

物体の偏光特性の解析と応用

中村 嘉朗[†] 富永 昌治[‡]

[†]大阪電気通信大学大学院情報工学専攻

[‡]大阪電気通信大学情報工学科

あらまし コンピュータビジョンやパターン認識において、シーンに存在する物体の材質を画像データから判定することは重要である。実際、金属とプラスチックのような不均質誘電体では見かけは類似するが、本質的に異なった材質である。このとき色情報を用いずに、区別する手法として偏光の利用がある。本稿では、偏光フィルタとカメラを用いたシステムで、物体表面の偏光特性を解析する。光沢やハイライト付近の偏光度分布が材質に依存することを実験的に見出した。この特性を用いて、金属-不均質誘電体の区別が可能であることを示す。いくつかのプラスチックと金属材料を用いた実験で有効性を示す。

キーワード 物体認識, 偏光, 金属, 不均質誘電体, デジタルカメラ

Analysis of Polarization Properties of Objects and its Application

Yoshiro NAKAMURA[†] and Shoji TOMINAGA[‡]

[†]Graduate School of Information and Engineering, Osaka Electro-Communication University

[‡]Department of Engineering Informatics, Osaka Electro-Communication University

Abstract In computer vision and pattern recognition, it is important to judge the material of an objects based on the image data in a natural scene. For instance, metals and inhomogeneous dielectrics like plastics are essentially different materials although the appearances are often close each other. We consider use of a polarization property as a technique to distinguish the materials without using color information. The present paper analyzes the polarization properties of objects surfaces by using a system consisting of a polarization filter and a digital camera. We have found experimentally that the polarization degree around specular highlight depends on the materials. We show that this property makes it possible to distinguish metal and inhomogeneous objects from the observed polarized images.

Keyword Object recognition, polarization, metal, inhomogeneous dielectric, digital camera.

1. はじめに

シーンに存在する物体の材質を画像データから判定することは各方面で重要である。例えば、金属とプラスチックのような不均質誘電体では見かけは類似するが、異なった材質として分離されるべきである。

カラーカメラで物体を撮影する際、計測画像は物体表面の光反射の性質及び、照明光源や撮影の観測条件に依存して得られる。一般に自然界に存在する物体及び、人工的に作られた物体の多くは2色性の光反射特性を持つことが知られている。特に不均質誘電体では、物体色と同時に光源からの正反射によるハイライトを観測できる。2色性反射とは、鏡

面反射と拡散反射の2つの異なった反射成分の線形結合で反射光が記述できると仮定する。一方、均質物体である金属は、鏡面反射のみの1色性の反射特性を示している。

したがってこのような反射特性を利用して、観測画像内の物体を金属-不均質誘電体に分類する手法が研究されてきた。すなわち鏡面反射と拡散反射の色情報からカラーヒストグラム形状を用いた手法である。しかし、これには光源色と物体色が同じ場合、分類できないという欠点がある。その他、色情報を用いずに区別する手法として偏光の利用がある[1-3]。

本稿では、偏光フィルタとカメラを用いたシステムで、物体表面の偏光特性を計測し、

偏光度の分布形状から物体表面の材質を安定して分類することを提案する。我々は、光沢やハイライト付近の偏光度分布が材質に依存することを実験的に見出している。特に、金属物体表面の偏光度分布図は、フレネル反射の理論とは異なった実験結果である。これらの特性を用いて、金属-不均質誘電体の区別が可能であることを示す。また偏光度特性は偏光フィルタにも依存することを示す。

2. 不均質誘電体-金属物体の反射

不均質誘電体の反射は、図 1 に示すように 2 種類の反射成分からなる。まず入射光の一部は物体の表面と空気層の境界面で反射し、この反射光を鏡面反射と呼ぶ。反射光は入射角と受光角が一致するごく狭い範囲のみで観測される。プラスチックの表面に発生するハイライト領域はこの反射が主である。また、この鏡面反射光は光源の情報を持っており、その色は光源の色と一致する[4]。

第二の反射成分は、入射光が物体内部に入り材料の色素の間で散乱や吸収が繰り返されることで起こる。これが境界面を逆方向に通過して空気中に戻れば、拡散反射成分として観測される。プラスチックの黄色や赤色といった固有の物体色はこの拡散成分の観測による。このように鏡面成分と拡散成分からなる反射のモデルを一般に 2 色性反射モデルと呼ぶ。

金属は不均質誘電体と異なり、入射光のほぼ全てが物体表面と空気層の境界面で反射する。金属の強いハイライトはこの鏡面反射からなる。また、第二の反射成分である拡散反射成分は、非常に小さい。この意味から金属の反射は一色性といえる。なお、金属の屈折率、吸収係数が波長に依存しない固定値であるのに対して、金属は波長に依存するため、鏡面反射光の色は光源色と一致せず、金色、銀色、銅色といった金属固有の色となる。

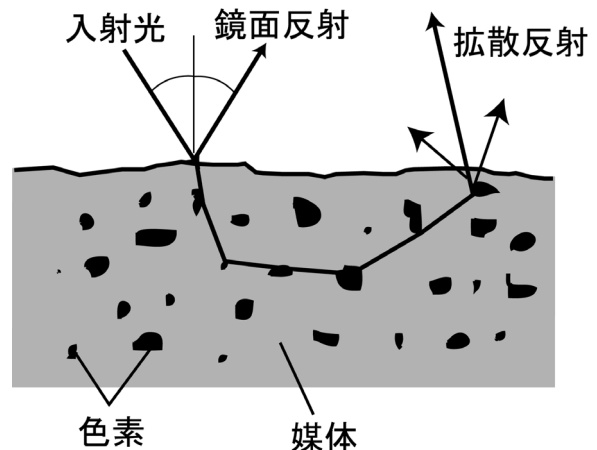


図 1 不均質誘電体の反射過程

3. 偏光現象

自然光と呼ばれる太陽や白熱電球等から放射される光は時間的にも空間的にも位相が不規則に変動し、あらゆる偏光が合成された無偏光状態の光といえる。この光が滑らかな物体表面上で鏡面反射したとき、光波が特定の方向に振動しているものや、規則的に振動するものが偏光と呼ばれる現象である。偏光は互いに直交する 2 つの電磁波(水平偏光成分、垂直偏光成分)の振動の偏りで、この振動の位相関係により直線偏光、円偏光、楕円偏光に区別できる。円偏光、楕円偏光は垂直偏光(P 偏光)と水平偏光(S 偏光)の位相差による偏光現象で、観測することは難しい。プラスチックなどの 2 色性反射特性を示す不均質誘電体は直線偏光の影響を強く受け、金属物体などの均質誘電体はあまり直線偏光の影響を受けないという特性をもっている。また、偏光は光源や物体表面との入射角にも依存する。

4. 偏光度

偏光度とは反射光における直線偏光成分の割合である。自然光が滑らかな物体表面で反射すると反射光の一部は直線偏光の影響を受け、非偏光成分と直線偏光成分を含む部分直線偏光状態となる。この状態を観測するには偏光フィルタを用いる。これは反射光のうちある特定方向に振動する直線偏光が透過するフィルタである(図 3 参照)。材質には人造偏光板のポーラロイドがよく用いられる。これは、ポリビニールアルコールの膜を一方方向に引き伸ばして、長い鎖状の高分子を方向的にそろえて並べたものである。この膜

をプラスチックシートやガラスでサンドし、接着したものを用いる．この偏光フィルタの偏光子を回転させることで、任意の方向に振動している直線偏光成分のみを取り出すことができる．例として、塩化ビニールシートと銅を円筒形状にして光源を照射した．この反射光に対して偏光フィルタを回転させながら計測すると図 3 のようになる．

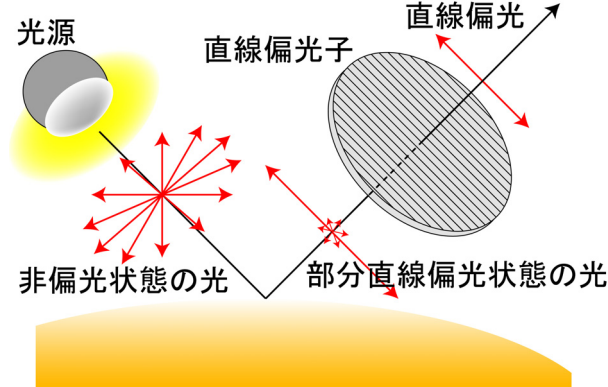


図 2 偏光の幾何モデル

図 4 は偏光フィルタの回転角による反射光の光強度変化である．これからわかるように塩化ビニールシートはハイライト部の強弱が激しく、偏光現象が大きく表れていることがわかる．また、銅はあまり偏光していないことがわかる．光強度は偏光フィルタの回転角度に対して $I_{\max}$ と $I_{\min}$ の間で 180° を 1 周期とする、正弦関数状に変化する．このとき直線偏光成分の光強度は $T_p(\lambda)^{-1}(I_{\max} - I_{\min})$ である． $T_p(\lambda)$ は偏光フィルタによる直線偏光の透過率である．反射光が完全に直線偏光となる入射角はブリュースター角と呼ばれ、S 偏光成分が 0 となる．これ以外の角度では反射光には非偏光状態の光が含まれ、それが $I_{\min}$ として観測される．偏光フィルタによる非偏光状態の透過率を $T_N(\lambda)$ とすると、非偏光状態の光強度は $T_N(\lambda)^{-1}I_{\min}$ となる．また反射光全体の光強度 I_{all} は 2 成分の合計となり

$$I_{\text{all}} = T_p(\lambda)^{-1}(I_{\max} - I_{\min}) + T_N(\lambda)^{-1}I_{\min} \quad (1)$$

となる．これより偏光度 ρ は

$$\rho = (I_{\max} - I_{\min}) / \left\{ I_{\max} + \left(\frac{T_p(\lambda)}{T_N(\lambda)} - 1 \right) I_{\min} \right\} \quad (2)$$

と定義される．

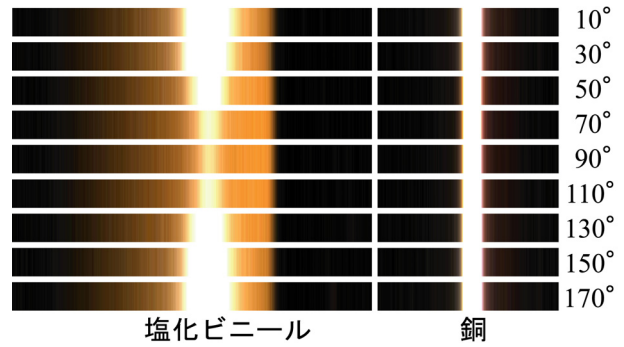


図 3 偏光フィルタの回転角度に対する不均質誘電体と銅の観測画像

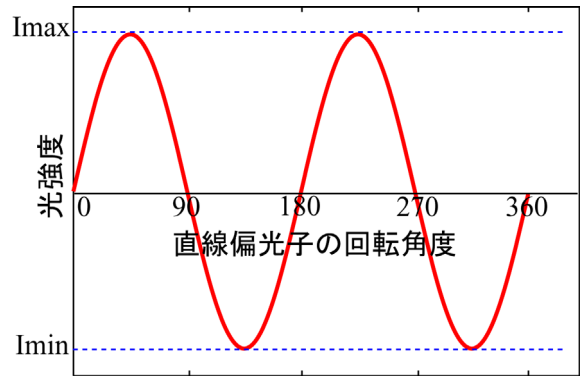


図 4 偏光子角に対する反射光強度の変化

5. 金属－不均質誘電体の判別法

金属物体と不均質誘電体を分類するための従来法として、カラーヒストグラムを用いた手法がある．しかし、カラーヒストグラムを用いた手法では計測における物体と光源の色に依存し、特に白色の物体では分類が不可能であるという問題点があった．そこで本論文で提案する手法は、偏光フィルタとカメラシステムを用いて、偏光度の分布により分類する手法である．

この手法は入射角に依存せず、明示的にかつ安定して分類することができる．これは物体の観測画像において、特にハイライト領域の偏光度分布に注目する．不均質誘電体の偏光度はハイライトピークが最も高く、ピークから外れるに従って偏光度が低くなるため、偏光度の分布はピーク点を中心に凸型になる(図 5 参照)．

一方、金属物体はほとんど偏光の影響を受けないため、原理的には図 6(a) のように偏光度分布図は一定値を取る．ところが詳細な実験で、偏光度の変化を調べてみると、図 6(b) のようにフラットではなくハイライトピー

クが最小で、そこを中心に凹型で現れることを発見した。

この偏光度分布の特徴の違いにより金属物体と不均質誘電体を分類することを提案する。すなわちハイライトを含む物体の偏光画像を観測し、ハイライトピークの偏光度分布形状の凹凸性を調べる。

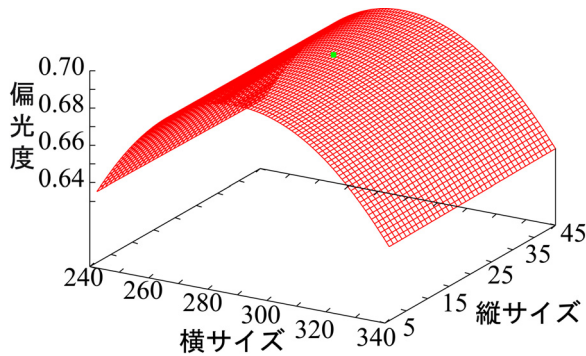
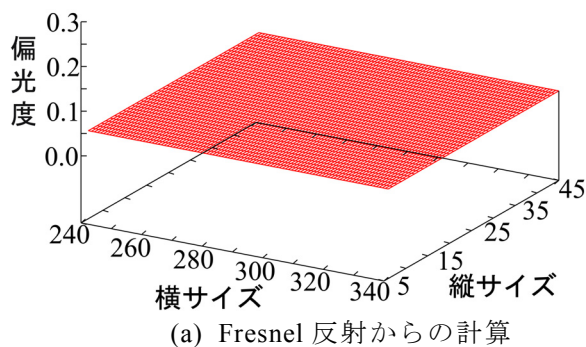
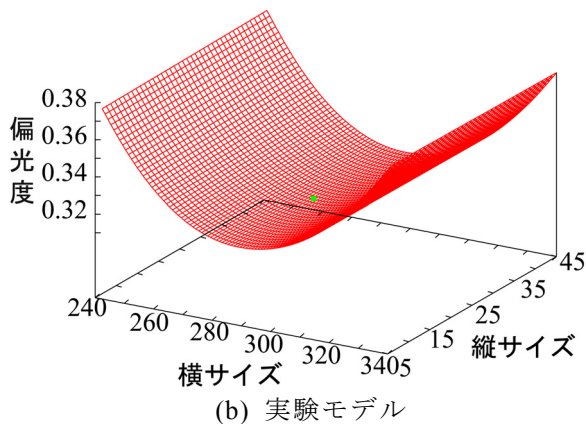


図5 誘電体の偏光度分布



(a) Fresnel 反射からの計算



(b) 実験モデル

図6 金属の偏光度分布

これらの結果より偏光度分布のグラフの形状が上に凸か下に凸かで不均質誘電体または金属と判別することができる。しかし偏光度の分布が明確にできるとは限らない。そこ

で、画像処理の自動化のためのアルゴリズムを検討した。この判別には、まずハイライトピークを検出しそのピーク点を中心に2次的に2次微分する。このとき2次微分値の符号により判定する。すなわち負ならば不均質誘電体で、正ならば金属物体と判定する。2次微分オペレータとしてはラプラシアンを変形した図7を用いている。

1		1		1
1		-8		1
1		1		1

図7 2次微分フィルタ

6. 計測環境

光源としては平行光源装置と白熱電球を用いた。受光側として、図8のような偏光フィルタとカメラ EOS-D30 を用いた。計測環境を図9に示す。ここで回転台とアームは単独で動くものである。これにより物体への入射角と反射光の受光角を任意に設定することができる。また偏光フィルタはカメラの前に設置し、5度ずつ360度回転させることにより、画素ごとに一番明るい値と一番暗い値を取得することにより偏光度を得た。また、透過率と消光比の異なる偏光フィルタを用いて、各物体の偏光度分布図を求める。



図8 デジタルカメラと偏光フィルタからなるシステム

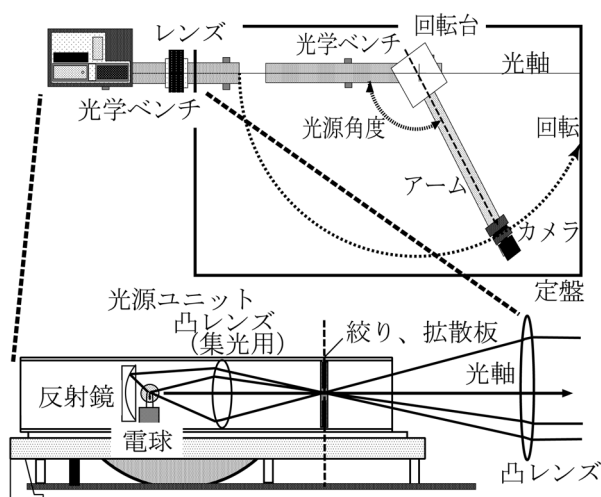


図9 平行光源装置と計測環境

7. 実験

7.1 各種物体の表面材質識別

平行光源システムの照明光源はハロゲンランプである。計測対象として図10に示す4種類の異なった物体を用いた。これらは陶器、ステンレス、塩化ビニールシート、アルミで物体色はすべて白色である。これらの物体の偏光画像を計測し、これより偏光度の分布特性を作成した（図11-14参照）。これらの図は物体側面のハイライトに沿った領域における偏光度の分布を示す。各図で●印がハイライト領域におけるピーク点を示す。陶器と塩化ビニールシートの不均質誘電体ではハイライトピークを中心に上に凸型であらわれ、ステンレスとアルミの金属物体では凹型（下に凸型）という特徴が明瞭に現れている。

さらに、より複雑な表面形状について試験した。図15は表面の粗い金属物体である。この物体を計測して得られた偏光度の分布特性を図16に示す。偏光度は図10の物体に比べて複雑な分布をしているが、下に凸という性質は現れている。なお数値的に分類するためハイライトピーク点における偏光度の2次微分値を算出した。

塩化ビニール： -0.104,
 陶器： -0.042,
 ステンレス： 0.016,
 アルミニウム： 0.060,
 表面の粗い金属箱： 0.066.

7.2 フィルタ依存性の検討

偏光特性は使用する偏光フィルタに依存する。そこで3種類の偏光フィルタを用いて、同一物体について偏光度分布を調べた。計測対象には蒸着したアルミ板で、これを円筒状にして入射角45°で計測した。偏光画像より得られた偏光度分布図を図17に示す。不均質誘電体ではあまり変化は見られなかったが、金属物体では偏光フィルタの違いにより大きく変化した。

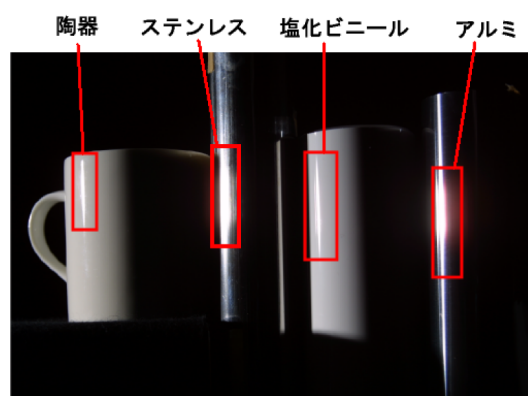


図10 異なった物体の計測画像

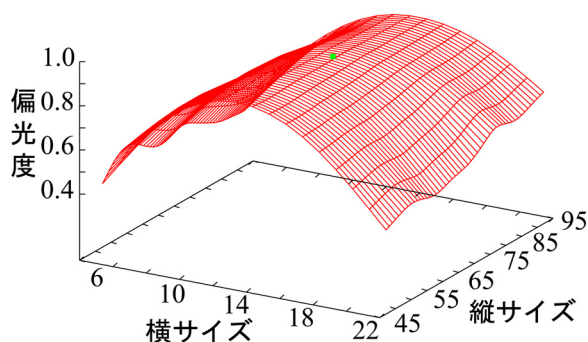


図11 陶器の偏光度分布図

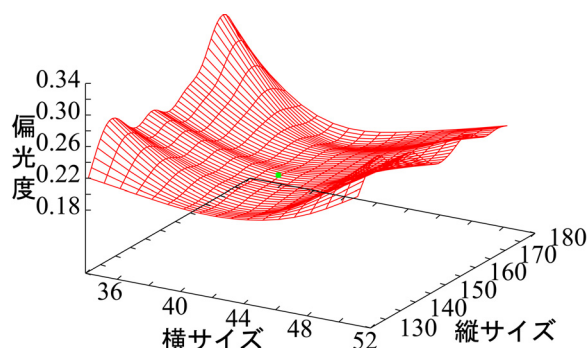


図12 ステンレスの偏光度分布図

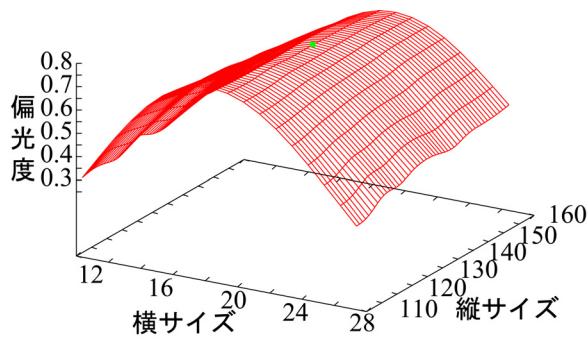


図 13 塩ビの偏光度分布図

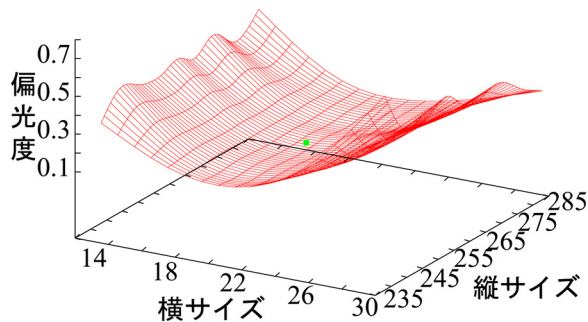


図 14 アルミの偏光度分布図



図 15 表面の粗い金属物体

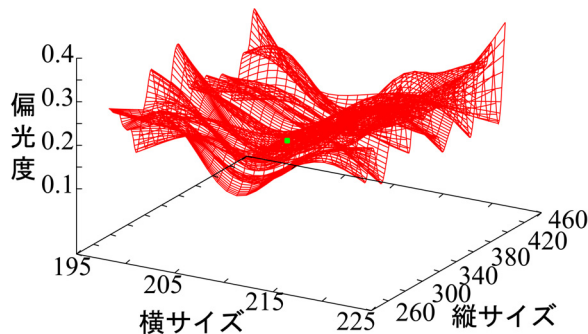


図 16 粗い金属物体から得られた偏光度

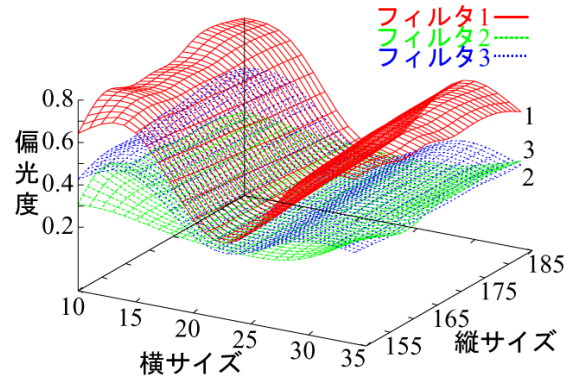


図 17 3 種類のフィルタによる偏光度分布

8. おわりに

本稿では偏光特性を用いて物体の材質を金属-不均質誘電体に分類する手法について提案した．不均質誘電体は 2 色性反射特性を示し，金属は鏡面反射のみの 1 色性反射の物体である．従来のカラーヒストグラムでこれらの材質識別する手法は，物体色に依存し光源色と物体色が似ていると分類は困難であった．また，白色物体では光源色との分離ができなくなり，分類が不可能であるという欠点が存在した．

提案した偏光特性を用いた手法はハイライト領域の画素について偏光度を調べ，その分布形状を利用した手法である．非金属物体ではハイライトピークを中心に上に凸型，金属物体では下に凸型で分布する特徴が実験でわかった．本手法は物体の色に依存せず安定して分類することができる．また表面形状が複雑な物体に対しても，識別することができる．7.2 の実験では，偏光度は偏光フィルタに依存することを示した．

文 献

- [1] 佐藤洋一, "コンピュータビジョンにおける最新動向: 物理ベーストビジョン", InterLab, pp.40-44 (Aug. 1999).
- [2] 伊藤真幸, 田中法博, 富永昌治, "画像を用いた物体の偏光特性の解析", 日本色彩学会誌, Vol.26, SUPPLEMENT, pp.22-23 (May 2002).
- [3] 伊藤真幸, 田中法博, 富永昌治, "偏光特性を用いた表面識別の一手法", 平成 14 年電気関係学会関西支部連合大会講演論文集, G11-10, G261 (Nov. 2002).
- [4] S. Tominaga, B. Wandell, The standard reflectance model and illuminant estimation, *J. of Optical Society of America A*, Vol. 6, No.4, pp. 576-584 (April 1989).