

# Restive Shadow : 多波長赤外光を用いた拡張影生成システム

阪口 紗季<sup>1,a)</sup> 東納 ひかり<sup>2,†1</sup> 松下 光範<sup>2,b)</sup>

受付日 2015年6月26日, 採録日 2016年1月12日

**概要:** 本研究では, 現実世界に存在する「影」という現象に着目し, その性質を拡張させるシステム “Restive Shadow” を提案する. 提案システムは, 遮蔽物の外観にはない絵柄が加わった影の生成と, 遮蔽物にはない動きが加わった影の生成の2種類の影の拡張を可能にする. 影を拡張させる手法はこれまでも多く制作されているが, 本研究では赤外光を遮蔽することによって生成される自然な影を利用する点で特徴がある. 提案手法では, 複数種の IR フィルタによって異なる波長の赤外光の透過・遮断を制御することによって, 同一の物体から複数の形状を持つ影を生成する.

**キーワード:** 影, 多波長赤外光, 拡張現実感

## Restive Shadow: A System for Creation of Extend Shadow by Using Infrared Lights with Multiple Wavelengths

SAKI SAKAGUCHI<sup>1,a)</sup> HIKARI TONO<sup>2,†1</sup> MITSUNORI MATSUSHITA<sup>2,b)</sup>

Received: June 26, 2015, Accepted: January 12, 2016

**Abstract:** This study proposes a multiplexing invisible shadow system, named “Restive Shadow,” that is intended to enhance a user’s shadowgraph experience. The proposed system uses infrared lights that emit light of a certain wavelength and consists of an object that is attached with many different types of IR filters. Directing the light toward the object causes the object’s shadow to appear; the shape of the object then appears to change according to the wavelength of the emitted infrared light. By using this system, a user is expected to attain a different viewpoint of shadows.

**Keywords:** shadow, multiplexing infrared light, augmented reality

### 1. はじめに

影とは, 我々が日常的に目にする自然な現象である. 影は光を物体で遮蔽すると現れ, 色は黒もしくは無彩色の単色であり, 光を遮蔽している物体と同じ形や動きをすることでいった性質を持つということは多くの人に認知されている.

自然な現象であるという認識だけにとどまらず, 影は昔からエンタテインメントとしても馴染みがある. 影絵芝居のような伝統芸能や, 影踏み鬼ごっこといった遊びが存在することから, 影は遊びのツールとしても人々に親しまれているといえる. これらでは, 物体の輪郭を型取り, その動きに追従するといった影の性質がうまく活用されている.

近年では, 影をモチーフとしたメディアアートも多数制作されており, これらでは影の性質を拡張する人工的に変える試みがなされている. たとえば, 本来であれば黒色であるはずの影に色彩を加えたり\*1, 影を作る物体とは異なる

<sup>1</sup> 関西大学大学院総合情報学研究所  
Graduate School of Informatics, Kansai University, Takatsuki, Osaka 569-1095, Japan

<sup>2</sup> 関西大学総合情報学部  
Faculty of Informatics, Kansai University, Takatsuki, Osaka 569-1095, Japan

<sup>†1</sup> 現在, スミセイ情報システム株式会社  
Presently with Sumitomo Life Information Systems Co., Ltd.

<sup>a)</sup> k107221@kansai-u.ac.jp

<sup>b)</sup> m\_mat@kansai-u.ac.jp

\*1 <http://www.plaplax.com/legacy/artwork/minim++/artwork/kage.htm>

る形や動きを持つ影を生成したり\*2、影に対して物理的な接触を可能にしたりする\*3といった影の拡張がなされている。これらのように、今や画像処理やセンシングを用いて物体や影を認識したり、CGアニメーションを用いて人工的に影に似せた動画像を生成したりすることによって、自然現象である影の振舞いを自在に制御することが可能になっている。しかしながらこういった手法では、実世界における光源および遮蔽物と、バーチャルな世界における影との整合性を人工的に調整する必要があり、システム制作者に負担がかかることや、システム側の処理が重くなることが懸念される。

我々は、このような課題に対し、計算機の処理のみに頼るのではなく、自然現象そのものの振舞いをも入出力に利用することによって、簡素な仕組みで影の拡張を可能にする手法の実現を目指す。影を拡張させるために、本研究では赤外光が持つ人の目には不可視である性質に着目し、これを遮蔽することによって生成される不可視な影を利用する。これにより、計算機の処理を用いずに幾何的整合性のとれた拡張影の生成を試みる。この手法を用いて、本研究ではインタラクティブに拡張影を生成するシステム“Restive Shadow”を実装した。Restive Shadowでは、影に対して2種類の拡張を行う。1つは、遮蔽物の外観にはない絵柄が加わった影の生成であり、もう1つは、遮蔽物にはない動きが加わった影の生成である。本稿では、Restive Shadowのシステム構成と、そこで用いる素材について述べ、影に対する2種類の拡張を可能にするアプリケーションのデザインと、システム体験者から得られた反応および考察について述べる。

## 2. 関連研究

本研究では、赤外光の遮蔽によって生じる不可視な影を用いて影を拡張させる。これまでも影を拡張する試みがされており、赤外光による物体のセンシングを用いる手法や、影という自然現象そのものの振舞いを利用する手法が提案されている。本章では、これらの2つの手法に分類して先行研究について述べ、さらに赤外光を利用した情報の重畳手法に関する先行研究について述べる。

### 2.1 赤外光による影のセンシングを用いた影の拡張

不可視光を用いることによって、人物の動きや形状をセンシングし、影を拡張させる手法が提案されている。MiwaらによるShadow Awarenessは、劇場における舞台の演者と観客の一体感を強めることを目的とした新たなパフォーマンス手法の提案であり、そこでは、演者の影を拡張する演出が行われている[1]。演者の動きをサーモカメラによってセンシングし、それに合わせて様々な形や色が加わった

影を生成し、演者の影としてプロジェクションすることによって、リアルタイムな影の拡張を行っている。

XuらによるUser Interface by Virtual Shadow Projectionは、ユーザの手指の影をディスプレイ上のカーソルとして利用することができるシステムである[2]。赤外光の遮蔽によって生成された不可視な影を赤外カメラで撮影し、形状認識を行った後にプロジェクタによってスクリーン上に投影することによって、ディスプレイ上でのポインティングデバイスとしての機能を持った手指の影を生成している。

これらのシステムは、いずれも影の拡張に不可視光を用いる点で本研究と類似するが、ユーザの動きや形状をコンピュータによってキャプチャし、計算機の処理が加わった影を投影することによって拡張影を生成している点で本研究と差異がある。

### 2.2 光の遮蔽によって生成される影を用いた影の拡張

CGによる人工影の提示や、影の形状・位置認識をとまなわれない手法での影の拡張がなされている。橋田らのソラ・カラは、影の濃淡を制御することができるシステムである[3]。光学素子のフィルタを用いて光の波長選択を行い、光で発色を制御できるフォトリソミック材料を用いたスクリーンに照射することでスクリーンの発色の濃淡を制御する。また物体を置いて波長選択された光をさらに遮蔽し、2種類の波長選択光を照射する領域を作ることで、1つのスクリーンに2種類の色の濃淡を作る。さらに、遮蔽されてできた領域の色はすぐには戻らないという性質を利用して、次第に色が変わるような動的な発色パターンを生成する。これにより、物体の影となる部分の色を動的に変化させることができる。

Minomoらは、補色を用いて自己の影を彩りあるものにするシステムを提案している[4]。このシステムでは2台のプロジェクタで投影面が重なるように床面に映像を投影する。この際に、互いに補色関係にある映像を投影しているため、床面は白く照らされる。投影された空間内にユーザが入るとプロジェクタから投影される光を遮り、床面の補色関係が崩れることでユーザの影となる部分に彩りのある影が出現する。

Isogawaらは、光の遮蔽によってテーブル上に生成された影の領域とその他の領域とで異なる画像情報を提示するシステムを提案している[5]。Minomoらと同じく補色を利用することによって、プロジェクタの光が遮られ影となった部分に画像を視覚化しているが、それに加え、影でなない領域にも異なる画像情報を投影している。

いずれの手法も、光の遮蔽によって生成される影を利用し、影の動きや形状に対するセンシングを行っていない点で本研究と類似するが、本研究の提案では赤外光による不可視な影を利用する点で差異があるといえる。

\*2 <http://designmuseum.org/design/philip-worthington>

\*3 <http://www.vrsj.org/about/rule2.html#ronbun>

### 2.3 赤外光による不可視情報の重畳・制御

赤外光が持つ、人の目には不可視である性質を用いて不可視な情報の付与や可視化を可能にする手法が提案されている [6], [7].

白井らによる HIEI Projector では、可視光で投影した映像に対して、赤外光による異なる映像を重ねて投影している [8]. これにより同一の面上に対し、使用するデバイスによって異なる情報を提示することが可能となっている.

また、サーモグラフィ画像を利用して実物体を識別し、情報を付与する手法も存在する [9], [10], [11], [12].

Iwai らによる Optical Superimposition of Infrared Thermography through Video Projection は、サーモグラフィ画像を実物体上で視覚化するシステムである [13]. 実物体を遠赤外線カメラで撮影して得られるサーモグラフィ画像を、同一の実物体に再度プロジェクタによって投影することによって、実物体に重畳する形で温度の視覚化を実現している.

いずれの手法も赤外光の性質を用いることによって人の目には不可視な情報を実物体に重畳したり、実物体が持つ不可視な情報を認識したりすることが可能である点で類似するが、本研究の提案では、赤外光を遮蔽することによって生成される不可視な影を利用する点で差異があるといえる.

### 2.4 本研究の位置付け

影の表現方法に関して、2.1 節で述べたシステムは計算機の処理が加わった影を投影しているため、影の変形、着色など多彩な影の表現が可能となっている点で本研究よりも優位である. また、影の再現度に関して、2.2 節で述べた手法は可視光の遮蔽によって生成される影を用いているため、影の生成に遅延が生じない点や影のエッジが鮮明である点で本研究よりも優位である. このように、本研究の提案手法は影の表現のバリエーションが少ないことや、影の実時間性や鮮明さに関する再現度が低いといったデメリットがある. 一方で、提案手法は簡素な仕組みで影の拡張を可能にする点にメリットがある. 詳細については後述するが、提案手法ではプログラミングやハードウェア構築を必要とせず、紙工作といった容易な手法で拡張影の振舞いのデザインと制作を行うことができる. そのため、本提案システムの体験者は、拡張影を鑑賞するだけでなく、制作することも可能であるという特徴がある.

## 3. Restive Shadow

### 3.1 提案手法

本研究での拡張影の生成には、赤外光の透過・遮断を IR フィルタ (赤外透過フィルタ) によって制御することによって人の目には不可視な影を作り、それを視覚化する手法をとる. IR フィルタとは、ある特定以上の波長を持つ光

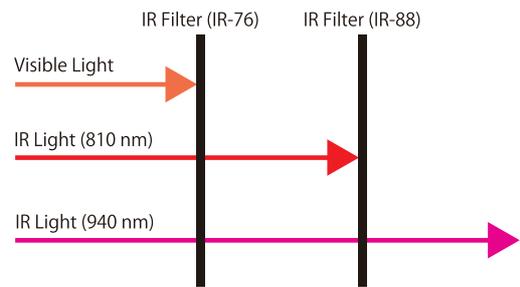


図 1 IR フィルタによる赤外光の透過・遮断  
Fig. 1 Relationship between IR lights and IR filters.

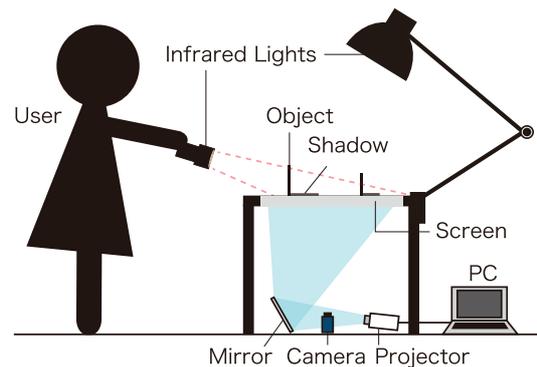


図 2 システム構成  
Fig. 2 Configuration of system.

を透過する性質を持った光学フィルタである. 提案システムでは、FUJIFILM 製の SC フィルタ (紫外線吸収フィルタ)、および IR フィルタ (光吸収・赤外透過フィルタ) を使用する (以下、両者を合わせて IR フィルタと記す). それぞれには IR-76, IR-78 といったように号数が付けられており、IR-76 フィルタは 760nm 以上、IR-78 フィルタは 780 nm 以上の波長を持つ光を透過し、それより短い波長を持つ光は遮断する (図 1). 提案システムの赤外ライトには複数種の波長の赤外線 LED を使用する. また、光を遮蔽して影を生成するための物体 (以下、オブジェクトと記す) には複数種の IR フィルタを使用し、赤外ライトとオブジェクトの組合せによって光の透過・遮断を制御する.

### 3.2 システム構成

提案システムの外観はテーブル型をしており、ユーザはテーブル面に影を映す. 提案システムの構成図を図 2 に示す. 本システムは、赤外ライト、赤外領域も撮影が可能な赤外カメラ、プロジェクタ、テーブル状のスクリーン、オブジェクトによって構成される.

赤外ライトには、ユーザが手で持って使用するハンドヘルドライトと、テーブル状のスクリーンに固定されているアームライトの 2 種類がある. ハンドヘルドライトには、810nm の単一波長の赤外光を照射するライトと、940 nm の単一波長の赤外光を照射するライトの 2 種類を、市販の LED ライトを改造することにより実装した. 図 3 に外



図 3 赤外ライト (左:ハンドヘルドライト, 右:アームライト)  
**Fig. 3** Infrared light sources (Left: handheld light, Right: arm light).

表 1 提案システムで使用する赤外線 LED  
**Table 1** Infrared LEDs used in the proposed system.

| 型番        | ピーク波長 (nm) | 半値角 (°) | 放射束 (mW) |
|-----------|------------|---------|----------|
| VSF771N1  | 770        | ±12     | 5.5      |
| LSF811N1  | 810        | ±10     | 15.0     |
| TLN231(F) | 870        | ±16     | 30.0     |
| L-53F3BT  | 940        | ±15     | 6.4      |

観を示す。810 nm のハンドヘルドライトには、ピーク波長が 810 nm である赤外線 LED (メーカー: Alpha-One, 型番: LSF811N1) を 5 個使用し, 940 nm のハンドヘルドライトには、ピーク波長が 940 nm である赤外線 LED (メーカー: Kingbright, 型番: L-53F3BT) を 5 個使用した。表 1 に、使用した赤外線 LED の詳細を示す。それぞれのハンドヘルドライトに使用した 5 個の LED は図 3 の左下部に示すように円状に配置された。これらのハンドヘルドライトを駆動させるには、それぞれのライトごとに 4.5 V の電源が必要である。本実装ではアルカリボタン電池 (LR-44) 3 個で 1 つのライトを駆動させている。アームライトには、770 nm, 810 nm, 870 nm, 940 nm の 4 種類の波長を選択的に照射するライトを 1 種類実装した。図 3 に外観を示す。このアームライトには、ピーク波長がそれぞれ 770 nm (メーカー: Alpha-One, 型番: VSF771N1), 810 nm, 870 nm (メーカー: TOSHIBA, 型番: TLN231(F)), 940 nm である赤外線 LED を 8 個ずつ使用した。表 1 に、使用した赤外線 LED の詳細を示す。それぞれの 8 個の LED は図 3 の右下部に示すように円周上に配置された。これらの赤外線 LED の明滅や光量を調整するために、Arduino Uno によって PWM 制御を行っている。本実装では 12 V の外部電源で LED と Arduino Uno の両方を駆動させている。

赤外光は人の目には視認できないため、光源をライト型にすることによって、光が照射される部分がユーザにとっ



図 4 提案システムで生成される影 (左:スクリーン上部から見た影, 右:スクリーン下部からカメラで撮影した影)

**Fig. 4** Generated shadows by system (Left: Casted shadows by lights, Right: Captured images by camera).

て判別できるようにしている。また、ハンドヘルドライトは、ON/OFF 状態を確認できるように、ON の状態時にはライトに取り付けた可視光 LED も点灯するようにした。

赤外光とオブジェクトによって生成された、人の目からは不可視な影 (以下、不可視影と記す) を取得するために、740 nm を超える赤外光波長領域の光線のみを透過するフィルタ (SC-74 フィルタ) をレンズに貼付したカメラを使用する。カメラには Watec 製の CCD カメラ (WAT-902-H-ULTIMATE), および赤外領域も撮影可能な TAMRON 製の IR 対応レンズ (12VM412ASIR) を用いている。CCD カメラの有効画素数は 768 (H) × 494 (V), シャッタースピードは 1/100 秒である。また、スクリーン素材には背面投影が可能な KIMOTO 製の DILAD スクリーン (WSK) を用いることにより、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ができる。プロジェクタの解像度は 1024 × 768, 投影映像は垂直周波数 60 kHz である。なお、カメラをテーブル下部に配置し、スクリーンの下側から影を撮影することにより、ユーザの手指やオブジェクトそのものが撮影されることを避け、スクリーン上に生成された影のみを撮影できるようにしている。スクリーン上部から見た影と、スクリーン下部からカメラによって撮影した影を図 4 に示す。また、プロジェクタをテーブル下部に配置し、スクリーンの下側から映像を投影することにより、スクリーンの上側から生成される不可視影との混合を避けている。

本提案システムが、赤外光とそれによる不可視影を視覚化するメカニズムを次に述べる。

- (1) ユーザによって照射された赤外光がオブジェクトによって遮断され、スクリーン面に赤外光による不可視影が映し出される。
- (2) 不可視影が映し出されたスクリーンをテーブル下部に設置してある赤外カメラによって撮影する。
- (3) 撮影された映像の画角を OpenCV<sup>\*4</sup>によってプロジェクション範囲に一致させる。
- (4) 映像をプロジェクタによってテーブル下部から同一のスクリーン面に投影する。

<sup>\*4</sup> <http://opencv.org/>

なお、(3)では撮影された映像内に映し出されているスクリーンの矩形を選択し、それを射影変換によってプロジェクション範囲に引き延ばす処理を行っている。これは、プロジェクタから投影される映像を実世界上の物のスケールに合わせることで、拡張影をオブジェクトの位置にマッピングするためである。

これにより、ユーザがオブジェクトを照らす赤外ライトやオブジェクトの位置を変化させても、赤外ライトからの光や影がそれに追従する形での映像提示が可能になる。すなわち、実際に映し出される影自体はプロジェクタから投影される人工的な影であるが、ユーザにはそれが赤外ライトによってリアルタイムに生成される自然な影として見えていることになる。オブジェクトと光源の位置の変化による影の変形に関しては、既存の物体認識や画像処理を用いた手法に対して、極端な角度から光を照射したときでも影の振舞いが再現される、物体や光の認識率を気にする必要がなくなる、オクルージョンの問題も解消されるといったメリットがある。提案システムのアプリケーションでは、複数種の IR フィルタで構成されるオブジェクトに異なる波長の赤外光を選択的に照射することによって、オブジェクトから生成される影の形を様々に変化させる。次節に、影を生成する赤外光の波長と IR フィルタの組合せについて述べる。

### 3.3 影を生成する波長とフィルタの組合せ

提案システムでは、複数の異なる波長の赤外光源と、複数種の IR フィルタで構成されるオブジェクトを用いる。このオブジェクトに照射する赤外光源の波長を異なる波長に切り替えたとき、オブジェクトから生成される影の形の変化が鮮明であることが望ましい。そのため、影を生成する赤外光の波長および IR フィルタの種類組合せの検証実験を行った。本実験では、透過可能な波長が 20 nm ごとに異なる 12 種類のフィルタ (SC-74 フィルタおよび IR-76～IR-96 フィルタ) を配置した透明のアクリル板の上部から赤外光を照射し、スクリーン上に影を生成した。実験の様子を図 5 に示す。赤外光源には 4 種類の波長を持つ赤外線 LED (770 nm, 810 nm, 870 nm, 940 nm) を使用し、それぞれの波長によって生成された影をスクリーンの上部から一眼レフカメラで撮影した。図 6 に、本実験によって生成された影を示す。770 nm の赤外光を照射したとき、SC-74 フィルタは影を生成せず、IR-78 以上のフィルタは影を生成した。810 nm の赤外光を照射したとき、IR-78 以下のフィルタは影を生成せず、IR-82 以上のフィルタは影を生成した。870 nm の赤外光を照射したとき、IR-82 以下のフィルタは影を生成せず、IR-86 以上のフィルタは影を生成した。940 nm の赤外光を照射したとき、IR-90 以下のフィルタは影を生成せず、IR-94 以上のフィルタは影を生成した。



図 5 赤外光の波長と IR フィルタの組合せの検証実験の様子  
Fig. 5 Experimental setting for inspecting combination of infrared wavelengths and IR filters.



図 6 赤外光の波長と IR フィルタの組合せによる影の生成事例  
Fig. 6 A case of generated shadow made with infrared lights and IR filters.

赤外光の波長の切替えによって、オブジェクトの影の形の変化が鮮明であるためには、波長を切り替えたときにフィルタによる影の出現・非出現に明確な差があることが望ましい。この理由から、810 nm と 940 nm の 2 種類の波長を持つハンドヘルドライトを使用する場合は、SC-74～IR-78 フィルタの中から 1 種類と、IR-82～IR-90 フィルタの中から 1 種類を使用することが可能である。提案システムでは、IR-76 フィルタと IR-88 フィルタを使用することとした。また、770 nm, 810 nm, 870 nm, 940 nm の 4 種類の波長を持つアームライトを使用する場合は、SC-74 フィルタ、IR-78 フィルタ、IR-82 フィルタ、IR-90 フィルタを使用することとした。

この結果をもとに実装した 2 種類のアプリケーションについて、次節より述べる。

### 3.4 アプリケーション 1 : Layered Shadow

1 つめのアプリケーションである Layered Shadow では、

ユーザがオブジェクトに赤外ライトを照らすと、オブジェクトの外観からは見て取れない絵柄が影の中に現れる [14].

オブジェクトの形は、家、バス、電車、木など、街の中にあるものを模しており、それぞれのオブジェクトはその形に関連付く絵柄が加わった影を生成する．たとえば、電車の形をしたオブジェクトを赤外ライトで照らすと、その影には窓や乗客の姿が現れる．木の形をしたオブジェクトの影には木の実や花が現れる．

電車の形をしたオブジェクトの構造を図 7 に示す．オブジェクトの内部には窓付きの電車の形に切り取った黒い画用紙、人のシルエットや電車の中のつり革の形に切り取った IR-88 フィルタが重ねられている．また、それらの両外側を窓が付いていない電車の形に切り取った IR-76 フィルタで覆うことで、ユーザからはオブジェクト内部の構造を視認できないようになっている．なお、オブジェクトの強度を上げ、自立させるために、オブジェクト内部に脚付きの透明のアクリル板を配置している．このアプリケーションでは、ユーザはオブジェクトに光を照らす際、940 nm と 810 nm の異なる赤外波長を持つ 2 種類のハンドヘルドライトを使用する．

オブジェクトを構成する IR フィルタによる赤外波長の透過・遮断の仕組みと、各々の赤外波長が照射されたときに生成される影の形状を図 8 に示す．電車の形のオブジェ

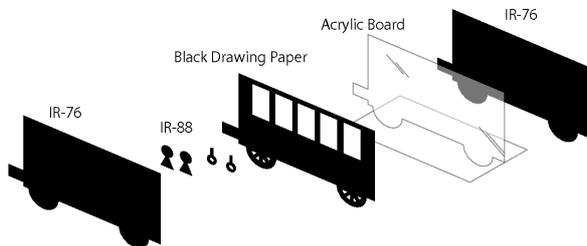


図 7 Layered Shadow アプリケーションで使用したオブジェクトの構造

Fig. 7 Structure of object for Layered Shadow application.

クトに可視光が照射されると、IR-76 フィルタが光を遮断するため、オブジェクトの外観と同じ形の影が生成される．同じオブジェクトに 940 nm の赤外光が照射されると、IR-76 フィルタと IR-88 フィルタは光を透過し、画用紙は光を遮断するため、電車に窓が付いた影が生成される．さらに、同じオブジェクトに 810 nm の赤外光が照射されると、IR-76 フィルタは光を透過し、IR-88 フィルタと画用紙は光を遮断するため、電車に窓がつき、中に人が乗っているような影が生成される．

実際に生成された影の様子を図 9 に示す．オブジェクトに 940 nm の赤外光が照射されると、図 9 の左に示すような影が現れる．また、810 nm の赤外光が照射されると、図 9 の右に示すような影が現れる．これらの図に見られるように、2 種類の波長から生成される影に明確な差があることが視覚的に認識できる．このように、アプリケーション

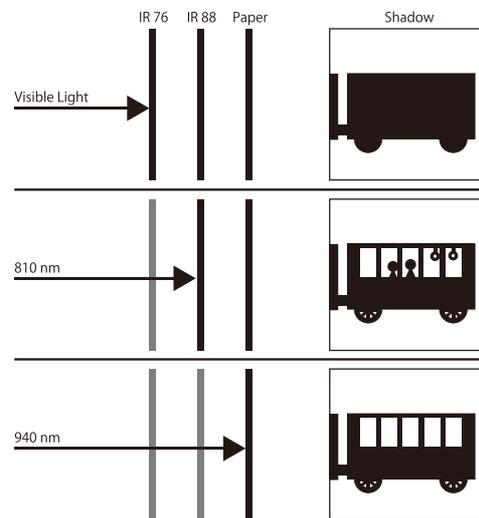


図 8 Layered Shadow アプリケーションにおける赤外ライトの波長と生成される影の形状

Fig. 8 Shadow shapes casted by different wavelength in Layered shadow application.

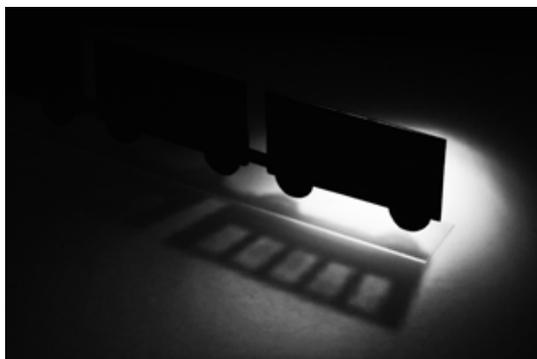


図 9 Layered Shadow アプリケーションによって生成された影 (左: 940 nm の赤外ライト照射時, 右: 810 nm の赤外ライト照射時)

Fig. 9 Generated shadow by Layered Shadow application (Left: 940 nm light, Right: 810 nm light).

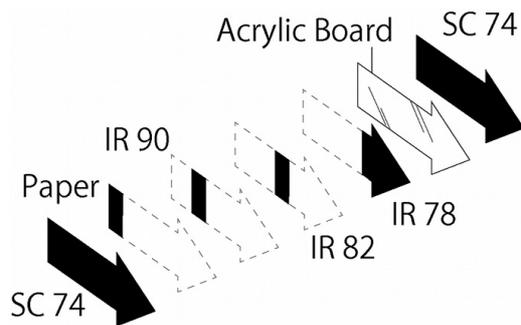


図 10 Animated Shadow アプリケーションで使用したオブジェクトの構造

Fig. 10 Structure of object for Animated Shadow application.

ン 1 では、1 つのオブジェクトから 2 種類の影が生成される。ただし、オブジェクト内で 810 nm の赤外光が遮断される面積を、940 nm の赤外光が遮断される面積よりも小さくすることは不可能である。そのため、オブジェクトの外形と生成される 2 種類の影の形に大きな変化を作るよりは、ベースとなる形状が存在し、その中で微細な変化を作ることによって、オブジェクトと影の形状が文脈的に関連付いたコンテンツ表現を作ることによって適しているといえる。

### 3.5 アプリケーション 2 : Animated Shadow

2 つめのアプリケーションである Animated Shadow では、赤外ライトが照らされているテーブルの上にユーザがオブジェクトをかざすと、静止しているオブジェクトに対してひとりでに動き出す影が生成される [15]。

オブジェクトの形は、矢印、花、蝶、りんごといった、我々の日常生活の中でよく見慣れた物の形を模しており、それぞれのオブジェクトはその形に関連付いた動的な影を生成する。たとえば、矢印の形をしたオブジェクトを赤外ライトで照らすと、その影には矢印の長さが伸び縮みするような動きが見られる。蝶の形をしたオブジェクトの影には、蝶が羽根を羽ばたかせて飛んでいるような動きが見られる。

矢印の形をしたオブジェクトの構造を図 10 に示す。オブジェクトの内部には画用紙、IR-78、IR-82、IR-90 フィルタがそれぞれ異なる位置に配置されている。また、それらの両外側を矢印の形に切り取った SC-74 フィルタで覆うことで、ユーザからはオブジェクト内部の構造を視認できないようになっている。なお、オブジェクトの強度を上げるために、内部に透明のアクリル板を配置している。このアプリケーションでは、ユーザはオブジェクトに光を照らす際、940 nm、870 nm、810 nm、770 nm の 4 つの赤外波長を単波長ずつ照射するアームライトを使用する。

オブジェクトを構成する IR フィルタによる赤外波長の透過・遮断の仕組みと、各々の赤外波長が照射されたときに生成される影の形状を図 11 に示す。アームライトの波長切替えパターンが 940 nm から 1 段階ずつ短い波長へと

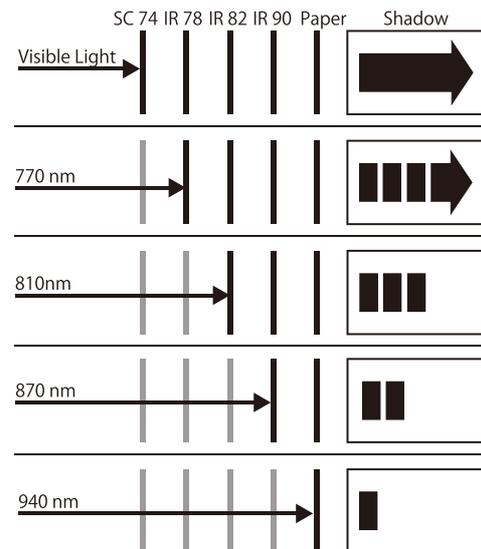


図 11 Animated Shadow アプリケーションにおける赤外ライトの波長と生成される影の形状

Fig. 11 Shadow shapes casted by different wavelength in Animated Shadow.

切り替わる場合、オブジェクトが生成する影には、影の面積が徐々に増えていくような動きが見られる。940 nm から 1 段階ずつ短い波長へと切り替わり、770 nm に達すると 1 段階ずつ長い波長へと切り替わる場合、影の面積が増えたり減ったりするような動きが見られる。このとき、波長は 1 秒ごとに切り替えられ、切替えの際は、前の波長の光が徐々に減光し、次の波長の光が徐々に増光することによって、影の形が緩やかに変化するようになっている。770 nm と 940 nm が交互に切り替わる場合、影の一部分がネオンサインのようにチカチカと点滅するような動きが見られる。このとき、波長は 250 ミリ秒ごとに切り替えられることによって、影が点滅の様子が表現されている。

実際に生成された影の様子を図 12 に示す。オブジェクトに 940 nm の赤外光が照射されると、図 12 における a のような状態で影が現れる。870 nm の赤外光が照射されると、影は b の状態で現れる。810 nm の赤外光が照射されると、影は c の状態で現れる。770 nm の赤外光が照射されると、d に示すような影が現れる。赤外光の波長が経時的に切り替わることで、矢印形のオブジェクトの影は動いているように見える。このように、アプリケーション 2 では、静止しているオブジェクトに対し、それが生成する影は動く、といった表現が可能である。ただし、アプリケーション 1 と同様に、オブジェクト内で赤外光が遮断される面積は、赤外光の波長が長くなるにつれて増加し、短くなるにつれて減少するといったように、一方向的な変化のみに対応している。そのため、本アプリケーションで表現できる影の動きは、オブジェクトの形状内で影の面積が増減するものに限定される。

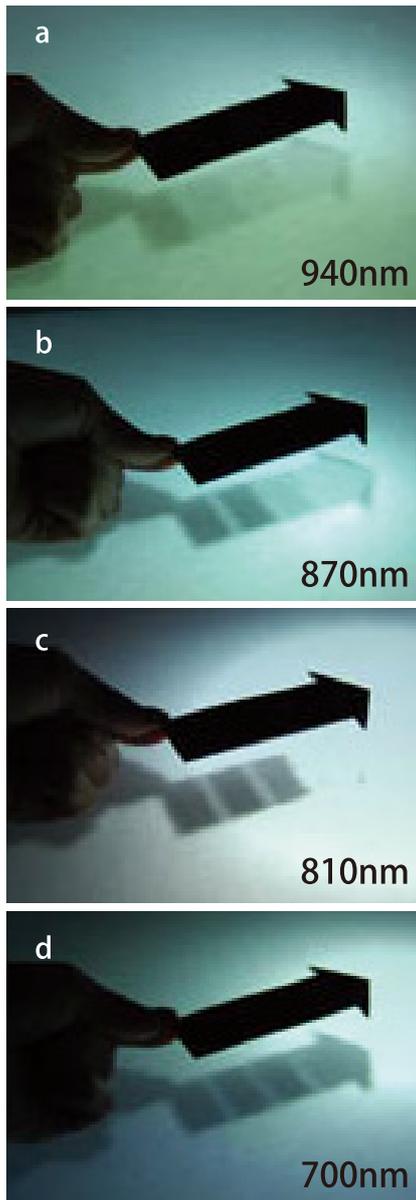


図 12 Animated Shadow アプリケーションによって生成された影  
 Fig. 12 Generated shadow by Animated Shadow application.

#### 4. 生成される影の振舞いに関する評価実験

提案システムで生成される影の動きは、実世界上でのオブジェクトの動きに対して遅延が見られる。そこで、影の遅延の測定と影の遅延に対するユーザ評価を行った。また、提案システムで生成される影はエッジがぼやける現象が見られることから、影のぼやけに対するユーザ評価を行った。

##### 4.1 影の遅延の測定

提案システムで生成される影は、オブジェクトの動きに追従して動くようになっているが、その動きには遅延が生じている。そこで本実験では、提案システムで生成される影の動きの遅延時間を計測した。また、遅延には OpenCV によって映像の画角を合わせるための処理時間と、赤外カ

表 2 測定された影の遅延  
 Table 2 Delay of shadows.

| OpenCV<br>による処理 | 各シャッタースピード別の影の遅延時間 (フレーム) |         |         |          |
|-----------------|---------------------------|---------|---------|----------|
|                 | 1/100 秒                   | 1/250 秒 | 1/500 秒 | 1/1000 秒 |
| あり              | 17.8                      | 18.0    | 17.6    | 18.4     |
| なし              | 6.6                       | 6.8     | 6.4     | 6.2      |

メラのシャッタースピードが影響していると仮定し、これらを変数として遅延の原因を調査した。

##### 4.1.1 実験構成と手続き

実験には、3.3 節で述べたシステム構成を用いた。このとき赤外ライトにはアームライトのみを使用し、770nm の波長の赤外光のみがテーブル面に常時照射されるようにした。実験では、テーブル面に対して垂直方向に 3cm 離れた位置でオブジェクトを約 3 秒間静止させた後、水平方向に移動させることによって、影を追従させる動作を 10 回行い、その平均遅延時間を求めた。遅延時間の計測には、オブジェクトと影の両方がフレーム内に収まる位置から SONY 製のビデオカメラ (HDR-CX430V) でフレームレート 60 fps で撮影を行い、撮影した動画像内でオブジェクトが水平方向に動き始めたタイミングと影が追従し始めたタイミングの時間差 (フレーム数) を計測する手法を採用した。時間差の計測には、Adobe Premiere Pro のタイムラインツールを用いた。実験の条件として、OpenCV の画角補正あり/なしの状態それぞれで、赤外カメラのシャッタースピードを 1/100 秒、1/250 秒、1/500 秒、1/1000 秒に変化させ、影の遅延時間を計測した。

##### 4.1.2 結果と考察

表 2 に結果を示す。提案システムの設定条件は、OpenCV による処理あり・シャッタースピード 1/100 秒である。このときの影の遅延フレーム数は 17.8 であった。また、OpenCV による処理ありの状態となしの状態では遅延に差があることが確認された。しかし、シャッタースピードの設定値の変更による遅延の変化は見られなかった。このことから、影の遅延は OpenCV によって映像の画角を合わせる処理による処理時間が原因となっていることが示唆された。

#### 4.2 影の遅延に対するユーザ評価

影の動きの遅延に対するユーザ評価を行った。提案システムにおいてオブジェクトを把持して影を生成するときのユーザの動作を、(1) 鉛直方向を軸としたオブジェクトの回転、(2) 水平方向へのオブジェクトの移動、(3) 水平方向を軸としたオブジェクトの回転の 3 つに分解し、それぞれにおける影の追従の遅延について評価を行ってもらった。(1)~(3) の動作を図 13 に示す。また、提案システムの影の遅延の評価値と、提案システムよりも影を遅延させたときの評価値を比較することによって、システム側による遅延が、ユーザによる影の遅延の感じ方にどれくらい影響す

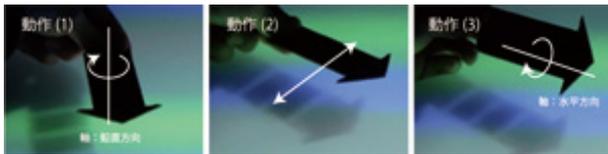


図 13 オブジェクトに対するユーザの動作  
Fig. 13 Movements for the object.

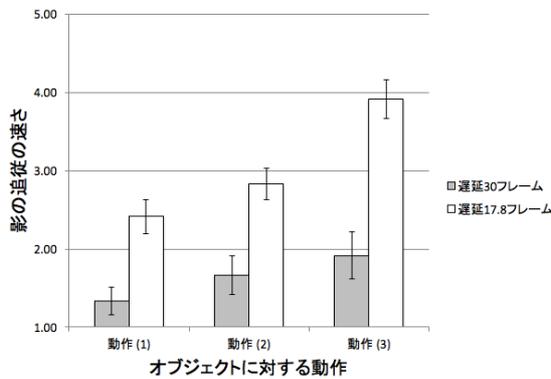


図 14 遅延に対するユーザ評価  
Fig. 14 User review for delay.

るのかを調べた。実験参加者は情報系学部に通う大学生 12 人 (男 9 人, 女 3 人) であった。

#### 4.2.1 実験構成と手続き

本実験では、統制を行うために、実験参加者に対して提案システムで影を生成する様子を撮影した動画を鑑賞してもらい形で評価を行ってもらった。この動画には、4.1.1 項で述べた構成において、影の遅延が 17.8 フレームの状態 (1), (2), (3) の動作を行った様子、および影の遅延が 30 フレームの状態 (1), (2), (3) の動作を行った様子の計 6 パターンの様子が撮影されたものが用意された。なお、遅延が 30 フレームの条件は、影の遅延を知覚できるものとして提案システムでの遅延との比較対象に用いた。動画の撮影は、図 5 に示す構成で行った。実験参加者には、動画を 1 パターン鑑賞するごとに、影が遅延しているかどうかについて 5 段階評価で質問紙に回答してもらった。また、それぞれのパターンにおいて、影の遅延を許容できるかどうかについて「はい」か「いいえ」の 2 択で回答してもらった。なお、動画のパターンはランダムな順序で提示された。

#### 4.2.2 結果と考察

12 人の 5 段階評価の平均値と標準誤差を図 14 に示す。この結果より、(1) 鉛直方向を軸としたオブジェクトの回転動作を行った際の影の追従には最も遅延を感じやすく、(3) 水平方向を軸としたオブジェクトの回転動作を行った際の影の追従には最も遅延を感じにくい傾向があることが示唆された。また、(1), (2), (3) の動作それぞれにおいて、遅延が 30 フレームの状態と 17.8 フレームの状態に有意差があるかどうかを調べるために Wilcoxon の順位和検定を

行った。検定の結果、すべての動作において遅延の評価値に有意差が見られ ( $p < .01$ )、図 14 に示すように、(3) の動作に関しては特に有意な差があることが確認された。このことから、システム側による遅延が、ユーザによる影の遅延の感じ方に大きく影響することが示唆された。また、それぞれのパターンにおいて影の遅延を許容できるかどうかの質問に対し、30 フレームの遅延における (1) の動作に対しては 12 人中 3 人、(2) の動作に対しては 2 人、(3) の動作に対しては 5 人が遅延を許容できると回答し、17.8 フレームの遅延における (1) の動作に対しては 12 人中 5 人、(2) の動作に対しては 9 人、(3) の動作に対しては 11 人が遅延を許容できると回答した。30 フレームの遅延、17.8 フレームの遅延いずれの状態においても、オブジェクトに対する動作の種類によって、遅延を許容できるかどうかが変わることが分かった。(3) の動作では、他の 2 つの動作に比べると影の変形や移動といった動きが少ない。そのため、比較的遅延を感じにくかったと考えられる。このことから提案システムは、影絵芝居のようにオブジェクトを頻りに動かし、影の大きな移動や変形をとまなうようなコンテンツではなく、オブジェクトやライトをかざし、オブジェクト自体の影の内部で起こる変化を鑑賞するようなコンテンツに適していると考えられる。

#### 4.3 影のぼやけに対するユーザ評価

提案システムでは、生成される影のエッジがぼやける現象が起こるため、影のぼやけに対するユーザ評価を行った。影のぼやけの度合いは、テーブル面もしくは光源からオブジェクトまでの距離によって変化する。そこで、テーブルと光源の間に配置するオブジェクトの位置を様々に変えたときの影の様子を観察してもらい、エッジのぼやけに対して評価を行ってもらった。実験参加者は情報系学部に通う大学生 12 人 (男 9 人, 女 3 人) であった。

##### 4.3.1 実験構成と手続き

本実験では、統制を行うために、実験参加者に対して提案システムで影を生成する様子を撮影した静止画像を鑑賞してもらい形で評価を行ってもらった。この静止画像には、4.1.1 項で述べた構成において、アームライトの光源からテーブル面の距離が 80 cm になるように固定し、テーブル面からオブジェクトまでの距離が 3 cm, 5 cm, 7 cm, 9 cm, 11 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm に設定した状態で影を生成している様子の計 8 パターンの様子が撮影されたものが用意された。オブジェクトには、3.5 節で述べた矢印型のものを用いた。静止画の撮影は、図 5 に示す構成で行った。図 15 に、本実験で用いた静止画像の一例を示す。実験参加者には、静止画像を 1 パターン鑑賞するごとに、影のエッジがぼやけているかどうかについて 5 段階評価で質問紙に回答してもらった。また、それぞれのパターンにおいて、影が矢印の形に見えるかどうかについて「はい」か

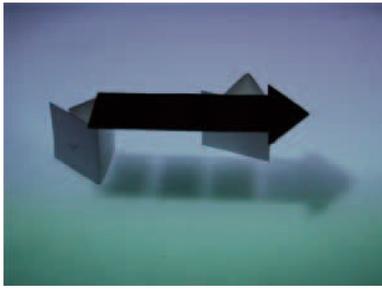


図 15 影のぼやけに対するユーザ評価で用いた静止画像の一例  
 Fig. 15 Shadow example used in the user review for evaluating blur.

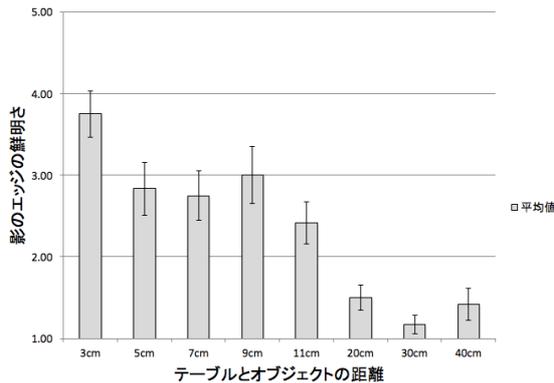


図 16 影のぼやけに対するユーザ評価  
 Fig. 16 User review for edge of shadow.

「いいえ」の2択で回答してもらった。なお、動画のパターンはランダムな順序で提示された。

#### 4.3.2 結果と考察

12人の5段階評価の平均値と標準誤差を図16に示す。この結果より、テーブル面からオブジェクトまでの距離が近いほど、影のエッジはぼやけておらず、オブジェクトをテーブル面から遠ざけ、光源に近づけるほど影のエッジはぼやけることが分かった。また、それぞれのパターンにおいて影が矢印の形に見えるかどうかの質問に対しては、3cmと5cmのパターンでは12人中11人が「はい」と回答し、7cmのときは12人中10人、9cmのときは8人、11cmのときは6人、20cmのときは1人、30cmのときは0人、40cmのときは2人が「はい」と回答した。このことから、影が最もはっきり見える条件は、オブジェクトをできる限りテーブルに近づけつつ、影がオブジェクトや手で遮蔽されないことであることが分かった。

### 5. 体験者の反応

本提案システムの体験方法として、すでに完成されたアプリケーションを鑑賞してもらう方法と、アプリケーションのコンテンツであるオブジェクトを制作してもらう方法が考えられる。本章では、本提案システムを鑑賞者として体験したユーザと、制作者として体験したユーザそれぞれの反応と考察について述べる。

表 3 これまでに行った展示

Table 3 Exhibitions.

| 展示機会                     | 開催場所 | 開催日程          |
|--------------------------|------|---------------|
| Make: Ogaki Meeting 2012 | 岐阜県  | 2012/8/25, 26 |
| EC 2012                  | 兵庫県  | 2012/9/28-30  |
| インタラクシオン 2013            | 東京都  | 2013/2/28-3/2 |
| Laval Virtual 2013       | フランス | 2013/3/20-24  |
| ACE 2013                 | オランダ | 2013/11/11-15 |
| SIGGRAPH Asia 2013       | 香港   | 2013/11/19-22 |

#### 5.1 鑑賞者としての反応

これまでに、国内外の展示会やイベントにおいて数回にわたり提案システムのデモンストレーション展示を行った。これまでにやってきた展示の一覧を表3に示す。デモンストレーション展示においては、展示者が影を作る様子を示しながらシステムの操作を説明した後に、実際に来場者に体験してもらった。体験者のほとんどが、生成された拡張影に対して驚いた反応を示していた。また、1つのオブジェクトやライトを試した後に、他のものでも試そうとする様子が見られた。このことから、拡張された影が通常の影とは異なっていることが認知されたといえる。また、多くの体験者から、オブジェクトや光源を移動させて影の位置や形を変化させる様子が見られた。実世界において、光源と物体の位置関係によって影の位置や形が様々なに変化することは一般的に認知されている。提案システムにおいても、通常の影と同様の振舞いをさせるために体験者が光源や物体を移動させていたことから、提案システムによって生成される拡張影も通常の影と同様の幾何的整合性が再現できていたといえる。一方で、「影がぼやけている」や「(オブジェクトの動きに対して)影が遅れている」といった感想が得られた。提案システムでは、赤外光によって生成される不可視光を赤外カメラによって撮影し、それをプロジェクタによって投影することによって影を可視化している。影がぼやける原因として、カメラ映像をPCやプロジェクタに転送する際に動画の解像度が低下することがあげられる。また、影がぼやけるもう1つの原因として、赤外ライトの特性があげられる。赤外ライトには複数のLEDを用いているため影が多重に生成されることが考えられる。影を鮮明に映すために理想的な光源は、十分な明るさでかつ照射範囲が広い点光源であり、ハンドヘルドライトの場合は消費電力と励起電圧が電池で賄えるものが望ましい。影の遅延は、4.1節の実験結果より17.8フレームであることが確認され、その原因は画像処理による処理時間が影響していることが示唆されている。影の遅延をなくすためには、画像処理によるキャリブレーションを必要としない、光学系の治具の設計が解決策として考えられる。提案システムの操作性に関しては、少数の体験者からはライトをオブジェクトに接触するほどに近づけ、スクリーン上に影を生成できていない様子も見られたが、展示者が

影が生成されるライトのかざし方を示すと影の作り方を理解している様子であった。また、ライトがONになっているかどうかを確認するためにライトの照射口を覗き込んだり、ライトがONになっているにもかかわらず、ライトを点灯させてほしいと申し出たりする様子も見受けられた。提案システムで用いたライトには、ON/OFFの状態を示すために、赤外線LEDだけでなく可視光LEDも付与されていたが、システムの体験者にとってはON/OFFの状態を判断することが困難であったと考えられる。ライトが点灯している状態がより分かりやすくなるように設計し直す必要がある。

## 5.2 制作者としての反応

提案システムのアプリケーションのコンテンツであるオブジェクトは、紙工作によって制作が可能である。このことは今後、コンピュータやメディアアートに馴染みのない人でもフィジカルなモノづくりによってバーチャルなコンテンツを制作者として楽しむきっかけ作りに役立てることができると考えられる。そこで、本提案システムを制作者として体験したユーザからの反応や感想を得るために、実際にオブジェクトのデザインを行ってもらった実験を行った。実験では、本提案システムを鑑賞したことがある、情報系大学に通う大学生4人（男子2人、女子2人）に独自のオブジェクトのデザインを行ってもらい、その様子を観察した。体験者にはまず、本提案システムのアプリケーション1: Layered Shadowでのインタラクションについて説明を行い、本アプリケーションで用いるオブジェクトの制作方法について説明した。次に、体験者には独自のオブジェクトのアイデアをスケッチしてもらい、最後に画用紙を用いて、オブジェクトに重ね合わせる3つのレイヤの型紙を制作してもらった。体験者にはA4サイズの黒画用紙が5枚ずつ配布され、筆記具、ハサミ、カッターナイフ、糊、セロハンテープが貸し出された。また、制作中は体験者、実験者間のいっさいの会話を許可した。アイデアのスケッチでは、体験者は少なくとも2種類以上のアイデアを出していた。出されたアイデアの中には、各レイヤ間で影となる領域が一部では増加し、他部では減少するといった、本提案手法では実現不可能である表現が含まれたが、型紙の制作の過程で体験者は自らそれに気づき、アイデアを変更する様子が見られた。また、型紙の制作方法に困っている体験者に対し、別の体験者がアドバイスや代替案を示す様子も見られた。別の体験者のアイデアに興味を持ち、コンセプトや制作方法などの詳細を尋ねる体験者も見られた。図17に体験者が制作したオブジェクトの型紙を示す。オブジェクトの制作後に、各体験者に対し、制作において苦労した点についてインタビューを行ったところ、アイデア出しが難しかったという回答が4人中3人から得られた。提案システムのアプリケーション1では、1つのオブジェ

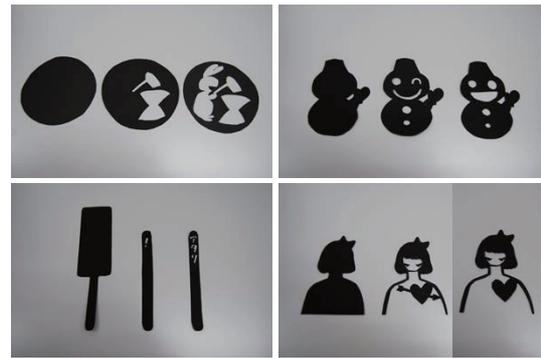


図 17 体験者が制作したオブジェクトの型紙  
Fig. 17 Objects designed by participants.

クトから2種類の異なる形状を持つ影が生成されるが、その間で影となる領域が一部では増加し、他部では減少するといった表現は不可能である。制作者はこの制約を考慮してアイデアを出す必要がある。また、オブジェクトから生成される影の形状を1種類だけでなく2種類考えることに難しさを感じたという回答が4人中1人から得られた。今回はオブジェクトのレイヤを3種類考えてもらうことを前提に型紙を制作してもらったが、制作の難易度を調整するためにレイヤ数を減らすことが有効であると考えられる。

## 6. まとめと今後の展望

本稿では、赤外光による不可視影を用いた拡張影の生成手法を提案した。提案手法では、赤外光の波長とIRフィルタの種類のコラボレーションによって、同一のオブジェクトから生成される影の形状を様々に変化させることを検証した。また、その手法を用いて影の拡張を行うシステム“Restive Shadow”を実装した。デモンストレーション展示におけるシステム体験者の反応より、本システムによって影が拡張されたことが認知されたことと、実世界の状態と拡張影との幾何的整合性がとれていたことが示された。これにより、光を遮蔽することによって生成される自然な影そのものの振舞いを入出力に利用し、簡素な仕組みで影を拡張することを可能とした。

今後は、生成される影の光学的整合性と時間的整合性の問題を解決し、自然な影の再現性を向上させる。また、アプリケーションの展開に関して、今後は偏光板などの他の光学素子も組み合わせることによって、赤外光による自然な影を用いた拡張影生成手法と、影とのインタラクションについて検討する。

謝辞 本研究の実施にあたり、科研費 基盤研究C（課題番号：24500160）からの支援を受けた。記して感謝の意を表す。

## 参考文献

- [1] Miwa, Y., Itai, S., Watanabe, T. and Nishi, H.: Shadow Awareness: Enhancing Theater Space Through

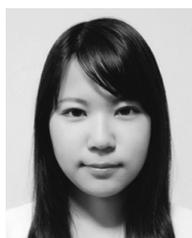
- the Mutual Projection of Images on a Connective Slit Screen, *ACM SIGGRAPH 2011 Art Gallery*, pp.325–333 (2011).
- [2] Xu, H., Iwai, D., Hiura, S. and Sato, K.: User Interface by Virtual Shadow Projection, *SICE-ICASE, 2006, International Joint Conference*, pp.4814–4817 (2006).
- [3] 橋田朋子, 寛 康明, 苗村 健: ソラ・カラ: 太陽光を活用した屋外空間の発色制御, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol.17, No.3, pp.279–288 (2012).
- [4] Minomo, Y., Kakehi, Y., Iida, M. and Naemura, T.: Transforming your shadow into colorful visual media: Multiprojection of complementary colors, *ACM Computers in Entertainment*, Vol.4, No.3, Article No.10 (2006).
- [5] Isogawa, M., Iwai, D. and Sato, K.: Making Graphical Information Visible in Real Shadows on Interactive Tabletops, *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, Vol.20, No.9, pp.1293–1302 (2014).
- [6] 木村 翔, 寛 康明, 苗村 健: 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, *情報科学技術レターズ*, Vol.5, pp.289–291 (2006).
- [7] 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).
- [8] 白井良成, 松下光範, 大黒 毅: 秘映プロジェクタ: 不可視情報による実環境の拡張, *WISS2003 予稿集* (2003).
- [9] 川原圭博, 松本剛士, 新田拓哉, 苗村 健, 原島 博: 透過型ビデオアバタの提案と実装—熱画像を利用した実時間システム, *日本バーチャルリアリティ学会第5回大会論文集*, Vol.5, pp.333–336 (2000).
- [10] Yasuda, K., Naemura, T. and Harashima, H.: ThermoKey: Human Region Segmentation from Video, *Computer Graphics and Applications*, IEEE, Vol.24, No.1, pp.26–30 (2004).
- [11] 西貝吉晃, 飯田 誠, 苗村 健: ThermoSic: 温度情報を利用した自動モザイク処理, *映像情報メディア学会誌*, Vol.59, No.3, pp.422–426 (2005).
- [12] 岩井大輔, 金谷一郎, 日浦慎作, 井口征士, 佐藤宏介: ThermoPainter: 熱画像を用いたタブレット型入力装置とそのインタラクティブ描画システム, *情報処理学会論文誌*, Vol.46, No.7, pp.1582–1593 (2005).
- [13] Iwai, D. and Sato, K.: Optical Superimposition of Infrared Thermography through Video Projection, *Infrared Physics & Technology*, Vol.53, No.3, pp.162–172 (2010).
- [14] Sakaguchi, S., Tanaka, T. and Matsushita, M.: Layered Shadow: Multiplexing Invisible Shadow Using Infrared Lights with Different Wavelengths, *Proc. Virtual Reality International Conference: Laval Virtual*, Article No.13, pp.13:1–13:2 (2013).
- [15] Sakaguchi, S., Tono, H., Tanaka, T. and Matsushita, M.: Restive Shadow: Animating Invisible Shadows for Expanding Shadowgraph Experience, *SIGGRAPH Asia 2013 Emerging Technologies*, Article No.16, pp.16:1–16:2 (2013).



阪口 紗季 (学生会員)

2012年関西大学総合情報学部卒業。2014年同大学大学院総合情報学研究科博士課程前期課程修了。現在、同大学院博士課程後期課程在学中。ヒューマンコンピュータインタラクションに関する研究に従事。2013年 Laval

Virtual Award ほか各賞受賞。ヒューマンインタフェース学会学生会員, 日本感性工学会学生会員, ACM Student Membership.



東納 ひかり

2014年関西大学総合情報学部卒業。現在、スミセイ情報システム株式会社に所属。在学中はヒューマンコンピュータインタラクションに関する研究に従事。



松下 光範 (正会員)

1995年大阪大学大学院基礎工学研究科物理系専攻制御工学分野博士前期課程修了。同年日本電信電話株式会社入社。2008年関西大学総合情報学部准教授。2010年同教授, 現在に至る。情報編纂, インタラクションデザインに関する研究に従事。博士(工学)。2003年情報処理学会論文賞, 2007年日本知能情報ファジィ学会論文賞ほか各賞受賞。人工知能学会, 日本バーチャルリアリティ学会, ACM 各会員。