

画像計測・検査装置のための微細画像処理技術の開発

飯島 俊匡, 岡崎 伸哉, 橋場 参生, 高橋 裕之

Development of the Microscopic Image Processing Technique for Measurement and Inspection Apparatus

Toshimasa IIJIMA, Shinya OKAZAKI, Mitsuo HASHIBA, Hiroyuki TAKAHASHI

抄 録

数十 μm から十数mm程度の大きさの物体を対象とした計測や検査技術に関する要望が多く寄せられている。これらの微細な物体を対象として画像計測や検査を行う場合、撮像範囲や焦点の合う範囲が狭くなるなど、一般的な大きさの物体を対象とした場合に比べて、計測や検査に適した画像を取得することが難しい。また、既存装置としてデジタルマイクロスコープなどの高性能な機器があるが、コスト等の問題からフィールドへの持ち込みや検査システムへの組み込みは困難である。そこで本研究では、産業廃棄物の含有成分識別検査や小型部品外観検査などに適用可能な、微細画像処理技術に関する技術開発を行ったので報告する。

キーワード：画像処理, 微細画像, アスベスト, 外観検査装置

Abstract

There are many requests from our customers about inspection and measurement technology for the small object of several tens μm -several mm. In the case of those small objects, it is difficult to obtain the good images for image inspection and image measurement because imaging region and range in focus is narrow. In addition, a high performance measurement equipment such as digital microscope is quite expensive so it is difficult to integrate into the inspection systems or bring to working sites. In this study, we developed microscopic image processing techniques for inspection to identify the components of industrial waste and visual inspection apparatus for small objects.

KEY-WORDS : Image Processing, Microscopic Image, Asbestos, Inspection Apparatus

1. はじめに

当場に寄せられる多くの要望の一つに、数十 μm から十数mm程度の大きさの物体を対象とした計測や検査技術に関するものがある。その対象は様々であり、製品や原材料の傷、欠け、割れ等の外観検査、印刷検査、昆虫識別、生体検査、異物混入検査など、多くの産業分野にわたっている。これらの微細な物体を対象とした画像計測や画像検査を行うためには、まず計測や検査に適した画像を取得する必要がある。しかし、対象が小さな場合は倍率の高いレンズを用いて撮像するため、撮像範囲や焦点の合う範囲が狭くなるなど、一般的な大きさの物体を対象とした場合に比べ、計測や検査に適し

た画像を取得することが難しい。

一方、微細な物体を観測するための既存機器としてデジタルマイクロスコープ（図1）などの高性能な機器があるが、検査処理の連続性やコスト等の問題からフィールドへの持ち込みや生産ラインにおける検査システムへの組み込みは困難である。

そこで本研究では、生産ラインの検査システムへの組み込みや、フィールドへの持ち込みが可能であり、安価なレンズやカメラを用いた場合でもデジタルマイクロスコープと同様の機能を実現可能な微細画像処理技術の開発に取り組み、産業廃棄物の含有成分識別検査や、小型部品の外観検査に適用可能な画像計測・検査装置のための基盤技術を獲得したので

事業名：経常研究

課題名：微細画像計測・検査装置に関する技術開発（平成24～25年度）

報告する。



図1 デジタルマイクロスコープ（キーエンス製VHX-1000）

2. 微細画像取得技術

微細な物体を対象として倍率の高いレンズを用いて撮像する場合、同一画角中に撮像できる領域が狭くなる。また、被写界深度（焦点の合う範囲）が浅く、同一画像中に明瞭な部分とぼやけた部分が存在する。これらの問題を解決し、画像計測や画像検査に適した十分な撮像範囲で明瞭な画像を取得するための画像処理技術として、領域合成技術と深度合成技術の開発に取り組んだ。

2.1 領域合成技術

撮像範囲の広い画像を取得するために、パノラマ画像生成等に用いられるイメージモザイクの原理を利用し、複数の画像を継ぎ目なく合成して1枚の大きな画像を生成する領域合成技術を検討した。イメージモザイクには様々な計算方法があるが、ここでは、各画像から特徴点を抽出し、その対応付けを行うことで画像の変形と位置合わせを行い領域合成する手法を適用した。

一般的に画像を用いた検査や計測を行う場合、顕微鏡のステージとレンズの関係のように、対象物が設置される平面とカメラの位置関係は基本的に変わらないように配置する。このとき、カメラがキャリブレーション済み（内部パラメータが既知）で、かつレンズの収差が補正済みであるとする、対象物を移動させて得られる2枚の画像の幾何学的関係は、平行移動、回転、拡大・縮小となる。また、照明からの距離が変化する場合もあるため、明るさも同様であるとは限らない。したがって、画像中の特徴点の対応付けを行おうとした場合、それらに対して頑健な特徴量を利用する必要がある。そこで、今回は特徴量としてSURF¹⁾（Speeded Up Robust Features）を用いた。

SURFはその特徴点に平行移動、回転、拡大・縮小、明るさの変化があっても普遍的な値を持つ特徴量である（図2）。SURFは、画像のエッジの種類を基に特徴点候補を選定して

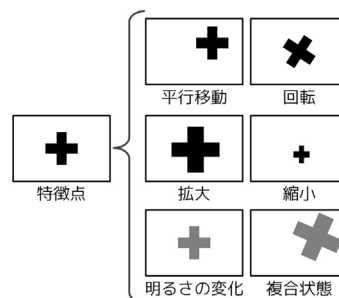


図2 SURFの頑健性

いるため明るさの変化に強く、そのエッジの向きに依存しないようラプラシアンを取っている。さらに、画像の拡大・縮小に対応するため、エッジを判定する領域の大きさを数段階に分けて計算し、エッジの位置と大きさが極値を取る特徴点候補を最終的な特徴点とする。こうすることで、各特徴点は明るさの変化とその向きに依存せず、画像の拡大・縮小に頑健な特徴点となる。

次に、各特徴点の特徴量を算出する。まず、特徴点周辺領域の輝度変位の分布から特徴量を算出する方向を決めることで正規化する。そして、特徴点周辺を正規化した方向に4×4ブロックに分け、各ブロックをさらに4分割して輝度変位の分布を計算することで64次元の特徴量とする。こうすることで画像の回転、平行移動に頑健な特徴量を得る。

このSURFを用いて2枚の画像から特徴点を抽出し、各特徴点が持つ64次元の特徴量から、各特徴点間のユークリッド距離を算出する。そして対応点を一意に求めるため、最も距離が小さい点の距離が、2番目に小さい距離の6割未満であった場合に対応する点とする。図3は2枚の顕微鏡画像に対するSURFとその対応付けの一部を示している。なお、画像を平行移動、回転、拡大・縮小により位置合わせをするために

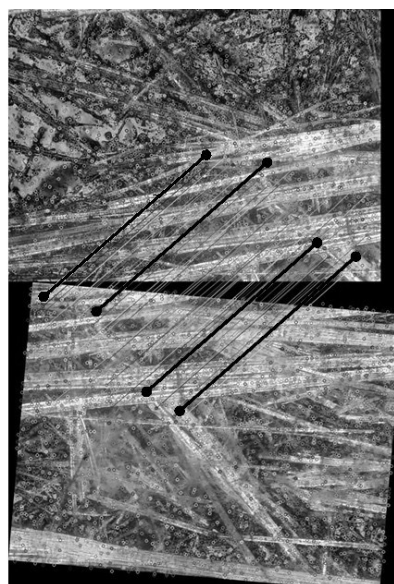


図3 SURFとその対応付け

は、少なくとも3点の対応点が必要であり、SURFの現われないエッジのない平坦な画像では位置合わせは困難である。

本研究では、上記手法を用いて撮像範囲が部分的に重なるよう異なる位置で撮影し、得られた複数枚の画像を自動的に連結して1枚の画像を生成する領域合成ソフトウェアを開発した。実際に2枚の顕微鏡画像に対して領域合成を行った結果、図4で示すように正しく領域合成が出来た。

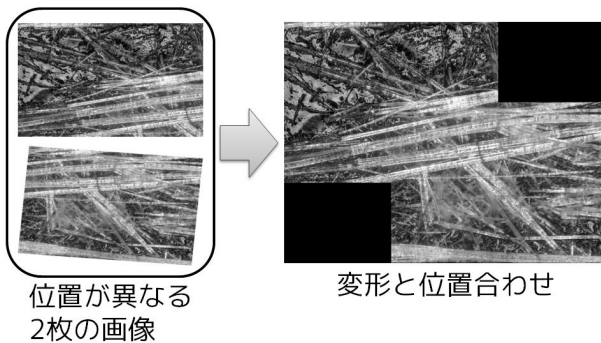


図4 顕微鏡画像の領域合成結果

2.2 深度合成技術

被写界深度が浅い場合、焦点距離を短くするか絞りを絞る、撮影対象物までの距離を長くするなどの光学的な解決方法もあるが、シャッター速度が遅くなったり解像度が下がるといった問題が生じる。そこで、焦点が異なる複数枚の画像を撮影し、画像中の焦点が合った部分を選択して合成することで広範囲に焦点が合った画像を得る深度合成技術について検討した。

焦点が合うということは、合焦部分の境界や模様が鮮明である、つまり近傍のコントラストが高いと言い換えることが出来る。そこで、焦点が異なる複数枚の画像に対して、局所領域内の輝度分散を評価し、極値を持つ焦点距離の画像を選択して深度合成する手法を適用した(図5)。なお、合焦判定を輝度分散の評価で行っているため、輝度変化の少ない画

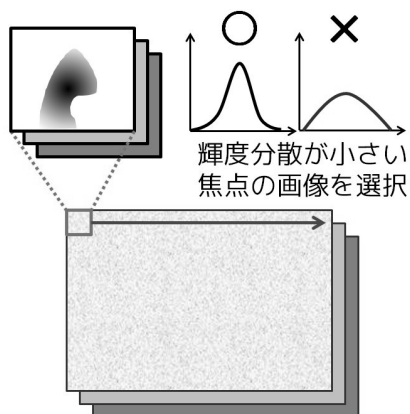


図5 局所領域の輝度分散の評価

像では深度合成は困難である。

図6は、偏光顕微鏡を用いて撮影した焦点の異なる複数枚の画像と、局所領域の輝度分散を評価して得られた合焦領域(図中の白線で囲まれた部分)を示したものである。本研究では、上記手法を用いて広範囲に焦点が合った画像を取得する深度合成ソフトウェアを開発した。実際に偏光顕微鏡を用いて撮影した画像に対して深度合成を行った結果、図7で示すように広範囲に合焦した画像が得られた。

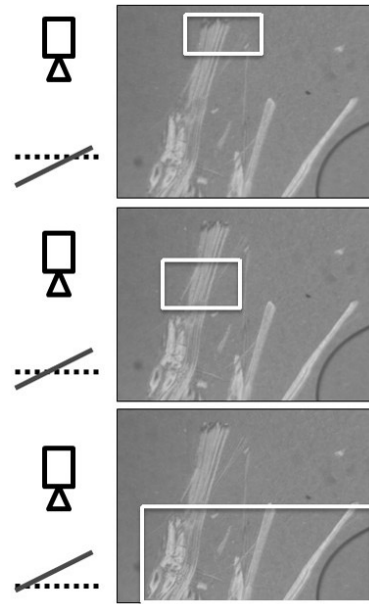


図6 焦点の異なる複数の画像と合焦領域(白線部分)

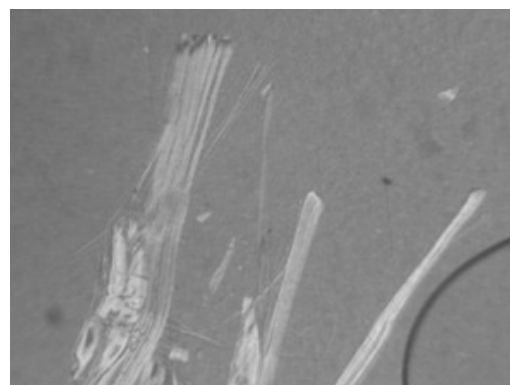


図7 偏光顕微鏡画像の深度合成結果

3. アスベスト識別検査装置の試作

近年、建築物の解体現場において、建築廃材に含まれるアスベスト(図8)の飛散が社会問題化している²⁻³⁾。作業員への被曝や周りの住環境への飛散を防止するために各種法令が定められ、適正な労働環境下で廃棄物の適切な処理が行われている。しかし、現状では建築廃材を専門の分析機関に送付して公定法(JIS A 1481⁴⁾)で定められているアスベ

スト含有判定を行っており、多くの時間とコストがかかっている。そのため、分別の前さばきとしてアスベスト含有の有無を現場で簡易かつ低コストで検査できる装置が求められている。

アスベストの含有検査では、1サンプル当たり50視野以上を観察してアスベスト繊維の数を計数する必要がある。このため、アスベストを識別するための検査装置では、視野内の繊維形状の有無を自動的に認識し、人がアスベストを判別するための補助をする仕組みを搭載することが効果的である。そこで、前節の微細画像取得技術を用いて得られた顕微鏡画像から、エッジ検出とその強度を閾値で判別して二値画像を得、ハフ変換による直線検出を行うことで繊維形状の有無を識別する手法を開発した（図9）。

上記機能を搭載したソフトウェアを製作し、偏光顕微鏡と

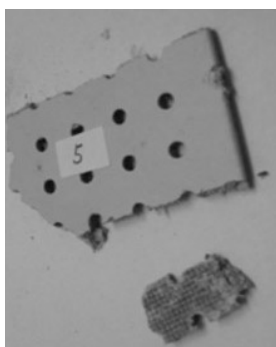
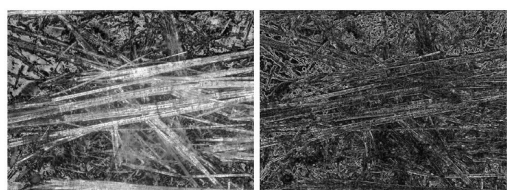
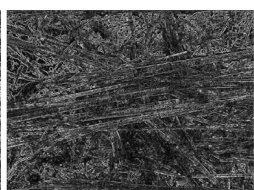


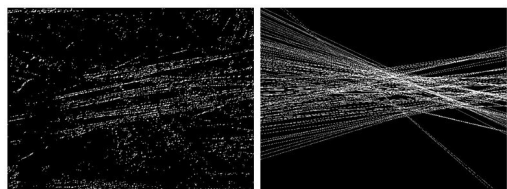
図8 アスベスト含有
建築廃材



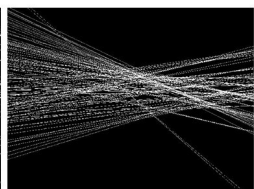
微細画像の取得



エッジ検出



エッジ強度の評価



ハフ変換による直線検出

図9 繊維形状有無の識別



図10 試作したアスベスト識別検査装置

ギガビットイーサネットカメラ（以下、GigEカメラと表記）を用いて、建築廃材に含まれるアスベストを識別するための検査装置を試作した（図10）。

4. 小型部品外観検査技術

微細な小型部品等の外観に生じる欠陥を検出するための技術開発として、ここではミニチュアベアリング（図11）を対象として、打痕や傷などの欠陥を判別する手法の検討を行い、小型部品の外観検査に利用可能な画像計測技術の開発に取り組んだ。



図11 ミニチュア
ベアリング

4.1 打痕判別処理

打痕はなだらかな凹凸である場合が多く、局所的な距離の変化やエッジ画像などを用いて判別するのは難しい。しかし、凹凸の変位が微小であっても鏡面反射に関しては変位に大きく反応する。そこで、測定対象物にライン光を投影し、その鏡面反射光を観測することで、打痕を判別する手法を検討した。ここでは、対象となるミニチュアベアリングのカバー面の形状から、対象物を回転させて鏡面反射光を観測することとした。ライン光の反射図形は、正常部位では矩形となり、不良部位では形状が変化する（図12）。

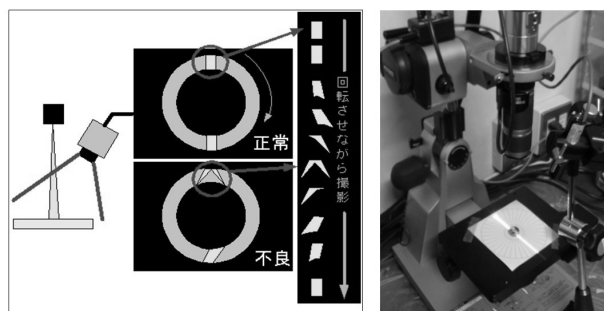


図12 ライン光源を用いた打痕判別手法

反射図形の形状評価は、Haar-like特徴量を用いて評価した。この特徴量は、2つの領域の輝度差に着目することで局所的なエッジ成分や線成分を捉えることができる。ここでは、反射図形の周辺を複数のブロックに分割し、それぞれの組み合わせでHaar-like特徴量を計算して特徴ベクトルとする。得られた特徴ベクトルの相関を算出することで類似度を評価できる。あるサンプルの各部位の類似度を図13に示すと、部位番号5と6で類似度が下がっている。したがってその部位に欠陥があることがわかる。このように反射図形の特徴量を評価することで欠陥検出が可能であることが確認できた。

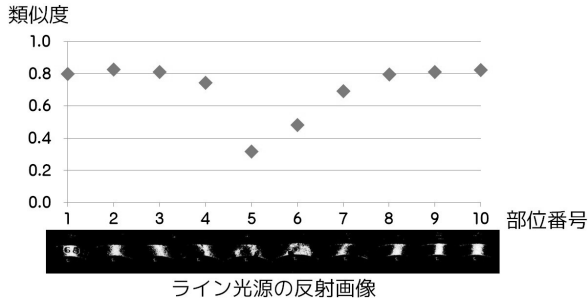


図13 反射図形の形状変化による打痕判別

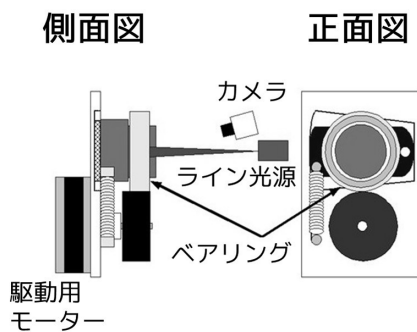


図14 小型部品撮影機構の概念図

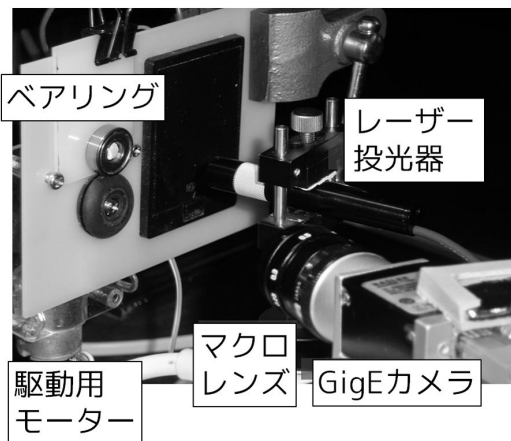


図15 小型部品外観検査の試作機

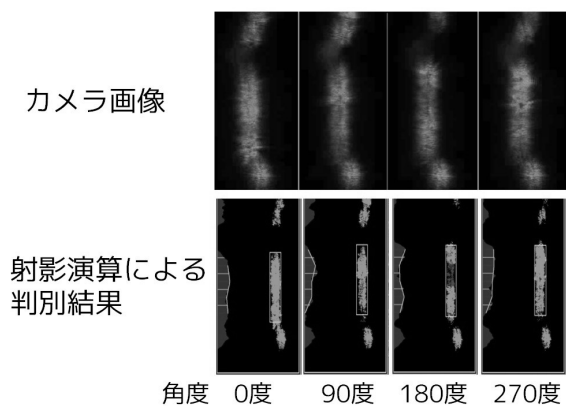


図16 外観検査の試作機から得られた結果

開発した打痕判別処理を用いてレーザー投光器とGigEカメラ、ミニチュアベアリングを回転させる機構からなる小型部品撮影機構(図14)を検討し、試作機を製作した(図15)。

試作した小型部品外観検査装置を用いて、ミニチュアベアリングを計測した結果を図16に示す。カメラ画像だけでは打痕による欠陥の判別は困難であるが、射影演算した結果のプロット(図16下段に示した各角度の図左側)から、角度180度の中心付近に凹みがあることがわかる。このように、画像特徴量として射影演算による判別を行うことで打痕による欠陥が判別可能であることが確認できた。しかし、本試作機では、打痕判別処理により凹みの欠陥は検出可能であったが、傷の欠陥の検出が困難であることが分かった。そこで、傷を検出するための技術開発に取り組んだ。

4.2 傷判別処理

傷は局所的な凹凸がある場合が多く、前節のようなライン光による検出は感度が低く難しい。また、ベアリングのような鏡面を持つ物体の外観検査の場合、鏡面反射光が強くなり、画像による欠陥検出は難しい。そこで、物体表面が鏡面であっても適用可能で、非接触かつ高感度に距離計測が可能な位相シフト法⁵⁾を用いた傷の検出を検討した。

位相シフト法とは、プロジェクタ光源等を用いて測定対象物に位相をずらしながら縞パターンを投影し、カメラで各位相を撮影することで位相分布を算出する。得られた位相分布からは1画素毎に独立して位相値を得ることができ、測定対象物の表面の凹凸を高精度に測定できる手法である(図17)。

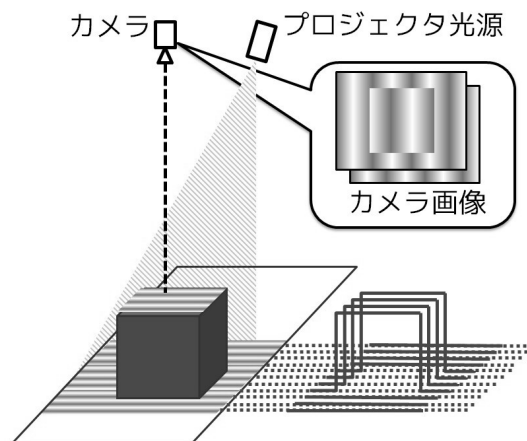


図17 位相シフト法による高さ計測

位相シフト法では、位相を $\pi/3$ ずつずらした縞パターンを3回投影すれば位相分布が一意に求まるが、今回は計算を簡単にするため位相を $\pi/4$ ずつずらした縞パターンを4回投影した(図18左)。各位相の縞パターンを投影して得られた画像の画素 (x, y) における輝度値を $I_1 \sim I_4$ とすると、物体の位相分布 $\theta(x, y)$ は次式で求まる。

$$\theta(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{I_2 - I_4}{I_3 - I_1} \right) \quad (1)$$

しかし、この式(1)で用いられる逆タンジェント関数は一般に多価関数となり、主値域 $-\pi/2 < \theta < \pi/2$ の値として位相値が出力される。つまり位相が主値範囲にたたみ込まれるので、位相値が $-\pi/2 < \theta < \pi/2$ の内部では連続的に変化するが、この範囲をはみ出すたびに不連続に変化する。例えば、測定対象物を置かず、平面に図18左の縞パターンを投影して得られた画像を式(1)で計算すると、図19の様な位相分布画像が得られる。位相分布画像は、垂直方向に輝度が同じラインが同じ位相を示すが、逆タンジェント関数の多価性のため、水平方向には不連続に変化する部分が現われる。

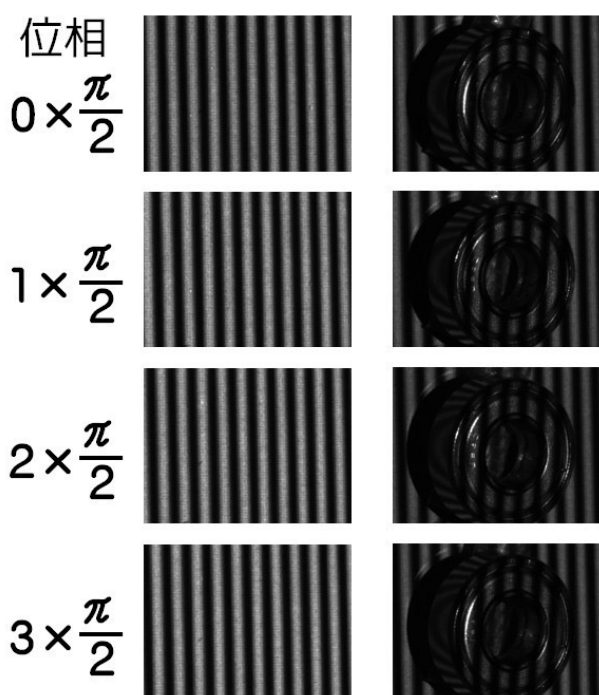


図18 投影した縞パターン（左）と得られた画像 I_n （右）

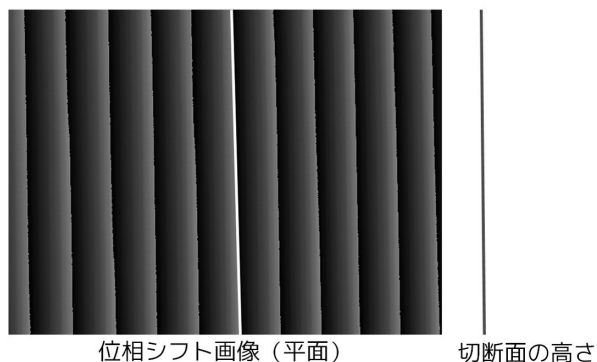


図19 平面の位相シフト画像と切断面の高さ



図20 プロジェクタ光源を用いて縞パターンを投影

計測対象のミニチュアベアリングとプロジェクタ光源、カメラを図20のように配置し、測定して得られた位相シフト画像を図21に示す。なお、ベアリングの位置を見やすくするために輪郭を破線で示している。また、図19、図21中の中央部分にある垂直方向の白線を切断面とした時、その高さを各図の右にプロットしている。図21からベアリングのカバー面の凹凸が高精度に測定できていることがわかる。

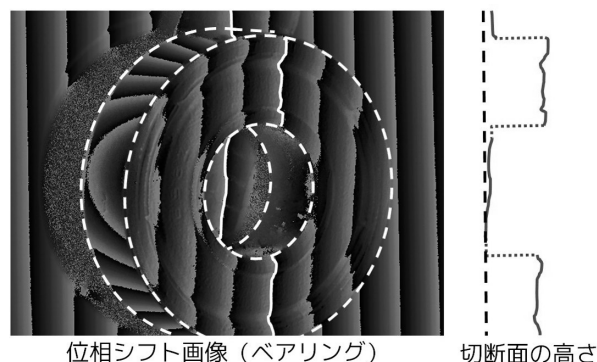


図21 ベアリングの位相シフト画像と切断面の高さ

位相シフト法を用いて物体の高さを求める場合は、得られる位相の不連続性が問題になるが、本処理においては細かな凹凸である傷を検出することが目的である。したがって得られた位相シフト画像の変位を求め、位相の不連続面以外で急激に変化しているところが欠陥であると言える。

図22はミニチュアベアリングの位相シフト画像の変位強度を示した図である。この変位強度を閾値で判別処理することで、細かな傷である型番の刻印や小さな凹みが識別可能であることがわかる。このように、位相シフト画像の変位強度から傷判別処理を開発し、傷の検出が可能であることを確認した。

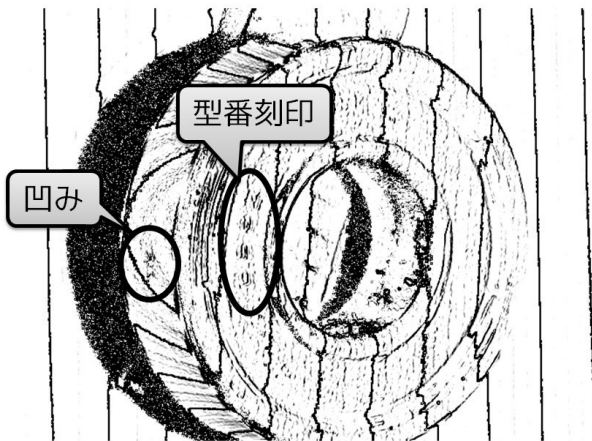


図22 位相シフト画像の変位強度

5. まとめ

本研究では、微細な物体を対象として画像計測や検査を行う場合に必要となる、領域合成手法や深度合成手法などの微細画像処理技術を開発した。開発した微細画像処理技術を用いてアスベスト検出を目的とした建築廃材の含有成分識別検査装置を試作した。

また、レーザー投光と画像特徴量の計算による打痕判別処理と、位相シフト画像の変位強度を用いた傷判別処理を開発した。開発した手法を用いた小型部品外観検査装置を試作し、ミニチュアベアリングの欠陥検出試験を行い、有効な結果が得られることを確認した。

今後は、開発した手法の精度向上や、システム化のための技術開発を行い、実用化を目指した取り組みを進める予定である。

謝辞

株式会社環境科学開発研究所および北日本精機株式会社には、微細画像計測手法と検査装置の開発、撮影試験に用いたサンプルの提供などご協力をいただきました。ここに記して感謝いたします。

引用文献

- 1) H. Bay, T. Tuytelaars, and L. Van Gool, “SURF: Speeded Up Robust Features”, European Conference on Computer Vision, pp.404-417, (2006)
- 2) 齊藤進・飯島俊匡・高橋裕之・他, 「東日本大震災アスベスト含有建材判別報告」, 第23回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集, (2013)
- 3) 齊藤進・高橋徹・飯島俊匡・他, 「震災による建物倒壊現場におけるアスベスト含有建材の迅速判別方法の開発」,

第23回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集, (2013)

- 4) JIS A 1481-1-2014, 「建材製品中のアスベスト含有率測定方法」, 日本規格協会, (2014)
- 5) 藤垣元治, 「光学的全視野計測における位相解析技術」システム制御情報学会誌, Vol.48, No.12, pp.495-503, (2004)