

# 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 —

窪田 直樹      渡辺 博己      棚橋 英樹

加藤 邦人\*      長谷部 瑛久\*

### Research of visual inspection system for metal parts - Construction of Inspection System by Photometric Stereo -

Naoki KUBOTA    Hiroki WATANABE    Hideki TANAHASHI  
Kunihito KATO\*    Akihisa HASEBE\*

**あらまし** 岐阜県の製造業のうち、金属製品製造業は大きなウェイトを占めている。これらの部品を製造・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問題が発生することがある。そのため、次の工程に進む前の検査でこれらを見出すことは非常に重要である。一方で、これらの傷・打痕は光の当たり方によっては発見がしづらく、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取得のためのシステムを構築したので報告する。

**キーワード** 照度差ステレオ法, 外観検査, 金属

#### 1. はじめに

岐阜県の製造業のうち、自動車、航空機をはじめとする機械部品製造業は非常に大きなウェイトを占めている。各種部品は、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、大きな損害になる。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する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外観検査システムの構築を行ったので報告する。

#### 2. 照度差ステレオ法

照度差ステレオ法は、複数の光源から物体に光を照射し、その画像を画像処理することで物体表面がカメラに対してどの方向を向いているかを推定する方法である。

一般に、物体の表面での反射光は、入射角と同じ角度で反射する(鏡面反射)光と、周囲に一樣に拡散する光に分けられる。後者の光の拡散はランバート反射と呼ばれ、式(1)で表すことができる。

\* 岐阜大学工学部

$$I_D = \hat{N}^T \cdot \hat{L} C L_L \dots (1)$$

- $I_D$  : 物体表面の微小領域の輝度
- $\hat{N}^T$  : 物体表面の微小領域の単位法線ベクトル(Tは転置を表す)
- $\hat{L}$  : 物体表面の微小領域から光源Lへ向かう単位ベクトル(以降光源ベクトル)
- $C$  : 物体表面の微小領域の反射率
- $I_L$  : 物体表面の微小領域への照度

この式から、光源ベクトルおよび照度と反射率の積が既知であれば、観測した物体表面の輝度をもとに、微小領域の法線ベクトルと光源ベクトルの内積すなわち両ベクトルがなす角度を求めることができる。

ここで、各ベクトルは3次元ベクトルであるので、図1

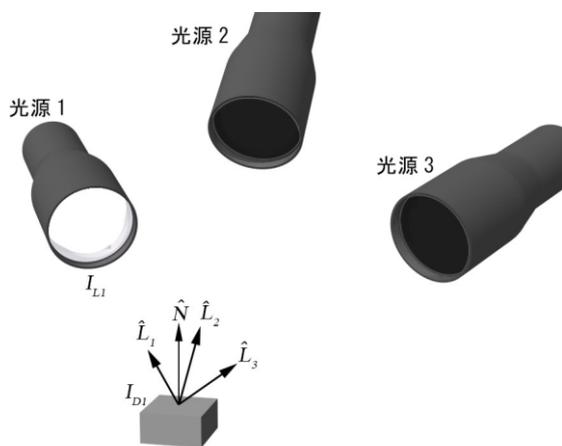


図1 照度差ステレオ法(光源1を点灯した状態)

で示すように3光源の情報があれば、式(2)のとおり法線ベクトルを一意的に推定することができる。

$$\hat{N} = \begin{bmatrix} \hat{L}_1^T \\ \hat{L}_2^T \\ \hat{L}_3^T \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{I_{D1}}{C L_{L1}} \\ \frac{I_{D2}}{C L_{L2}} \\ \frac{I_{D3}}{C L_{L3}} \end{bmatrix} \dots (2)$$

カメラで撮影した画像はマス目状の画素の集合であり、それぞれの画素に写る領域を上記の微小領域とみなすことで、撮影された領域の法線ベクトルを連続的に取得することができる。この法線ベクトルの変化などを調べることで傷・打痕等を見つけることができると考えられる。

照度差ステレオ法は、比較的短時間(照明の切り替え時間程度)で撮影が終わる、1台のカメラで撮影するのでカメラ間キャリブレーションが必要ない、ランバート反射がみられる全ての画素に対して法線を求めることができる、といった特徴がある。

### 3. 照度差ステレオシステムの構築

#### 3. 1 システムに用いる光源

前章で述べたとおり、微小領域の光源ベクトル、照度

および輝度が観測できれば、その領域の法線ベクトルを求めることができる。

一般的な光は、点光源から発せられる光のように、光源から球状に広がり、その照度は光源からの距離の二乗に反比例する。そのため、光源の微小領域との位置関係によって、光源ベクトルの向きや照度に変化する。一方、平行光は、光が拡散することなく直進するため、光源の微小領域との位置関係に関わらず、光源ベクトルの向きや照度が一定である(図2)。検査対象の微小領域ごとに光源との位置関係を明確にすることは困難であるため、照度差ステレオ法では平行光源を用いる。平行光を得るには、点光源と対象物との距離を十分に離す方法と、特殊なレンズ(テレセントリックレンズ)を用いて作り出す方法がある。本研究では、装置全体の小型化を見据え、テ

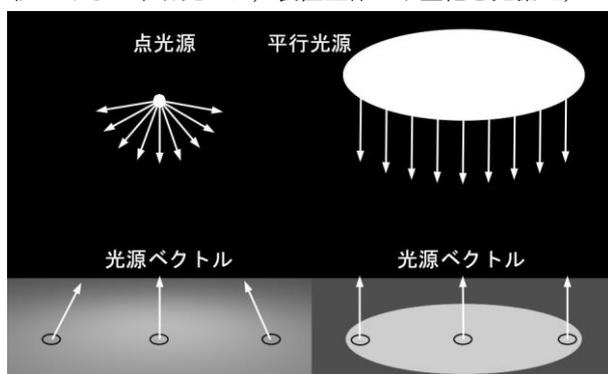


図2 点光源と平行光源

レセントリックレンズを用いることで平行光を得ることとした。

#### 3. 2 構築したシステム

図3に、構築したシステムの撮影部分を示す。

カメラはEO-5012 LE(エドモンド・オプティクス・ジャパン製)、レンズはM1214-MP2(computar製)で、以下の仕様・設定で使用している。

撮像素子サイズ	5.6mm × 4.2mm
有効画素数	2560×1920
階調	12ビット

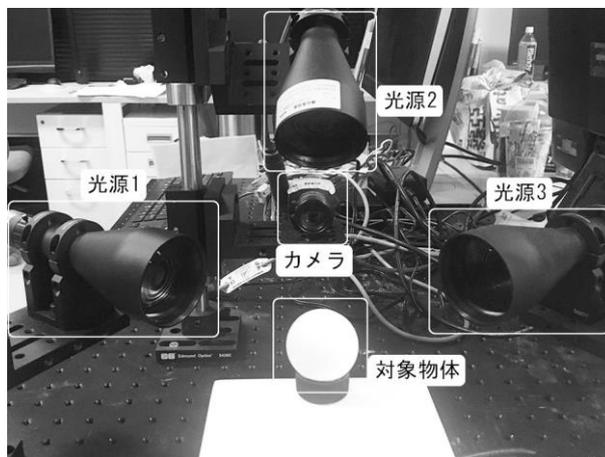


図3 システムの撮影部分

フレームレート 10.01fps  
 映像出力 USB 3.0  
 焦点距離 12mm  
 開放絞り F1.4

光源は、LED照明ICS2(ADVANCED ILLUMINATION製)にTSテレセントリックバックライトイルミネーター(エドモンド・オブティクス・ジャパン製、レンズ径約60mm)を接続したものを、カメラの上および左右に設置した。それぞれの光軸は、カメラの焦点から約26cmの位置で交差するように調整した。

カメラは、USBケーブルを介してコンピューターEliteDesk 800G2(ヒューレットパッカー製)に接続している。また、各LED照明の信号線をDAコンバーターDAI16-4(CONTEC製)に接続し、コンピューターから照明の点灯/消灯ができるようになっている。

図4に、撮影アプリケーションの画面を示す。このアプリケーションは、最大4台の照明を任意の組み合わせで点灯/消灯させる制御機能と、各組み合わせの下で画像を連続的に撮影・保存する機能を有する。画像を保存する際には、照明の組み合わせパターンごとにフォルダを作成

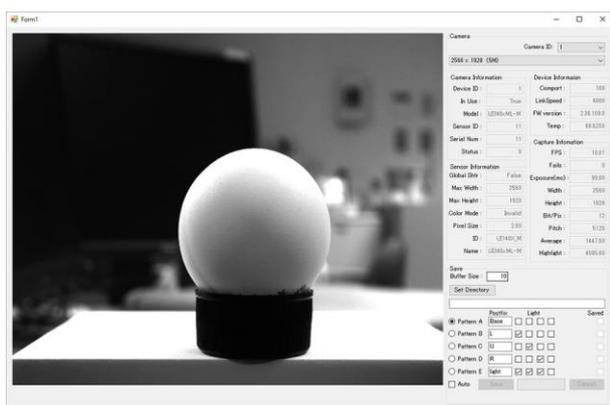


図4 撮影アプリケーションの画面

し、撮影時刻をファイル名とすることで、後処理でのミスを低減させるようにした。

本研究では、画像を撮影する際に、全照明を消灯した状態と、3台の照明を1台ごと点灯させた状態(計3種類)の画像を、それぞれ連続で10枚ずつ撮影した。さらに、画像処理の前処理として、次の処理を行った。

1. 時間方向のノイズ(画素値の揺らぎ)の影響を低減させるために、連続撮影した10枚の画像の平均画像を作成した。
2. ホットスポット(常時点灯している画素)の影響を低減させるため、各照明下で撮影した画像の平均画像から、無照明で撮影した画像の平均画像を減算した画像を作成した。

これ以降の画像処理は、全てこの前処理を行なった画像を使用した。

### 3. 3 光源ムラの低減

図1中の光源1を点灯させた状態で、カメラの光軸に対しほぼ垂直に設置した石膏製平面を撮影した画像(以下

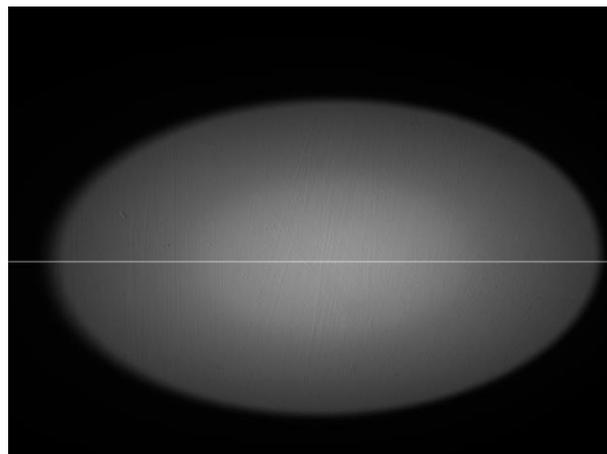


図5 光源1画像

光源1画像)を、図5に示す。

光源1は、図5に向かって右手前方向から照射しているため、平面の照射部分は横長の楕円形状になっている。この楕円部分は、中心が明るく、周囲に向かうにつれて暗くなっている。理想的な平行光を得るには、テレセントリックレンズの焦点に点光源を置く必要があるが、本研究で使用したLED照明が点光源になっていないためにこのグラデーション状のムラが発生したと考えられる。

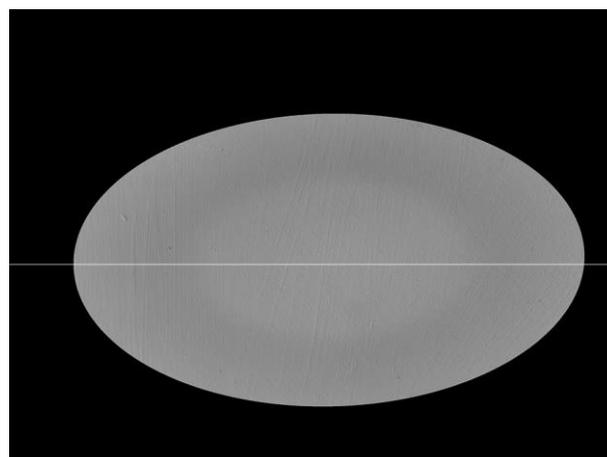


図6 補正後の光源1画像

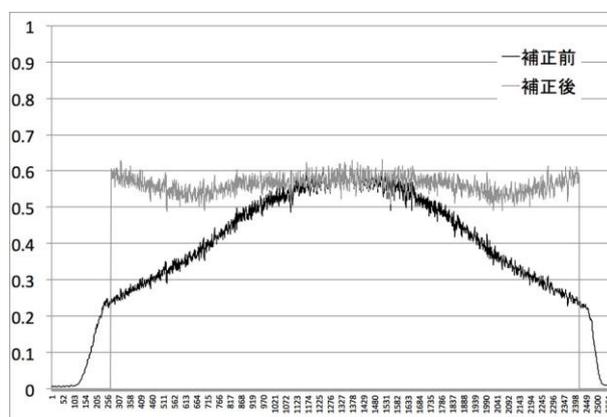


図7 補正前後の輝度

ここでは、このグラデーション状のムラが、光源の光軸を中心とした円対称象になっており、かつ、ガウス分布に従っていると仮定して、画像処理で補正した。補正後の照明1画像を図6に、図5および図6の中央部水平線上の画素の輝度(黒が0、白が1)のグラフを図7に示す。

### 3. 4 光源ベクトルの推定

照度差ステレオ法では、光源ベクトルの推定が必要となる。一般には、カメラの前に金属球などを設置した状態で光を照射し、その鏡面反射の位置から光源ベクトルを推定する方法が多く用いられる<sup>[1][2]</sup>。しかし、金属球はランバート反射成分が少ないため、光源やカメラの絞りの調整および照度の測定を別途行う必要がある。そこで本研究では、これらの調整・測定の簡略化のため、以下の手法を用いた。

まず、鏡面反射のない球体Sをカメラの前に設置して光源1画像を撮影する。この時、一番明るい点においても輝度が飽和しないよう十分注意する。続いて、この画像から球体が写っている円の領域Aを抽出する。ここで、撮影した画像の水平方向をX軸(右が正)、縦方向をY軸(下が正)とし、円の中心を $(x_0, y_0)$ 、半径を $r$ とする。この円は、中心 $(x_0, y_0, 0)$  半径 $r$ の球体Sを、XY平面上に投影したものと見做すことができる。すると、球体Sの表面は、以下の式で表すことができる

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + z^2 = r^2 \dots (3)$$

続いて、円の領域A内の任意の3点 $(x_n, y_n)$  $(n = 1 \dots 3)$ を選び、各点の輝度 $I_{Dn}$ を取得する。ここで、球体S上の点 $(x_n, y_n, \sqrt{r^2 - (x_n - x_0)^2 - (y_n - y_0)^2})$ の法線ベクトルは、
$$\vec{N}_n = \left( \frac{x_n - x_0}{r}, \frac{y_n - y_0}{r}, \frac{\sqrt{r^2 - (x_n - x_0)^2 - (y_n - y_0)^2}}{r} \right)^T$$
で表すことができる。光源ベクトル $\hat{L}$ と、法線ベクトル $\vec{N}_n$ 、輝度 $I_{Dn}$ はランバート反射の式(1)を満たすので、

$$\begin{bmatrix} I_{D1} \\ I_{D2} \\ I_{D3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{N}_1^T \\ \vec{N}_2^T \\ \vec{N}_3^T \end{bmatrix} \cdot \hat{L} C_{L} \dots (4)$$

が成り立つ。したがって、 $\hat{L}$ は次の式から求めることができる。

$$\hat{L} = \frac{1}{C_L} \begin{bmatrix} \vec{N}_1^T \\ \vec{N}_2^T \\ \vec{N}_3^T \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I_{D1} \\ I_{D2} \\ I_{D3} \end{bmatrix} \dots (5)$$

ここで、式(1)より、 $\vec{N} = \hat{L}$ となる点においては $I_D = C_L$ が成り立つことから、球体S上、光源ベクトルと法線ベクトルが一致する点とその周辺の画素値の平均を取り、それを照度と反射率の積 $C_L$ とする。

同様の手法で、光源2、光源3についても光源ベクトルおよび照度と反射率の積を求める。

上記の手法を用いて、図8に示す直径40mmの球体を各光源下で撮影した画像から光源ベクトルおよび照度と反射率の積を求めた。実際の球体Sの表面には微小な凹凸

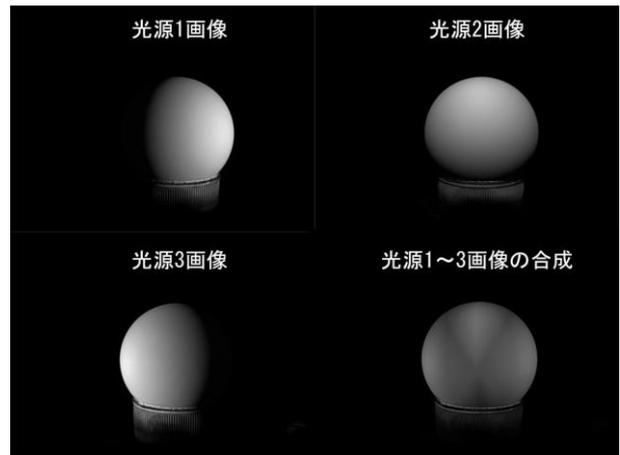


図8 球体を撮影した画像

などがあり、正確な光源ベクトルを求めることができない。そこで、任意の3点の組み合わせをできるだけ多くとり、その平均を求める処理を行なった。また、3. 3節で述べたとおり、光源にはムラがあり、非平面ではムラの低減が困難である。そこで、直径40mmの球に対し、60mm径の光束の中央付近を照射し、できるだけ明るい部分のみを使うようにした。さらに、任意の3点の組み合わせも、あまり遠い点の組み合わせを選ばないようにした。表1に、推定した光源ベクトルおよび照度と反射率の積を示

表1 光源ベクトルおよび照度と反射率の積

画像	光源ベクトル	照度と反射率の積
光源1画像	(-0.888, -0.005, -0.460)	0.823
光源2画像	(-0.001, -0.716, -0.698)	0.644
光源3画像	(-0.917, 0.0779, -0.392)	0.894

す。

求めた光源ベクトルを元に、図8で示した光源1~3画像に対して照度差ステレオ法を適用した画像を図9に示す。図中の黒色の部分は、いずれかの照明が当たっていないため法線を算出できなかった部分である。また、法線を算出できたところについては白色で示し、さらに黒い直線で算出した法線を示している。参考までに、理想的な球体に、表1で示す光源からの光が当たった時の照度差ステレオ画像をコンピュータ上で再現したものを理論値

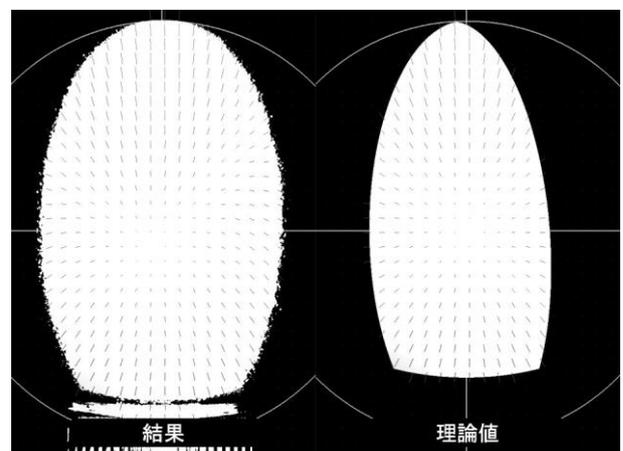


図9 照度差ステレオ結果と理論値

として併記した。

撮影時の環境光の影響などで光の当たっている領域が理論値よりも広く、その部分の法線の方向は正確に算出できていないが、理論値と重なる部分においては、法線の方向は概ね正確に算出されており、光源方向が推定できていることを示している。

#### 4. 実験

前章で構築したシステムを用いて、平面の表面の凹凸を調べるため、その法線を求める実験を行なった。さらに、表面の凹凸を視覚的にわかりやすくするため、表面の凹凸の復元を行なった。

##### 4. 1 平板の照度差ステレオ画像

石膏製平面を、カメラの焦点から約26cmのところ、カメラの光軸に対しほぼ垂直に設置した。その平面を、各光源を点灯した状態で撮影した画像を図10に、その画像から算出した照度差ステレオ画像を図11に示す。照度差ステレオ画像の右上部分にはほぼ正面向きの法線ベクトルが得られたが、左下部分に近づくにつれ、法線ベクトルが下を向くようになっている。これは、撮影した画像の光源ムラが十分低減できていないためと思われる、今後

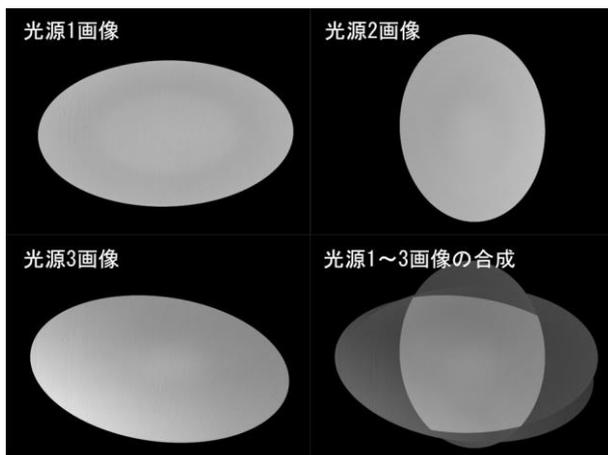


図10 石膏製平板を撮影した画像

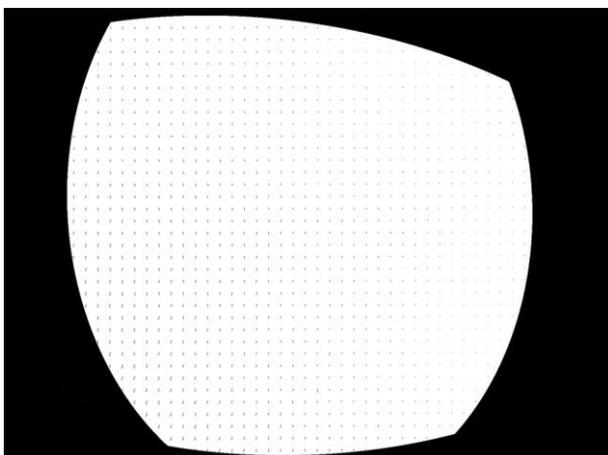


図11 照度差ステレオ画像

このムラをさらに低減していく必要がある。

図12に、光源画像と照度差ステレオ画像の一部を拡大したものを示す。図中の「灰色部」は、本来白色である石膏の表面の一部が灰色になっている部分である。石膏表面の凹部(傷)については照度差ステレオ画像に現れているが、灰色部については現れていない。これは、灰色部は色が異なるだけで表面に凹凸がなく、法線の変化がないためであり、このことから、将来部品の検査を行っ

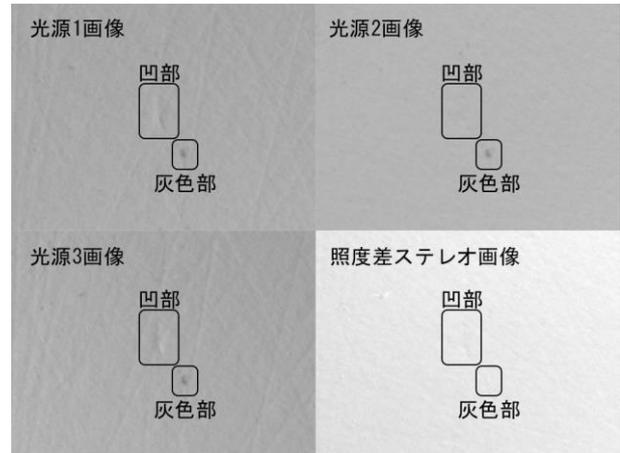


図12 照度差ステレオ画像の拡大図

た時に、塗装など部分的な色の変化を傷等と誤検出することがないことを期待できる。

##### 4. 2 表面の凹凸

照度差ステレオ法は、3光源の光が当たった全ての画素に対して法線を求めることができる。そのため、その画素に対応する物体上の微小領域が滑らかに連続しており、かつ連続してカメラに写っていれば、元の物体の形状を復元することができる<sup>[3]</sup>。ここでは、前節で撮影した画像上で発見した凹部を復元する。

まず、凹部を横断する直線(横200ピクセル、縦1ピクセル)において、法線ベクトルを元に奥行方向の情報を復元した。図13に、復元した直線部分のグラフ(横軸が左右、縦軸が奥行)と、対応する光源画像および照度差ステレオ画像を示す。

グラフは、前述した光源ムラや設置誤差のため水平にはなっていない(横200ピクセルの間に右端が7.5ピクセルほど手前になっている)が、ほぼ直線状になっている。横軸1285ピクセル付近と、横軸1330ピクセル付近に変化が見られる。この変化のある場所が、実際の平面上の凹部と対応しており、正しく復元できていることが確認できた。

続いて、図13に示した領域の周辺(横200ピクセル、縦100ピクセル)の復元を行なった。復元を行なった領域の簡易3次元表示を図14に示す。中央付近の凹部や、引っかき傷のようなものが再現できている。

なお、今回の実験では、画像上の200ピクセルは石膏平面上の8.3mmに相当した。

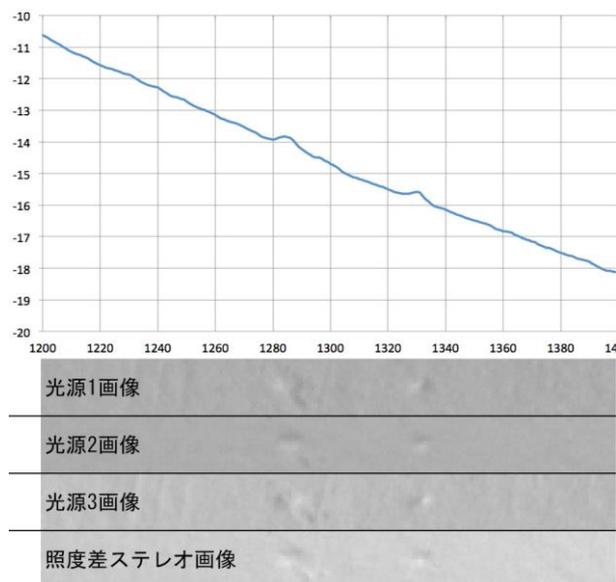


図13 照度差ステレオ法で復元した平面の一部

## 5. 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、3つの平行光源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画像から、画像処理によって光源ベクトルおよび照度と反射率の積の推定を行うことができた。また、その情報を元に平面物体に存在する傷等を発見することができることを確認した。

今後は、光源のムラをハード的あるいは画像処理によって低減するとともに、平面上の傷・打痕の検出を自動的に行うアルゴリズムを考察・実装する。また、今回は

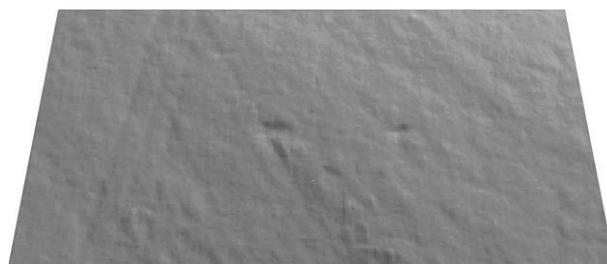


図14 簡易3次元表示

精度についての検証を行わなかったが、どの程度の精度で傷等の検出ができるかも調査する。

さらに、鏡面反射が見られる金属部品を対象として照度差ステレオ法が利用できるよう、平行光源の数を増やすなど対策を行って検証を行う。

## 謝辞

本研究の一部は、一般財団法人越山科学技術振興財団の研究助成によって実施しました。

## 文献

- [1] 松下康之, "照度差ステレオ", 研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア, 2011-CVIM-177, No.29, pp1-12
- [2] 井本治孝他, "反復照度差ステレオ法を用いた微細形状計測装置の開発", 日本機械学会論文集 Vol.82(2016), No.835, p.15-00512
- [3] 水永雄介他, "フォトメトリックステレオ法による物体形状の再構築", Reports of the Faculty of Science and Engineering, Saga University, Vol.33, No.1, 2004