさせている。次に、撮像されたシリンダ内壁面の画像は円環状の画像となり中心部分には必要とされる情報は含まれていないので、画像処理の負担を低減するために、これを短冊状の画像へと変換する。この際、情報の欠落を防ぐために円環内周部分を外周部分のサイズに引き延ばして変換を行う。最後に、短冊状画像を光学系の円筒内位置に合わせて重ねて結合し、重ね合わせの枚数に応じて輝度値の正規化を行う (図 5)。

この重ね合わせの操作によって対象物の傷はコントラストが強調されるのに対し、光学系についた傷や汚れは重ね合わせ画像上に周期的に現れ相対的にコントラストが下がる。これを利用して光学系の傷や汚れの影響を抑制する。

Fig.5 Image composition method and generated image

3. 欠陥の検出処理

シリンダ内壁面を撮像した円環状画像から生成された短冊状画像は、光学系の性質から発生する大域的な輝度ムラを有している。また、切削加工によるツールマークや表面粗さに由来するランダムな背景ノイズパターンを有している。欠陥検出では、これら背景の輝度ムラ・ノイズと区別して欠陥領域を検出することが求められる。

まず背景の大域的な輝度ムラについては、短冊状画像にガウシアンフィルタを適用し、得られたローパス画像との比較によってこれを除去した。輝度ムラ除去後の画像では、概ね欠陥像及び背景のツールマークパターンのみが残存する。

次に、この輝度ムラ除去画像からランダムな背景パターンと区別して欠陥像を検出する必要がある。これに対して、一般的な 2 値化処理や、モフォロジ処理、プロブ処理の組み合わせでは、各種パラメータの設定が煩雑になり、適切に傷像を検出することが可能なロジック構成は困難であった。そこで本研究では、これまでに筆者らが提案した傷の気付きアルゴリズムを適用した。

図 6 に傷の気付きアルゴリズムの処理モデルを示す。傷の気付きアルゴリズムは、人の視覚生理機構のうち、周辺視と固視微動に着目して提案された。まず、格子による低解像度化処理 (ダウンサンプリング) 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り 2 値化する。格子の位相を設定された格子の縦・横幅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 (ダウンサンプリングレベル) を順次拡大していき、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 値画像を画素毎に加算積算する。積算画像を正規化し、ヒートマップ表示することによって、ポップアウト (欠陥候補領域の顕在化) 箇所を示す傷の気付きマップを出力する。

低解像度化は、空間分解能の低下と引き換えに階調数を上げる効果があり、その値は各格子に含まれる画素の濃淡の割合を

Fig.6 "KIZUKI" processing flow⁵⁾

表す。したがって、検査対象表面のざらつき等により、傷・欠陥像が周囲よりは密度の高いドットで構成されている場合や、周囲とのコントラストが低い場合も、それを検出できる。低解像度化により、その格子状態単独では、検出された傷候補領域はブロック状になるが、種々の格子状態の結果を積算することによって、最終的には傷候補領域にフォーカスして検出することができる。また、様々な格子位相とサイズによる処理は、未知の傷・欠陥サイズ、位置へ対応して、それを顕在化させるだけでなく、背景パターンの特徴(大域的な良品特徴)を抑制する効果が期待できる。シリンダ内壁面画像の場合、画像全域に渡って存在する筋状のツールマークについては、それが完全には規則的でないため、一般的な周波数解析による除去は困難である。傷の気付き処理では、ツールマークのランダム性によって、種々の格子サイズ・位相状態における局所領域の濃淡値は統計的にユニークでなくなり、相対的に傷が含まれる局所領域が顕在化する。

4. 評価実験

4.1 実験方法

試作した撮像光学系と検査アルゴリズムにより、シリンダ内壁面の傷を検出する評価実験を行った。実験では検査の基本性能を検証するために、既知の大きさの人工傷をもつサンプルを製作し、切削痕などのツールマークと光学系の傷や汚れを過検

Fig.7 Cylinder sample

Fig.8 Example of captured images

Fig.9 Detection results of single captured image. (a)Polar unwrapped image (b)Background subtracted image (c)"KIZUKI" map

Fig.10 Detection results of composed image. (a)Composed image (b)Background subtracted image (c)"KIZUKI" map

Fig.11 Detection results of binarization process
(a)Threshold: 174 (b)Threshold: 247

出することなく人工傷のみを検出できるかどうかを確認した。サンプルはアルミ合金製のブロックに旋盤でφ60mmの円筒形状のストレート穴を加工したものである。実際の製品で起こり得る表面状態のばらつきを想定して、表面仕上げ粗さを2種類用意した(Rz: 4.5と1.5相当)。そして、それぞれのサンプル内壁にバイトで傷をつけ、その大きさをレーザ顕微鏡により測定して傷サンプルとした。光学系の傷や汚れとしては、実際の計測現場において検査対象ワークとの干渉によって最も傷がつきやすいと思われるトーリックレンズ表面に、金属で傷(0.5mm程度)をつけて模擬をした。図7に作製したサンプルブロックと人工傷の外観を、図8に開発した光学系による撮像画像例を示す。

撮像は、手動のアクチュエータにより光学系を深さ方向へ一定幅ずつ移動させながら行った。今回試作した撮像系での撮像幅は8mmであったので、深さ方向に2mmずつ光学系を移動させて撮像し、合計30mmの範囲の重ね合わせ画像を生成した。そして、重ね合わせ前の画像と重ね合わせ画像のそれぞれに対し気付きアルゴリズムによる傷検出を行い、レンズの傷とサンプルの傷がどのように検出されるかを比較した。

4.2 実験結果

図9に、重ね合わせ前の撮像画像に対して気付きアルゴリズムを施し欠陥を検出した結果の画像を示す。図9(a)は処理前の短冊状画像、図9(b)は大域的な輝度ムラを除去した画像、図9(c)は傷の気付き処理による検出結果である。切削加工でのツールマークによるランダムな背景パターンの中から、レンズの傷による欠陥とシリンダ内壁面につけられた傷の欠陥の両方が検

Table 2 Detection results of artificial scratches

Scratch ID	Surface roughness	Scratch size [mm]	Results		
			Proposed method	Binarization Threshold:174	Binarization Threshold:247
1	Rough (Rz: 4.5)	0.24 x 2.3	Found	Found	Found
2		0.15 x 2.3	Found	Not found	Found
3		0.20 x 1.5	Found	Found	Found
4		0.30 x 3.8	Found	Found	Found
noise		-	Not found	Not found	Found
5	Fine (Rz: 1.5)	0.26 x 2.8	Found	Found	Found
6		0.16 x 2.0	Found	Not found	Found
7		0.30 x 3.5	Found	Found	Found
noise		-	Not found	Not found	Found

出されていることが分かる。なお、入力短冊状画像のサイズは3300×130画素、傷の気付き処理における格子サイズは5～15画素範囲で、位相とサイズを1画素毎で変化させた。

図10に、重ね合わせ後の撮像画像に対して気付きアルゴリズムを施し欠陥を検出した結果の画像を示す。図10(a)は重ね合わせ画像の一部(3300×260画素分)、図10(b)は大域的な輝度ムラを除去した画像、図10(c)は傷の気付き処理による検出結果である。図9と異なり、検査対象であるシリンダ内壁面の傷だけが検出されていることが分かる。なお、気付き処理のパラメータは図8の時と同様である。

また参考のため、図10(b)を2値化した結果を図11に示す。図11(a)のようにしきい値を下げると微細な傷が検出されなくなり、図11(b)のようにしきい値を上げるとツールマーク等のランダムな背景ノイズが過検出される。それに対し図10(c)では過検出することなく微細な傷までを検出できている。

以上の実験結果から、画像の重ねあわせを行う事によりレンズの傷の過検出を抑制することが可能で、気付きアルゴリズムを適用することにより切削痕のツールマークによるランダムな背景ノイズの中から安定して傷を検出できることを確認した。これにより撮像光学系の画像の重ね合わせと気付きアルゴリズムを組み合わせた検査方法の有効性が確認された。開発した検査光学系による撮像と気付き処理による傷の検出実験を行った結果を表2にまとめて示す。提案方法では、表面の粗さに関わらず、レンズの傷やツールマークを過検出することなく検出す

べきサイズの傷を検出することができた。一方、単純なしきい値による2値化では、しきい値が大きいと小さい欠陥が見逃され、しきい値が小さいとツールマークを過検出してしまった。

5. 結 言

自動車用の金属円筒状部品の内壁面検査光学系と気付きアルゴリズムによる検査法において、光学系の傷や汚れと対象物の傷を区別して検出する方法を考案し、限度見本サンプルを用いた実験によりその方法の有効性を確認した。今後は、本方式の実用化へ向けた実サンプルへの適用評価を行っていく予定である。

参 考 文 献

- 1) 松井, 山下, 金子: 全方位レーザ・全方位カメラから成るレンジファインダの自己位置推定と配管の3次元モデル生成, 電学論, **130**, 9 (2010) 1504.
- 2) 亀本, 南部, 狩場, 中西, 山田, 高森, 橋本, 森田, 渡辺: クリーン鋼管内面傷の光学自動検査技術の開発と実用化, ビジョン技術の実利用ワークショップ VIEW2014, OS1-H1 (2014).
- 3) 江崎: 半導体レーザを使用したキズ検査装置のインライン活用, 検査技術, **16**, 12 (2011) 64.
- 4) 長嶋, 塚田: 金属平板傷検査のための落射照明光学系の開発, ビジョン技術の実利用ワークショップ VIEW2012, OS4-H7 (2012).
- 5) 青木, 舟橋, 興水, 三和田: 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.