

## 曲面上の微小な凹凸を自動検出する光学検査技術

Optical Inspection Technologies to Automatically Detect Microdefects on Products with Curved Surfaces

加納 宏弥 KANO Hiroya 大野 博司 OHNO Hiroshi 岡野 英明 OKANO Hideaki 大野 啓文 OHNO Akifumi

製造工程の外観検査では、光学撮影技術を用いた自動化が進んでいる。しかし、曲面上の微小な凹凸は、従来の光学撮影技術では検出が難しく、熟練技術者の目視検査に頼ることが多い。

東芝グループは、ストライプ状の多色カラーフィルターと放射状に広がる照明光を用いて、曲面上の凹凸を画像の色の急峻(きゆうしゅん)な変化として捉える光学系を開発した。更に、色の急峻な変化を抽出することで、凹凸を自動検出する画像処理手法を開発した。これらを組み合わせた光学検査技術を、曲面形状の自動車用部品に適用して実証実験した結果、曲面上にある高低差数十 $\mu\text{m}$ の微小な凹凸が自動検出できることを確認した。

To improve productivity in the manufacturing industry, demand has grown in recent years for optical imaging technologies that can automatically detect the microdefects on curved surfaces of products via nondestructive inspection. However, visual inspection work often must be carried out by a limited number of skilled engineers because it is difficult for conventional optical imaging technologies to detect microdefects on curved surfaces.

The Toshiba Group has developed the following two technologies as a solution: (1) an optical system using both a stripe-patterned multicolor filter and radially diffusing illumination light, which can capture microdefects on curved surfaces as drastic color changes in the image, and (2) an image processing technique to automatically detect the microdefects by extracting drastic color changes through spatial differential processing. The results of tests applying these technologies to an automotive part with curved surfaces confirmed that the new optical imaging technologies can automatically detect the microdefects with a depth of several tens of micrometers on curved surfaces.

### 1. まえがき

製造工程において、製品表面の傷や凹凸といった欠陥の有無をチェックする外観検査は、必須かつ重要な作業である。検査にあたっては、製品外観の画像を撮影し、画像処理で製品表面の欠陥を検出する手法が有効と期待される。しかし、検出したい凹凸の高低差が数十 $\mu\text{m}$ 以下と微小な場合、明暗のコントラストが得にくいために、一般的なカメラをそのまま用いる従来の光学系での撮影では、検出が難しい。そのため、微小欠陥の検査は、熟練技術者の目視による官能検査に頼ることが多い。特に、我が国では少子高齢化が進み、労働人口減少による熟練技術者の不足が深刻化しており、製造工程の自動化・デジタル化による生産性向上が社会的な課題となっている。

東芝グループは、多色カラーフィルターで光の方向分布を色情報に変換し、撮影する光学技術を開発してきた<sup>(1)–(5)</sup>。この技術により、微小な欠陥を、画像の色の変化として捉えられる。実際、平らなプラスチック板の表面にある深さ3 $\mu\text{m}$ 程度の微小な傷を、1回の撮影で鮮明な色変化として捉えられることを実証した<sup>(1)</sup>。しかし、対象物の表面が曲面である場合には、照明の方向を変えるなど、曲面形状に合わせて

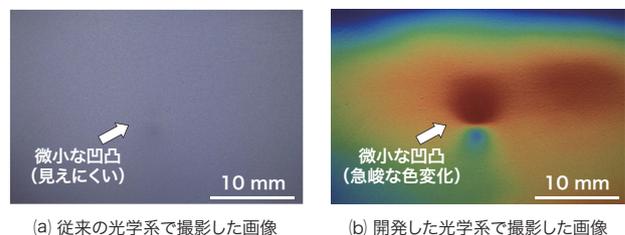


図1. 開発した光学系による微小な凹凸の撮影画像

従来の光学系では写すことが難しかった曲面上の微小な凹凸を、画像の急峻な色変化として捉えられる。

Images captured by conventional and new optical imaging systems prior to image processing

撮影条件を適正化する必要があった。

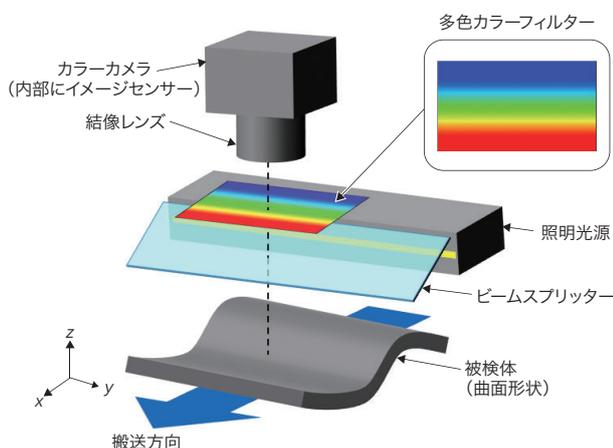
そこで、先行研究<sup>(1)–(5)</sup>での提案に工夫を加えた光学系を開発し、曲面形状を持つ対象物にも適用可能にした。この光学系を用いれば、緩やかな曲面は画像の緩やかな色変化として捉え、かつ、微小な凹凸(ここでは高低差数十 $\mu\text{m}$ の凹凸も微小とみなす)の各点で生じた反射光の方向変化は画像の急峻な色変化として捉えられる。これによって、曲面と微小な凹凸とを区別して撮影できるようになった(図1)。更に、複数の撮影画像の中から、微小な凹凸の有無や位

置を自動的に判定して表示する画像処理手法を開発した。これらを組み合わせた光学検査技術により、曲面上の高低差数十 $\mu\text{m}$ の凹凸を自動検出できるようになった。

ここでは、開発した光学系や画像処理手法と、試作機による実証実験の結果について述べる。

## 2. 光学系の基本構成と凹凸を検出する仕組み

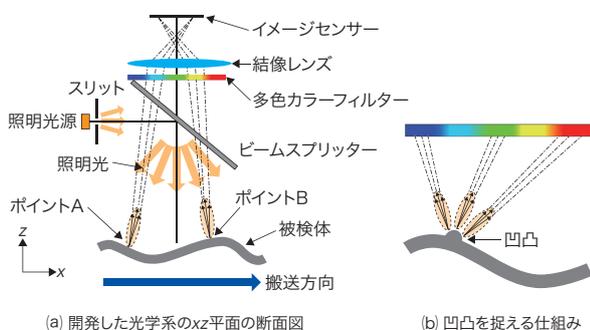
開発した光学系の構成を、**図2**に示す。基本的な構成要素は、カラーカメラ(イメージセンサーと結像レンズ)、多色カラーフィルター、照明光源、ビームスプリッターである。被検体は1軸の自動ステージ上に配置し、**図**示した方向に搬送する。照明光源からの照明光を搬送中の被検体に照射し、被検体からの反射光を多色カラーフィルター越しに



**図2. 開発した光学系の構成**

ストライプ状の多色カラーフィルターと、ライン型の照明光源を用いて構成することが特徴である。

Configuration of new optical imaging system



**図3. 曲面上の微小な凹凸を検出する仕組み**

曲面形状は緩やかな色変化として捉え、かつ、微小な凹凸は急峻な色変化として捉えられる。

Mechanism for detecting microdefects on curved surfaces

カラーカメラで順次撮影する。この光学系は、カラーフィルターの配色パターンをストライプ状にしたことと、ライン型の照明光源を用いたことが特徴である。ここで便宜的に、カメラの光軸方向を $z$ 軸、被検体の搬送方向を $x$ 軸、 $xz$ 平面に直交する方向を $y$ 軸と定義する。

次に、この光学系で微小な凹凸を検出する仕組みを説明する。**図3(a)**は光学系の $xz$ 平面の断面図であり、**図3(b)**には被検体表面の微小な凹凸を捉える仕組みを模式的に示す。**図3(a)**のように、照明光源は直後にスリットを設けており、スリットの間隙から光が放射状に拡散する。この照明光を、ビームスプリッターを介して被検体に照射する。ここで重要なのは、被検体上の1点にはある一つの方向の光だけが照射されるということである。被検体で生じる正反射光の方向は、照明光の方向と被検体表面の傾斜角度によって決まるある特定の方向になる。特に、被検体表面が平滑である場合には、反射光は狭い方向分布を持つ。このような狭い方向分布を持つ反射光は、多色カラーフィルターのある狭い領域内を通過してカラーカメラで撮影される。例えば、**図3(a)**中のポイントAは、反射光が多色カラーフィルターの水色に近い領域を通過するため、画像には水色に近い色で写る。同様に、ポイントBは黄色に近い色で写る。このように、この光学系では、被検体の傾斜角度に応じて決まる反射光の方向情報を、画像の色情報として捉える。

**図3(b)**のように、被検体表面に微小な凹凸がある場合、反射光の方向は表面の傾斜角度に依存するので、凹凸の各点間での傾斜角度の急峻な変化に従って、反射光の方向も凹凸近傍で急峻に変化する。そのため、この光学系では、微小な凹凸を画像の色の急峻な空間的变化として捉えられる。

ここで、この光学系が曲面形状の被検体にも適用できることを説明する。**図3(a)**に示す $xz$ 平面内の被検体表面が曲面である場合、被検体の位置や傾斜角度によっては反射光が結像レンズに入らないことがある。そこで、被検体を $x$ 方向に搬送しながら順次撮影する方式を採用した。これによって、カメラの画角で決まるある範囲内の傾斜角度を持つ表面は、複数の撮影画像のいずれかに必ず写り、被検体が曲面であっても、表面の微小な凹凸を捉えることができるようにした。

## 3. 凹凸を自動検出する画像処理手法

被検体を搬送しながら複数の画像を撮影すると、1枚1枚の画像にはそれぞれ被検体の一部が写り、更に、凹凸近傍ではそのほかの正常な領域とは異なる色変化が生じる。開発した光学系に特有のこのような画像セットから、凹凸を自

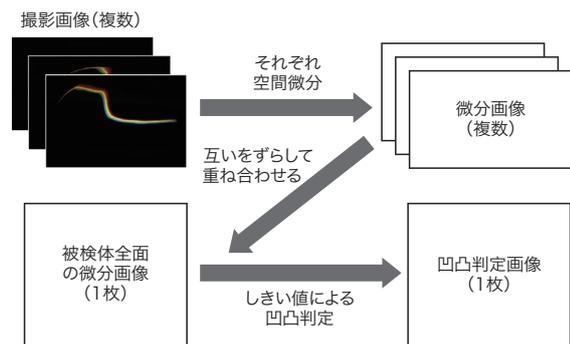


図4. 画像処理フロー

複数の撮影画像をそれぞれ空間微分し、それらをずらして重ね合わせることで、被検体の全面にわたって検査できる。

Image processing

動検出し、複数の画像から被検体の元の姿が把握できる1枚の画像を再構成する画像処理手法を開発した。

図4に、開発した画像処理フローを示す。一般に、画像内の急峻な空間的变化を捉える手法として、画像の空間微分がある。この光学系で得られる画像では、凹凸近傍が急峻な色変化として写るため、画像の空間微分が凹凸を検出する有効な処理の一つであると考えられる。

まず、撮影画像1枚1枚に対して空間微分を施すことにより、急峻な色変化が生じた領域を抽出する。得られた微分画像は、凹凸近傍に特に強い信号が現れる。しかし、得られた複数の画像のそれぞれには被検体の一部しか写っていないため、被検体全面の処理結果を一度で把握できない。そこで、次に、これらの画像を1枚の画像にまとめるための処理を施す。具体的には、 $N$ 枚目の画像に対して $N+1$ 枚目の画像を、2枚の撮影の間に被検体が画像上を動いた距離だけ搬送方向と逆方向にずらして、微分画像の画素値の絶対値を足し合わせる。このようにすると、微分処理によって得られた凹凸の信号を重ね合わせながら、被検体全面の微分画像を再構成できる。最後に、被検体全面の微分画像に対して明るさのしきい値を設定し、そのしきい値以上になった領域が凹凸であると判定する。

この画像処理手法により、開発した光学系で撮影した複数の画像から、微小な凹凸が写る位置を自動検出できる。

#### 4. 曲面上の凹凸に対する自動検出の実証実験

実証実験に用いた試作機の構造と被検体を、図5に示す。ライン型の照明光源の長手方向長さは約300 mmであり、発光面の直後にスリットを設けた。結像レンズの焦点距離は35 mmとした。被検体には、自動車向けに市販されている給油口カバーを用いた。被検体は円に近い楕円(だ

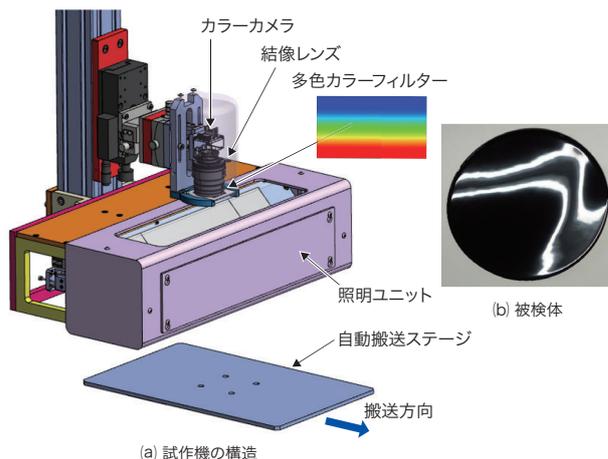


図5. 試作機の構造と被検体

照明ユニットは、ライン型のLED(発光ダイオード)光源とビームスプリッターで構成した。被検体は、自動車用の給油口カバーである。

Outline of prototype optical imaging system and test sample

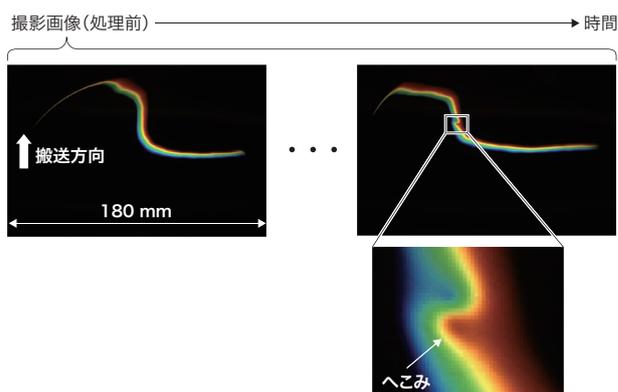


図6. 搬送しながら撮影した被検体の処理前の画像

深さ約40  $\mu\text{m}$ のへこみが、周囲の正常な部分に比べて急峻な色変化として写っている。

Images of test sample being conveyed prior to image processing

えん)形であり、直径は約180 mmであった。表面は塗装された滑らかな曲面であり、その傾斜角度は $10^\circ$ 以下であった。被検体表面には微小な凹凸が複数ある。このうちの一つをスキャン方式の白色干渉計で、数分間掛けて測定したところ、深さが約40  $\mu\text{m}$ のへこみであった。以下では、このへこみの自動検出結果を示す。

実際の撮影画像を、図6に示す。複数の画像の中からへこみ近傍が写る画像を含めた2枚を図の上段に示した。画像の横方向の視野は約180 mmであり、被検体の搬送方向は画像の上方向である。それぞれの画像を見ると、被検体の一部が、その表面の曲面形状に応じて帯状に明るく写り、かつその部分はカラーフィルターの配色パターンに基づ

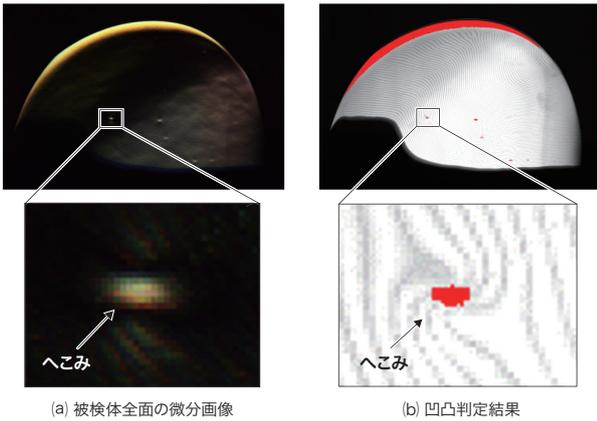


図7. 画像処理結果

注目しているへこみを自動検出できた。

Images of test sample after image processing

いた色が付いている。ここで、右側の画像を見ると、へこみ近傍では周囲に比べて急峻な色変化が生じている。このことから、注目している数十 $\mu\text{m}$ の凹凸を、画像の急峻な色変化として鮮明化できることが分かった。

図7に、複数の撮影画像に対して画像処理手法を施した結果を示す。図7(a)は、被検体全面の微分画像であり、注目しているへこみ近傍が周囲に比べて明るく写っている。また、これ以外にも、同程度に明るく写る領域が複数あった。図7(b)は、凹凸判定結果である。凹凸と判定された領域を赤色で、それ以外の領域は撮影画像の明るさをモノクロ化して表示した。この結果から、注目しているへこみを正しく判定できたことが分かる。それ以外の複数の明るい領域も、同程度の凹凸であった。

これらの結果から、開発した光学系及び画像処理手法によって、曲面上に存在する深さ40 $\mu\text{m}$ の凹凸が自動検出できることを確認した。

## 5. あとがき

ストライプ状の多色カラーフィルターと、放射状に広がる照明光とを備えた光学系を開発し、曲面上の微小な凹凸を、画像の色の急峻な変化として鮮明に捉えられるようになった。更に、色が急峻に変化している領域を空間微分で自動検出し、被検体全面の検出結果を1枚の画像として表示する画像処理手法を開発した。これらを組み合わせた光学検査技術を曲面形状の被検体に適用した結果、曲面上の高低差数十 $\mu\text{m}$ の凹凸を自動検出できた。この技術は、高低差10 $\mu\text{m}$ 以下も自動検出できるポテンシャルがあり、実証を進めている。

この光学検査技術を、従来の撮影技術では実現できな

かった検査にも適用し、製造工程の自動化・デジタル化による生産性向上に貢献していく。

## 文献

- (1) 大野博司, ほか. 微小欠陥を瞬時に鮮明な画像にできる撮像技術. 東芝レビュー. 2021, **76**, 6, p.38-41. <<https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/jp/technology/corporate/review/2021/06/f03.pdf>>, (参照 2024-08-22).
- (2) Ohno, H. One-shot color mapping imaging system of light direction extracted from a surface BRDF. OSA Continuum. 2020, **3**, 12, p.3343-3350.
- (3) Ohno, H. One-shot three-dimensional measurement method with the color mapping of light direction. OSA Continuum. 2021, **4**, 3, p.840-848.
- (4) Ohno, H.; Kamikawa, T. One-shot BRDF imaging system to obtain surface properties. Opt. Rev. 2021, **28**, p.655-661.
- (5) Ohno, H.; Kano, H. BRDF color mapping using line scan camera. Opt. Rev. 2023, **30**, p.486-492.



加納 宏弥 KANO Hiroya  
研究開発センター 知能化システム研究所  
機械・システムラボラトリー  
日本光学会・日本機械学会会員  
Mechanical Systems Lab.



大野 博司 OHNO Hiroshi, Ph.D.  
研究開発センター 知能化システム研究所 機械・システムラボラトリー  
博士(理学) 日本光学会・応用物理学会・画像電子学会・精密工学会・Optica・SPIE会員  
Mechanical Systems Lab.



岡野 英明 OKANO Hideaki  
研究開発センター 知能化システム研究所  
機械・システムラボラトリー  
日本光学会会員  
Mechanical Systems Lab.



大野 啓文 OHNO Akifumi  
東芝情報システム(株)  
エンベデッドシステム事業部 エンベデッドシステム営業技術部  
Toshiba Information Systems (Japan) Corp.