光の方向をカラーマッピングして 微小形状を瞬時に測る3次元計測技術

Method for Instant Measurement of 3D Microdefect Shapes Using Optical Imaging System Capable of Color Mapping of Light Direction

大野 博司 OHNO Hiroshi

様々な製造工程で加工中又は加工後の製品表面の3次元形状を,撮像装置で取得した複数の画像から算出し,非接触で 外観検査を行う方式が広く普及している。しかし,従来の撮像方式では,製品表面のミクロンサイズの微小形状を鮮明な画 像にすることが難しく,形状識別ができなかったり,見落としたりするという問題があった。

そこで東芝は、微小形状からの反射光の方向成分をカラーマッピングして鮮明な画像を取得し、その1枚の画像から3次 元形状を算出する技術を開発した。試作機による実験で、微小な3次元形状を瞬時に計測できることを確認した。

Non-contact inspection methods to measure the three-dimensional (3D) surface shapes of products by means of calculations using multiple images captured by cameras have become widely disseminated in a variety of manufacturing processes, either during or after the processing of products. However, as it is difficult to obtain clear images of microdefects on the surfaces of products using conventional optical imaging technologies, there is a possibility that the shapes of microdefects might not be distinguished or that they might be overlooked.

To address this issue, Toshiba Corporation has developed a method to calculate the 3D surface shapes of microdefects through color mapping of the directions of light reflected from the microdefects using a clear image obtained by a newly developed one-shot optical imaging system. From the results of experiments using a prototype imaging system, we have confirmed that this method makes it possible to instantly measure the 3D surface shapes of microdefects, including those of minute scale.

1. まえがき

様々な製造工程で、加工中や加工後の製品の3次元形 状を、撮像装置で取得した複数の画像から算出し、製品の 外観検査を非接触で行う方式が広く普及している。3次元 計測技術として、物体表面にレーザーで細い線を投射し、 それを走査しながら連続的に複数の画像を撮像装置で取得 し、画像における投射線の変形具合から3次元形状を算出 する光切断法がある。ほかに、物体表面に様々な周期のし ま模様を投射して撮像画像を次々に取得し、それらの画像 を解析して3次元形状を求めるしま投影法もある。しかし, 製品表面の微小形状は、特にミクロンサイズになると従来の 撮像技術では明暗のコントラストが小さく、鮮明な画像が取 得できなかった。そのため、微小欠陥を見落としたり、微小 欠陥の形状を精度良く識別できなかったりするという問題が あった。また、計測時間の短縮は生産性の向上につながる ため、できるだけ高速に3次元形状を取得できる技術が望 まれている。

そこで、物体表面で反射された光の方向成分から3次元 形状を求める手法を定式化し、光の方向成分をカラーマッ ピングできる撮像技術を用いて、微小形状を短時間に3次 元計測する技術を開発した。



図1. 法線の方向と反射光方向の関係 入射光の方向が既知の場合,正反射光の方向を測定することで法線を求め られる。

Geometric relationship between surface normal direction and reflected light direction

ここでは、光の方向成分から3次元形状を算出する手法 と、1枚の撮影画像から光の方向成分をカラーマッピングす る撮像技術について述べる。更に、試作機による撮影画像 を用いて、3次元形状が瞬時に算出できることを確認した。

2. 3次元形状の計算手法

物体表面の3次元形状は,表面の法線方向分布が取得 できれば再構築できる。そこで,物体表面で反射された光 の方向から法線方向を求め,3次元形状を計算する手法を 構築する。

物体表面からの反射光は,多くの場合,正反射成分ある いはその近傍の強度が大きい。特に,物体表面が鏡面に近 くなると,反射光はほぼ正反射成分だけとなる。正反射光 の方向は,図1に示すように,物体表面の点(以下,物点 と略記)に入射する光の方向と表面の法線の方向が張る平 面(入射面)上となる。法線方向は入射角と反射角が等し くなるように定まる。これにより,入射光の方向が既知の場 合,正反射光の方向が測定できれば法線方向を定めること ができる。

ここで、物点の位置を(x, y, h)としたとき、高さhがx, yの関数として定まれば物体表面の3次元形状が求まる。また、物体表面の法線方向は、hの空間偏微分として表すことができる。そこで、法線の方向と正反射光の方向の関係を用いると、hと正反射光の方向成分(x方向成分 θ_x, y 方向成分 θ_y)との関係を表す偏微分方程式(1)が導出できる^{(1),(2)}。

$$\nabla h(x, y) = -\frac{1}{2} \begin{pmatrix} \theta_x \\ \theta_y \end{pmatrix}$$
(1)

この式(1)は、高速フーリエ変換(FFT; Fast Fourier Transformation)を適用して、高速計算が可能である。つまり、光の方向の2成分 θ_x 、 θ_y から、3次元形状を瞬時に計算できる。

また,対象領域の周辺が平たんならば,光の方向の1成 分だけを使って3次元形状を計算できる。すなわち,hは式 (1)から次のように求まる。

$$h(x, y) = -\int_{x_0}^{x} \frac{\theta_x(x', y)}{2} dx'$$
(2)

ここで、 $x=x_0$ を周辺の平たん部とし、そこでのhを0とした。式(2)も、簡単な四則演算に帰着し、計算の並列化が可能であるため、高速に計算できる。これにより、物体表面のhが光の1方向の成分から瞬時に求まる。

これらから,光の1方向成分を取得できる光学系が構築 できれば,3次元形状が測定できることが分かる。

3. 光の方向成分をカラーマッピングする撮像技術

反射光の方向成分は、BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function)と呼ばれる分布関数を用いて記述できる⁽³⁾。このBRDF情報を1枚の画像から取得できるワンショットBRDF光学系を用いて、反射光の方向成分を測定する。この撮像技術⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾で微小形状を撮像すると、**図2**の右のように光の方向成分に応じて色が変化するカラーマッピング画像が取得できる。これにより、従来の3次元計測技

術では明暗のコントラストが付きにくい微小形状に対し,周 囲とは異なる色で鮮明な画像にすることができる。そのため, ミクロンサイズの微小な3次元形状でも瞬時に精度良く計測 できるようになった。

図3に、ワンショットBRDF光学系の模式図を示す。この 光学系は、照明光学系と撮像光学系で構成され、ストライ プ状の多波長開口(同一面にストライプ状の異なる波長透 過領域を持つフィルター)を備えるところに特徴がある。

照明光学系は、白色のLED(発光ダイオード)を光源と し、光源からの光を照明レンズ⁽⁸⁾⁻¹²⁾で平行光に変換する。 更に、ビームスプリッターを介し、z軸に沿って被検物に平 行光を照射する。平行光を被検物に照射することで、被検 物の表面の各点において、BRDFの基準となる入射方向を



図2. 開発した撮像技術による光の方向成分のカラーマッピング ワンショットBRDF光学系で、光の方向成分をカラーマッピングできる。 Color mapping of light direction using newly developed optical imaging system



図3. ワンショットBRDFの光学系の模式図

ここで用いるワンショットBRDF光学系は、ストライプ状の多波長開口を用いることが特徴である。

Schematic cross-sectional view of one-shot bidirectional reflectance distribution function (BRDF) optical imaging system

般

論

文





全撮像面にわたってそろえることができる。

撮像光学系は、結像レンズ、イメージセンサー、及びス トライプ状の多波長開口で構成される。結像レンズは、光 軸をz軸、焦点距離をfとし、被検物の表面の物点で反射 された光をイメージセンサー上の像点に集める。

多波長開口は結像レンズの焦点面に配置し、y軸方向に 対して色が一定となるようにする。このような構成の下で、 物点から光軸に平行に伝搬する光線は、多波長開口の原 点O(図3で緑色の領域)を通過するようになる。一方、物 点から光軸に対して斜めに伝搬する光線は、多波長開口上 において、原点Oから離れた位置(a, b)を通過する。また、 多波長開口を通過した領域に応じ、互いに異なる波長スペ クトルを持つ光になる。ここで、xz平面に光線を投影したと き、 θ_x は、光軸に対する傾斜角であり、多波長開口の通過 位置のx座標であるaを焦点距離fで割った値として求まる。 このとき、図4に示すように、光線は θ_x に応じて異なる色に なる。このような θ_x と色の関係は、物点の位置に依存しな い。そのため、取得した撮像画像の全画素において、光の 方向成分 θ_x を色で識別できる。

4. 3次元計測技術の実験による検証

2章の計算手法と3章の撮像技術を用いれば,1枚の画像 から微小形状の3次元形状を計測できる。これを実験的に 確かめるために、ワンショットBRDF光学系を試作し、微小 形状サンプルの3次元形状を実測した。また、被検物のサン プルとして、リッジ状の微小凸形状をアルミニウム板に切削 加工で作成した。この微小リッジは、加工時の設計寸法とし て、幅が2mm、高さが40 µmのミクロンサイズとした。

図5に、照明光学系と撮像光学系を一体にした試作機を 示す。結像レンズは焦点距離を105 mmとし、平行照明の 発散角は0.15°とした。多波長開口はストライプ状とし、青 から赤に22段階で色相が変化するものを作成した。

図6に、この試作機で撮像した未処理画像を示す。この図



図5. ワンショットBRDFの試作機

撮像光学系と照明光学系を一体にして、ワンショットBRDFを作成した。 Prototype one-shot BRDF optical imaging system





から、微小リッジの法線方向の傾きがx軸方向に沿って変化 することが分かる。また、各画素の色相(hue)から θ_x を全 画素にわたって算出できる。図7に算出した結果を示す。

図8に、図7で示した光の方向成分から式(2)を用いて3 次元形状を計算した結果の斜視図を示す。高さは色等高線 を用いて示した。

図9の左にこの3次元形状の上面図と線分a-a'を示す。 また、図9の右に、線分a-a'上の高さをプロットし、白色 干渉顕微鏡で実測したものと比較した。白色干渉顕微鏡は ナノオーダーでの高精度な測定が可能であり、線分a-a'と その近傍の高さをスキャンしながら測定した。この図から、 二つの測定結果は最大約4.6%の誤差で良く一致すること が分かる。



図7. 微小リッジに対する θ_xの算出結果

図6の各画素の色相(hue)から、微小リッジに対する光の方向成分を算出した。

Result of calculation of components of light direction (θ_{x}) reflected from microridge







図9. 微小リッジの断面プロット

開発した3次元形状計測技術による計測結果は、白色干渉顕微鏡による計 測結果と、最大約4.6%の誤差で良く一致することを確認した。

Calculated cross-sectional shape of microridge

このように,開発した3次元計測技術で,微小な3次元 形状を高精度に測定できることを確認した。

5. あとがき

光の方向をワンショットでカラーマッピングして撮像画像に し、その1枚の画像から微小な3次元形状を瞬時に測る3 次元計測技術を開発した。また、試作機を用いた実験によ り、ミクロンサイズの高さを持つ微小な3次元形状を瞬時に 精度良く計測できることを確かめた。

この3次元計測技術は、製品の外観検査における微小 欠陥の計測や、その形状識別に有効である。また、例えば レーザー溶接における溶融金属の形状確認など、製品加工 中の外観モニタリングにも活用できる。今後、様々な製造工 程の外観検査に、この技術を適用していく。

文 献

- Ohno, H. One-shot three-dimensional measurement method with the color mapping of light direction. OSA continuum. 2021, 4, 3, p.840–848.
- (2) Ohno, H.; Toya, K. Localized gradient-index field reconstruction using background-oriented schlieren. Applied Optics. 2019, 58, 28, p.7795-7804.
- (3) Nicodemus, F. E. Directional Reflectance and Emissivity of an Opaque Surface. Applied Optics. 1965, 4, 7, p.767–775.
- (4) 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 2022-03-04).
- (5) Ohno, H.; Kamikawa, T. One-shot BRDF imaging system to obtain surface properties. Optical Review, 2021, 28, 6, p.655– 661.
- (6) Ohno, H. One-shot color mapping imaging system of light direction extracted from a surface BRDF. OSA continuum. 2020, 3, 12, p.3343–3350.
- (7) Ohno H.; Kano H. Depth reconstruction with coaxial multiwavelength aperture telecentric optical system. Optics Express. 2018, 26, 20, p.25880–25891.
- (8) Ohno, H. Symplectic ray tracing based on Hamiltonian optics in gradient-index media. Journal of the Optical Society of America A. 2020, **37**, 3, p.411–416.
- (9) Ohno, H.; Usui, T. Points-connecting neural network ray tracing. Optics Letters. 2021, 46, 17, p.4116–4119.
- (0) Ohno, H.; Usui, T. Gradient-index dark hole based on conformal mapping with etendue conservation. Optics Express. 2019, 27, 13, p.18493–18507.
- Ohno, H. Design of a coaxial light guide producing a wide-angle light distribution. Applied Optics. 2017, 56, 14, p.3977–3983.
- (12) Ohno H.; Kato, M. Total internal reflection shell for lightemitting diode bulbs. Applied Optics. 2019, 58, 1, p.87–93.



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・OSA・SPIE・応用物理学会会員
Mechanical Systems Lab.