

照度差ステレオ法による外観検査システムの研究開発(第3報)

窪田 直樹 渡辺 博己

Research of Visual Inspection System by Photometric Stereo(3rd Report)

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検査対象の表面の法線の方向を調べる手法を開発する。

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

岐阜県における輸送機械器具製造業および金属製造業を合わせると、製品出荷額・従業員数とも製造業全体の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、外観検査手法の一つとして、照度差ステレオ法^[2]を採用した。照度差ステレオ法とは、照明の位置を変えながら撮影した複数の画像から、対象物表面の法線ベクトルを算出する手法である。法線ベクトルは3次元情報

を持つため、単純な輝度情報と比べ多くの情報を持っている。本研究では、この照度差ステレオ法を用いた撮影システムの開発について紹介する。

2. 照度差ステレオ法

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光(鏡面反射、正反射)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。

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

ここで、

- 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

である。

式(1)から、光源ベクトル \hat{L} と、物体表面の反射率と照度との積 $C I_L$ が既知であれば、観測した物体表面の輝度 I_D 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

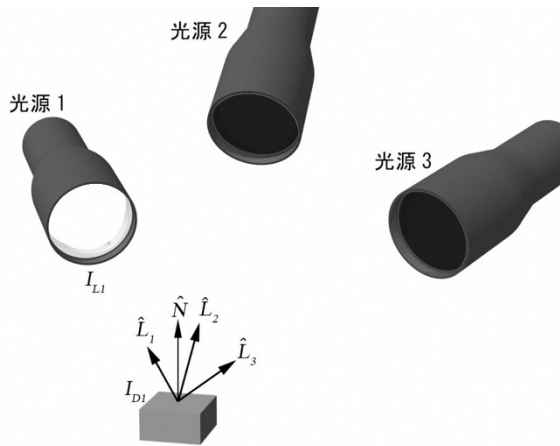


図1 照度差ステレオ法(光源1を点灯した状態)

トルを一意に推定することができる。

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

ここで、

A^T : Aの転置行列

A^{-1} : Aの逆行列

である。

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、撮影した画像のすべての画素の法線ベクトルを取得することができる。以降、撮影した画像の各画素の法線ベクトル(x, y, z)を色(r, g, b)に置き換えた画像を、照度差ステレオ画像と呼ぶ。

3. 照度差ステレオ画像の取得

3.1 撮影装置

図2に、照度差ステレオ画像撮影システムの外観を示す。中央にZ軸ステージがあり、検査対象物はこの上に静置する。Z軸ステージの直上にはカメラを、Z軸ステージの周囲にはテレセントリックレンズを装着した照明を4台設置した。テレセントリックレンズは、光源の光を平行に投影するために用いるレンズである。照度差ステレオ法では、事前に光源ベクトルを求める必要があるが、一般の照明では、光が光源から拡散するため、検査対象物の部位によって光源ベクトルの方向が異なり、法線ベクトルの算出が困難になる。そのため、照度差ステレオ法では、平行光を用いることが多い。平行光を得るためには、光源の位置を検査対象物から十分離れたところに設置する方法と、平行光源を用いる方法が考えられる。本研究では、装置全体の小型化のため、平行光源を採用した。

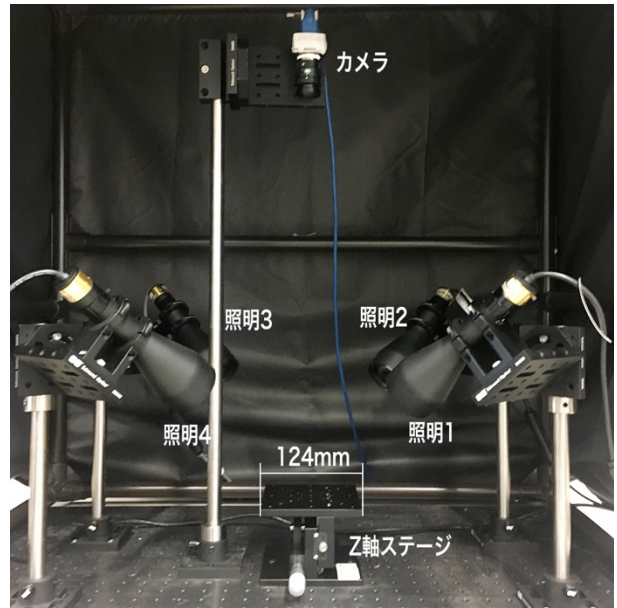


図2 照度差ステレオ画像撮影システム

撮影装置の仕様は以下のとおりである。

カメラ	: EO-5012 LE(エドモンド・オプティクス・ジャパン)
撮像素子サイズ	5.6mm × 4.2mm
有効画素数	2560×1920
階調	12ビット
フレームレート	10.01fps
映像出力	USB 3.0
レンズ	: M5018-MP2(computar)
焦点距離	80mm
開放絞り値	F1.8
照明	: ICS2(ADVANCED ILLUMINATION)
照明用レンズ	: 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・オプティクス・ジャパン)

3.2 光源ベクトル推定

照度差ステレオ法では、カメラに対する光源の方向を推定することが重要である。一般的には、球体を撮影し、球体の中心座標と最も明るい点の座標から光源方向を計算する。しかし、明るい部分には広がりがあるため正確に光源方向を捉えることができない。Hayakawa^[3]は、入力画像中の相対的なランバート拡散反射率が既知の画素6点を使用することで、光源ベクトル推定を行う手法を提案している。しかし、本研究で用いる平行光源は、照明がもつ明るさのムラがそのまま平行投影されるため、均一な照度が必要なこれらの方法をとることができない(図3)。そこで、次のような手法で光源ベクトルを推定した。

図4(a)に示すような球体を撮影した入力画像から、球体の中心座標と半径を求める。ここで、入力画像に写っている球体の陽の部分と陰の部分が分離できるような2値化の閾値を求める。続いて、任意の光源ベクトルを想定し、その方向から球体に光が当たったと想定した想定球体画像(図4(b))を作る。そして、入力画像と想定球体画像を、あら

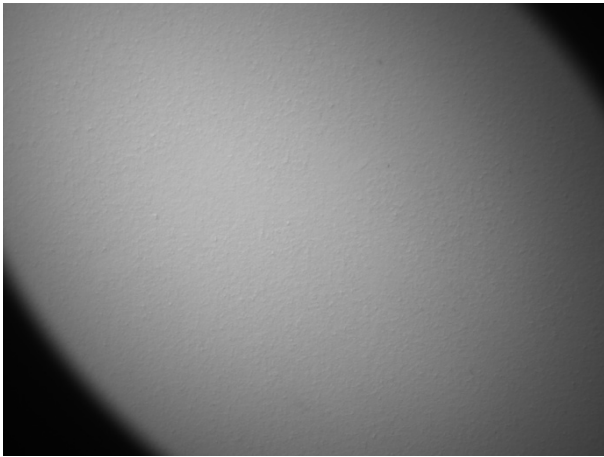


図3 標準反射板(石膏板)を撮影した画像



図6 不連続が発生した照度差ステレオ画像

素値から照度差ステレオ画像を作成することとした．このとき、式(2)は、下記のように書き換えられる．

$$\hat{N} = \begin{bmatrix} \hat{L}_1^T & \hat{L}_2^T & \hat{L}_3^T & \hat{L}_4^T \\ \frac{I_{D1}}{CI_{L1}} & \frac{I_{D2}}{CI_{L2}} & \frac{I_{D3}}{CI_{L3}} & \frac{I_{D4}}{CI_{L4}} \end{bmatrix} \cdot \dots \cdot (3)$$

ここで、

A^+ : Aの疑似逆行列

である．

3. 4 照度差ステレオ画像から疑似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疑似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の各成分を $n_x(x, y)$, $n_y(x, y)$, $n_z(x, y)$ 、面の高さを $z(x, y)$ と表し、原点の面の高さ $z(x, y) = 0$ 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．

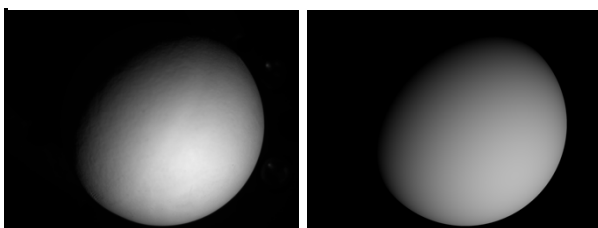
$$z(x + 1, 0) = z(x, 0) + \frac{n_x(x + 1, 0)}{n_z(x + 1, 0)}$$

$$z(0, y + 1) = z(0, y) + \frac{n_y(0, y + 1)}{n_z(0, y + 1)}$$

それ以外の点については、次のように高さを求める．

$$z(x + 1, y + 1) = \frac{z(x, y + 1) + z(x + 1, y)}{2} + \frac{n_x(x + 1, y + 1) + n_y(x + 1, y + 1)}{2n_z(x + 1, y + 1)}$$

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．この手法は、原点から離れるにつれ誤差が蓄積し、不正確な3次元画像になってしまう．そこで、原点を画像の中央にとることで、画像の中央付近の誤差を小さくするようにした．



(a) 入力画像 (b) 推定球体画像

図4 球体画像



(a) 入力画像 (b) 推定球体画像

図5 2値化画像

はじめ求めておいた閾値で2値化し(図5), その差分をとる．この作業を、差分が小さくなるよう想定光源ベクトルの向きを徐々に変えながら行う．差分がほぼ変化しなくなった時点で、そのときの想定光源ベクトルを、その光源の光源ベクトルとした．

3. 3 照度差ステレオ画像の作成

照度差ステレオ法は、3枚の入力画像から対象物表面の法線ベクトルを算出することができる．しかし、照明が3台だけでは、影や鏡面反射の影響で、ランバート反射による輝度値を得られない場合がある．そこで、本研究では、4台の照明を使用している．昨年度は、撮影画像の各画素に対し、4枚の撮影画像の画素のうち最大輝度の画素を鏡面反射成分と判断して棄却し、残る3枚の撮影画像の画素から法線ベクトルを求めた．この手法は、鏡面反射の影響を抑えられる反面、光源ベクトル推定の誤差や光源ムラの影響で、照度差ステレオ画像に不連続が生じることがあった．図6に、不連続が発生した照度差ステレオ画像を示す．球体を撮影したときの照度差ステレオ画像であるが、球体の途中で不連続が発生している．今年度は、4枚の撮影画像の画

4. 結果と考察

4. 1 光源ベクトルの推定

光源からの光を当てた球体を撮影した画像から、光源ベクトルを推定した。図7に、入力画像と、各アルゴリズムで推定した光源ベクトル上の光源から照射された推定球体画像を示す。図7(a)は入力画像で、右下から光が当たっている。図7(b)は、入力画像に含まれる球体から、最も明るい点を探し、その方向に光源があると推定したときの推定球体画像である。撮影した球体は、表面につや消し剤を塗布してあったが、完全には鏡面反射を消すことができず、その影響で入力画像に比べ正面寄りから光が当たっているように見える。図7(c)は、文献[3]で紹介されている手法で推定した推定球体画像である。この手法も、鏡面反射の影響や光源が持つムラの影響で、入力画像に比べ右寄りから光が当たっているように見える。図7(d)は、本研究での手法であり、陰の入り方など入力画像に近いことが判る。ただし、本手法は計算に時間がかかるため、ムラのない平行光源や、鏡面反射がほとんど無い球体が用意できる環境であれば、文献[3]の方法が適していると考えられる。

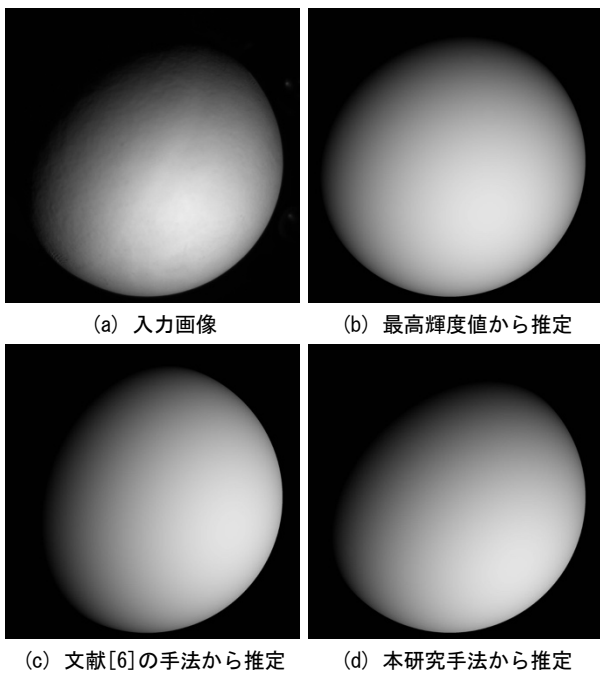


図7 入力画像と推定球体画像

4. 2 金属部品の照度差ステレオ画像

図8に、カッターの刃を各照明下で撮影した入力画像を示す。図中の矢印は、光源からの光の向きを表す。カッターの刃は金属製のため、刻印部分に鏡面反射が見られる。この4枚の入力画像のうち、照明1,2,3の3枚から作成した照度差ステレオ画像を図9に示す。照度差ステレオ画像は、画素ごとに法線ベクトル値を持っているが、ここでは、ベクトルのX成分の値を示す画像(明るいほど法線ベクトルが右向き)を図9(a)に、Y成分の値を示す画像(明るいほど法線ベクトルが上向き)を図9(b)に示す。また、3章4節で述べた

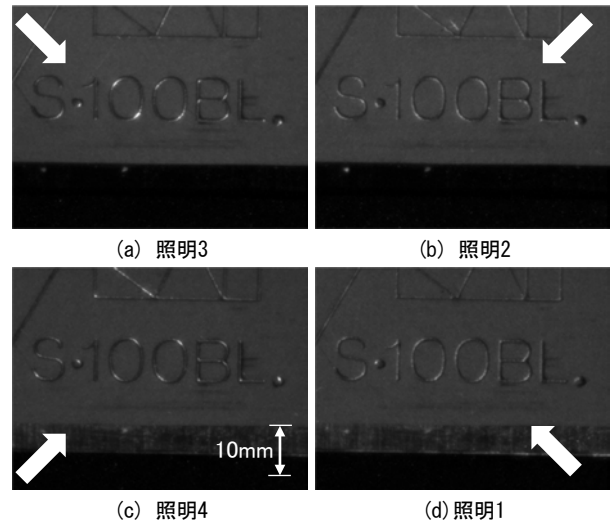


図8 カッターの刃の入力画像

方法で作成した疑似3次元画像を、図9(c)に示す。

カッターの刃の刻印は刃の表面に対して凹んでいるため、刻印を構成する線は、X成分画像では線の左側で明るく、右側で暗くならなければならない。同様に、Y成分画像では線の上側が暗く、下が明るくなるならなければならない。しかし、図9(a)の「0」の文字を見ると、文字の左上部分、右下部分は暗くなっており、明るい部分がない。また、左下部分、右上部分についてはその逆である。これらは、鏡面反射の影響で正しく法線ベクトルを推定することができなかったためと考えられる。また、図9(c)を見ても、誤差が累積しているため、カッターの刃の形状が再現できていない。

図10は、昨年度のアルゴリズム(4枚の画像上の各画素において、最大輝度を持つ画素を除く3画素から法線を求める)で作成した照度差ステレオ画像である。図9と比べると、刻印を構成する線の上下・左右に明暗の領域が正しく出て

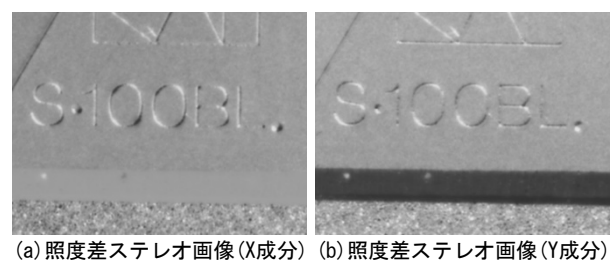
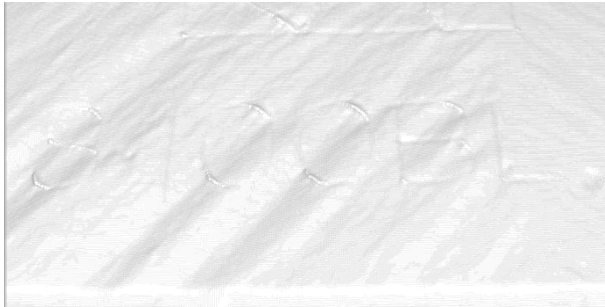


図9 入力画像3枚で作成した照度差ステレオ画像

(c) 照度差ステレオ画像から作成した3次元画像



(a) 照度差ステレオ画像 (X成分) (b) 照度差ステレオ画像 (Y成分)



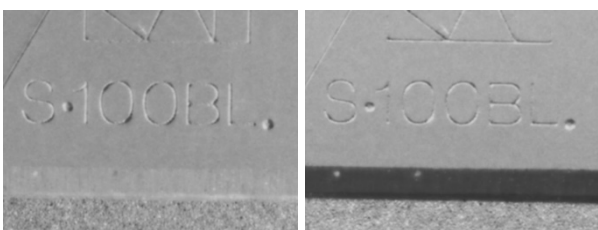
(c) 照度差ステレオ画像から作成した3次元画像

図10 昨年度のアルゴリズムで作成した照度差ステレオ画像

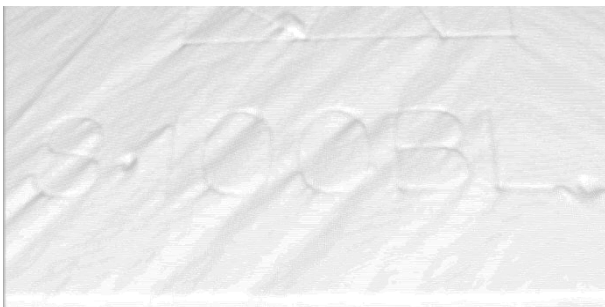
いるが、その一方で明暗が不連続になっている。図10(c)の疑似3次元画像を見ると、図9に比べるとカッターの刃の平坦さが出ているが、照度差ステレオ画像の不連続部分が目立っている。

図11に、本年度のアルゴリズム(4光源ベクトルの疑似逆行行列から法線を求める)で作成した照度差ステレオ画像を示す。鏡面反射の影響はまだ残っているが、刻印を構成する線の上・左右の明暗は正しくできている。また、疑似3次元画像についても、刻印が読み取れるまで再現されている。

疑似逆行行列を利用する方法は照明の数が増えても対応ができるので、照明の数を増やすことでより精度の高い照度差ステレオ画像が得られるのではないかと予想される。

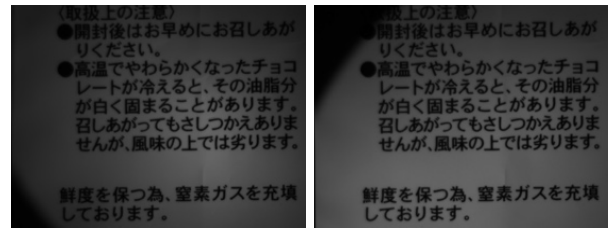


(a) 照度差ステレオ画像 (X成分) (b) 照度差ステレオ画像 (Y成分)



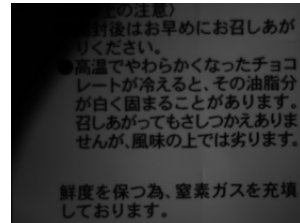
(c) 照度差ステレオ画像から作成した3次元画像

図11 本年度のアルゴリズムで作成した照度差ステレオ画像

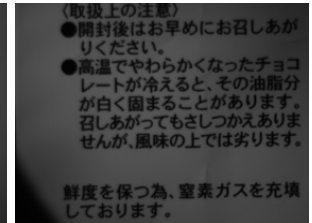


(a) 入力画像 (照明3)

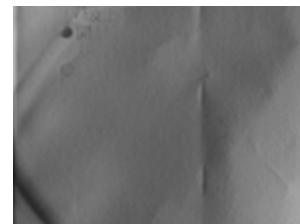
(b) 入力画像 (照明2)



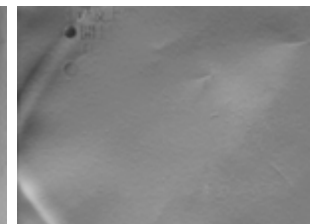
(c) 入力画像 (照明4)



(d) 入力画像 (照明1)



(e) 照度差ステレオ画像 (X成分)



(f) 照度差ステレオ画像 (Y成分)

図12 フィルムの照度差ステレオ画像

4. 3 フィルムの照度差ステレオ画像

図12に、食品包装フィルムを切り取った物の照度差ステレオ画像を示す。フィルムには文字が印刷されているが、印刷には凹凸がほとんど無いため、照度差ステレオ画像では文字が消えている。そのため、文字に隠れて見えづかったフィルムの折り目や凹凸を容易に発見することができる。

5. まとめ

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、照度差ステレオ画像を取得するシステムを構築した。

このシステムを用いて、各照明の光源ベクトルを算出するアルゴリズムを開発した。また、多少の鏡面反射がある対象物でも照度差ステレオ画像を得ることができた。これにより、平面に近い金属部品、プラスチック部品や、印刷のある部品の表面の凹凸などを調べることができるとがわかった。

文 献

- [1] 平成26年工業統計調査, 岐阜県環境生活統計課.
- [2] Robert J. Woodham, Photometric method for determining surface orientation from multiple images. Optical Engineering 19(1980)139-144.
- [3] Hideki Hayakawa, Photometric stereo under a light source with arbitrary motion, Vol. 11, No. 11, J. Opt. Soc. Am A