

赤外光源と偏光板を用いた重畳情報の選択的視覚化

阪口 紗季¹ 東納 ひかり^{2,†1} 松下 光範²

概要: 本研究の目的は、実物体に予め付与した複数の情報を、現実世界上の処理によって選択的に取り出す手法の提案である。提案手法では、物体に光を照射することによって、そこに付与された情報を影として視覚化する。さらに偏光板の性質を利用し、物体の回転によって光の透過/遮蔽を制御することによって、生成される影の形状を変化させる。これにより、重畳した複数の情報を物体の角度に依存して選択的に取り出すことが可能になる。

Selective Visualization of Complex Information Using Infrared Light and Polarizer

SAKAGUCHI SAKI¹ TONO HIKARI^{2,†1} MATSUSHITA MITSUNORI²

Abstract: This paper proposes a method for visualizing information included in an object as a shadow when the object is irradiated by infrared lights. The shape of the visualized shadow changes when the object is rotated, by using the property of the polarizing plate. Thus, a user can change the visualized information according to the angle of the object. This system can be applied to the media art of shadowgraphs.

1. はじめに

古来より、物理的な実体に対して予め情報を埋め込んでおき、特定の行為を行うことによって埋め込まれた情報を視覚化する方法が考案されている。例えば、あぶり出しでは柑橘類の果汁を使って文字や絵などの図柄を紙に書くことで、情報を付与する。果汁が乾燥すると描いた図柄は視認できなくなるが、紙を火で炙ることにより果汁で描いた部分に色が徐々に浮かび上がり、隠された図柄を見ることができるようになる。また、紙幣には偽造防止のために透かし模様が埋め込まれており、光にかざすことによって、模様が浮かび上がる仕組みになっている。

物理的な実体に対して予め情報を埋め込む方法には (1) 事前に情報を埋め込んでおく必要がある、(2) 埋め込まれた情報を選択的に取り出したり変更したりすることが容易ではない、といった制約が存在する。液晶ディスプレイの

利用やプロジェクションマッピングによって視覚情報を動的に付加したり、可視/不可視を制御することは容易であるが、予め物理的な実体に情報を埋め込む方法には、物体に情報を予め埋め込むという行為によって生じる唯一性や固有性があるため、その制約にも拘らず利用が見込まれる。このような背景の下、本研究では上述した物理的な実体に対して予め情報を埋め込む方法の制約のうち、(2) を緩和することを目指す。これを実現させるために、赤外光源と複数種の光学素子の特性を利用する。偏光板と 1/2 波長板を組み合わせることで、物体の回転により光の透過/遮蔽を制御することが可能であり、それを情報の可視/不可視の制御に利用することとした。これにより、重畳した複数の情報を物体の角度に依存して選択的に視覚化できる手法を提案する。

2. 本研究で用いる光学素子

2.1 偏光板

偏光板は、特定の方向に振動した光（偏光）のみを透過し、それ以外の光を遮蔽する性質を持ったフィルタである。偏光板が偏光を透過する方向（偏光方向）を揃えた状態で

¹ 関西大学大学院総合情報学研究所
Graduate School of Informatics, Kansai University

² 関西大学総合情報学部
Faculty of Informatics, Kansai University

^{†1} 現在、スミセイ情報システム株式会社
Presently with Sumitomo Life Information Systems Co.,Ltd.

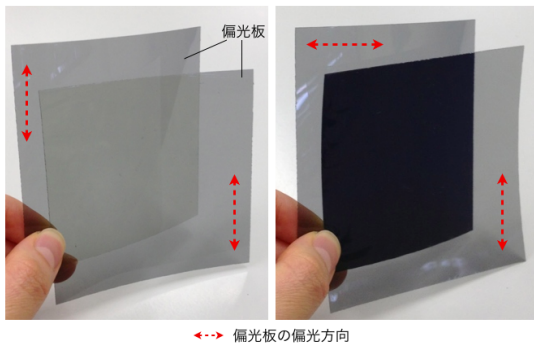


図 1 偏光板を重ねた様子

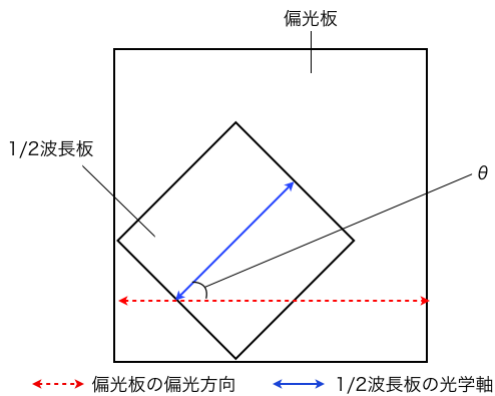


図 2 偏光方向と光学軸の角度

2枚の偏光板を重ねた場合、図1の左に示すように、光を透過する。偏光方向を直交させた状態で2枚の偏光板を重ねた場合、図1の右に示すように、光を遮蔽する。この性質を利用することで、偏光板を重ねる角度による、光の透過と遮蔽の制御が可能になる。なお偏光板には種類があり、その種類によって偏光できる波長領域が異なる。

2.2 1/2 波長板

1/2 波長板は、偏光の振動方向を変える性質を持ったフィルタである。偏光板の偏光方向に対して、1/2 波長板において光を入射しても複屈折しない方向（光学軸）の角度を θ となるように重ね（図2参照）、偏光板側から光を入射すると、入射光の振動方向が 2θ 回転するようになる。つまり、偏光板の偏光方向に対して 1/2 波長板の光学軸が 0° 、 90° 、 180° 、 270° の時には、 $0^\circ \times 2 = 0^\circ$ 、 $90^\circ \times 2 = 180^\circ$ 、 $180^\circ \times 2 = 360^\circ$ 、 $270^\circ \times 2 = 540^\circ$ (180°) 回転するため、光の振動方向は変化しない。偏光板の偏光方向に対して 1/2 波長板の光学軸が 45° 、 135° 、 225° 、 315° の時には、 $45^\circ \times 2 = 90^\circ$ 、 $135^\circ \times 2 = 270^\circ$ 、 $225^\circ \times 2 = 450^\circ$ (90°)、 $315^\circ \times 2 = 630^\circ$ (270°) 回転するため、光の振動方向が変化する（図3参照）。例えば、2枚の偏光板の偏光方向を揃えて重ね、その間に光軸が $\theta = 45^\circ$ となるように 1/2 波長板を挟んで光を入射すると、1/2 波長板によって光の振動方向が 90° ($= 2 \times 45^\circ$) 回転するため、偏光板は入射光を

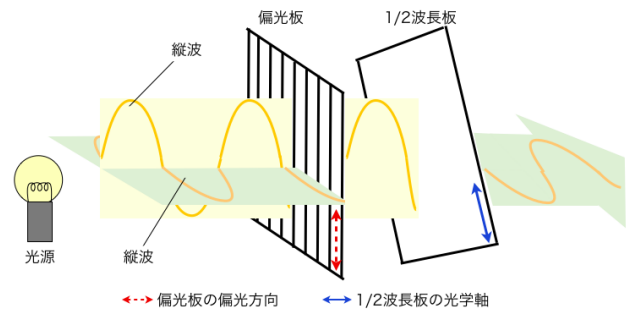


図 3 1/2 波長板の性質 (1/2 波長板の光学軸が 45° になるように重ねた状態)

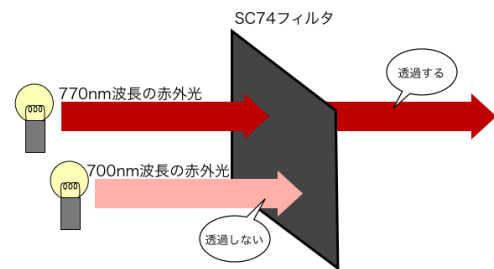


図 4 SC フィルタの性質

遮蔽する。一方、2枚の偏光板を、偏光方向が交差するように重ね、その間に光軸が $\theta = 45^\circ$ となるように 1/2 波長板を挟んで光を入射すると、偏光板は入射光を透過する。

2.3 可視光カットフィルタ

SC フィルタは、特定波長以上の光線のみを透過する性質を持ったフィルタである。波長 A nm 以上の光を透過する SC フィルタに $A > \alpha$ となる α nm の赤外光と $\beta > A$ となる β nm の赤外光を照射すると、SC-A は α nm の赤外光を遮蔽し、 β nm の赤外光を透過する。例えば SC-74 フィルタは、740nm 以上の波長を持つ赤外光を透過し、それより短い波長を持つ赤外光を遮蔽する（図4）。740nm 以上の波長領域は、人の目には不可視であるため、このフィルタは通常では黒く不透明なものとして見える。

3. 提案システム

3.1 概要

提案手法では、1/2 波長板の両面を SC-74 フィルタで覆い隠したオブジェクトを用いる。このオブジェクトを偏光方向を揃えた 2枚の偏光板の間に挟み、外側から赤外光を照射することで、埋め込まれた 1/2 波長板の形状を、影として出現させ、さらにオブジェクトの回転角度に依存して影の出現/非出現を制御する。この形式を図5に示す。特定波長の赤外光を照射し、偏光板（図5-a）を透過すると、偏光（図5-c）のみが放出される。この光は、オブジェクトの内部に配置した 1/2 波長板によって振動方向が回転し（図5-d）、もう一方の偏光板（図5-b）によって遮蔽される。

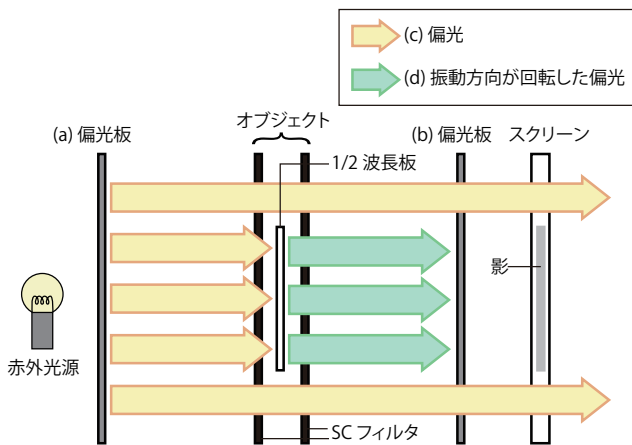


図5 提案システムの概要

これによって影が出現している。赤外光による不可視な影は、赤外光を撮影可能なカメラを用いて撮像し、その画像をプロジェクタで投影することで視覚化する。ユーザは偏光板(図5-b)を通して、生成された影を見ることになる。

偏光板が偏光できる波長領域は限られているため、照射する赤外光の波長の違いによって、生成される影の濃さは異なる。この特性を利用して、明瞭な影を提示する赤外波長と、不明瞭な影を提示する赤外波長を切り替えることで、影の生成を制御することができる。

1/2 波長板 2 枚を異なる形状に切り取り、偏光方向に対してそれぞれの光学軸が 0° 、 45° となるように並べてプラスチック板に貼付する。この物体を 45° ずつ回転させることで異なる形状の影が交互に生成されるようになる。これによって、情報の選択的な取り出しを可能にする。

3.2 偏光板の種類選定

偏光板は、種類によって対応する波長領域が異なるため、明瞭な影を生成する偏光板の種類を選定する実験を行った。本実験では、可視光領域に対応した偏光板(以下、可視用偏光板と記す)と赤外光に対応した偏光板(以下、赤外用偏光板と記す)を用意し、影の形状が明瞭に提示される2枚の組み合わせを選定する。偏光板の組み合わせとして、(A) 可視用偏光板2枚の組み合わせ、(B) 可視用偏光板と赤外用偏光板を1枚ずつ使用した、計2枚の組み合わせ、(C) 赤外用偏光板2枚の組み合わせ、の3条件を設定し、比較する。2枚の偏光板の偏光方向を揃えた状態で、偏光方向に対する1/2波長板の光学軸が 0° 時における明度と 45° 時における明度の差が最大になる時、生じた影とそれ以外の部分を最も区別しやすくなるため、影の形状が明瞭に提示されているといえる。従って、条件(A)(B)(C)において、この明度差を調べた。

図5に示す構成において、赤外光の直下とスクリーン上に、2枚の偏光板をそれぞれの偏光方向を揃えて設置し、これらの間に1/2波長板を設置した。偏光板には、可視

表1 偏光板の種類選定

| 条件 | 明度 (0° 時) | 明度 (45° 時) | 明度差 |
|----|-------------------|--------------------|------|
| A | 190.0 | 169.1 | 20.9 |
| B | 173.2 | 138.8 | 34.4 |
| C | 136.5 | 86.5 | 50.0 |

用偏光板(美工社製)と、赤外用偏光板(エドモンド・オプティクス・ジャパン社製)を用いた。赤外光源 - 1/2 波長板間を 400mm 、スクリーン - 1/2 波長板間を 0mm の距離で設定し、複数種の赤外波長 (770nm 、 810nm 、 870nm 、 940nm) のうち、中間波長である 810nm 波長の赤外光を照射した条件の下で、偏光板の偏光方向に対する1/2波長板の光学軸を 0° または 45° に固定した時に生成される影を、赤外光を撮影可能なカメラで撮影した。

撮影した画像については、画像編集ソフト GIMP (<http://www.gimp.org/>) のヒストグラムツールを用いて明度を計測し、その数値を比較した。明度は $0\sim 255$ の値で計測され、値が小さいほど暗く、大きいほど明るいと判断される。なお、カメラの露光は固定されており、全て同じ設定で撮影した。

3つの条件において、偏光板の偏光方向に対して1/2波長板の光学軸が 0° 時と 45° 時の明度とその差を表1に示す。明度差は、条件(C)が最も大きく、その次に条件(B)が大きく、条件(A)が最も小さくなることが確認された。しかし前節で述べたように、提案システムでは、偏光板を通して影を見る必要がある。可視用偏光板は透明であるが、赤外用偏光板は茶色がかかった黒色をしており、赤外用偏光板を通して物を見るができない。従って、赤外用偏光板を通して影を見る必要がある条件(C)はシステムに適していないと考えられる。この結果を鑑み、条件(B)の、可視用偏光板と赤外用偏光板を1枚ずつ、計2枚を用いて実装を行った。

3.3 赤外光の波長選定

提案システムは、赤外光の波長を切り替えることで影の生成を制御する。赤外光の波長によって生成される影の明度が異なるため、複数種の赤外波長 (770nm 、 810nm 、 870nm 、 940nm) のうち、影の形状を明瞭に提示する波長と、提示しない波長を選定する。偏光板の偏光方向に対する1/2波長板の光学軸が 0° 時における明度と 45° 時における明度の差が最大である時、生じた影とそれ以外の部分を最も区別しやすくなるため、影の形状が明瞭であるといえる。反対に、 0° 時と 45° 時における影の明度差が最小である時、生じた影とそれ以外の部分を区別することが難しいため、影の形状は不明瞭であるといえる。従って、影の生成を制御するために、明度差が最大になる波長と、最小になる波長を選定する必要がある。

図5に示す構成において、複数種の赤外光 (770nm 、

表 2 赤外光の波長選定

| 照射光の波長 (nm) | 明度 (0° 時) | 明度 (45° 時) | 明度差 |
|-------------|-----------|------------|------|
| 770 | 174.1 | 124.3 | 60.3 |
| 810 | 212.4 | 186.6 | 25.7 |
| 870 | 172.1 | 161.0 | 11.1 |
| 940 | 198.5 | 196.4 | 2.1 |

810nm, 870nm, 940nm) を照射できる赤外光の直下とスクリーン上に、2枚の偏光板をそれぞれの偏光方向を揃えて設置し、これらに 1/2 波長板を設置した。前節で得られた結果から、赤外光の直下には赤外用偏光板を、スクリーン上には可視用偏光板を用いた。複数種の赤外光 (770nm, 810nm, 870nm, 940nm) を照射した条件の下で、偏光板の偏光方向に対する 1/2 波長板の光学軸を 0° または 45° に固定した時に生成される影を、赤外光を撮影可能なカメラで撮影した。なお、スクリーン、1/2 波長板、赤外光源間の距離の違いによって影の明度が変化するため、スクリーン - 1/2 波長板間、1/2 波長板 - 赤外光源間の各々について 100mm, 200mm, 300mm の 3 条件で距離を設定し、それらの組み合わせによる計 9 パタンの位置設定で撮影した。撮影した画像については、前節と同じく画像編集ソフト GIMP のヒストグラムツールを用いて影の明度を計測し、その数値を比較した。なお、カメラの露光は固定されており、全て同じ設定で撮影した。

各々の波長における平均の明度を表 2 に示す。偏光板の偏光方向に対する 1/2 波長板の光学軸が 0° 時、45° 時にできる影の明度差は、770nm の赤外光照射時に最大で、940nm の赤外光照射時に最小となることが確認された。このことから、770nm の赤外波長を照射した時には影の形状が明瞭であり、940nm の赤外波長を照射した時には影の形状が不明瞭であることが分かった。この結果を鑑み、赤外光源として 770nm と 940nm の 2 種類の波長を独立に照射できるデスクライトを実装した。

4. 実装

4.1 システム構成

図 6 に示すように、オブジェクトは 1/2 波長板 (光洋社製) と SC フィルタ (FUJIFILM 社製, SC-74) で構成される。1/2 波長板 2 枚を異なる任意の形状に切り取り、それぞれの光学軸が偏光板の偏光方向に対して各々 45° (図 6-A)、0° (図 6-B) となるように並べて透明のアクリル板 (アクリルサンデー社製, 硬質塩化ビニール板) に貼付する。この外側を SC フィルタ (FUJIFILM 社製, SC-74) で覆う。

情報を視覚化するシステムを図 7 に示す。このシステムはデスクライト、赤外カメラ、偏光板、プロジェクタ、テーブル状のスクリーンによって構成される。デスクライトには 2 種類の波長の赤外光 (770nm, 940nm) を照射できる LED を組み込んでいる。カメラには近赤外線領域も撮影可能な

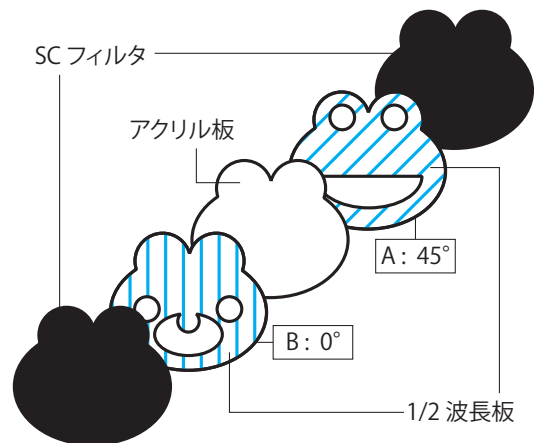


図 6 オブジェクト構成図

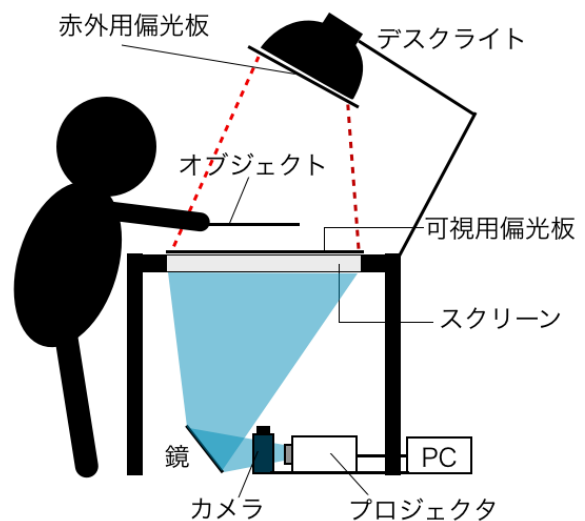


図 7 システム構成図

CCD カメラ (レンズ: TAMRON 社製, 12VM412ASIR, カメラ: Watec 社製, WAT-902-H-ULTIMATE) を用いた。不可視な影を撮像するために、レンズには SC フィルタを貼付した。また、スクリーン素材に背面投影用のスクリーンフィルム (KIMOTO 社製, DILAD スクリーン WSK) を用いることで、赤外光によるオブジェクトの不可視影とプロジェクタ映像の投影を可能にした。提案システムでは、プロジェクタをテーブル下部に配置しスクリーン下側から映像を投影することで、プロジェクタによる実影と物体による不可視影との混合を避けている。

光の偏光による影を生成するために、デスクライトには 800nm~2000nm の波長領域に対応した赤外用偏光板 (エドモンド・オプティクス・ジャパン社製) を取り付けている。スクリーン上には可視光のみを偏光させることができる可視光用偏光板 (シータスク社製, LN-1804P) を取り付けている。両方の偏光板を、偏光方向を揃えて取り付けている。

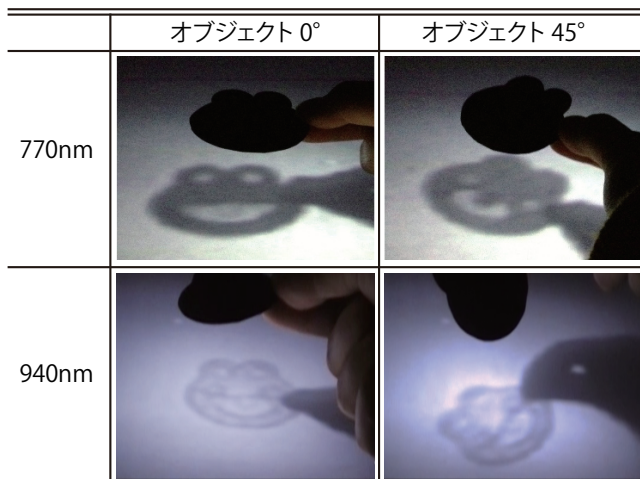


図 8 システムの動作の様子

4.2 アプリケーション

提案システムを用いたアプリケーションを実装した。ユーザは赤外ライトが照射されたスクリーン上にオブジェクトをかざして、角度をかえることで、生成される影の図柄を切り替えることができる。本研究ではプロトタイプとして異なる 2 種類の影が出現するオブジェクトを作成した。

偏光方向に対するオブジェクトの角度を 0° に設定した初期状態では、偏光方向に対する光学軸の角度が 45° である図 6-A のみが光を遮蔽し、0° である図 6-B は光を透過する。オブジェクトを 45° 回転させると、偏光方向に対する光学軸の角度が 0° であった図 6-B が 45° になり光を遮蔽し、45° だった図 6-A が 90° になることで光を透過する。また、オブジェクトをさらに 45° (初期状態から 90°) 回転させると、偏光方向に対する光学軸の角度が 45° であった図 6-B が 90° になり光を透過し、90° だった図 6-A が 135° になることで光を遮蔽する。このように、オブジェクトの角度を 45° 回転させるごとに影の形状を交互に変化させることができる。

図 8 は 770nm, 940nm 波長の赤外光をオブジェクトに照射した時のシステムの様子である。770nm の赤外光を照射した時、オブジェクトから 2 種類の影が生成されることが確認できる。940nm の赤外光を照射した時には、影は生成されない。通常では、オブジェクトの内部に埋め込まれた 1/2 波長板の形状情報を視認することはできないが、オブジェクトを特定の波長の赤外光を照射した場所にかざすことによって、情報を視覚化することができる。

5. 関連研究

5.1 光を用いて情報を視覚化する方法

Layered Shadow[1] は、物体をライトにかざすと、物体と違った形の影が現れるシステムである。このシステムでは、特定波長以下の光線を遮断する性質を持つ数種類の赤外光透過フィルタ (IR フィルタ) で構成された物体を利用

している。そのため、異なる波長の赤外光を照射することで、同じ物体から異なる影の像を創りだすことができる。また照射する赤外光の波長を時間経過に伴って変化させることで、アニメーションのように動く影を生成することができる [2]。

赤外線透過顔料を用いた物体識別手法 [3] では、近赤外線透過特性の異なる 2 種類の顔料の開発を行い、これを用いて非可視型コードを衣服に印刷することができる。可視領域の両方で光を吸収する性質を持つ CB と、可視領域では光を吸収するため肉眼では黒色であるが、赤外領域では光を透過するため透明に見える顔料 AM-BK を用いて、非可視型コードを作成する。白色紙等の反射性のある基盤の上に CB でコードを印刷し、その周辺を AM-BK で印刷する。可視領域で撮影した写真では、埋め込まれたコードとその周辺を見分けることができないが、赤外領域で撮影した写真では、埋め込まれたコードのみ、鮮明に映し出すことができる。

不可視バーコードにおける印刷支援システム [4] では、紫外線領域の光を照射することにより発光する無色透明のインクで 2 次元バーコードを印刷する。ブラックライト等でバーコードを発光させ、それを撮影することで、情報を抽出する。

赤外可視変換素材を用いた選択的情報提示に関する基礎検討 [5] では、赤外光をスクリーンに照射することによって情報を取得することができる。赤外情報を提示できるプロジェクタと、赤外情報を視覚化できるスクリーンを使用している。人間の目では認識することができない赤外情報を、スクリーン上で視覚化することで認識可能にしている。

5.2 偏光性を利用した研究

偏光板アート [6] は偏光板の特性を利用したメディアアートである。これは、肉眼では色のない作品に見えるが、偏光ファインダーを通してみると鮮やかに彩色されて見える作品になる。偏光板アートでは、光を屈折させる特性を持った材質を任意の形に切り取り、2 枚の偏光板の間に挟んでいる。この材質の厚みが変わると、異なった色を見ることができる。また、偏光ファインダーの角度を変えて見ることによって、異なるふたつの絵を交互に見せることができる。

本物証明シール [7] は偏光板の小片をランダムな模様にしてフィルムに塗布し、これによってシールの模様固有性を持たせている。直交した 2 方向の偏光アナライザを通して読み取った値の差分によってシールの固有模様を読み取る。

小池らの液晶型テーブルトップシステム上における透明マーカの実現 [8] では、2 枚の偏光性のある物質の間に 1/2 波長板を置くことで情報の取得を制御する。偏光性をもつ液晶ディスプレイの映像を、偏光板を取り付けたカメラで撮影することによって遮断し、ディスプレイ上に 1/2 波

長板を置くことで映像の遮断を解除する。1/2 波長板は透明な素材であるため、人の視覚を邪魔することなく操作できる。

5.3 先行研究との差異

Layered Shadow[1] は、照射された物体とは異なる形状の影が生成されるという点で本研究と類似するが、このシステムの場合、影の形状変化はシステムに予め登録された光の照射パターンによって決定されるため、ユーザとのインタラクションに欠けるきらいがある。本研究では、より積極的にユーザが影の形状変化に関与することができるように、回す行為による形状の切り替えを取り入れている。

赤外線透過顔料を用いた物体識別手法 [3]、不可視バーコードにおける印刷支援システム [4] は、カメラで撮影する、ブラックライトを照射するなど特定の行為を行うことによって、通常の状態では人間の目に見えない情報を視覚化する点で本研究と類似するが、これらは特定の行為に対して1つの情報しか持ち得ない。本研究では視覚化する情報に変化を持たせるために、情報を切り替えることを可能にする。

赤外可視変換素材を用いた選択の情報提示に関する基礎検討 [5] は、プロジェクトで照射する光に情報を埋め込んで、スクリーンによって視覚化しているのに対して、本研究ではオブジェクトに情報を埋め込んで、プロジェクトによって情報を視覚化している点で、情報の視覚化方法が異なる。

偏光板アート [6] は偏光板を回転させて得られる情報を制御している点で本研究と類似するが、偏光板アートが色を制御しているのに対して、本研究は光の遮蔽によってできる影の形状を制御する点で差異がある。

本物証明シール [7] は光学素材を埋め込み、その性質を用いて光を制御している点で本研究と類似するが、物体の見え方を観測方向によって変化させるために偏光板を用いるのに対し、本研究では、物体自体の角度によって見え方を変化させるために偏光板を用いる点で異なる。

小池らの液晶型テーブルトップシステム上における透明マーカの実現 [8] は、偏光板と 1/2 波長板を利用して光の透過/遮蔽を制御しているという点で本研究と類似しているが、このシステムでは提示される情報はマーカに埋め込まれた情報ではなく、液晶ディスプレイが提示する映像になる。そのため、本研究のような、物体に情報を埋め込む技術とは目的が異なる。

6. おわりに

本稿では、1/2 波長板で構成されたオブジェクトの角度を変えることで、オブジェクトから生成される影の形状を切り替えることができるシステムを提案した。今後はマーカ認識を組み合わせることで、実物体により多様な情報を

埋め込むことができるように拡張することを検討する。

謝辞 本研究は、科研費基盤研究 C (課題番号: 24500160) の助成を受けたものである。記して謝意を表す。

参考文献

- [1] Saki Sakaguchi, Takuma Tanaka, Mitsunori Matsushita: Layered Shadow: Multiplexing Invisible Shadow Using Infrared Lights with Different Wavelengths, *Proc. Virtual Reality International Conference 2013*, Article No.13 (2013).
- [2] Saki Sakaguchi, Takuma Tanaka, Hikari Tono, Mitsunori Matsushita: Restive shadow: animating invisible shadows for expanding shadowgraph experience, *Proc. SIG-GRAPH ASIA2013 Emerging Technologies*, Article 16 (2013).
- [3] 山宮 士郎, 牧野 秀夫, 廣野 幹彦, 前田 義信, 石井 郁夫: 赤外線透過顔料を用いた物体識別手法, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. 83, No.7, pp. 797-803 (2000).
- [4] 上條 浩一, 張綱, 上條 昇, 南 正輝, 森川 博之: 不可視バーコードにおける印刷支援システム, 情報処理学会論文誌, Vol. 50, No. 11, pp. 2607-2617 (2009).
- [5] 木村 翔, 筧 康明, 苗村 健: 赤外可視変換素材を用いた選択の情報提示に関する基礎検討, 情報科学技術レターズ, Vol. 5, pp. 289-291 (2006).
- [6] 有限会社プリントアート: 偏光板アート, <http://www.print-art.co.jp/henkoban.html> (2014年4月確認).
- [7] 塚村 善: 本物証明シール: 偏光板を用いた模様, 電子情報通信学会技術研究報告, ISEC, 情報セキュリティ, Vol. 109, No.113, pp. 209-211 (2009).
- [8] 小池 英樹 and 西川 渉 and 福地 健太郎: 液晶型テーブルトップシステムにおける偏光の応用: 光学フィルムを用いた透明マーカの開発, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 14, No. 1, pp. 111-119 (2009).