

## パターン化偏光子を用いた偏光イメージングデバイスの開発と応用

太田 晋一<sup>†</sup> 川嶋 貴之<sup>††</sup> 井上 喜彦<sup>††</sup> 本間 洋<sup>††</sup> 佐藤 尚<sup>††</sup> 川上 彰二郎<sup>††, †††</sup>

長嶋 聖<sup>††††</sup> 青木孝文<sup>††††</sup>

<sup>†</sup> 宮城県産業技術総合センター 〒981-3206 宮城県仙台市泉区明通 2-2

<sup>††</sup> 株式会社フォトニックラティス 〒980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉

<sup>†††</sup> (財) 仙台応用情報学研究振興財団 〒980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉

<sup>††††</sup> 東北大学大学院情報科学研究科 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

E-mail: <sup>†</sup> ota-sh583@pref.miyagi.jp,

<sup>††</sup> kawasima@photonic-lattice.com

### あらまし

CCDの1画素毎に透過偏光方向の異なる偏光子アレイを配置し、空間の偏光情報と輝度情報を同時に取得できる偏光イメージングカメラの開発を行っている。本論文では、偏光イメージングカメラから取得した画像を処理し、偏光情報を取得できることを示す。さらに、偏光イメージングカメラの応用例として、窓の映りこみ除去、物体の形状情報の取得及び道路面の検出を示す。

### キーワード

偏光、フォトニック結晶、CCD、偏光イメージング、マシンビジョン

## Development of a polarization imaging device using a patterned polarizer and its application

Shinichi Ota<sup>†</sup> Takayuki Kawashima<sup>††</sup> Yoshihiko Inoue<sup>††</sup> Yo Homma<sup>††</sup> Takashi Sato<sup>††</sup>

Kawakami Shojiro<sup>††, ††††</sup> Sei Nagashima<sup>††††</sup> Takafumi Aoki<sup>††††</sup>

<sup>†</sup> Industrial Technology Institute, Miyagi Prefectural Government.

2-2 Akedori, Izumi-ku, Sendai-shi, Miyagi, 981-3206 Japan

<sup>††</sup> Photonic Lattice, Inc. Aramaki aza aoba, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi, 980-0845 Japan

<sup>†††</sup> Sendai Foundation for Applied Information Sciences.

Aramaki aza aoba, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi, 980-0845 Japan

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

6-6-05 Aramaki aza aoba, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi, 980-8579 Japan

E-mail: <sup>†</sup> ota-sh583@pref.miyagi.jp,

<sup>††</sup> kawasima@photonic-lattice.com

### Abstract

We have developed a polarization imaging camera using a segmented polarizer, each segment corresponding to a pixel of a CCD and having a different polarization direction. Brightness and polarization information can be obtained from the camera. In this paper, we explain the procedure for obtaining the information and show some examples of polarization images, and further procedures for the purpose of recognition of object shapes and reduction of specular reflection.

### Keyword

polarization, photonic crystal, CCD, polarization imaging, machine vision

## 1. はじめに

一般に、通常の撮像素子では空間の輝度情報のみを取得可能であり、光のもう一つの情報である偏光情報は無視されている。偏光情報を取得するには、通常、撮像素子の前に配置した偏光子を回転させながら撮影する方法や透過軸方向の異なる偏光子を設置した複数台のカメラを用いて撮影する方法などを用いる [1]。このような方法においては、計測に時間を要するために高速化において限界があることや大掛かりなシステムが必要になることが問題となっている。

これに対し、筆者らのグループでは、CCDの1画素単位で透過軸を制御したパターン化偏光子をCCDに直接貼り合わせた偏光イメージングカメラの開発を行っている [2] [3]。偏光イメージングカメラは、1台のカメラを用いた1度の撮影で、空間の偏光情報と輝度情報を同時に取得可能である。

本論文では、まず、パターン化偏光子と偏光イメージングカメラの概要について示す。次に、偏光イメージングカメラを用いて撮影した画像から偏光情報を取得する手法を示す。さらに、偏光イメージングカメラの応用例として、窓の映りこみ除去、物体の形状情報の取得及び道路面の検出を示す。

## 2. パターン化偏光子の概要

本節では、偏光イメージングカメラの主要部品であるパターン化偏光子の概要について述べる。

従来の偏光子は有機フィルムを延伸する、もしくは複屈折結晶を用いる、といった作成方法がとられているため、異なる透過軸の偏光子を素子内で集積化するということは困難であった。

これに対し、今回は、筆者らのグループから提案された「自己クローニング法」による、数ミクロンサイズで透過軸を制御したパターン化偏光子を用いた [4]。自己クローニング法とは、スパッタリングによる薄膜形成技術を応用したもので、凹凸のある基板上に、その凹凸のパターンを保存したまま多層膜を積層できる方法である。具体的には、パターン化した基板上に、エッチングを行いながら多層膜のコーティングを行う。製膜とエッチングのバランスを最適化することで、一定角度の斜面が選択的に保存される。

図1に自己クローニング法で作製される偏光子の概略図を示す。xy面内での異方性を利用して、z方向に伝搬する光において、溝に平行な偏光（以下TE偏光と呼ぶ）と垂直な偏光（以下TM偏光と呼ぶ）との間でブラッグ反射による遮断域の波長域がずれることを利用して、偏光分離を実現させている。これまでに光通信用偏光子として挿入損失0.1dB、消光比40dBのものを実現し [5]、可視光用としては膜厚のチャージングを利用し帯

域幅80nmの青用偏光子を実現してきた [6]。

この素子の特長はパターン化が可能であるという点である。偏光子としての透過軸の方向は基板のパターンで決まっているため、任意のパターンを用意することで、任意の透過軸を1枚の基板上に配置することが可能である。

今回は図2に示すように、CCDの1画素のサイズに合わせて $4.65\mu\text{m}$ 角ごとに透過軸の方向を45度ずつ変えた偏光子を作製した。材料は $\text{Nb}_2\text{O}_5$ と $\text{SiO}_2$ を交互に積層している。表面SEM像から方向の異なるパターン間においても形状が乱れることなく、積層できていることがわかる。基板ピッチは230nm、積層厚さは約 $5\mu\text{m}$ である。

今回用いた偏光子の特性を図3に示す。特性は、 $3\text{mm} \times 3.5\text{mm}$ の面積の様なパターンで測定した。波長550nm以下において消光比500程度のものを用いている。なお、このままでは550nm以上の光は両偏光とも透過するため、偏光子の裏面に多層膜フィルタを形成し、その波長域の光はカットしている。

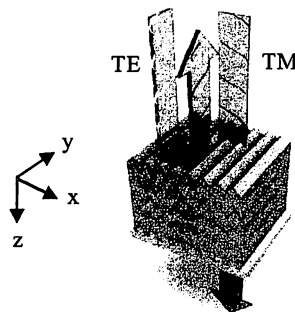


図1 自己クローニング法で作成される偏光子の概略図

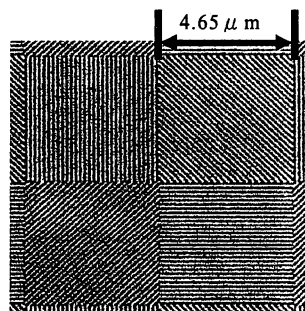


図2 偏光子アレイのSEM像

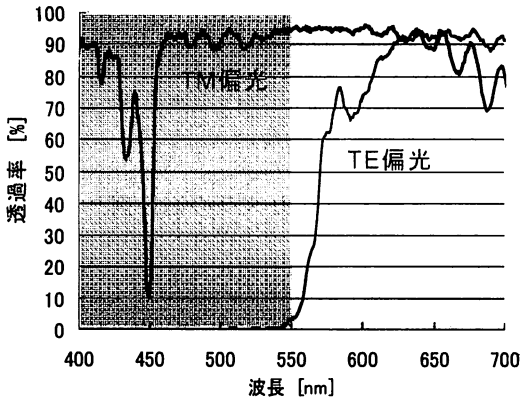


図3 偏光子の波長-透過率特性

### 3. 偏光イメージングカメラの概要

本節では、偏光イメージングカメラの概要について述べる。

図4に今回開発した偏光イメージングカメラの外観を示す。使用したカメラの画素数は1380x1240pixel、フレームレートは8f/sec、1/2インチモノクロCCDを持ち、PCにはUSB接続できる。図5に偏光子アレイを貼り合わせたCCDの概観を示す。偏光子アレイは、画素数1164x874、1画素4.65 $\mu$ m角ピッチ、透過軸方向が45度ずつ異なる4パターンから構成される。

図6に偏光イメージングカメラを用いて直線偏光フィルタを撮影した画像を示す。透過軸方向が45度ずつ異なる偏光子アレイの4パターンを反映してモザイク模様になっていることが分かる。

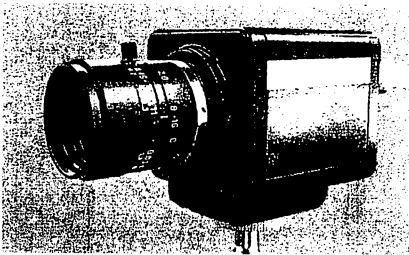


図4 偏光イメージングカメラの外観

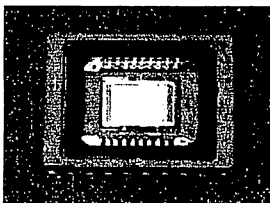


図5 偏光子アレイを張り合わせたCCDの外観

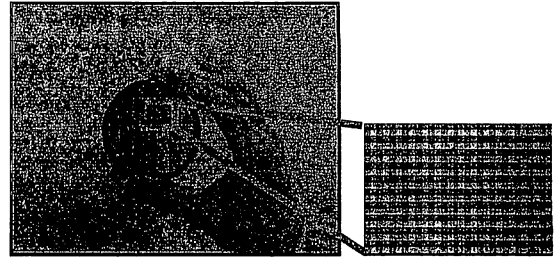


図6 偏光イメージングカメラを用いた直線偏光フィルタの撮影画像 (左：直線偏光フィルタ、右：拡大図)

### 4. 偏光情報の取得方法

本節では、偏光イメージングカメラを用いて撮影した画像から偏光情報を取得する手法を示す。

偏光子アレイは、図7に示すように、透過軸方向が45度ずつ異なる0,45,90,135度の4パターンから構成される。

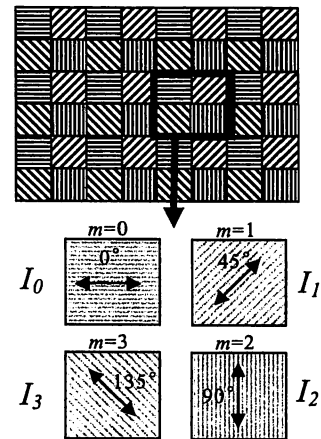


図7 偏光子アレイ

これらの偏光子アレイの受光強度  $I_m$  は、図8のように正弦的に変化し、平均値  $M$  と振幅  $A$  を用いて、偏光子の方位に依存しない強度と偏光子の方位に依存する強度の和として式1のように表される。受光強度が最大となる方向(以下偏光主軸方向と呼ぶ)を  $\alpha$  とする。偏光子の方位  $m$  ( $m=0, 1, 2, 3$ ) は、0,45,90,135度に対応する。

$$I_m = M + A \cdot \left\{ \cos \left( 2\alpha - \frac{\pi}{2} \cdot m \right) \right\} \quad (1)$$

$m$  ( $m=0, 1, 2, 3$ ) : 偏光子の方位

$M$  : 平均値

$A$  : 振幅

$\alpha$  : 偏光主軸方向

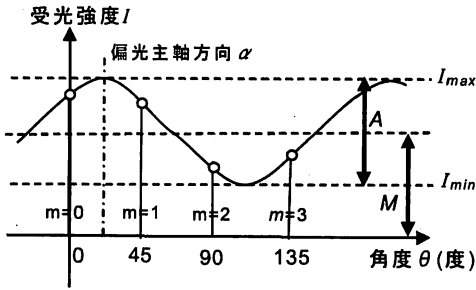


図8 偏光子アレイの受光強度

透過軸方向が45度ずつ異なる0,45,90,135度の4パターンから得られた受光強度 $I_0, I_1, I_2, I_3$ を式2、式3のようにフーリエ解析する。

$$F = \sum_{m=0}^3 I_m \cdot e^{-j2\pi \frac{m}{4}} = (I_0 - I_2) + j(-I_1 + I_3) \quad (2)$$

$$\text{Re}\{F\} = I_0 - I_2$$

$$\text{Im}\{F\} = -I_1 + I_3$$

$$\begin{aligned} F &= \sum_{m=0}^3 I_m \cdot e^{-j2\pi \frac{m}{4}} \\ &= \sum_{m=0}^3 \left[ M + A \cdot \cos\left(2\alpha - \frac{\pi}{2} \cdot m\right) \right] \cdot e^{-j2\pi \frac{m}{4}} \\ &= \sum_{m=0}^3 \left[ M - A + 2A \cdot \cos^2\left(\alpha - \frac{\pi}{4} \cdot m\right) \right] \cdot e^{-j2\pi \frac{m}{4}} \\ &= 2A \cdot e^{j2\alpha} \quad (3) \end{aligned}$$

式2、式3より、振幅 $A$ と偏光主軸方向 $\alpha$ は、式4、式5のように求めることができる。

$$A = \frac{|F|}{2} = \frac{\sqrt{\text{Re}\{F\}^2 + \text{Im}\{F\}^2}}{2} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{\arg\{F\}}{2} \quad (5)$$

平均値 $M$ は、式6のように求めることができる。

$$M = \frac{1}{4} \cdot \sum_{m=0}^3 I_m \quad (6)$$

平均値 $M$ と振幅 $A$ と偏光主軸方向 $\alpha$ の偏光情報の偏光情報の解析では、式(4)の絶対値の計算と式(5)の三角関数の計算を配列化したテーブルを用いること

で、加減算とシフト演算のみで実現可能であり、処理の高速化が可能である。実際に、Intel Pentium4 PC(3.2GHz)において、150万画素あたり約4msec程度で処理を実現できており、偏光処理画像のリアルタイムでの表示を実現している。

## 5. 偏光イメージングカメラの応用例

本節では、偏光イメージングカメラの応用例として、窓の映りこみ除去、物体の形状情報の取得及び道路路面検出を示す。

### ・窓の映りこみ除去

偏光イメージングカメラを用いて車のフロントガラスを撮影し、偏光成分を除去することによって、映りこみを除去した結果を示す。

一般に、ガラス面での映りこみは強く偏光している。写真の撮影の際には、カメラの前に配置した偏光子を適切な角度に回転させることで、特定のガラス面の反射を除去する方法が多く用いられる。しかし、図9のように方向の異なる複数のガラス面が存在する場合、すべてのガラス面の映りこみを同時に除去することはできない。

これに対し、偏光イメージングカメラは、画素単位で偏光情報を取得し、偏光成分を除去することが可能である。図9の撮影画像から映りこみを除去した結果を図10に示す。複数のガラス面の映りこみを同時に除去できていることが分かる。図10の映りこみを除去した画像は、図9の撮影画像から $I_{min}(=M-A/2)$ を抽出した画像である。



図9 撮影画像



図10 映りこみを除去した画像

### ・物体の形状情報の取得

偏光イメージングカメラを用いて物体を撮影し、偏光主軸方向を抽出することによって、物体の形状についての情報を取得した結果を示す。

一般に、物体の表面反射は、入射する光が偏光していない場合、反射面に平行なS偏光の反射率の方がP偏光の反射率より大きい。そこで、表面反射の偏光主軸方向からS偏光の向きを特定し、反射面の方向の情報を得ることで、偏光から形状についての情報を得ることができる。実際に、宮崎らは偏光情報を用いて透明物体の3次元形状の検出に成功している[7]。

ボールと人形を偏光イメージングカメラで撮影し、偏光主軸方向の情報を表示させた結果を図11、図12に示す。図12の偏光主軸方向の画像は、図11の撮影画像から式(1)の偏光主軸方向 $\alpha$ を抽出し、図12中の濃淡マップに従い表示させたものである。撮影は、ドーム状の白い布の中にボールを置き、拡散照明を用いている。

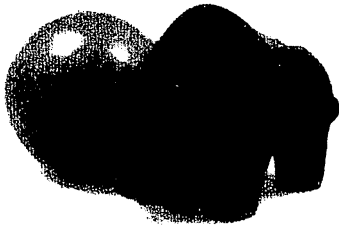


図 11 撮影画像



図 12 偏光主軸方向の画像

(濃淡表示では0度と90度は区別できないが、データ上は区別可能。)

ボールと人形の形状を反映し、それぞれの方向に対応した色が表示されていることがわかる。なお偏光方向は180度異なる面で同じ方向となるので、ある面とその180度反転した面は同じ色を表示する。今回のような、偏光主軸方向だけの情報では、面の向きは完全には決まらず、奥行き方向の情報も得られない。

したがって物体の3次元形状の一部の情報を得ているといえる。また、ボールと人形の境界は、輝度情報では識別が難しいが、それぞれの境界での面の方向は大きく異なっているために、偏光情報を用いることで境界を容易に識別できている。

### ・道路面の検出

偏光イメージングカメラを用いて道路面を撮影し、偏光情報を用いて道路面を検出した結果を示す。

道路面はほぼ連続した面で構成されるため、反射光の偏光主軸方向はほぼ一様であり、その形状に合わせて緩やかに変化する。また、車を運転する際に、偏光サングラスを着用する機会があることから分かるように、偏光成分強度が比較的強い。一方、道路面意外の構造物は、通常、道路面より複雑な構造か、別の方向をもつ面で構成されている。従って、このような道路面の偏光情報の特徴から、道路面の検出を行える可能性がある。

偏光イメージングカメラを用いて道路面を撮影し、偏光主軸方向の情報を表示させた画像を図13、図14に示す。今回は、上記の道路面の偏光情報の特徴をふまえ、以下の手順で検出を行った。



図 13 撮影画像

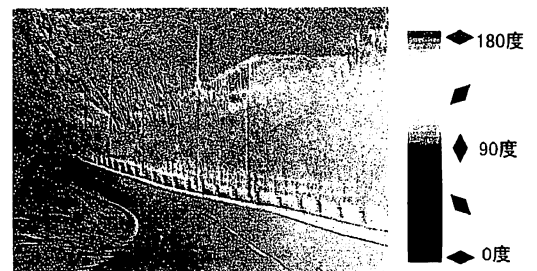


図 14 偏光主軸方向のカラー画像

**Step1**：偏光イメージングカメラを用いて道路面を撮影し、2節の処理手順に従い、平均値  $M$  と振幅  $A$  と偏光主軸方向  $\alpha$  の画像を作成する。

**Step2:** 平均値  $M$  と振幅  $A$  の画像から、どれだけ偏光しているかを表す指標である偏光度  $\rho$  の画像を作成する (式 7)。

$$\text{偏光度 } \rho = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{A}{M} \quad (7)$$

**Step3:** 偏光度の大きい領域を検出するために、偏光度の 2 値化画像を作成する (図 15)。

**Step4:** 偏光主軸方向が緩やかに変化する領域を検出するために、偏光主軸方向の画像に空間微分フィルタを適用後、2 値化画像を作成する (図 16)。

**Step5:** 図 15 からわかるように、今回用いた 2 節の処理手順の場合、急峻な輝度値変化を伴うエッジ部分において、計算上では偏光度が大きくなる。しかし、このような領域は、偏光主軸方向が安定していない場合が多い。そこで、今回は、偏光度が大きいかつ偏光主軸方向が緩やかに変化する領域を検出するために、図 15 と図 16 の AND 画像を作成し、2 回の収縮・膨張処理を行っている。

図 17 に道路領域の候補の検出結果を白色で表示した画像を示す。道路面の検出では、ステレオカメラを用いた 3 次元形状計測による手法の研究が多く行われている [8]。道路面の偏光情報を用いることは、さらに計算負荷を軽減しリアルタイム性を高めることやロバスト性を高める上で重要な意味を持つと考えられる。

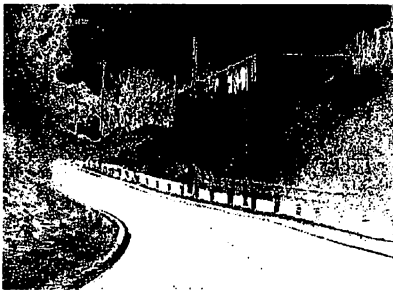


図 15 偏光度の 2 値化画像



図 16 偏光主軸方向の空間微分フィルタ適用後の 2 値化画像



図 17 道路面の検出結果

## 6. まとめ

CCD の 1 画素毎に透過軸方向の異なる偏光子アレイを CCD に直接張り合わせることで、画素レベルで空間の偏光情報と輝度情報を同時に取得できる偏光イメージングカメラを開発した。偏光イメージングカメラを用いて撮影した画像を透過軸方向が 45 度ずつ異なる 4 パターン毎に処理することで、偏光情報を高速に取得できることを示した。偏光イメージングカメラの応用例として、物体の形状情報の取得、道路面検出について示した。偏光イメージングカメラは、1 台のカメラを用いた 1 度の撮影のみで空間の偏光情報と輝度情報を同時に取得可能であり、高速に偏光情報を取得する必要がある応用に特に有用であると考えられる。

## 文 献

- [1] 山上一郎, 山下二郎, "パラメトリック増幅器," 信学論 (B), vol. J62-B, no.1, pp.20-27, Jan.1979.
- [2] 川嶋貴之, 佐藤尚, 本間洋, 井上喜彦, 川上彰二郎, 太田晋一, 長嶋聖, 青木孝文, "フォトリック結晶偏光子を集積した偏光イメージングカメラの開発," 電子情報通信学会ソサイエティ大会 C-3-92, 2006 年 9 月.
- [3] 川上彰二郎, 川嶋貴之, 井上喜彦, 本間洋, 佐藤尚, 太田晋一, 長嶋聖, 青木孝文, "フォトリック結晶偏光子を用いた偏光イメージングカメラの開発," 電子情報通信学会論文誌 C, 2007 年 1 月号掲載予定 (招待論文).
- [4] T. Kawashima, Y. Sasaki, K. Miura, N. Hashimoto, A. Baba, H. Ohkubo, Y. Ohtera, T. Sato, W. Ishikawa, T. Aoyama, and S. Kawakami, "Development of autocloned photonic crystal devices," IEICE Trans. Electron., vol.E87-C, 283-290, 2004.
- [5] 川嶋貴之, 大寺康夫, 佐藤尚, 川上彰二郎, "2 次元フォトリック結晶偏光分離素子の高性能化," 電子情報通信学会総合大会, C-3-1, 2000 年 3 月.
- [6] 川嶋貴之, 井上喜彦, 佐藤尚, 川上彰二郎, "可視光用フォトリック結晶偏光子の開発," 第 52 回応用物理学関係連合講演会, 29p-YV-11, 2005 年 3 月
- [7] 宮崎大輔, 池内克史, "偏光レイトレーシング法による透明物体の表面形状の推定手法," 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J88-D-II, No. 8, pp. 1432-1439, 2005 年 8 月.
- [8] 関晃仁, 奥富正敏, "道路面の抽出・姿勢推定をもとにした一般道路環境下におけるロバストな障害物検出," 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J89-D, No. 8, pp. 1859-1868, 2006 年 8 月