

## 部品検査のための画像重ね合わせ手法の検討

### A Study of an Image Superposition Method for Component Inspection

鈴木 絢子<sup>†</sup>    伊藤 康一<sup>†</sup>    青木 孝文<sup>†</sup>    小坂井 映<sup>‡</sup>    戸田 昌孝<sup>‡</sup>    久野 耕嗣<sup>‡</sup>  
<sup>†</sup>東北大学大学院情報科学研究科      <sup>‡</sup>アイシン精機株式会社

Ayako SUZUKI<sup>†</sup>      Koichi ITO<sup>†</sup>      Takafumi AOKI<sup>†</sup>  
Akira KOZAKAI<sup>‡</sup>      Masataka TODA<sup>‡</sup>      Koji KUNO<sup>‡</sup>

<sup>†</sup>Graduate School of Information Sciences, Tohoku University

<sup>‡</sup>Aisin Seiki Co., Ltd.

#### アブストラクト

近年，工場における生産工程の自動化 (Factory Automation: FA) において，画像処理を用いた FA システムが注目されている．その中で，本稿では，自動車部品の製造工程における欠陥検査に着目する．自動車部品の欠陥検査では，熟練した作業員が部品表面に欠陥があるかを目視により調べている．大量の部品を検査しているため，作業員によって評価指標が異なることなどが原因で，品質を一定にできないことが問題となっている．そこで，欠陥検査を自動化するために，照明とカメラをロボットアームに取り付け，さまざまな角度から部品を撮影し，反射光の強度分布（反射配光分布）を正常面の分布と比較することにより欠陥を判別する．正確な反射配光分布を得るためには，撮影した多視点画像を高精度に重ね合わせる必要がある．これに対し，本稿では，多視点画像から部品表面の3次元形状（平面）を推定し，高精度に画像を重ね合わせる手法を提案する．また，提案手法の有効性を実証するため，実際に撮影された部品画像を用いて性能評価実験を行い，欠陥を正確に検出できることを示す．

#### 1 はじめに

近年，工場における生産工程の自動化 (Factory Automation: FA) において，画像処理を用いた FA システムが注目されている．FA システムを導入し，従来人間によって行われていた作業を自動化することで，人為的ミスの削減，作業の効率化，人間に対する安全性の向上を図ることができる．その中で，本稿では，自動車部品の製造工程における欠陥検査に着目する．自動車部品は，通常，アルミなどを鋳造して製造される．この際，空気を含むことで空洞ができてしまったり（鑄巣），加工面に段差ができてしまったり（段付）することがある（図1）．現在は，熟練した作業員が，部品表面にこのような欠陥が

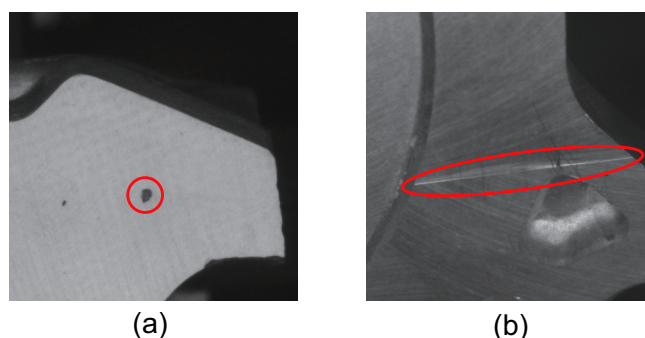


図1: 欠陥の例：(a) 鑄巣，(b) 段付，それぞれ円（赤）で囲まれた箇所

あるかを目視により調べている．大量の部品を検査しているため，作業員によって評価指標が異なることなどが原因で，品質を一定にできないことが問題となっている．このため，自動化のニーズが高まっている．

本稿では，正常面と欠陥箇所では照明の反射が異なることを利用し，画像処理を用いて欠陥検査を自動化する．具体的には，照明とカメラをロボットアームに取り付け，さまざまな角度から部品を撮影し，その反射光の強度分布（反射配光分布）を正常面の分布と比較することで，欠陥を判別する．反射配光分布とは，部品画像の各画素における反射光の分布である．部品表面の平面に対する視点の角度を  $\theta$ ，その時の反射光強度（輝度値）を  $r$  としてプロットし，作成する．部品の正常面と欠陥箇所では反射配光分布が異なるため（図2），これを利用することで欠陥を検出することができる．正確な反射配光分布を得るためには，撮影した画像を高精度に重ね合わせる必要がある．これに対し，本稿では，多視点画像から部品表面の3次元形状（平面）を推定し，位相限定相関法 (Phase-Only Correlation: POC) [1], [2] を用いて高精度に画像を重ね合わせる手法を提案する．また，提案手法の有効性を実

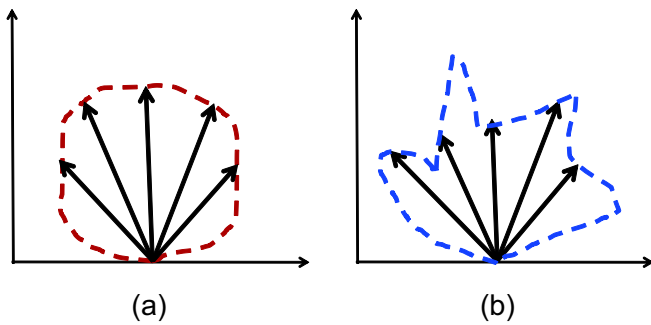


図 2: 反射配光分布 : (a) 正常面, (b) 欠陥箇所

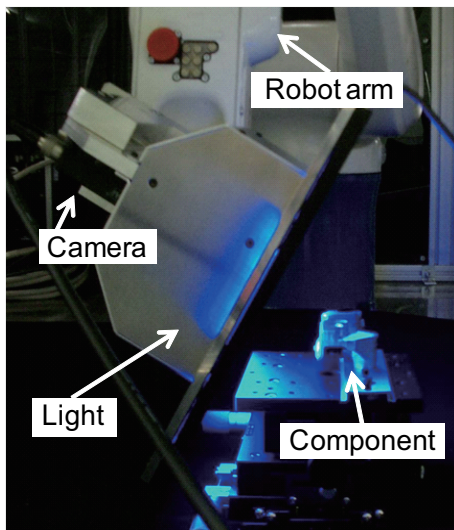


図 3: 撮影装置

証するために、実際に撮影された部品画像を用いて性能評価実験を行い、欠陥を正確に検出できることを示す。

## 2 システム概要

本節では、実験システムの概要について述べる。撮影装置を図 3 に示す。図 3 のように、ロボットアームにカメラと照明を取り付け、部品表面に対して照明の入射角をさまざまな角度に変化させ、多視点から画像を撮影する。使用したカメラの解像度は  $1,620 \times 1,220$  ピクセルであり、照明にはフラットドーム LED 照明を用いた。部品表面に対し、ロボットアームを  $30^\circ$  から  $150^\circ$  まで、 $2^\circ$  ずつ 61 段階に回転させて撮影し、画像  $I_i$  ( $i = 1, \dots, 61$ ) を得る。ここで、 $i$  は画像番号であり、正面 ( $90^\circ$ ) から撮影した画像  $I_{31}$  を基準画像とする。撮影する角度によって見え方が異なるため、そのままでは反射配光分布を作成できない。そこで、全ての画像を基準画像に重ね合わせる必要がある。以下では、画像を重ね合わせるためのアルゴリズムについて述べる。

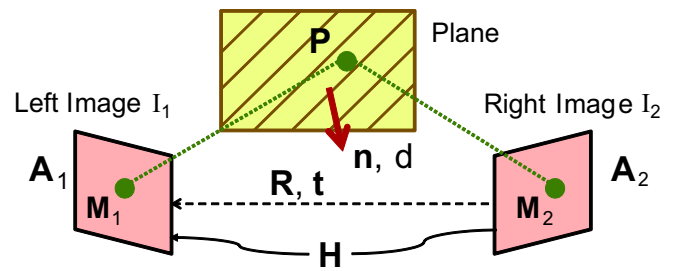


図 4: 平面物体の両眼視

## 3 画像重ね合わせアルゴリズム

本節では、本稿で提案する、3次元復元と平面推定を用いた画像重ね合わせ手法について述べる。

重ね合わせる対象は平面であるので、基準画像  $I_{31}$  と  $i$  番目の画像  $I_i$  との射影変換  $H_{31,i}$  を用いて画像を変形させれば、画像を重ね合わせることができる。各画像間の射影変換  $H_{31,i}$  は、部品画像間の対応関係から求められる。しかし、撮影した部品画像は、撮影する角度によって明るさが大きく異なっているため、一般的な画像マッチング手法を用いて、画像間を対応づけることができない。その他に、あらかじめキャリブレーションを行って射影変換  $H_{31,i}$  を求める手法も考えられる。しかし、部品の取り付け位置とキャリブレーションパターンの取り付け位置が異なってしまうため、画像を高精度に重ね合わせることができない。そこで、重ね合わせる対象が平面であることと、カメラの動きをロボットアームで制御することに着目し、平面の方程式から射影変換  $H_{31,i}$  を推定することを考える。

### 3.1 平面物体の両眼視

平面物体の両眼視は、図 4 のような関係になっている。カメラは正規化カメラであると考え、2台のカメラの間には以下の関係が成り立つ。

$$M_1 = RM_2 + t \quad (1)$$

ここで、 $M_1, M_2$  は、それぞれ対象 3次元平面上の 1 点  $P$  の左と右カメラ座標系における座標、 $R, t$  はカメラの外部パラメータである。平面の方程式は、右カメラの座標系において、

$$n^T M_2 = d \quad (2)$$

と表される。ただし、 $n$  ( $\|n\| = 1$ ) は平面の法線ベクトルで、 $d$  は座標原点から平面までの距離である。式 (2) を式 (1) に代入すると、以下の式が得られる。

$$M_1 = \left( R + \frac{tn^T}{d} \right) M_2 \quad (3)$$

$M_1, M_2$  の代わりに, 2 台の正規カメラにおける画像座標の拡張ベクトル  $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2$  を用いると, 変換

$$s\tilde{x}_1 = H\tilde{x}_2 \quad (4)$$

が得られる. ここで,  $s$  はスカラーであり, 射影変換  $H$  は次式となる.

$$H = R + \frac{tn^T}{d} \quad (5)$$

さらに, デジタル画像座標  $\tilde{m}_1, \tilde{m}_2$  を用いる場合, 式 (4) は

$$s\tilde{m}_1 = H\tilde{m}_2 \quad (6)$$

となる. ただし,  $H$  は次式で表される.

$$H = A_1 \left( R + \frac{tn^T}{d} \right) A_2^{-1} \quad (7)$$

ここで,  $A_1, A_2$  はそれぞれ左カメラ, 右カメラの内部パラメータである. 行列  $H$  のスケールが任意なので, 自由度は 8 である. よって, 4 点の対応がわかれば, 行列  $H$  を求めることができる.

### 3.2 3次元復元と平面推定を用いた画像重ね合わせアルゴリズム

本稿で用いるシステムでは, 1 台のカメラをロボットアームで制御し, 各視点における画像を撮影している. このため, カメラキャリブレーションを行うことで, カメラの内部パラメータ  $A$  と各視点の外部パラメータ  $R_i, t_i$  が求められる. ここで, 基準画像  $I_{31}$  と重ね合わせる画像  $I_i$  について考える. 式 (7) において, 1 台のカメラで撮影しているため,  $A_1 = A_2 = A$  となり, 2 枚の画像間の射影変換  $H_{31,i}$  は次式で表される.

$$H_{31,i} = A \left( R_{31,i} + \frac{t_{31,i}n^T}{d} \right) A^{-1} \quad (8)$$

ただし,  $R_{31,i}, t_{31,i}$  は以下の式から求める.

$$R_{31,i} = R_i R_{31}^{-1} \quad (9)$$

$$t_{31,i} = -R_i R_{31}^{-1} t_{31} + t_i \quad (10)$$

$A, R_{31,i}, t_{31,i}$  はカメラキャリブレーションから求められるので,  $n, d$  を求めれば, 射影変換  $H_{31,i}$  を求めることができる. 一般に, 平面の方程式は以下の式で表される.

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (11)$$

式 (11) より,  $n, d$  は以下の式で求められる.

$$n = (a, b, c) / \sqrt{a^2 + b^2 + c^2} \quad (12)$$

$$d = \frac{||ax_0 + by_0 + cz_0 + d||}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (13)$$

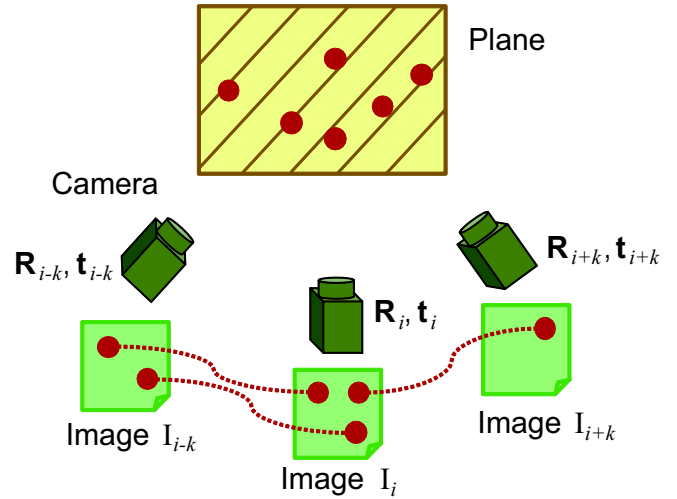


図 5: 3次元復元と平面推定

ただし,  $(x_0, y_0, z_0)$  は座標原点である. そこで, 多視点画像から部品平面上の点を 3次元復元し, 平面の方程式を推定することで  $n, d$  を求め, 射影変換  $H_{31,i}$  を推定する (図 5). 本稿で提案する重ね合わせアルゴリズムの手順を以下に示す.

#### 3次元復元と平面推定を用いた画像重ね合わせアルゴリズム

入力:

画像シーケンス  $I_i(n_1, n_2)$  ( $i = 1, \dots, N$ )

カメラの内部パラメータ  $A$

カメラの外部パラメータ  $R_i, t_i$  ( $i = 1, \dots, N$ )

出力:

重ね合わせ画像  $I'_i(n_1, n_2)$  ( $i = 1, \dots, N$ )

Step1: 画像  $I_i(n_1, n_2)$  と  $I_{i+k}(n_1, n_2)$  との対応関係を, POC を用いた対応点探索 [3] により求める. ただし,  $k = 3$  とし,  $6^\circ$  間隔で対応付けを行う. また, 対応点探索におけるピーク値の閾値を 0.55 とする.

Step2: RANSAC [4] を用いて誤対応点除去を行う. ただし, 変形モデルは射影変形モデルとする.

Step3: すべての画像ペアから得られた対応点を 3次元復元する.

Step4: 3次元復元した点に対して平面フィッティングを行い, 平面の方程式を求める.

Step5: 得られた平面の方程式から, 法線ベクトル  $n$  と座標原点から平面までの距離  $d$  を求める. そして, キャリブレーションで求めた  $A, R_i, t_i$  と得られた  $n, d$  から, 式 (8) を用いて画像間の射影変換  $H_{31,i}$  を求める.

Step6: 求めた射影変換  $H_{31,i}$  を用いて画像  $I_i(n_1, n_2)$  を変形させ, 重ね合わせ画像  $I'_i(n_1, n_2)$  を作成する.

Step7: 部品の取り付け位置の違いやキャリブレーション

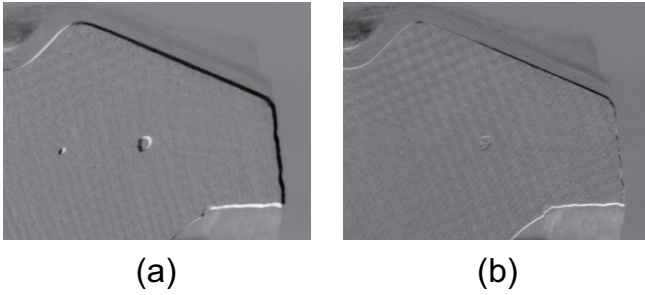


図 6: 基準画像 ( $i = 31$ ) との差分画像 ( $i = 38$ ): (a) 補正前, (b) POC による補正後

ンの微小な誤差により,  $I'_i(n_1, n_2)$  にがたつきが現れるため, それを補正する (図 6). 画像  $I_k(n_1, n_2)$  に対する画像  $I_l(n_1, n_2)$  の平行移動量を  $\delta_{k,l}$  とすると, 基準画像に対する各画像の平行移動量  $\delta_{31,i}$  は以下の式で表せる.

$$\delta_{31,i} = \begin{cases} \sum_{j=i}^{30} \delta_{j+1,j} & (i = 1, \dots, 30) \\ \sum_{j=32}^i \delta_{j-1,j} & (i = 32, \dots, 61) \end{cases} \quad (14)$$

POC を用いて, 隣接する画像間の平行移動量  $\delta_{j+1,j}$  および  $\delta_{j-1,j}$  を求め, 得られた  $\delta_{31,i}$  を用いて画像を変形する.

#### 4 キャリブレーションパターンを用いた実験・考察

本節では, キャリブレーションパターンを撮影した画像を用いて, 提案手法の精度評価を行う.

##### 4.1 実験方法

キャリブレーションパターンは,  $4.9 \times 4.9 \text{ mm}$  のチェッカーパターンを用いた. キャリブレーションパターンに対し, ロボットアームを  $30^\circ$  から  $150^\circ$  まで,  $2^\circ$  ずつ 61 段階に回転させて撮影した. 画像サイズは,  $1,620 \times 1,220$  ピクセルである. 使用した画像を図 7 に示す. 中央の  $7 \times 7$  点に対して, MATLAB の Camera Calibration Toolbox [5] を使用してカメラキャリブレーションを行った. 精度評価には, 基準画像と各重ね合わせ画像との差分画像, 重ね合わせの誤差を用いる. 重ね合わせの誤差は, 基準画像と各重ね合わせ画像それぞれの交点座標を用いて,  $x, y$  方向の RMS (Root Mean Square) 誤差と最大誤差で評価する.

##### 4.2 実験結果・考察

MATLAB の Camera Calibration Toolbox によるキャリブレーション結果を図 8 に示す. また, 基準画像と各重ね合わせ画像との差分画像を図 9 に, 重ね合わせの誤

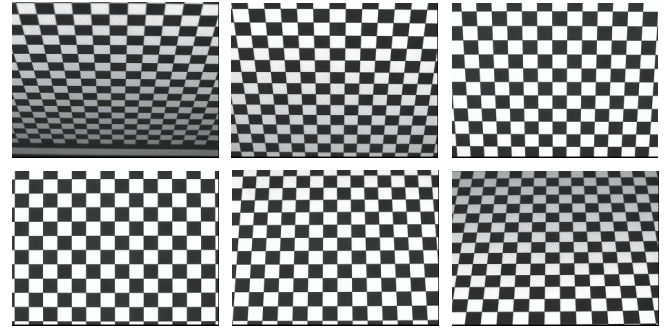


図 7: キャリブレーションパターン: 左上から順に  $i = 1, 11, 21, 31, 41, 51$

Extrinsic parameters (world centered)

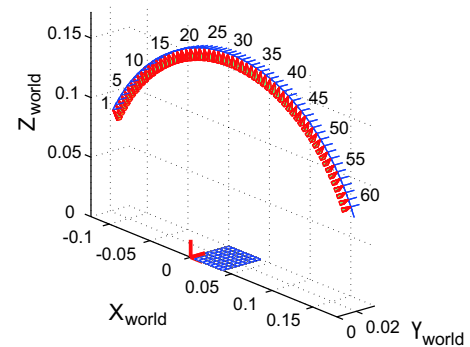


図 8: キャリブレーション結果

差を表 1 に示す. 差分画像を見ると, ほぼ正確に重ね合わせられていることがわかる. 重ね合わせの誤差を見ると, RMS 誤差は  $0.5$  ピクセル以下になっており, 高精度に重ね合わせられたと言える. また,  $y$  方向の誤差が大きいのは, 画像が  $y$  方向に動いているからであると考えられる. 以上より, 提案手法を用いて高精度に画像を重ね合わせることが可能である.

#### 5 部品画像を用いた実験・考察

本節では, 実際に撮影された部品画像を用いて欠陥検出を行い, 提案手法の有効性を示す. まず, 提案手法を用いて部品画像の重ね合わせを行う. そして, 重ね合わせ画像を用いて反射配光分布を作成し, 欠陥検出を行う.

##### 5.1 反射配向分布を用いた欠陥検出アルゴリズム

本節では, 反射配光分布を用いて欠陥検出を行う手法について述べる.

得られた重ね合わせ画像から, 反射配光分布を作成する. 反射配光分布は, 重ね合わせ画像における任意の画素  $I'_i(n_1, n_2)$  について, 部品平面に対する視点の角度を  $\theta$ , その時の輝度値を  $r$  として極座標平面にプロットし,

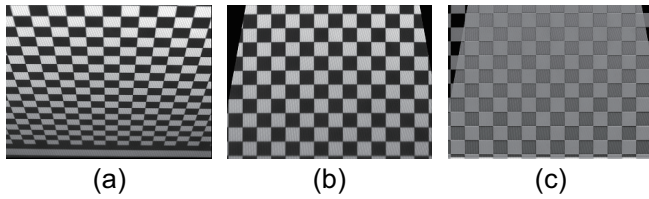


図 9: キャリブレーションパターンを用いた実験結果: (a) 変形前の画像 ( $i = 1$ ), (b) 変形後の画像, (c) (b) と基準画像 ( $i = 31$ ) との差分画像

表 1: キャリブレーションパターンの重ね合わせの誤差

	$x$	$y$
RMS Error [pixel]	0.1602	0.3685
MAX Error [pixel]	0.5765	1.9502

作成する。欠陥箇所を検出するために、正常面の反射配光分布モデルを定義する必要がある。本稿では、正常面の平均輝度値を用いる。まず、任意の正常面を選択し、選択範囲の全ての画素について反射配光分布を作成し、平均化することで、反射配光分布モデルを作成する。

正常面の反射配光分布モデルと、任意の画素の反射配光分布を比較し、正常面か欠陥かを判別する。今回は、正常面の反射配光分布モデルとの距離を利用して判別を行う(図 10)。まず、任意の範囲において、全ての画素の反射配光分布を作成する。そして、画素  $I_i(n_1, n_2)$  において、正常面の反射配光分布モデルとの距離  $d_i(n_1, n_2)$  を  $i = 1, \dots, 61$  について求める。そして、 $d_i(n_1, n_2)$  の平均値を欠陥スコアとする。得られた欠陥スコアに閾値処理を行い、欠陥を検出する。閾値は使用画像ごとに手動で設定する。

## 5.2 実験方法

キャリブレーションと部品の撮影条件は、第 4 節と同じである。使用した画像は 3 種類で、それぞれ鋳巣、段付 (OK)、段付 (NG) が存在する。鋳巣とは、鋳造の際に空気を含むことでできる空洞のことである。段付とは、振動を伴った加工刀具の軌跡差で生じる段差のことであり、ある閾値以上の段差の場合、欠陥となる。本稿では、閾値を超えない段付 (OK) と、閾値を超える段付 (NG) を使い、欠陥のみを検出できるか実験を行う。使用した画像をそれぞれ図 11 に示す。また、対応付けの際には、画像ごとに欠陥がない平面の箇所を切り出して使用している。

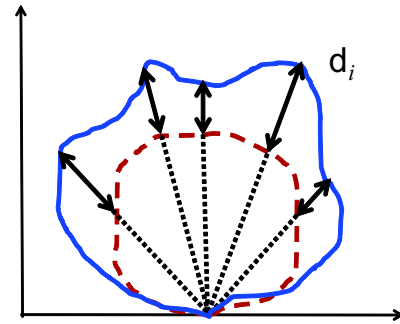


図 10: 反射配光分布モデル: 点線 (赤) が正常面の反射配光分布モデル, 実線 (青) が任意の画素の反射配光分布

## 5.3 実験結果・考察

部品画像 (鋳巣) を重ね合わせた結果を、図 12 に示す。キャリブレーションパターンに比べると、重ね合わせの精度はやや下がったものの、ほぼ正確に重ね合わせることができ、反射配光分布の作成に十分な精度を得た。

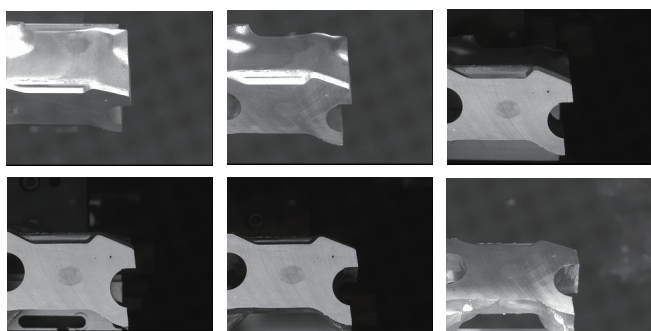
重ね合わせ画像を用いて作成した反射配光分布 (図 13) を用いて、欠陥検出を行った結果を図 14 に示す。図 14 では、欠陥と判定された画素だけ色を赤く変えて表示してある。鋳巣の結果を見ると、欠陥箇所がほぼ正確に検出されていることがわかる。段付の結果を見ると、段付 (NG) の方は検出されているのに対し、段付 (OK) の方は検出されていない。これより、提案手法を用いることで欠陥検出が可能である。また、今回は欠陥検出に用いる閾値を手動で決めているため、今後自動化する必要がある。

## 6 むすび

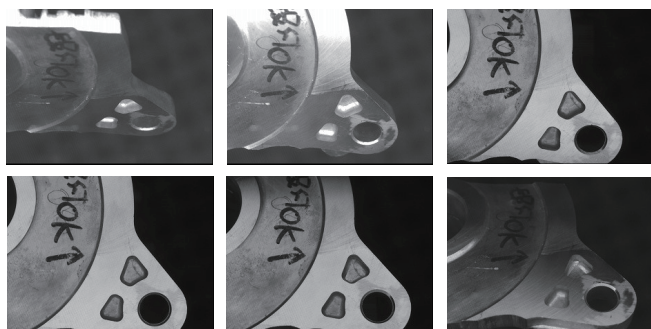
本稿では、3 次元復元と平面推定を用いた、多視点画像の重ね合わせアルゴリズムを提案した。また、重ね合わせ画像から反射配光分布を作成し、欠陥検出を行うことで、提案手法の有効性を示した。今後の課題としては、重ね合わせの精度向上や Support Vector Machine (SVM) を用いた欠陥箇所の検出などが挙げられる。

## 参考文献

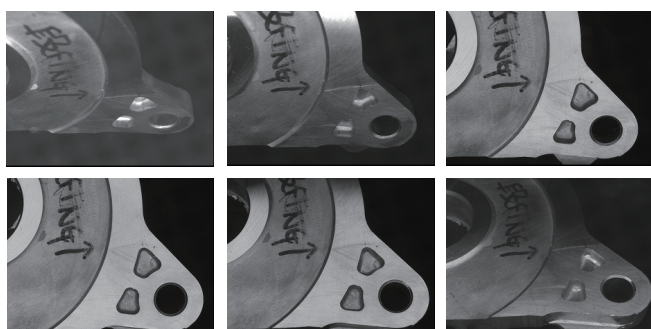
- [1] C. D. Kuglin and D. C. Hines: "The phase correlation image alignment method", Proc. Int. Conf. on Cybernetics and Society, pp. 163-165 (1975).
- [2] K. Takita, T. Aoki, Y. Sasaki, T. Higuchi and K. Kobayashi: "High-accuracy subpixel image registration based on phase-only correlation", IEICE Trans. Fundamentals, E86-A, 8, pp. 1925-1934 (2003).



(a)



(b)



(c)

図 11: 部品画像:(a) 鋳巣, (b) 段付 (OK), (c) 段付 (NG), それぞれ左上から順に  $i = 1, 11, 21, 31, 41, 51$

[3] K. Takita, M. A. Muquit, T. Aoki and T. Higuchi: "A sub-pixel correspondence search technique for computer vision applications", IEICE Trans. Fundamentals, **E87-A**, 8, pp. 1913–1923 (2004).

[4] M. Fishler and R. Boles: "Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography", Communications of the ACM, **24**, 6, pp. 381–395 (1981).

[5] "Camera calibration toolbox for matlab", [http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc).

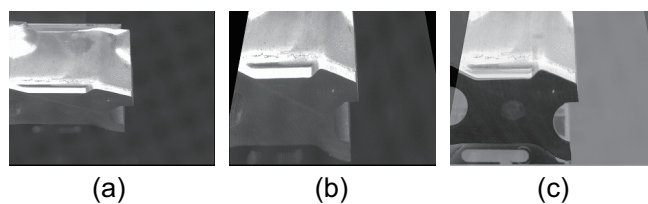


図 12: 部品画像 (鋳巣) を用いた実験結果: (a) 変形前の画像 ( $i = 1$ ), (b) 変形後の画像, (c) (b) と基準画像との差分画像

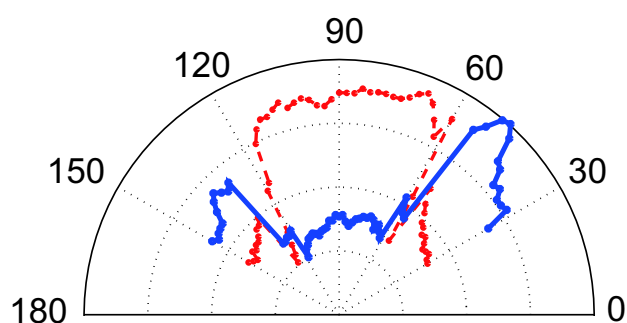
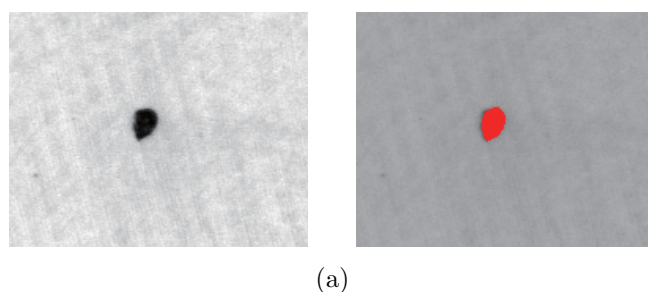
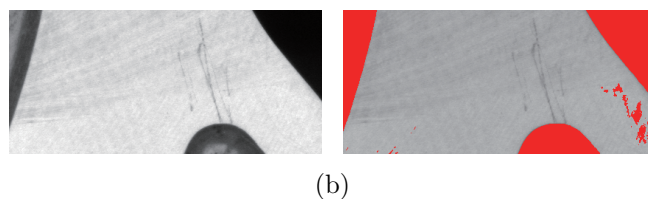


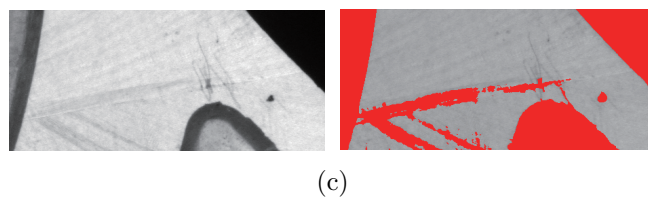
図 13: 鋳巣の反射配光分布: 点線 (赤) が正常面の反射配光分布モデル, 実線 (青) が任意の欠陥箇所の反射配光分布



(a)



(b)



(c)

図 14: 欠陥検出の結果: (a) 鋳巣, (b) 段付 (OK), (c) 段付 (NG), それぞれ左が対象画像, 右が検出結果