

照度差ステレオ法による外観検査システムの研究開発

窪田 直樹 渡辺 博己

Research of Visual Inspection System by Photometric Stereo

Naoki KUBOTA Hiroki WATANABE

あらまし 岐阜県は古くから製造業が盛んであり、大小様々な製品や、それら最終製品に至る途中の各種部品が生産されている。これらの製品・部品を製造・輸送する上で、部品の表面に細かい傷・打痕等が発生すると、意匠を損ねたり、塗装の劣化が生じたりするなど、後工程で問題となる。そのため、次の工程に進む前の検査でこれらを発見することは非常に重要である。一方、これらの傷・打痕は光の当たり方によっては発見しづらく、検査に熟練を要することがある。本研究では、熟練検査者の作業軽減を図るため、照度差ステレオ法によって傷や打痕を検出する技術を開発する。今年度は、照度差ステレオ法による画像データの取得について報告する。

キーワード 照度差ステレオ, 外観検査, 画像処理

1. はじめに

岐阜県の製造業において、自動車・航空機関連をはじめとする輸送機械器具製造業・金属製造業は、製品出荷額・従業員数とも1/4を超えており、重要な位置を占めている^[1]。このような製造業においては、各種製品・部品は、ある程度まとまった数(ロット)ごとに製造・出荷されるが、一部の部品に欠陥があれば、その部品を含むロット全てが欠陥扱いになることがあり、大きな損失になる。そのため、出荷前の検査は非常に重要である。このような欠陥検査項目の一つに、傷などの有無を調べる外観検査がある。傷のある部品は、意匠を損ねたり、塗装の劣化を招いたりすることがある。

現在、部品の外観検査には、カメラとコンピューターを用いた画像処理による方法と、検査者の目視による方法とがある。画像処理による外観検査は、電子部品をはじめとする小型部品の製造分野においては主流になっており、配置ズレや欠損、傷などの検出に威力を発揮している。一方、自動車関連部品のように大きな曲面を持った部品の検査は、電子部品用の画像処理をそのまま適用させることができない。そのため、ある程度大きな部品の検査は目視で行うことが主流となっている。しかし、目視による検査は、熟練を要することが多く、長時間の集中力が必要であり、疲労に伴う見落としが発生するという問題がある。このような問題の改善のためには、画像処理による外観検査の適用範囲を広くし、検査者の負荷を減少させる必要がある。

本研究では、検査対象物に向けて異なる位置から順に照明を当て、それぞれの照明下での画像をカメラで撮影、

画像処理することで、対象物表面の法線ベクトルを算出し、照度差ステレオ法を利用することで、検査対象物表面の法線ベクトルの変化から傷や打痕を検出する技術を開発する。今年度は、照度差ステレオ法による画像データの取得について、精度向上のためのアルゴリズム改良、金属部品の照度差ステレオ画像取得処理、発見できる傷の大きさの検討を行ったので報告する。

2. 実験方法

既報^[2]のとおり、照度差ステレオ画像撮影システムは、1台のカメラと平行光を照射する複数の照明によって構成されている。昨年度は3台の照明で照度差ステレオ画像の取得を行ったが、今年度は、金属製品の照度差ステレオ画像を取得するため、4台の照明を配置した(図1)。

本研究では、照明を1灯ずつ点灯させた状態で連続20枚対象物を撮影し、その20枚の平均画像を作成した。これは、撮影系の時間方向の微細なノイズを低減するためである。以降の画像処理では、この平均画像を使用した。

2. 1 光源ベクトル推定アルゴリズムの改良

照度差ステレオ法では、物体表面から光源へ向かう光源ベクトルの向きが重要である。既報では、カメラの前に設置した球体に平行光を照射したときの画像を撮影し、そこからランバート反射の式を用いることで光源ベクトルを算出した。しかし、照射光にムラがあること(図2)や、球体に鏡面反射成分があることなどから、原理的に正しい光源ベクトルを推定することができなかった。

そこで今回は、球体に平行光を照射したときの陰に着目し、撮影画像を2値化した画像と、任意の光源ベクトル

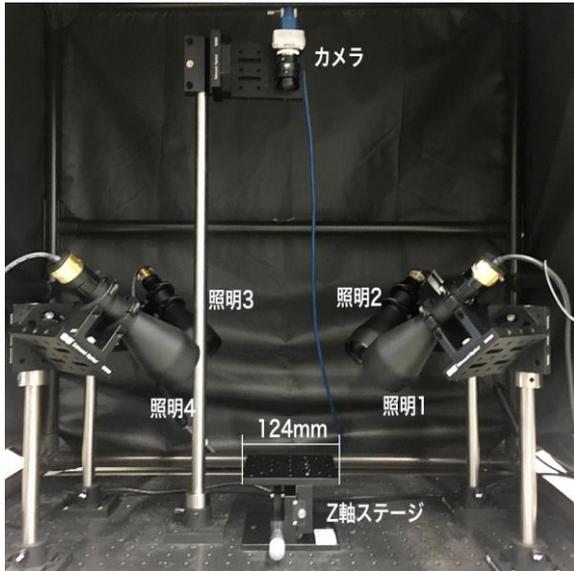


図1 照射光のムラ画像(白色グレースケールを撮影)

を想定して作成した球体の2値化画像とを比較し、その差分が最小となる光源ベクトルを探すことで、撮影状態に最も近い光源ベクトルを算出することにした。なお、光源の輝度は、同照明下で白色グレースケール(x-rite製)を撮影した画像中の最高輝度値とした。

2. 2 照度差ステレオ画像から3次元画像の作成

照度差ステレオ画像は、対象物表面の法線ベクトルを表しており、そこから傷や凹みを検出することができる。しかし、対象物の形状を表しているわけではないので視認性に乏しい。そこで、照度差ステレオ画像から3次元画像を作成するプログラムを作成した。アルゴリズムを以下に示す。

まず、点 (x, y) における法線ベクトルを $nx(x, y)$, $ny(x, y)$, $nz(x, y)$, 面の高さを $z(x, y)$ と表し、原点の面の高さ $z(0, 0)=0$ と定義する。

続いて、X軸およびY軸上の点について、次のように高さを計算する。

$$z(x + 1, 0) = z(x, 0) + nx(x + 1, 0) / nz(x + 1, 0)$$

$$z(0, y + 1) = z(0, y) + ny(0, y + 1) / nz(0, y + 1)$$

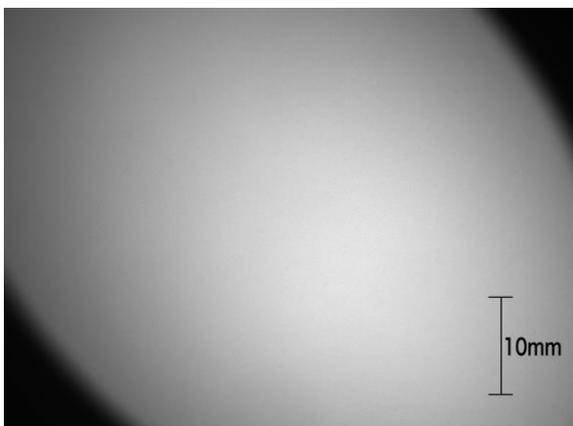


図2 照射光のムラ画像(白色グレースケールを撮影)

それ以外の点については、次のように高さを求める。

$$z(x + 1, y + 1) = \{z(x, y + 1) + nx(x + 1, y + 1) / nz(x + 1, y + 1) + z(x + 1, y) + ny(x + 1, y + 1) / nz(x + 1, y + 1)\} / 2$$

これを画面全体に繰り返すことで、対象物の3次元画像を作成した。なお、実際の処理では、原点を画像の中心に設定することで、画像周辺の減光などの影響を低減している。

2. 3 鏡面反射のある対象物の撮影

照度差ステレオ法は、物体表面のランバート反射を使用しているため、金属部品のように鏡面反射(金属光沢)が強い場合は法線ベクトルを取得することができない。そこで本研究では4台の照明を使い、画像内のすべての点において、画素値が飽和していない(鏡面反射成分を取得していない)3枚の画像を組み合わせることで、1枚の照度差ステレオ画像を作成することにした。ここで、鏡面反射には入射角と反射角が等しくなるという性質があるため、各照明光を同じ方向から照射しない限り、同時に2枚以上の画像に鏡面反射成分が写り込むことはない。

本研究では、同じ対象物を撮影した4枚の入力画像のうち、任意の3枚から作成した照度差ステレオ画像が、同じ法線ベクトルを取得できているかを確認し、その後4枚の入力画像から照度差ステレオ画像を作成する。

2. 4 傷の検出精度

照度差ステレオ法は、対象物の法線の変化から、明確な境界がなく緩やかな変化を持つ凹みを発見することが可能である。しかし、発見可能な傷の大きさや計測精度が明らかとなっていない。そこで、ポンチで傷をつけたプリント基板(銅箔)に対して、照度差ステレオ法で作成した画像とレーザー顕微鏡で撮影した画像とを比較した。

3. 結果と考察

本研究で使用した照明は、図2に示すとおり照射光にムラがある。そこで、対象物をカメラに正対するように設置して撮影した画像を、あらかじめ同条件で撮影した白色グレースケール画像で除することで、ムラの少ない画像を作成した。ここで、対象物と白色グレースケールで同様な照射条件にする必要があるため、対象物は平板状の物に限定され、そうでないものは平面から離れるにつれ光源ムラの影響を受けることになる。

なお、カメラからの入力画像は、周辺部が照明の照射範囲外となっているため、以降の照度差ステレオ画像は入力画像(2560×1920ピクセル)の中央1024ピクセル×1024ピクセル(約22.9mm四方)を切り出して使用している。

3. 1 光源ベクトル推定アルゴリズムの改良

図3に球体を撮影した入力画像、図4に推定した光源ベクトルを基に作成した球体画像を示す。昨年度開発したアルゴリズムでは、光源にムラがなく、輝度値が飽和しないことが必要であったが、今回開発したアルゴリズムでは、ムラのある光源や輝度値の飽和があっても光源ベ

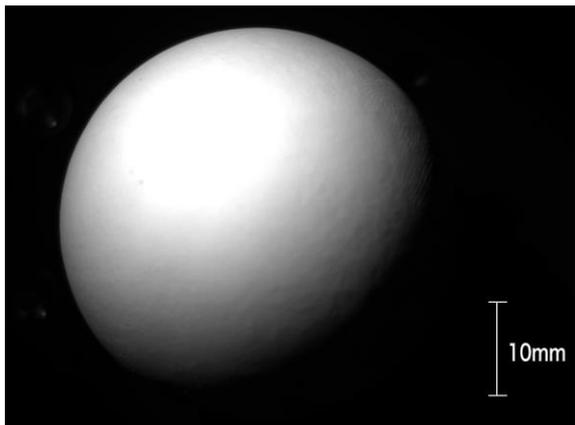


図3 球体を撮影した入力画像

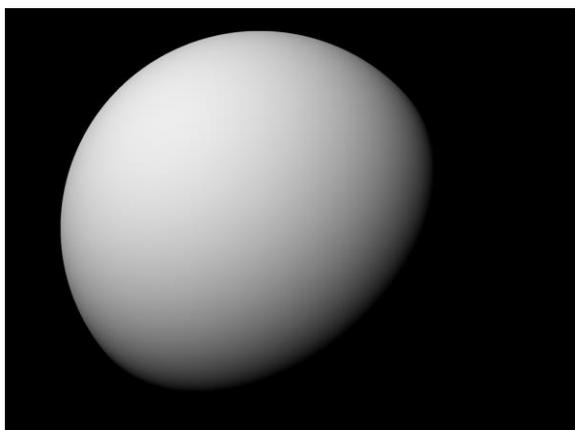


図4 推定した光源ベクトルから作成した画像

クトルを推定することができる。

3. 2 照度差ステレオ画像から3次元画像の作成

図5に、傷と汚れを持つ石膏平板の画像を示す。傷は画像中央のやや左上にあり、長さは約4mmである。図6に、石膏平板の照度差ステレオ画像を示す。通常、照度差ステレオ画像は法線の向きをカラースペクトルで表すが、本稿では、対象物の法線ベクトルとZ軸(カメラの光軸)とがなす角度が0度に近いほど白く、90度に近いほど黒いグレースケール画像で表現している。傷の周辺部分が灰色であることから、その領域はカメラに正対しておらず、傷の中央部分は白色であることからカメラに正対していることがわかる。一方で、画像右下にあった汚れは照度差ステレオ画像には影響がないことがわかる。

図7に、照度差ステレオ画像を基に作成した石膏平板の3次元画像を示す。この3次元画像は、各点の座標を、縦横高さの比率を変えることなくCloudCompare(EDF製)で読み込み、透視投影法で表示した画像をキャプチャした。

3. 3 鏡面反射成分のある対象物

同じ対象物を撮影した4枚の入力画像のうち、任意の3枚から作成した照度差ステレオ画像が、同じ法線ベクトルを取得できているかを確認する。まず、灰色グレースケールを4台の照明下で撮影した。続いて、照明1-2-3、2-3-4、3-4-1、4-1-2の各組み合わせで作った照度差ステレ

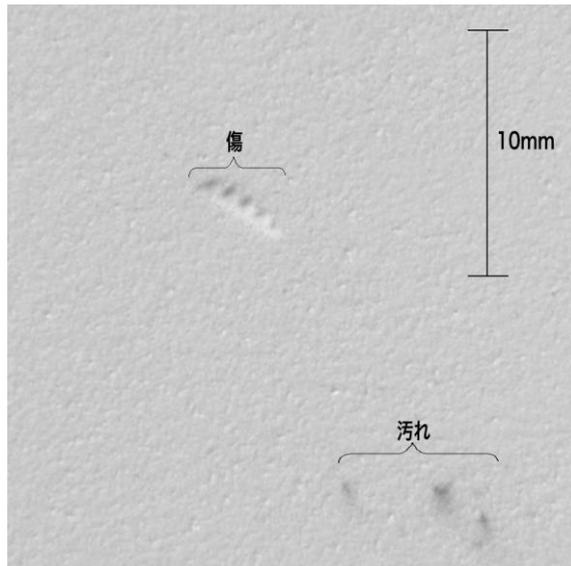


図5 石膏平板の画像

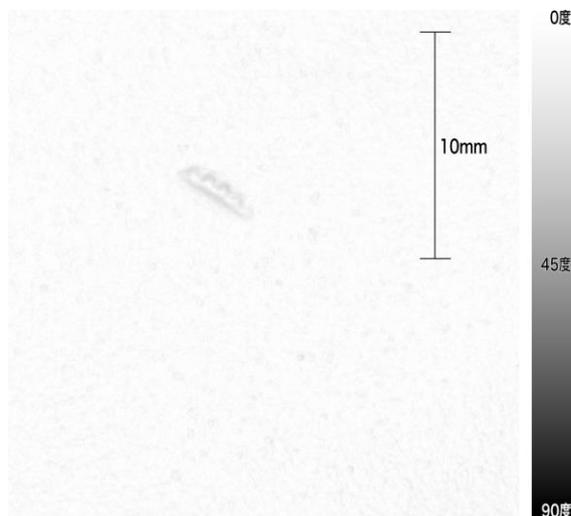


図6 石膏平板の照度差ステレオ画像

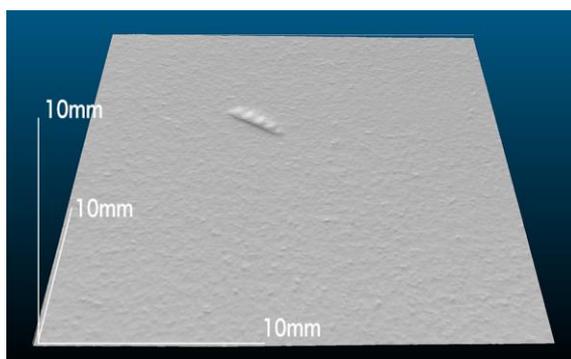


図7 石膏平板の3次元画像

表1 平均法線ベクトルとZ軸との間の角度

照明の組み合わせ	Z軸との間の角度(度)
1-2-3	2.46
2-3-4	2.35
3-4-1	1.76
4-1-2	2.03

オ画像の平均法線ベクトルとZ軸との間の角度を求めた。表1に結果を示す。それぞれのZ軸との間の角度は1度から2度に収まっており、大きな誤差はないと考える。

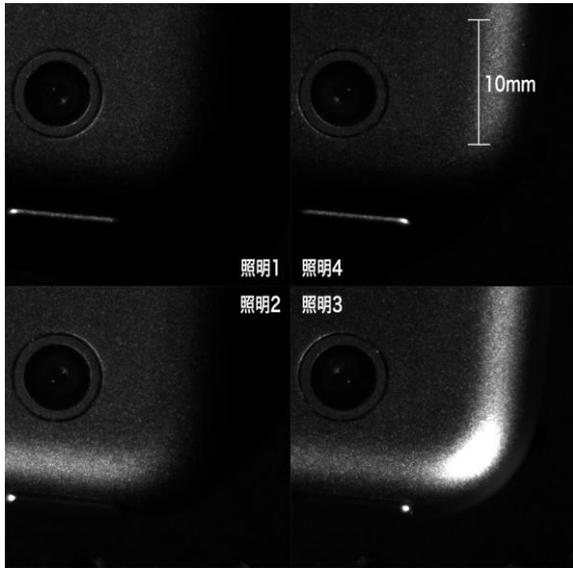


図8 金属製品を撮影した画像

図8に、曲面のある金属製品(タブレット端末)の端の部分、各照明下で撮影した画像を示す。曲面の部分で鏡面反射が発生しており、特に照明3の画像では製品の右下部分の光量が飽和している。図9に、照明2-3-4の下で撮影した画像を使用して作成した照度差ステレオ画像を示す。部品の曲面の部分や、円形状(カメラのレンズ)の一部で法線ベクトルを取得することができなかった(図中黒色の部分)。そのため、この照度差ステレオ画像だけでは適切な3次元画像を作成することはできない。図10に、照明2-3-4から作成した3次元画像を示す。法線ベクトルを取得できなかった曲面部分や円形状の部分で、形状が大きく歪んでいる。

図11に、4枚の照明画像から作成した照度差ステレオ画像を示す。円形状の内部等に法線ベクトルを算出できなかった部分があるが、概ね法線ベクトルを算出することができた。図12に、同画像から作成した3次元画像を示す。図10に比べ、歪みが小さくなっている。ただし、カメラの光軸に対し法線が垂直に近い部分は、照明が当たりにくいこと、3次元画像の作成の際に蓄積する誤差が大きいことから、正しい3次元画像を作成することはできない。

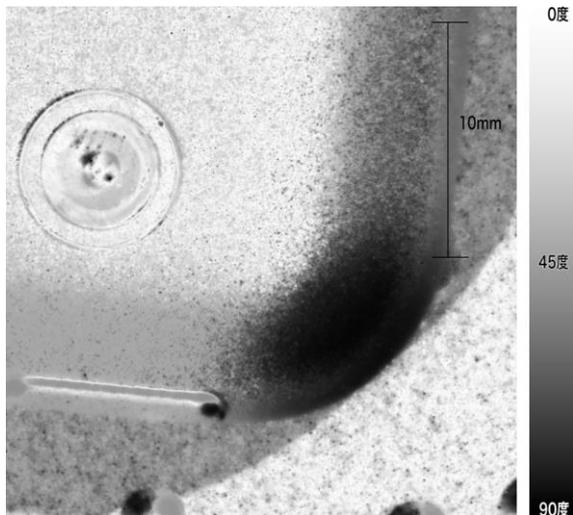


図9 金属製品の照度差ステレオ画像(照明2-3-4)

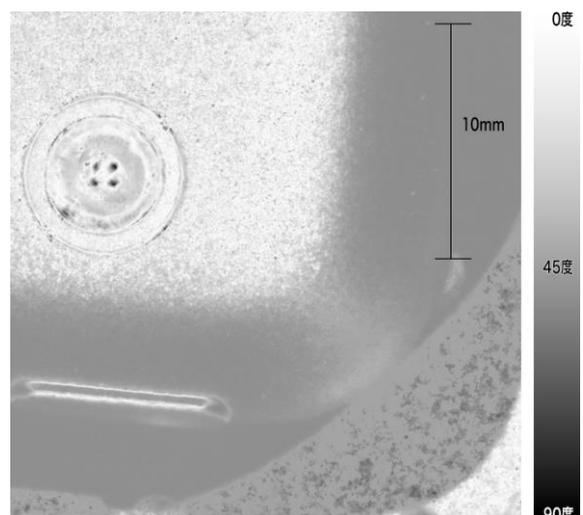


図11 金属製品の照度差ステレオ画像(照明1-2-3-4)

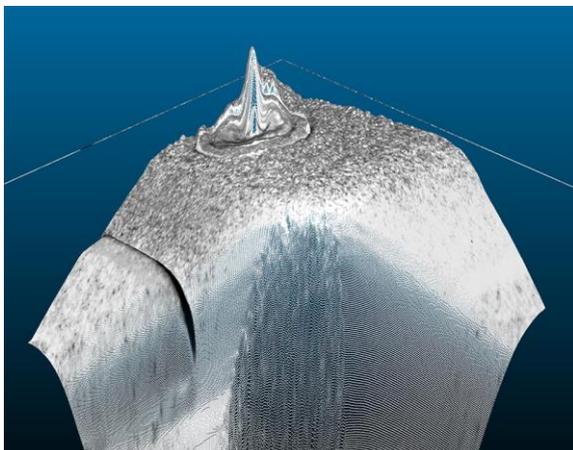


図10 金属製品の3次元画像(照明2-3-4)

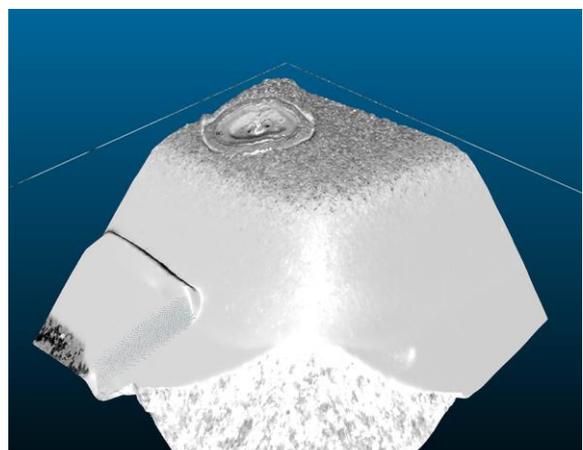


図12 金属製品の3次元画像(照明1-2-3-4)

3. 4 傷の検出精度

図13は、ポンチで凹みをつけたプリント基板(銅箔)の照度差ステレオ画像である。矢印で示す7カ所に凹みがある。また、図13左下部の拡大図は、7カ所のくぼみのうち最も小さい凹みAの拡大図である。大きさは約400 μm 、深さは約25 μm であった。

図14に、レーザー顕微鏡で撮影した凹みAの写真を示す。凹みAの大きさは約415 μm 、深さは約35 μm であった。

以上のことから、本システムでは、大きさ400 μm 、深さ40 μm 程度の凹みであれば、発見することができる(本稿では入力画像の中央22.9mm四方を切り出しているが、最大40mm四方程度まで観測可能)。その一方で、深さ方向の精度は不十分であった。

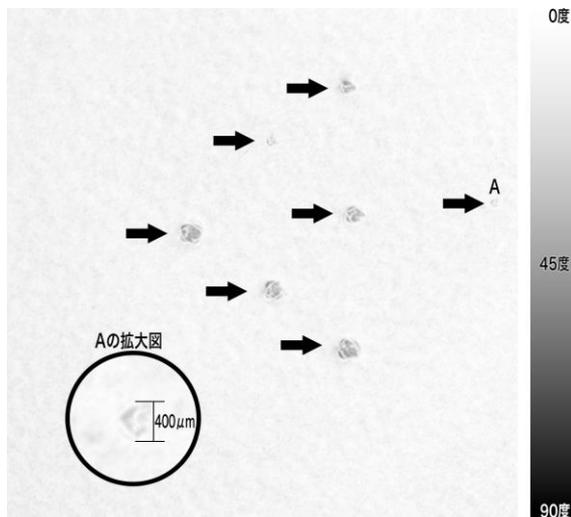


図13 凹みをつけたプリント基板の照度差ステレオ画像

4. まとめ

照度差ステレオ法を用いて物体表面の傷・打痕等の検出を行うために、1台のカメラと4台の平行光源を照射する照明を利用したシステムを構築し、撮影画像の保存まで自動で行うことができる環境を整えた。

このシステムを用いて撮影した球体、白色グレースケ

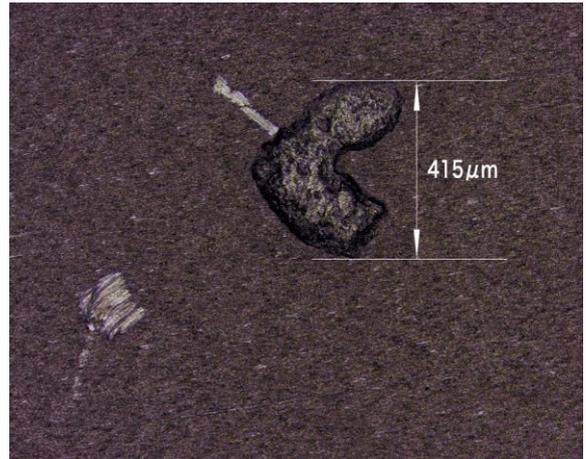


図14 凹みAのレーザー顕微鏡写真

ールの画像から、画像処理によって光源ベクトルおよび光源の輝度の推定を行うことができた。また、3光源では困難であった、金属部品のように鏡面反射成分(金属光沢)のある対象物の照度差ステレオ画像を取得することができた。レーザー顕微鏡との比較実験では、大きさ400 μm の凹みも発見することができることを確認した。

本研究は、対象物表面の法線ベクトルの変化を使用し、打痕のように、明確なエッジのないなだらかな変化を持つ傷を発見することを目的としていた。しかし、研究を進めていくうちに、3次元画像を高い精度で作成することが要求されるようになってきた。今後は、照度差ステレオ法の使用の可否を含め、検討していく。

文 献

- [1] 平成26年工業統計調査, 岐阜県環境生活統計課.
- [2] 窪田直樹, 渡辺博己, 棚橋英樹, “金属部品の外観検査システムの研究開発 -照度差ステレオ法による検査システムの構築-”, 岐阜県情報技術研究所研究報告第18号, pp.9-14, 2017.