

面型パターン照明による欠陥検査法の開発 - 欠陥の形状推定 -

杉野直規* 藤山宗之** 山根八洲男***

Development of Defect Inspection Method Using Patterned Area Illumination - Shape Estimation of a Defect -

Tadanori SUGINO, Muneyuki FUJIYAMA and Yasuo YAMANE

Abstract

In the defect inspection method using patterned area illumination, a defect upon an industrial product is detected from an image emphasized by the patterned area illumination. All defects detected by the inspection method, however, is not unsuitable as a finished product. Therefore, GOOD/NG judgment which judges that the defect is good or no-good as a finished product is required frequently. Shape estimation of a defect is useful for the GOOD/NG judgment. This study proposes a method of the shape estimation. An image obtained by this inspection method is influenced by size of a pattern on the illumination, because the pattern on the image is reflected image/shadow at slope of the defect that is equal to the shape of the defect. Hence, a difference image between two images obtained by two different patterns has information of the slope. We developed the method to estimate the shape of the defect by the difference image. The utility of the method of shape estimation was confirmed through the simulation and the experiment.

Key words: shape estimation, patterned area illumination, circle pattern, difference image

1. はじめに

工業製品表面上の微細な欠陥(凹凸)の外観検査において検査の精度を高めるためには照明装置が重要な役割を果たす。これまでに何らかのパターンを有する面型の照明を用いる手法が効果的であることが報告されている^[1-7]。これらの検査法では欠陥の検出が主目的であるため、欠陥の検出逃しの無いように軽微な異常でも検出可能な性能を有するように開発されることが多い。しかし、製造業の現場では製造工程で発生する異常であっても、あるレベル以下の異常は良品として処理し、あるレベル以上のものを不良品つまり欠陥とする良否判定がよく行われる。この良否判定において欠陥そのものの大きさや形がわかればその精度を上げることが可能であると考えられる。

面型パターン照明を用いた欠陥検査法では、欠陥とパターン照明との位置関係およびパターンの大きさによって得られる欠陥像が異なることが報告されている^{[6][8]}。本研究ではこのことを利用し、パターン特性(大きさ)の調整による欠陥の形状情報(高さなど)の推定が可能か検討した。

2. 面型パターン照明による欠陥検査

本章では、面型パターン照明によって欠陥像を強調することでその検出を容易にする原理および検出後の形状推定の必要性について述べる。

2.1 面型パターン照明による欠陥検出原理

面型パターン照明とは、平坦な面型照明装置の表面に何らかのパターンを付加したものである。図1に面型パターン照明を用いた外観検査法の原理を示す。検査面上に照明を照射すると、その反射光は平坦な(滑らかな)部分ではバイナリパターン(白:光透過, 黒:光遮へい)の並びを崩さず撮像装置で結像する。しかし、検査表面に微小な凹凸(欠陥)が存在する場合、その部分では平坦な部分とは異なる方向の光を反射するため、結果的に

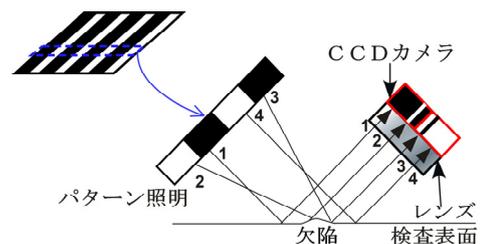


図1 面型パターン照明の検査原理

画像中の欠陥部に相当する位置でパターンの特長の変化が現れる。この画像中のパターンの乱れが欠陥を表しており、通常の照明を用いるのに比べ強調された欠陥像が得られる。検査ではこのパターンの乱れを画像処理し、欠陥の検出・評価を行う^[7]。

本研究で用いる欠陥検査システムは面型パターン照明および撮像装置(CCDカメラとレンズ)、それらを制御する2台のコンピュータで構成される。面型照明はパターンの切り替え・調整機能を有するため、一般的な蛍光灯と拡散板からなる面型照明ではなく液晶パネルを用いている。

2.2 欠陥の良否判定と形状推定

前節で示した手法によって欠陥もしくは疑わしい候補の検出は可能となる。この際、誤検出(欠陥でないものを検出)よりも欠陥を見逃してしまうことのほうが敬遠されるため検査の条件などを厳しく設定することが予想される。そのため補修、廃棄、再生産のコストと製品としての品質を比較し本来は製品として許容できるレベルのものも検出されてしまう。そこで良否判定を行う必要が出てくる。実際、画像を用いた自動検査以前の人間の視覚によって行われていた検査においても良否判定は行われていた^[10]。

良否判定を行う場合、欠陥の高さや凹凸の度合いなどの形状情報がわかればその判定はより正確なものになることは容易に想像できる。そこで本研究では、欠陥とパターン照明との位置関係およびパターンの大きさによって得られる欠陥像が異なるという報告^{[6][8]}より、パターンを変化させることでその投影像である欠陥像の大きさに変化が現れ、その変化は欠陥の凹凸の度合いや傾斜、つまり形状を反映していると考え、パターンの大きさを変動させ得られる画像情報を用いた欠陥の形状推定に取り組んだ。

3. シミュレーションによる形状推定法の検討

これまでの研究でパターンの特性によって同じ欠陥であっても欠陥像が異なることが分かっている。そこで光学シミュレータ^{[4][6]}を用いてパターンの大きさと欠陥像の関係について検証し、得られた結果より形状推定の手法を検討した。

なお、光学シミュレータはコンピュータグラフィックスで用いられる光線追跡法(レイトレーシング法)を基礎とし、コンピュータ内の仮想空間に照明系、撮像系、検査対象を配置し、照明からの光の投影の様子を再現するものであり、その性能は実証済みである。

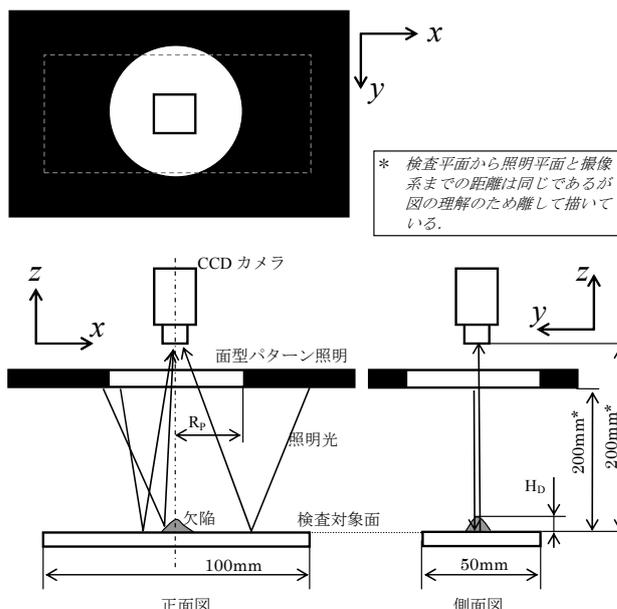


図 2 シミュレーション条件

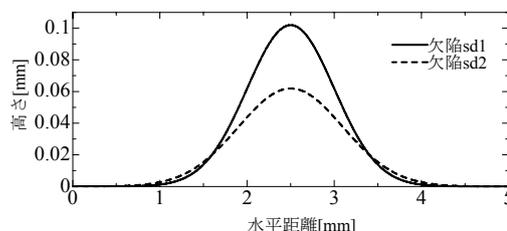


図 3 欠陥モデル(sd1, sd2)の断面プロファイル

3.1 シミュレーション方法

図 2 にシミュレーションの条件を示す。シミュレーションでは簡単のため照明および撮像系は欠陥の直上に配置した。欠陥モデルは正規分布に従う山型欠陥とし、高さ H_D が 0.1mm のモデル(以降、欠陥 sd1)、および 0.06mm のモデル(以降、欠陥 sd2)を使用した。図 3 に欠陥 sd1、欠陥 sd2 の頂上を含む断面プロファイルを示す。欠陥 sd1 のほうが高いが欠陥 sd2 のほうが、裾野部分が若干広いことがわかる。

投影するパターンは図 2 に示すように山型欠陥に対して映り込む方向の違いの影響が最も少ない円部分が白色でその周囲が黒色の円形状のパターン(以降、円形パターン)を用いた。円形パターンと欠陥の中心が一致するように設定し、欠陥 sd1, sd2 について円形パターンの半径 R_p を 5mm より 5mm 刻みで増加させ、欠陥像がシミュレーションによって得られる画像中より消滅するまでシミュレーションを行った。

3.2 シミュレーション結果

図 4 に欠陥 sd1, sd2 のシミュレーション画像の比較を示す。各シミュレーション画像の黒い部分が、

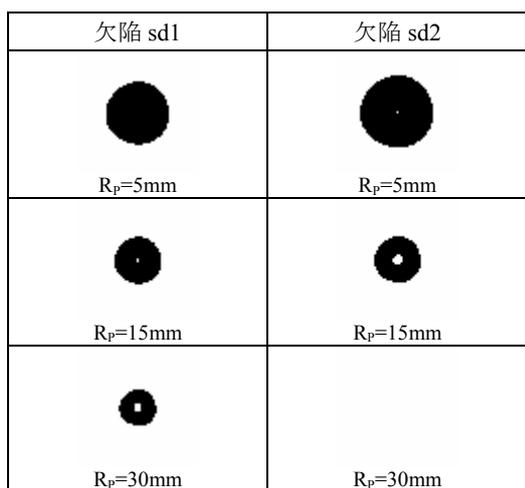


図4 欠陥 sd1, sd2 のパターンの大きさ変動に対するパターン投影シミュレーション画像

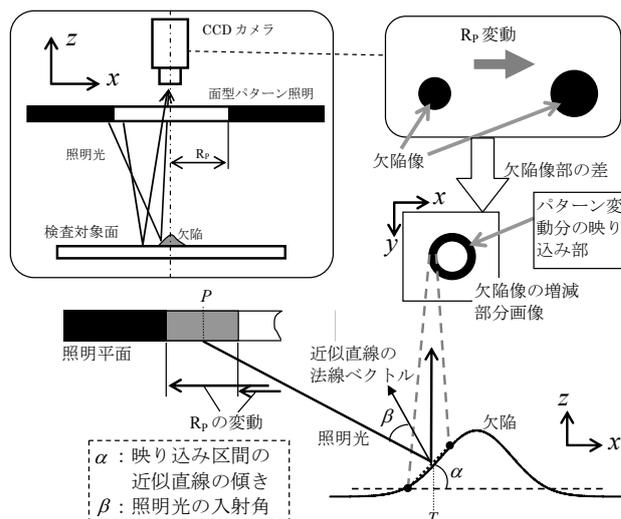


図5 欠陥像からの斜面傾きの推定モデル

円形パターンの外側の黒い領域が欠陥の斜面に映り込むことで現れた像である。また、欠陥像の中心付近の白い部分は照明平面外からの光が届く部分として計算された部分で白く表現している。

図3に示す円形パターンの半径 R_p が 5mm のときの欠陥像は両欠陥ともほぼ同一であるが、詳細に確認すると欠陥 sd2 のほうが若干大きな欠陥像であった。これは欠陥 sd2 の裾野部分が広い影響である。 $R_p=15mm$ では欠陥像はほぼ同一であったが、 $R_p=30mm$ のときに欠陥 sd2 の欠陥像が消滅している。つまり、欠陥の斜面に入ってくる光が黒色(影)から白色の照明光に変わったことを表している。

以上のように、あるパターンでの欠陥像が同じでもパターンの大きさが変わると欠陥の高さ(形状)によって得られる欠陥像が異なることが確認された。欠陥像の変化部分にはパターンの大きさの変動部分の情報が映り込んでおり、これはその部分が欠陥の斜面の傾斜に影響されていることを表している。このことを用いることで欠陥の形状の推定が可能であると考えられる。

3.3 シミュレーション結果に対する形状推定

前節で示したようにパターンの大きさの変動部分の情報が欠陥像の増減部分に反映されている。そこで図5に示す方法でシミュレーション画像を用いた欠陥の形状推定を試みた。まず2種の半径 R_p で得られた画像の欠陥像部分の差をとることで欠陥像の増減部分を画像化する。この増減部分の幅をこの像が映り込んでいる欠陥の斜面を直線近似する区間とする。このとき近似直線の区間の中心を T とする。またパターン半径 R_p を変動させたときの照明平面上の変動幅の中心を点 P とすると、点 P からの光が点 T に映り込むと解釈できる。以上の点 T , P および撮像系の位置関係より欠陥斜

パターン投影シミュレーション画像	差分画像
 ① $R_p=5mm$	 ②-①
 ② $R_p=15mm$	 ③-②
 ③ $R_p=25mm$	 ④-③
 ④ $R_p=35mm$	 ⑤-④
 ⑤ $R_p=45mm$	外側の黒い環状部分が R_p 変動分の映り込み。

図6 欠陥 sd1 のパターン投影シミュレーション画像とその差分画像

面の近似直線の傾き α を求めることが可能である。この α を用いて欠陥の大まかな形状の構築、つまり欠陥の大きさの推定を試みた。

欠陥 sd1 について $R_p=5, 15, 25, 35, 45mm$ のシミュレーション画像を用いて、パターンの大きさ R_p の変動をそれぞれ 5~15, 15~25, 25~35, 35~45 の4区間に分けて形状の推定を行った。図6にパターン投影シミュレーション画像とその差分画像を示す。この差分画像よりパターンの変動

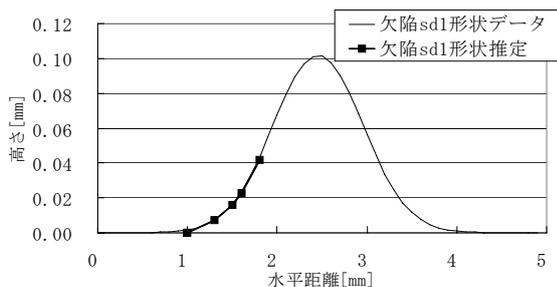


図7 欠陥 sd1 シミュレーション結果による欠陥形状推定



図8 表示デバイスを用いた実験装置

表1 実験装置諸元

装置名	製造元	規格	仕様および条件
液晶マルチメディアモニター	シャープ	IT-26M1	26インチ 最高輝度：500cd/m ²
高性能コンパクトズームレンズ	オプテアート	IMZ-US2	作動距離：200mm 撮影視野：36×48mm
IEEE カメラ Flea2	POINT GREY	FL2-08S2C-C	1/3° CCD 画像サイズ：1024×768 8bit グレースケール 濃度レベル自動調整

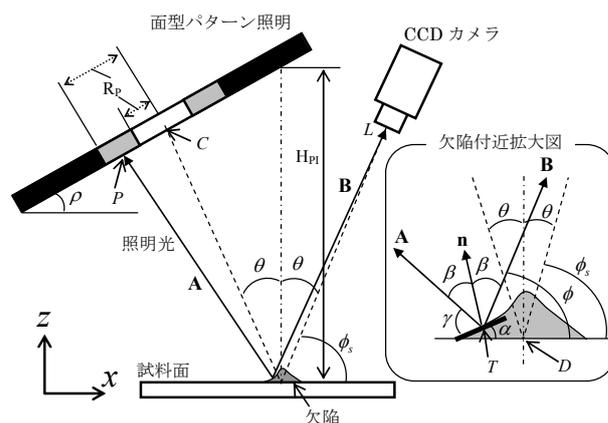
分の画像を映り込み区間として近似対象とし、前述の手法で形状推定を試みた。形状推定結果を欠陥 sd1 の断面プロファイルとともに図7に示す。なお、推定の手順の詳細は後述の4.3節で示す。図より、欠陥 sd1 の左側の裾野部分が適切に推定されていることが分かる。

4. 実験

3章で示したように理想的な条件でのシミュレーションでは欠陥の形状推定が可能であることがわかった。そこで実空間での可能性について実験的に検討した。

4.1 実験方法

車の塗装に用いられるのと同じ塗装を施した試料中の欠陥 rd1 について図8の実験装置で実験を行った。実験装置の諸元を表1に示す。図9に実験装置の位置関係などの条件を示す。図中の $x-z$ 平面の原点を欠陥の底面中心である点 D とする。位置関



- L: 撮像レンズの中心点
- D: 欠陥底面の中心点
- C: 円形パターンの中心点
- P: 円形パターンの変動幅の中心点
- T: 傾きを求める区間の中点、光の映り込みの代表位置
- A: 点 T と点 P を結ぶベクトル
- B: 点 T と点 L を結ぶベクトル
- n: 傾きを求める区間の法線ベクトル
- θ : 試料面の垂線と線分 LD のなす角
- ϕ_s : 点 L と点 D を結ぶ線分 LD と試料面のなす角
- ϕ : 点 L と点 T を結ぶ線分 $LT(=B)$ と試料面のなす角
- ρ : 面型パターン照明と試料面のなす角
- α : 区間の試料面に対する傾き
- β : $A(B)$ と n のなす角
- γ : 試料面と $A(B)$ のなす角
- R_p : 円形パターンの半径
- H_{p1} : 点 D から試料面に垂直な線が面型照明に到達するまでの距離

図9 実験における試料、装置の位置関係

係の条件における実験とシミュレーションの大きな違いは、面型照明と撮像系を同一軸上に並べることができないためレンズとパターンの中心が同一軸上にないことである。このため傾き ϕ_s が発生し、これが形状推定の際にシミュレーションとは異なる計算を必要とした。実験条件の実測値は、線分 $LD=200\text{mm}$ (レンズの作動距離より)、 $H_{p1}=326\text{mm}$, $\phi_s=82^\circ$, $\rho=48^\circ$ であった。なお、計測は手動で行ったため多少の計測誤差を含む。

投影する円形パターンの半径は 15 ピクセルから 50 ピクセルまで 5 ピクセルずつ変化させた。1 ピクセル当たりのディスプレイ上での実距離は 0.35547 mm/pixel であった。

4.2 実験結果

図10に円形パターンの半径を変動させて得られたパターン投影実画像および前後の差分画像を示す。シミュレーションと同様に環状のパターン変動部分が画像として得られた。これによってシミュレーションと同様の形状推定が可能であることがわかる。ただし、図10の $R_p=5.33\text{mm}$ での画像などに現れているように、実際の検査対象面は欠陥以外の部分にも表面粗さに起因する凹凸が存在し、それに対してもパターンが映り込むため形状推定の結果に影響を与える場合があることも予測される。

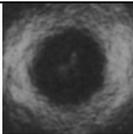
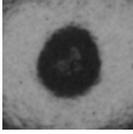
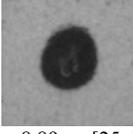
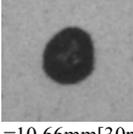
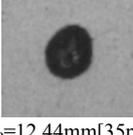
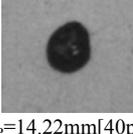
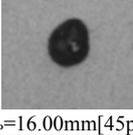
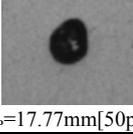
パターン投影実画像	差分画像
 ①R _p =5.33mm[15pixel]	 ②-①
 ②R _p =7.11mm[20pixel]	 ③-②
 ③R _p =8.89mm[25pixel]	 ④-③
 ④R _p =10.66mm[30pixel]	 ⑤-④
 ⑤R _p =12.44mm[35pixel]	 ⑥-⑤
 ⑥R _p =14.22mm[40pixel]	 ⑦-⑥
 ⑦R _p =16.00mm[45pixel]	 ⑧-⑦
 ⑧R _p =17.77mm[50pixel]	外側の黒い環状部分が R _p 変動分の映り込み。 ただし、②-①、③-② はさらにその外側に平 面に対するパターン像 の差分像が映り込んで いる。

図 10 欠陥 rd1 のパターン投影画像とその差分画像

4.3 形状推定と形状データとの比較

図 10 に示した差分画像を用いて形状推定を行った。各差分画像において黒色の環状部分で最も直径が大きくなる部分の片側(画像に向かって左側)の部分をも推定区間としてシミュレーションと同様に形状推定を試みた。ただし、実験装置などの位置関係は図 9 に従った。図 9 の α を求めることで最終的な形状データが推定できるため α を求め形状データを推定するまでの手順を以下に示す。

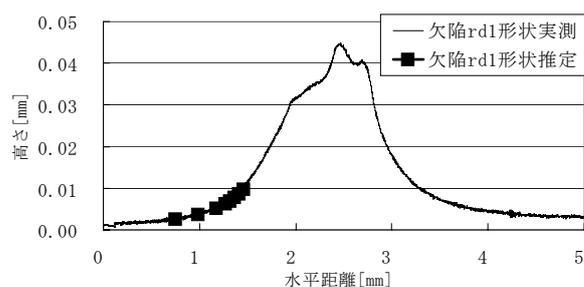


図 11 実際の欠陥 rd1 の形状推定と実測形状との比較

- 1) 形状推定を行うために 4.1 節で示した実験条件に加え、面型パターン照明上での円形パターンの中心位置である点 C の座標値(原点 D からの距離換算値)をあらかじめ求めておく必要がある。本実験では $C(-39.63\text{mm}, 281.99\text{mm})$ であった。
- 2) 点 T, L, P より構成されるベクトル \mathbf{A} および \mathbf{B} の偏角が β であるので次式の内積の式より β を求める。

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = |\mathbf{A}| |\mathbf{B}| \cos 2\beta \quad (1)$$

- 3) β および $\beta + \gamma = 90^\circ$ の関係より γ を求める。
- 4) パターン像の差分画像より得られるパターンの変動部分の映り込み像の中心位置を求め、これをピクセル単位より空間(距離)単位へ換算し、点 $T(T_x, T_z)$ を求める。この際 T の z 座標値は x 座標値に比べかなり小さいので 0 として取り扱い $T(T_x, 0)$ とする。
- 5) ϕ_s および T より ϕ を求める。この際、点 L と点 D 、点 L と点 T の距離をそれぞれ D_{LD}, D_{LT} すると次式の関係が成り立つ。

$$\cos \phi = \frac{|T_x| + D_{LD} \cos \phi_s}{D_{LT}} \quad (2)$$

なお、シミュレーションでは $\phi_s = 90^\circ$ であるため、式(2)は

$$\cos \phi = \frac{|T_x|}{D_{LT}} \quad (3)$$

となる。

- 6) ϕ および $\alpha + \gamma = \phi$ の関係より α を求める。
- 7) パターン像の変動幅が映り込んだ区間の近似直線の傾きを α とし、その区間の形状(近似直線)を構成する。
- 8) 1)~7) をパターン像の変動の全区間で行い合成する。

形状の推定結果と比較する実際の形状データとして、表面粗さ測定器(SE-30, 小坂研究所製)を用いて画像による推定位置とほぼ同位置の1ラインの断面プロファイルを計測したものを利用した。

図 11 に欠陥 rd1 の形状推定の結果とほぼ同位置の実形状データを比較した結果を示す。シミュレ

ーションと同様に欠陥の裾野付近が適切に推定できていることがわかる。しかしながら同図でわかるように欠陥の中腹から頂上への傾斜が急峻な部分が推定できていない。これは急峻な部分にパターンを映り込ませるにはさらに大きな円形パターンを用いる必要があるからである。しかし、図 10 でもわかるように円形パターンの径が大きくなればなるほど変動分の像が得にくくなる。原理的には推定可能であるが、この変動分の画像をいかに作りだすかが今後の課題である。照明や撮像系の位置関係、撮影条件をさらに検討・調整する必要がある。

また山型欠陥の頂上またはその付近には必ず少なからず平坦な部分が存在するが、これについてはパターンをいくら変動させても法線方向が垂直に近い場合パターンの変動分が投影像としては映り込まない可能性が高い。この部分の形状の推定をどのように処理するかも今後の課題である。

5. まとめ

本報告では、面型パターン照明を用いた微小欠陥検査において、投影パターンの大きさの変動による欠陥像の変化をシミュレーションおよび実験で確認した。このことを用いて画像に照明のパターンの変動が映り込んだ部分を差分画像で取得し、その情報と照明系、撮像系との位置関係より欠陥の形状推定が可能であることを示した。

今後の課題として、①形状の推定精度の検証、②山型欠陥の頂上付近などの勾配の急な部分や、頂上など平坦でパターンの変化が現れ難い部分では形状推定が困難となることへの対応、③実画像に現れる微細な表面の粗さの形状推定に対する影響の除去、などが挙げられる。

謝辞

本研究の一部は、平成 19 年度科学研究費補助金、若手研究(B)：課題番号 18760312 の援助にて行った。記して、感謝の意を表す。

参考文献

- [1] 田中一基 他：塗装表面検査の自動化技術，日本機械学会論文集(C 編)，Vol. 60, No. 577, pp. 3201- 3208, 1994.
- [2] 吉田清 他：動画像追跡処理法を用いた塗装外観検査装置の開発，第 9 回外観検査の自動化ワークショップ講演論文集，pp. 45, 1997.
- [3] 広瀬修 他：パターン照明を用いたフィルム表面凹凸欠陥の検出，精密工学会誌，Vol. 66, No. 7, pp. 1098-1102, 2000.

- [4] 広瀬修 他：パターン照明を用いたフィルム表面凹凸欠陥の検出(第 2 報)，精密工学会誌，Vol. 67, No. 7, pp. 1135-1139, 2001.
- [5] 杉野直規 他：塗装面欠陥検査のための光学シミュレータの開発，第 13 回外観検査の自動化ワークショップ講演論文集，pp. 152-157, 2001.
- [6] 杉野直規 他：光学シミュレータと LCD を用いた照明パターン検討システムの開発，2003 年度精密工学会春季大会学術講演会論文集，pp. 424, 2003.
- [7] 杉野直規 他：面型パターン照明を用いた凹凸判定機能付き欠陥検査法の開発，2005 年度精密工学会春季大会学術講演会論文集，pp. 423-424, 2005.
- [8] 杉野直規 他：面型パターン照明を用いた欠陥検査法の開発—パターンの自動調整—，2006 年度精密工学会高松地方講演会論文集，pp. 63-64, 2006.
- [9] T.Sugino et al.: Inspection of Bow and Deformation of Printed Circuit Board Using Patterned Panel Light Source, Proceedings of the International Conference on Agile Manufacturing, Advance in Agile Manufacturing - ICAM 2003, pp. 393-398, 2003.
- [10] 杉野直規 他：塗装面の欠陥検査の自動化 —欠陥の 3 次元形状と人間の判断との関係—，1999 年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集，pp. 654, 1999.