

## Oil Bubble Display: 油を投影面とした変形・結合・分裂が可能なディスプレイ

井手口裕太<sup>1)</sup>(非会員) 川口純輝<sup>1)</sup>(非会員) 浦西友樹<sup>2)</sup>(非会員) 吉元俊輔<sup>1)</sup>(非会員)  
黒田嘉宏<sup>1)</sup>(非会員) 井村誠孝<sup>3)</sup>(正会員) 大城理<sup>1)</sup>(非会員)

1) 大阪大学大学院基礎工学研究科 2) 大阪大学サイバーメディアセンター  
3) 関西学院大学理工学部

## Oil Bubble Display: Deformable, Fusible and Separable Display using Oil Projection Surface

Yuta Ideguchi<sup>1)</sup> Junki Kawaguchi<sup>1)</sup> Yuki Uranishi<sup>2)</sup>  
Shunsuke Yoshimoto<sup>1)</sup> Yoshihiro Kuroda<sup>1)</sup> Masataka Imura<sup>3)</sup>  
Osamu Oshiro<sup>1)</sup>

1) Graduate School of Engineering Science, Osaka University  
2) Cybermedia Center, Osaka University  
3) School of Science and Technology, Kwansei Gakuin University

ideguchi @ bpe.es.osaka-u.ac.jp

### 概要

本研究では、水の上に浮かべた油（オイルバブル）の挙動に着目し、オイルバブルをディスプレイ面として利用することで、その柔軟なディスプレイ面の形状に応じた映像とのインタラクションを可能にする Oil Bubble Display を提案する。ユーザはオイルバブルを変形・結合・分裂させることで、投影像とのインタラクションを行える。Oil Bubble Display では、オイルバブルへの映像の投影を行うために、オイルバブルに光を散乱させる物質を混合する。本論文では、Oil Bubble Display を用いた例として、投影像の変形、投影色の混合・分解および演算表現のアプリケーションを実装した。また、Oil Bubble Display のディスプレイとしての性能であるコントラスト、オイルバブル特有の柔軟性の時間変化について評価実験を行った結果、高いコントラストを得るための濃度および、操作回数 15 回までは柔軟性が十分保てることが分かった。

### キーワード

オイルバブル, フレキシブルディスプレイ, プロジェクション

### Abstract

In this study, we focus on the behavior of oil floating on the water, oil bubble, for a flexible display surface and propose *Oil Bubble Display* that allows interaction with an image corresponding to the shape of flexible display surface. The system enables users to deform, fuse and separate the oil bubble and to interact with projected images. In order to project images onto oil bubbles, we mixed powder materials with the oil which scatter the projected light. In this paper, we implemented shape deformation of projected images, mixing and decomposition of projected colors, and summation and distribution of projected numbers. We then investigated the contrast and the time variation of flexibility. As a result, the concentration of powder materials for high contrast was found and appropriate flexibility was kept up to 15 times of operation.

### Keywords

Oil Bubble, Flexible Display, Projection

## 1 はじめに

携帯電話やタブレット端末などに搭載されたタッチディスプレイは、ディスプレイに入力装置を組み合わせることで、映像を見せるだけではなく、手指によって直接操作が可能である。このようなディスプレイでは、ディスプレイ面と手指の接触位置を用いた入力が広く普及している。一方で、任意にディスプレイ面の位置や形状を変化させ、ディスプレイ面の位置や形状自体も入力情報として扱うことで、インタラクション可能なディスプレイの研究もある。DeforMe[1]では、粘弾性体に映像を投影し、変形に応じて投影像を操作することが可能である。さらに、ディスプレイ面を物体が突き抜けるといったインタラクションが可能なディスプレイとして、AquaTopDisplay[2]やフォグディスプレイ[3]のように水や霧などの流体に映像を投影し、操作するシステムが提案されている。

本研究では、ディスプレイ面の位置や形状の変化だけでなく、これまで実現されていなかった、結合・分裂を可能とするディスプレイの開発を目指す。その実現方法として、水の上に浮かべた油（オイルバブル）の挙動に着目して、その柔軟な挙動を生かしたディスプレイ、Oil Bubble Displayを提案する。図1は投影した映像が、オイルバブルの形状に応じて変形、分裂する様子を表したものである。Oil Bubble Displayは、オイルバブルにプロジェクタを用いて映像を投影するため、オイルバブルに光を散乱させる疎水性の物質を混合する。ユーザは、水の上に浮かべたオイルバブルを動かし、オイルバブルを変形・結合・分裂させることで、オイルバブルに投影された映像を操作する。本論文では、Oil Bubble Displayのアプリケーションとして、オイルバブルの形状変化を生かした投影像の変形、結合・分裂から類推される投影色の混合・分解、および演算表現の三つを実装した結果について述べる。

## 2 関連研究

本節では、ディスプレイに入力装置を組み合わせて利用している研究をまとめるとともに、提案手法の位置づけを明らかにする。

ディスプレイに入力装置を組み合わせて利用している代表的なディスプレイとして、タブレット端末などに利

用されている静電容量式のタッチディスプレイがある。その他にも、抵抗膜式や赤外線やカメラによってタッチを検出するディスプレイもある。これらは接触位置のみを入力として扱っているが、他の情報も入力として扱う研究が行われている。例えば、静電容量の違いから複数人でタッチした際にタッチした個人を識別する研究[4]や赤外線カメラを利用することでディスプレイの手前側でのジェスチャも入力として利用する研究[5]やカメラと手指の先につけたマーカを利用することでジェスチャを入力として利用する研究[6]やディスプレイに写る手の影も入力として利用する研究[7]もある。これらの研究では、ディスプレイ面が液晶ではなく、プロジェクタにより投影面に映像を投影することでディスプレイ面を構築している。他にも、雪が降るような寒い屋外でも使えるように、氷の壁にプロジェクタにより映像を投影することで、ディスプレイ面として利用する研究[8]や、距離画像センサを利用して手のひらや手に持った紙など身近なものをディスプレイ面として利用する研究[9]も行われており、プロジェクタにより映像を投影することで、入力情報や使用場所が増やすことができ、ディスプレイとしての機能が拡張されてきた。

近年では、剛体平面ではない対象をディスプレイ面とすることで、より対象の形状や特性を生かしたインタラクションを可能とするディスプレイの研究が行われている。例えば、落下する水滴や霧にプロジェクタにより映像を投影することでディスプレイ面として利用する研究[10, 11, 3]や、微粒発泡ポリスチレンビーズを敷き詰め、そこにプロジェクタにより映像を投影する研究[12]も行われている。このように、水滴などの微粒子にプロジェクタに映像を投影することで、ディスプレイ面を手や物体が突き抜けることができる。さらに、ディスプレイ面の位置や形状自体も入力情報として扱い、インタラクション可能なディスプレイの研究もある。DeforMe[1]では、粘弾性体に映像を投影し、変形に応じて投影像を操作することが可能である。しかし従来の研究においては、ディスプレイ面は常に一つであり、ディスプレイ面自体を結合・分裂するといった操作については扱われていない。

本研究では、水の上に浮かべた油特有の柔軟な性質を持つディスプレイとして Oil Bubble Display を提案する。Oil Bubble Display は、光を散乱させる物質を混合

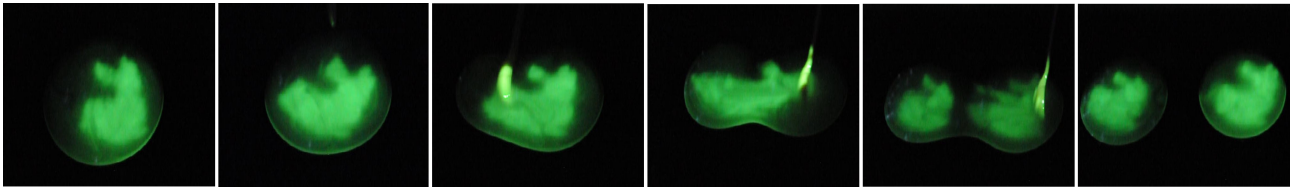


図1 Oil Bubble Display の操作：オイルバブルにうさぎを投影し、二つに分裂させたときの時系列画像

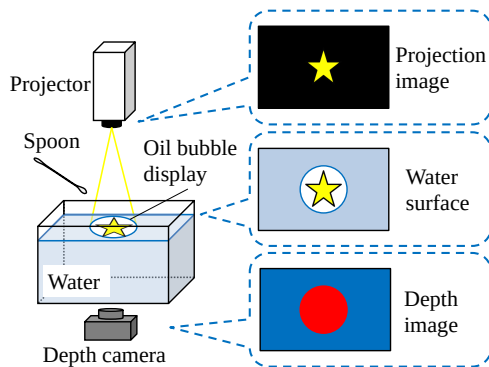


図2 システム概要

した油（オイルバブル）を水の上に浮かべ、オイルバブルをディスプレイ面として利用することで、ディスプレイ面の位置や変形に加え、結合・分裂を新たな入力情報として用いることを可能とする。

### 3 提案システム

図2に Oil Bubble Display の概要を示す。透明な水槽に水を入れ、オイルバブルを浮かべる。赤外線距離画像センサを用いて、オイルバブルの位置と形状を計測し、計測されたオイルバブルにプロジェクタから映像を投影する。オイルバブルを投影対象とし、投影対象そのものを結合・分裂させることを新たな入力情報として用いることで、投影色の混合・分解や演算表現といったインタラクションを可能にする。

#### 3.1 オイルバブル

油は疎水性の物質で、水に浮かべると円形に近い形状となるが、外力により柔軟にその形状が変わるという性質があり興味深い。本研究では、ディスプレイ面として水の上に浮かべたサラダ油（オイルバブル）を利用する。水の上に浮かべたオイルバブルは、水に溶けることなく水面に漂い、変形・結合・分裂といった操作が可能である。一方、水に浮かべた油を投影面とした場合、サラダ油は光を透過する性質を持つため、投影した映像を視認

することはできない。プロジェクタにより投影された映像をあらゆる方向から視認するためには、投影面で光が広範囲に散乱する必要がある。したがって、光を散乱する性質を持つ微粒子を油に混合することで、微粒子により光の散乱を発生させ、水に浮かべた油へ投影した映像の視認を可能とする。このとき油に混合する微粒子は、水および油に溶解しない物質である必要がある。本論文では油に混合する物質として、白色であり水に溶けない物質であるベビーパウダー（タルク粉）を用いる。

#### 3.2 オイルバブルの位置と形状の計測

オイルバブルの水槽中での位置および形状に合わせて映像を投影するため、オイルバブルの位置および輪郭形状を計測する必要がある。さらに、操作時のスプーンや腕と区別するため、検出された物体の三次元位置を計測し、水面付近に存在するオイルバブルのみを抽出する必要がある。このとき、オイルバブルの位置および形状の計測に可視光を用いた場合、プロジェクタによる映像の投影により誤検出が生じる恐れがあるため、本研究では、赤外線距離画像センサを用いる。オイルバブルに赤外線照射した場合、可視光と同様に、オイルバブルに混合した微粒子によって赤外線が散乱する。したがって、図3(a)に示すように水に浮かべたオイルバブルを赤外線距離画像センサにより距離画像（図3(b)）を取得したとき、オイルバブルとそれ以外の領域では距離が異なるため、オイルバブルとそれ以外を区別し、オイルバブルの重心位置および輪郭形状を計測する。また、オイルバブルは水面のみに存在するため、事前に水面の距離を計測することで、操作時のスプーンや腕の区別も可能である。

#### 3.3 オイルバブルの操作

図4に示すように、ユーザはスプーンを用いて水の上に浮かぶオイルバブルを移動および変形する。また、図5に示すように、ユーザはスプーンで二つのオイルバブルを近づけることにより、オイルバブルを結合できる。

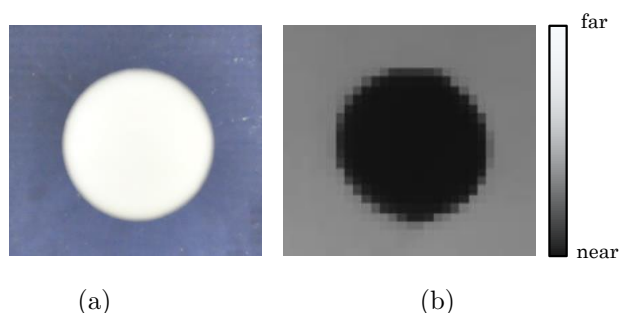


図3 オイルバブルの距離画像

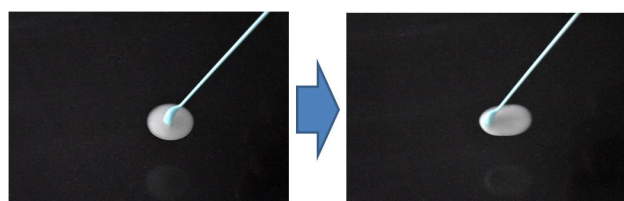


図4 オイルバブルの変形

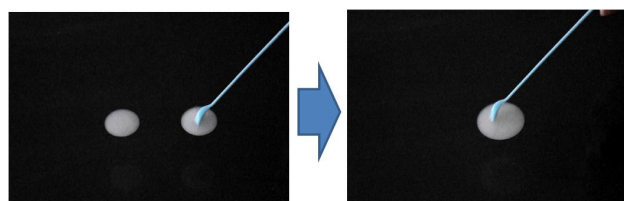


図5 オイルバブルの結合

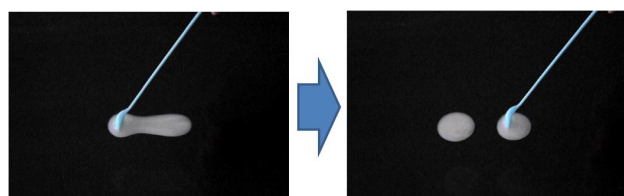


図6 オイルバブルの分裂

更に，図 6 に示すように，オイルバブルの左側を左に少し動かした後，右側を右に引き伸ばすことで一つのオイルバブルを二つに分裂できる．ユーザはこのようにスプーンなどを用いて，水の上に浮かぶオイルバブルを変形・結合・分裂させる操作を行い，オイルバブルの位置および形状を変化させることで，投影された映像を操作する．

### 3.4 オイルバブルの識別

オイルバブルに映像を投影する場合，オイルバブルが移動しても同じ映像を追跡して投影できることが望まし

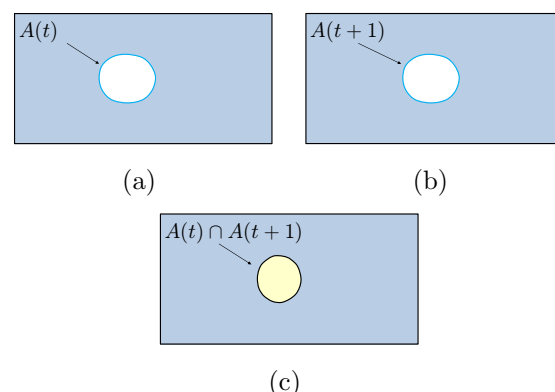


図7 オイルバブルの追跡

い．そのために，図 3(b) に示すような距離画像を明度により二値化した画像を用い，オイルバブルを識別する．図 7 に示すように，(a) から (b) へとオイルバブルが移動する場合を考える．距離画像センサのフレームレートにおいて，各フレーム間でのオイルバブルの移動量は微小である．そこで，図 7(a) の画像のオイルバブルの領域を  $A(t)$ ，(b) のオイルバブルの領域を  $A(t+1)$  とするとき， $A(t)$  と  $A(t+1)$  が同一のオイルバブルであるか以下の式より判定する．

$$\frac{S(A(t) \cap A(t+1))}{S(A(t+1))} \geq \kappa_{th} \quad (1)$$

このとき， $S(X)$  は領域  $X$  の面積であり，また  $\kappa_{th}$  は閾値を表す定数である．式 (1) を満たすとき， $A(t)$  と  $A(t+1)$  は同一のオイルバブルであると判定する．一方，式 (1) が満たされず，かつ  $S(A(t+1)) > 0$  のときは，新たにオイルバブルが投入されたと判定する．

### 3.5 結合・分裂の検出

オイルバブルの結合では，二つのオイルバブルが一つに結合するだけでなく，三つ以上のオイルバブルが一つに結合する場合も考えられる．しかし，三つ以上のオイルバブルの結合では，実際には同時に結合することは稀であり，二つのオイルバブルの結合が順次行われることになる．また，オイルバブルの分裂も同様に，一つのオイルバブルを三つ以上に分裂させることが考えられるが，三つ以上への分裂の操作は非常に困難である．また，オイルバブルの三つ以上への分裂は実際には，二つに分裂したオイルバブルをさらに二つに分裂させるといった操作によって行われる．したがって，今回は二つのオイルバブルが一つに結合または一つのオイルバブルが二つ



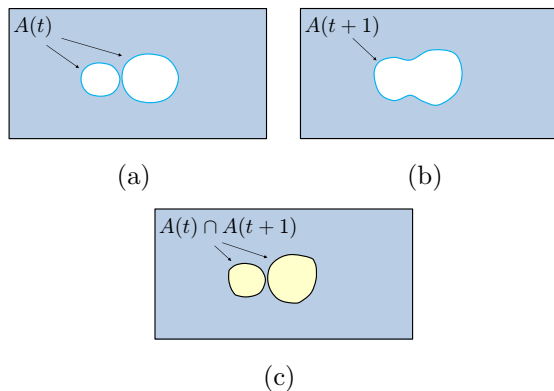


図 8 結合・分裂の検出

に分裂することを想定する。

分裂の検出は、図 3(b) に示すような距離画像を明度により二値化した画像を利用する。図 8 に示すように、(a) から (b) へと二つのオイルバブルが結合する場合を考える。図 8(a) の画像のオイルバブルの領域を  $A(t)$  とし、(b) の画像のオイルバブルの領域を  $A(t+1)$  とするとき、以下の式より判定を行う。

$$\frac{S(A(t) \cap A(t+1))}{S(A(t+1))} \geq k_{th} \quad (2)$$

このとき、 $S(X)$  は領域  $X$  の面積であり、また  $k_{th}$  は閾値を表す定数である。この値が閾値より大きい時、領域  $A(t)$  内にオイルバブルが二つある場合、二つのオイルバブルが一つに結合したことを検出できる。領域  $A(t)$  内にオイルバブルが一つの場合には移動したことが分かる。つぎに図 8(b) から (a) へと一つのオイルバブルが二つに分裂することを考える。分裂の場合同様に、分裂の前後での領域の変化は微小であるための式 2 より判定する。分裂の場合にも、領域  $A(t+1)$  内にオイルバブルが二つある場合、一つのオイルバブルが二つに分裂したことを検出できる。

## 4 評価実験

本節ではまず、油と混合物質の違いによるオイルバブルへの影響について実験した結果を示す。次に、Oil Bubble Display を実装し、Oil Bubble Display のディスプレイとしての性能を評価した。本論文では性能評価として、コントラストおよびオイルバブル特有の柔軟性の時間変化について述べる。

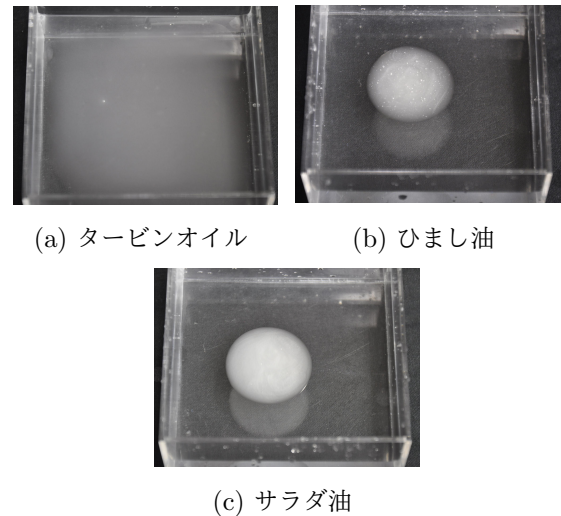


図 9 油による違い

### 4.1 油と混合物質

油と混合物質の違いによるオイルバブルへの影響を調べるため、それぞれの種類を変化させて実験を行った。実験では、混合物質と油を質量比 1 : 10 で混合してオイルバブルを作製した。100 × 100 × 50 mm の大きさの水槽に高さ 25 mm まで水を張り、作製したオイルバブルを浮かべた。

#### 4.1.1 油の種類の変化

様々な種類の油にベビーパウダーを混合した結果を図 9 に示す。本実験では、サラダ油、サラダ油より粘性の低いタービンオイル、サラダ油より粘性の高いひまし油を用いた。図 9 を見ると、(a) に示すタービンオイルを用いた場合には、油が水槽の全体に広がりオイルバブルを形成できないことが分かる。(b) に示すひまし油の場合には、(c) に示すサラダ油の場合と同様にオイルバブルを形成できたものの、混合中に発生した気泡がわずかに残っていることが確認できる。

#### 4.1.2 混合物質の違い

次に、様々な混合物質をサラダ油に混合した結果を図 10 に示す。実験では、白色の微粒子として小麦粉および絵具、水に溶けない物質としてマグネシウムおよびマヨネーズ、白色かつ水に溶けない物質として石灰粉および PTFE (ポリテトラフルオロエチレン)、粘性を向上させる物質として片栗粉を用いた。図 10 を見ると、(a) に示す小麦粉、(e) に示す石灰および (g) に示す片栗粉では、オイルバブルを形成できないことが分かる。(b)

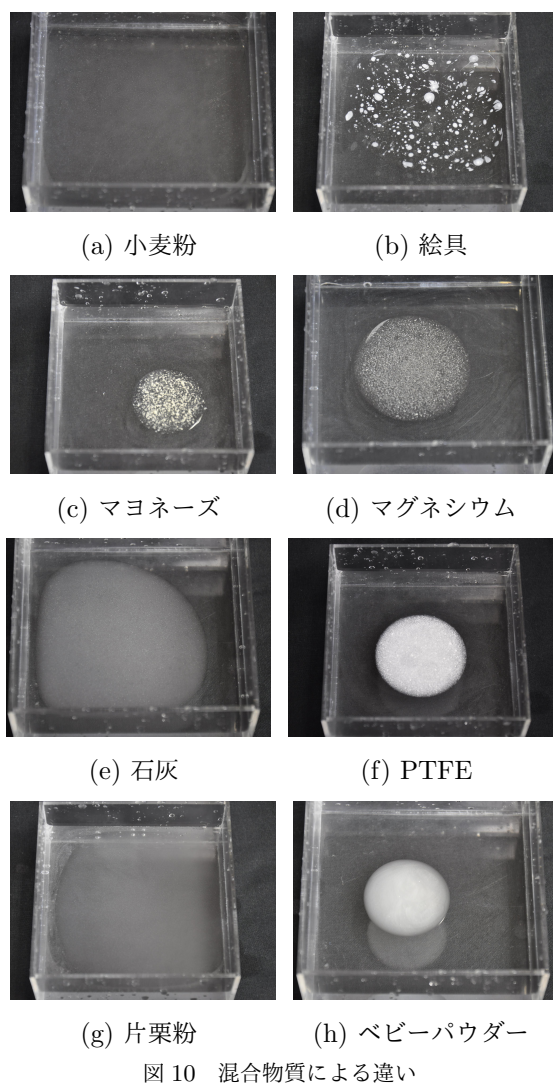


図 10 混合物質による違い

に示す絵具では、油と絵具が十分に混ざらず、水面に投入後に絵具が徐々に水に溶け出す結果となった。また、(c) に示すマヨネーズおよび (d) に示すマグネシウムでは、粒子の粒が視認でき、投影には適さないことが分かる。(f) に示す PTFE では、概ね良好なオイルバブルを形成したものの、部分的に凝集していることが確認できる。これらの結果から、ベビーパウダーが今回試した中で一番最適な混合物質であると考えられる。

#### 4.2 実装

図 11 に実装システムの外観を示す。450 × 300 × 100 mm の大きさの水槽に高さ 50 mm まで水を張った。水槽の下部 500 mm に TOF (Time of Flight) 方式の赤外線距離画像センサ (MESA 社製 スイスレンジャー SR4000) を設置し、上部 1000 mm にプロジェクタ

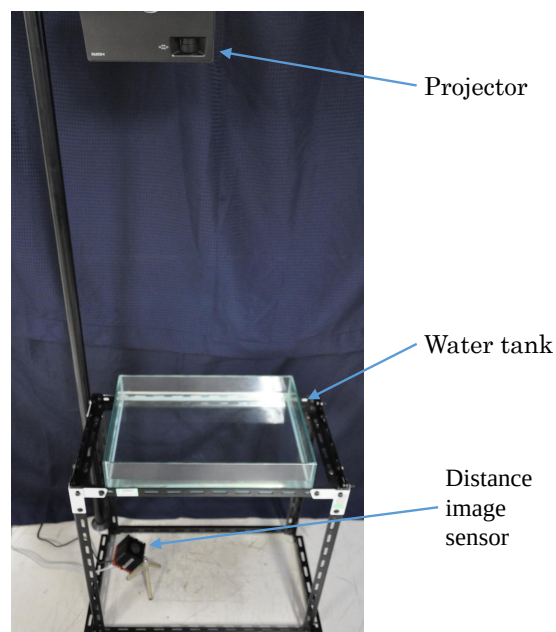
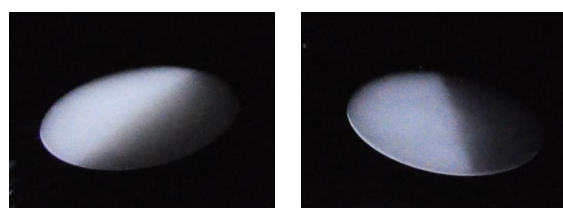


図 11 提案システムの実装

(Optoma 社製 EP7155i, 解像度 1024×768) を設置した。使用した赤外線距離画像センサの近赤外線の波長は 850 nm であり、このような近赤外光の水の減衰率は形相に影響ないほど小さく、水面のオイルバブルを検出できる。赤外線距離画像センサの最大フレームレートは 50 fps であり、実装したシステムのフレームレートは約 20 fps であった。実装したシステムでは、水面 300 × 200 mm の範囲内でオイルバブルの検出が可能であり、この範囲内に収まる大きさのオイルバブルに投影が可能である。また、オイルバブルの誤検出を軽減するため、面積が約 80 mm<sup>2</sup> 以下のオイルバブルはノイズとして扱った。想定したオイルバブルの大きさは 100 個 20000 mm<sup>2</sup> 程度であり、この大きさは十分に検出・投影が可能である。映像を投影するオイルバブルは、4.3 節で用いたものを除き、ベビーパウダーとサラダ油を質量比 1 : 10 で混合して作製した。また、実験時の気温は摂氏 20 度、水温は 15 度 20 度であった。

#### 4.3 コントラスト評価

オイルバブルに混合するベビーパウダーと油の混合比と、投影像のコントラストの関係を調べるため実験を行った。実験では、図 12 に示すように、オイルバブルの面積の半分に白色光を投影し、白色光を投影している



(a) 1:10 (b) 1:30

図 12 コントラストの計測

領域の照度を  $I_W$ ，投影していない領域の照度を  $I_B$  として，コントラスト  $C$  を以下のように定義した．

$$C = \frac{I_W}{I_B} \quad (3)$$

実験では，ベビーパウダーと油をそれぞれ質量比 1:10, 1:15, 1:20, 1:25, 1:30 で混合したものを浮かべ，暗い部屋で各オイルバブルの半分に白色光を投影し，分光放射測定器計（UPRtek MK350）により計測した．質量比 1:10 より高い濃度では比重の大きさによりオイルバブルが沈み，質量比 1:30 より低い濃度では赤外線カメラにより検出できないため，その間の濃度について計測を試みた．

混合比とコントラストの関係を図 13 に示す．同図より，濃度が高い方が白色の照度が高くなることが確認できる．また，濃度が高い場合と低い場合にコントラストが高く，質量比 1:20 付近でコントラストが低くなることが確認できる．白色を投影した領域ではオイルバブル表面での散乱した光が観測される．一方，黒色を投影した領域では，白色を投影した領域からの多重散乱光がオイルバブルの中を通り観測される．このように，観測される光の要因が白色領域と黒色領域で異なるため，濃度によりコントラストが変化したと考えられる．Web Content Accessibility Guidelines においては，サイズの大きなテキストおよび文字画像においては，少なくとも 3:1 のコントラスト比が必要であると示されており [13]，実装システムはこの条件を概ね満たしている．一方で，図 12 (a) に示すように，濃度が高い場合には多重散乱により投影像がボケ，文字や形状の区別の妨げになる．したがって，投影像の文字や形状の区別にはボケの影響とコントラストのトレードオフを考慮して質量比 1:30 が，投影色の区別にはより高い照度が必要なため質量比 1:10 がそれぞれ望ましい．

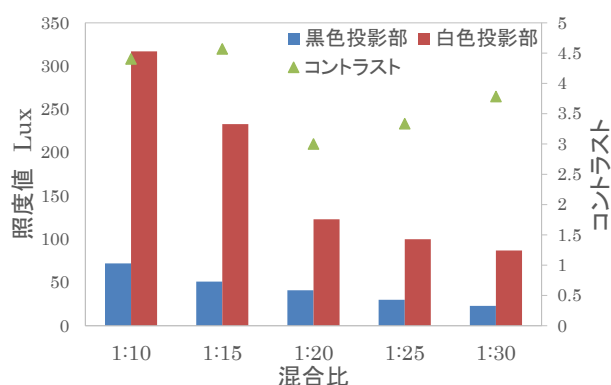


図 13 混合比とコントラスト



図 14 柔軟性の低下したオイルバブル

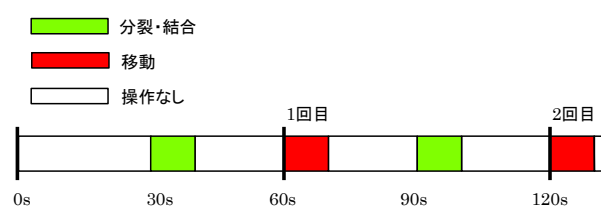


図 15 タイムチャート

#### 4.4 柔軟性評価

水面に浮かべて間もないオイルバブルは，定常状態に円形に近い状態になる．しかし，結合と分裂の操作を繰り返す時間が経つと，オイルバブルの形状が柔軟に変わるとい性質が損なわれ，図 14 に示すように定常状態で円形にならず，変形しにくくなるなど操作性が低下する現象が確認されている．これは，オイルバブル内のベビーパウダーが沈殿していることが原因であると考えられる．本実験では，オイルバブルの操作回数と柔軟性の関係を調べるため，オイルバブルを移動させた際の形状の時間変化を計測した．オイルバブルの柔軟性の定量評価を容易にするため単純な直線的な移動について考える．オイルバブルの移動のためスプーンを移動させると，はじめは半分程度がスプーンに直接追従し，残り半



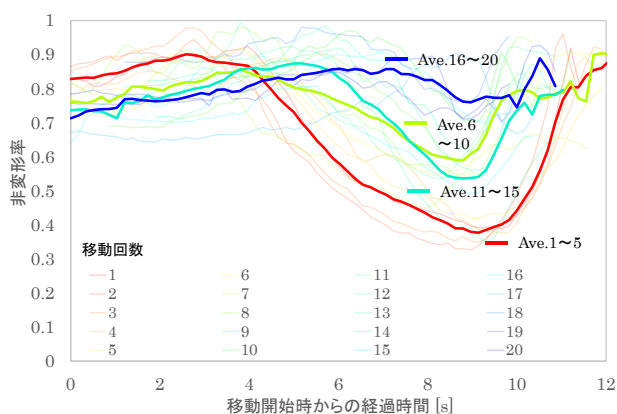


図 16 オイルバブルの非変形率の時間変化

分がその場にとどまろうとするため、オイルバブルは移動方向に伸びた形状になり縦横比が変化する。その後、オイルバブルはその状態でスプーンと共に移動し、スプーンが止まると移動していたオイルバブルが円形に戻ろうとする。この移動時のオイルバブルの縦横比により柔軟性を評価する。実験では、図 15 に示すように、分裂しその後結合する操作（緑色）と、10 秒かけて 200mm を移動させる操作（赤色）を、30 秒おきに交互に行った。オイルバブルの大きさは直径 40 mm とし、スプーンは先端が 10 × 15 mm の楕円形のものを利用した。操作の再現性を保つために、スプーンの動かし方をプロジェクタで線を投影することで指示した。線は移動方向と垂直に投影し、一定速度で 10 秒かけて 200mm を移動させ、線とスプーンの先端が同じになるように操作した。また、分裂し結合する操作は、移動方向と垂直の方向に行った。オイルバブルを移動させた際の結果を図 16 に示す。結果は、大津の手法 [14] による閾値で二値化し、楕円フィッティングした後、長軸と短軸の比率をオイルバブルの非変形率として算出した。また、図 16 では、各操作における非変形率の時間変化と 5 回ごとの時間変化の平均を記している。横軸は、移動開始時からの時間を表している。

分裂回数が少ない場合のオイルバブルは、移動させた際に伸びた形状となるため、非変形率が大きく下がり、その後、元の形状に戻ろうとするため、非変形率が徐々に上昇する。オイルバブルは、分裂回数が多くなるにつれて、移動させた際に変形しにくくなるため、非変形率の減少量は小さくなる。さらに、分裂回数が多くなるに

つれて、一度変形すると元に戻りにくくなるため、移動開始時に円形に戻らないための非変形率が低くなる。また、11 繰 15 回の平均までは、移動させた際に非変形率が下がることが確認できるが、16 繰 20 回の平均では、非変形率の減少が極端に小さくなる。16 繰 20 回の平均では、移動と共に非変形率が上昇する傾向が見られたが、これは復元力の低下により移動開始時に円形に戻らず、移動方向と垂直方向の楕円になっていたため、移動に伴い円形に近づいたことが原因である。このことから、分裂と結合を含む操作回数が 15 回以上になると、オイルバブルの柔軟な特性が損なわれていることとなる。この結果から、操作回数が 15 回までは使用できることが確認できた。

#### 4.5 考察

様々な種類の油と混合物質を用いて実験を行った結果、サラダ油とベビーパウダーの組み合わせが本論文で示した組み合わせの中では最適と考えられた。また、ひまし油はサラダ油に比べて弾性が高く塑性変形するため、単一のオイルバブルとしては操作性が悪いが、サラダ油と組み合わせることで、細かな形状を再現できると考えられる。また、サラダ油とひまし油を混合することで、自由な粘性のオイルバブルの形成が期待される。本実験においては水温を一定として実験を行ったが、水温を大きく変化させることで油の粘性を変化させることが可能であるため、今後は水温を制御することでより操作性の高いオイルバブルの作製も可能であると考えられる。

コントラスト評価の結果から、濃度が高い場合と低い場合にコントラストが高いことを確認した。しかし、濃度が高い場合には多重散乱によるボケの影響が文字や形状の区別の妨げになる。また、濃度が低すぎる（質量比 1:40）と赤外線距離画像センサで検出できなくなる問題や、濃度が高すぎる（質量比 1:5）とオイルバブルが水より重くなり沈殿する問題が発生する。したがって、コントラストが必要な場合には質量比 1:30 のオイルバブルが、照度が必要な場合には質量比 1:10 のオイルバブルが適しているといえる。柔軟性評価の結果から、操作回数 15 回までは、オイルバブルの柔軟な性質を保てることが確認できた。柔軟な性質を保てる時間は、混合する物質や濃度により変化することが考えられる。したがって、柔軟な性質を保てる時間をより長くするためには物質の密度や濃度に関する調査が必要である。また、オイ

ルバブルをスプーンにより操作する際に、スプーンの動作が早い場合にオイルバブルがスプーンに追従できない場合がある。そのため、オイルバブルの移動速度には制限がある。この制限は、オイルバブルや操作するスプーンの大きさに依存しており、オイルバブルを小さくまたはスプーンを大きくすることでこの制限を緩和することが可能である。本実装では、水面  $300 \times 200$  mm の範囲内がシステムに利用可能であるが、立ち止まって手が届く範囲内すべてが利用できるのが望ましいため、今後は水面  $1000 \times 600$  mm 程度の範囲内を利用可能にすることを目標とする。Oil Bubble Display は、水の上に浮かべた油に映像を投影することでディスプレイ面を形成しているため、投影面は平面となる。したがって、オイルバブルに混合する物質の質量を制御し、オイルバブルを水中に留めることで、投影に奥行きを持たせることが可能となる。

## 5 アプリケーション

本節では、Oil Bubble Display を用いた投影像の変形、投影色の混合・分解、および演算表現の三つのアプリケーション例について説明し、試作した結果を示す。投影像の変形では、投影すべき映像をオイルバブルの形状に合わせて変形させ投影させることで、投影像の形状の直接的な操作を可能とする。投影色の混合・分解では、一つのオイルバブルに一つの色を投影し、結合・分裂させることで、色の混合・分解を可能とする。演算表現では、一つのオイルバブルに一つの数字を投影し、結合・分裂させることで、数字を加算・配分といった演算をすることを可能とする。これらのアプリケーションは、投影像の変形、投影色の混合・分解はアミューズメントパークなどでゲームとして利用できると考えられ、演算表現は家庭で小さい子供が楽しく勉強できる利点があると考えられる。

### 5.1 投影像の変形

オイルバブルの形状に合わせて映像を変形させる方法について説明する。本研究では、オイルバブルの輪郭形状を六角形で近似し、その形状に合わせて投影像を変形する。まず、図 17 (a) に示すように、任意の正六角形の頂点（赤色）とその重心（青色）を考え、この頂点 2 点と重心（青色）を頂点とする三角形の面を形成する。次に、図 17 (b) に示すように、投影する映像をこの三角形の

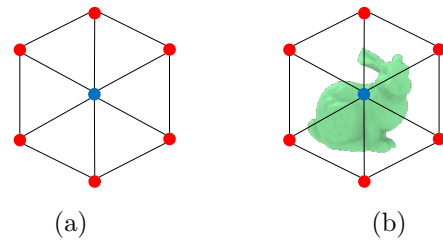


図 17 投影像と面の対応付け

面に対応付ける。この三角形をオイルバブルの輪郭形状と重心によって作成される三角形に合わせて変形させ、これらの三角形に対応付けされている映像をアフィン変換することで、投影像の形状を変形する。図 18 に、(a) から (b) にオイルバブルが変形した場合に投影する映像を変形させる概念図を示す。まず、(c) および (d) に示すように、計測したオイルバブルの重心（青色）を求め、計測したオイルバブルの領域の輪郭線を取得し、輪郭線の距離が等しくなるように輪郭線上に基準点（赤色）を 6 点決定する。つぎに、基準点 2 点と重心を頂点とする三角形の面を形成することで、図 17 (b) と同じ三角形の面を形成する。これにより、図 4 (e) に示すように、オイルバブルの形状が円形に近いと投影像は本来の投影像であり、オイルバブルが変形することで図 18 (f) に示すようにオイルバブルの形状に合わせて映像を変形させることができる。また、オイルバブルが分裂した際には、分裂したオイルバブルに元の映像にそれぞれ変形を適用して投影する。

### 5.2 投影色の混合・分解

投影色の混合・分解アプリケーションでは、ユーザはオイルバブルを結合・分裂させることで、オイルバブルに投影されている色を混合したり、分解したりできる。本研究では、色を HSV 表色系で表現し、彩度および明度は最大値とし、色相  $H$  を変化させることでオイルバブルの色を操作する。図 19 に、色相  $H$  を  $0 \sim 359^\circ$  で表現した図を示す。

まず、オイルバブルを水面に滴下した時に投影する色の色相  $H$  をランダムに決定する。結合の際には、結合前の色から加法混合に基づいて結合後の色を決定するために、色の色相  $H$  を RGB 空間へ変換し、結合処理を施した後で投影する色の色相  $H$  を決定する。結合前のオイルバブルの色をそれぞれ  $(R_{p1}, G_{p1}, B_{p1})$ ,  $(R_{p2}, G_{p2}, B_{p2})$  とし、面積を  $S_{p1}$ ,  $S_{p2}$  とするとき、結合後のオイルバ

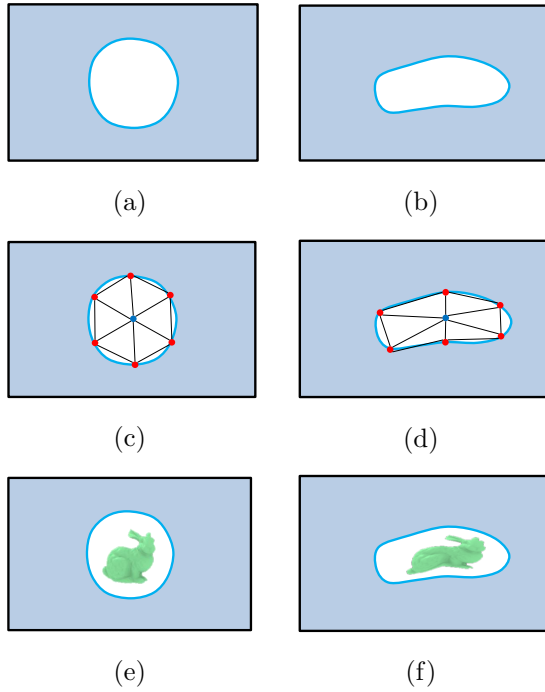


図 18 投影像の変形

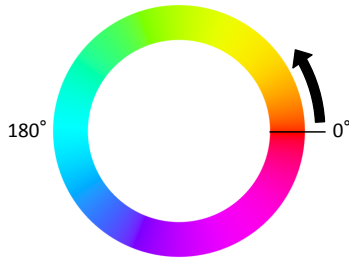


図 19 色相の色表現

ブルの  $(R_{p3}, G_{p3}, B_{p3})$  は以下のように決定する.

$$R_{p3} = \frac{S_{p1}R_{p1} + S_{p2}R_2}{S_{p1} + S_{p2}} \quad (4)$$

$$G_{p3} = \frac{S_{p1}G_{p1} + S_{p2}G_{p2}}{S_{p1} + S_{p2}} \quad (5)$$

$$B_{p3} = \frac{S_{p1}B_{p1} + S_{p2}B_{p2}}{S_{p1} + S_{p2}} \quad (6)$$

彩度および明度を最大値として, RGB 色空間から色相  $H$  へ変換することで, 結合後に投影する色の色相  $H$  を決定する.

分裂時も色の色相  $H$  を RGB 空間へ変換し, 分裂処理を施した後, 分裂後に投影する色の色相  $H$  を決定する. 分裂前オイルバブルの色を  $(R_{q1}, G_{q1}, B_{q1})$  とし, この

中で最大のものを  $I_{\max}$ , 最小のものを  $I_{\min}$  とする. 分裂後の面積をそれぞれ  $S_{q2}, S_{q3}$  ( $S_{q2} \geq S_{q3}$ ) とするとき, 分裂後の  $(R_{q2}, G_{q2}, B_{q2}), (R_{q3}, G_{q3}, B_{q3})$  は以下のように決定する.

$$Y = \frac{S_{q3}}{S_{q2} + S_{q3}} \quad (7)$$

$$(R_{q2}, G_{q2}, B_{q2}) = \begin{cases} (1, 0, 0) & (I_{\max} = R_{q1}) \\ (0, 1, 0) & (I_{\max} = G_{q1}) \\ (0, 0, 1) & (I_{\max} = B_{q1}) \end{cases} \quad (8)$$

$$(R_{q3}, G_{q3}, B_{q3}) = \begin{cases} (YR_{q1}, G_{q1}, 0) & (I_{\max} = R_{q1}, I_{\min} = B_{q1}) \\ (R_{q1}, YG_{q1}, 0) & (I_{\max} = G_{q1}, I_{\min} = B_{q1}) \\ (0, YG_{q1}, B_{q1}) & (I_{\max} = G_{q1}, I_{\min} = R_{q1}) \\ (0, G_{q1}, YB_{q1}) & (I_{\max} = B_{q1}, I_{\min} = R_{q1}) \\ (R_{q1}, 0, YB_{q1}) & (I_{\max} = B_{q1}, I_{\min} = G_{q1}) \\ (YR_{q1}, 0, B_{q1}) & (I_{\max} = R_{q1}, I_{\min} = G_{q1}) \end{cases} \quad (9)$$

結合時と同様に RGB から分裂後に投影する色の色相  $H$  を決定する. このように  $(R_{q2}, G_{q2}, B_{q2})$  は赤, 緑, 青の中で一番近い色になり,  $(R_{q3}, G_{q3}, B_{q3})$  は残りの成分とすることで, 例えば, 黄は赤と緑, オレンジは赤と黄といった直感的な色の分解になる.

### 5.3 演算表現

演算表現アプリケーションでは, ユーザはオイルバブルを結合・分裂させることで, オイルバブルに投影されている数字を加算・配分ができる. まず, オイルバブルを水面に滴下した時に投影する数字  $N$  を 1 繰 9 の中からランダムに決定する. 結合の際には, 結合前の数字同士を足し合わせることで結合後の数字を決定する. 結合前のオイルバブルの数字をそれぞれ  $N_{p1}, N_{p2}$  とするとき, 結合後のオイルバブルの数字  $N_{p3}$  は以下のように決定する.

$$N_{p3} = N_{p1} + N_{p2} \quad (10)$$

一方, 分裂の際には, 分裂後のオイルバブルの面積比を考慮して分裂後の数字を決定し, 分裂後のオイルバブルの数字の合計は分裂前の数字と同じとなるように配分する.

分裂前のオイルバブルの数字を  $N_{q1}$  とし, 分裂後の面積をそれぞれ  $S_{q2}, S_{q3}$  ( $S_{q2} \geq S_{q3}$ ) とするとき, 分裂後



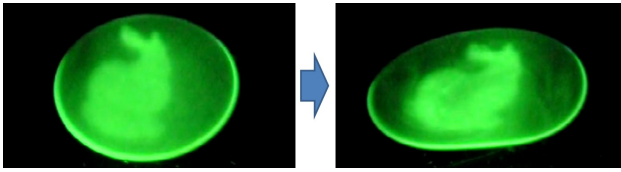


図 20 形状の変形結果

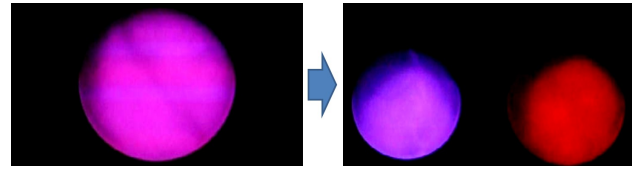


図 22 色の分裂結果

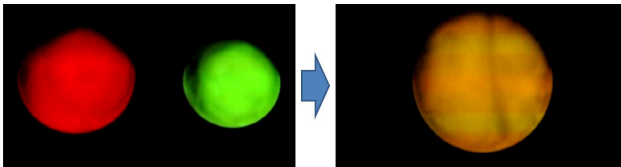


図 21 色の結合結果

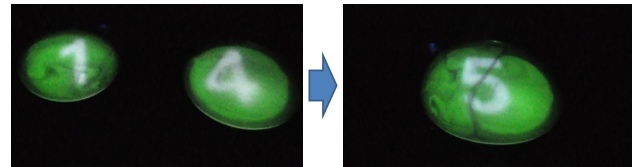


図 23 数字の結合結果

の  $N_{q2}$ ,  $N_{q3}$  は以下のように決定する.

$$N_{q2} = N_{q1} \frac{S_{q2}}{S_{q2} + S_{q3}} \quad (11)$$

$$N_{q3} = N_{q1} - N_{q2} \quad (12)$$

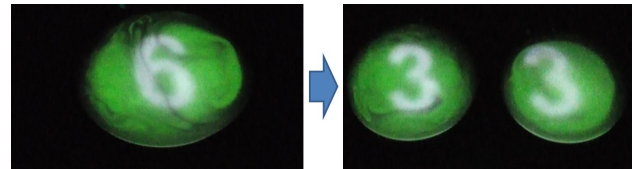


図 24 数字の分裂結果

#### 5.4 動作確認

これまでに述べたアプリケーションを試作し、動作確認を行った結果を以下に示す.

**投影像の変形** 図 20 にオイルバブルを変形させた際に、投影像が変形している様子を示す. オイルバブルを変形させることにより、オイルバブルの形状に合わせて投影像が変形していることが確認できる.

**投影色の混合・分解** 図 21 に二つのオイルバブルを結合させた際に、投影している色に変化した様子を示す. 赤色と緑色を混合することで橙色に変化することが確認できる. 図 22 にオイルバブルを分裂させた際に、投影している色に変化した様子を示す. 桃色を分解させることにより紫色と赤色に分解していることが確認できる. 結合・分裂により投影している色の色相が変化したことが確認できる.

**演算表現** 図 23 に二つのオイルバブルを結合させた際に、投影している数字が加算された様子を示す. 1 と 4 を加算することで 5 になることが確認できる. 図 24 にオイルバブルを分裂させた際に、投影している数字が配分された様子を示す. 6 を配分することにより 3 と 3 になったことが確認できる. 結合・分裂により投影している数字が加算・配分されたことが確認できる.

## 6 一般公開

Oil Bubble Display をインタラクシオン 2015[15] (会場: 東京国際交流館, 期間: 2015 年 3 月 5 日 (木) 繰 7 日 (土)) および JP2015 情報・印刷産業展 [16] (会場: インテックス大阪 5 号館, 期間: 2015 年 5 月 14 日 (木) 繰 16 日 (土)) に出展し, 100 人以上に対してデモ展示を行った (図 25). デモ展示では, 投影色の混合・分解アプリケーションを展示した.

体験者からは, 単純に「綺麗」や「面白い」などの意見の他に, 「池や水族館の水槽などでできたら面白そう」や「広告などに使えないか」や「自動的に動けばインテリアとして使えそう」などの意見を得ることができた. 特にオイルバブルの結合・分裂に対して面白いという意見が多く, 結合・分裂が楽しさの要因になっていることが示唆された. 体験者は, 結合に関しては難なく操作することができていたが, 分裂に関しては多少苦労している様子が見られた. オイルバブルの結合は, 一つのオイルバブルを別のオイルバブルに近づけることで, 二つのオイルバブルを結合させることができる. 一方, オイルバブルの分裂は, オイルバブルの片側を伸ばした後, オイルバブルが円形に戻る前に, 反対側を伸ばすことで一つ

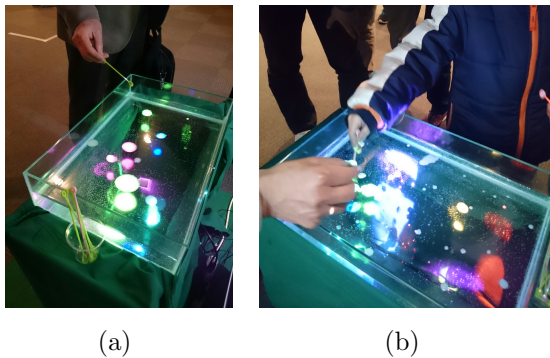


図 25 展示の様子 [15]

のオイルバブルを二つに分裂させるため、多少の慣れが必要である。デモ展示では、スプーンの先端が  $10 \times 15$  mm の楕円形のものを利用したが、今後は、より大きなスプーンを利用することでオイルバブルを伸ばす操作を簡単にするなどの改善が必要であると考えられる。

## 7 おわりに

本研究では、水の上に油（オイルバブル）を浮かべ、プロジェクタにより映像を投影するディスプレイ（Oil Bubble Display）を提案した。Oil Bubble Display は、水の上に浮かべた油をスクリーン面として利用することで、水の上の油特有の柔軟な性質を持つディスプレイである。これにより、操作時には変形し、定常状態では円形に近い形を保つことができる。また、スクリーン面は移動・変形・結合・分裂が可能であり、各スクリーンに情報を持たせることで、特に結合・分裂ではそれらの操作に合わせて情報を処理することが可能である。さらに、Oil Bubble Display を用いた投影像の変形、投影色の混合・分解、および演算表現の三つのアプリケーションを実装した。その結果、オイルバブルを変形・結合・分裂させることによって、投影像の形状を変形したり、色を混合・分解したり、数字を加算・配分したりといったインタラクションが可能であることが確認できた。

Oil Bubble Display は、オイルバブルの形状に合わせて投影像の変形が可能となったり、絵具などでは表現できない色の分解なども直感的に操作可能であることや、子供の算数の勉強など、アミューズメント、アート、教育への応用が期待される。Oil Bubble Display は、楽しく操作することができるため、特に教育では学習時間を伸ばす効果が期待できる。インタラクティブなディスプレ

イでゲームなどのコンテンツを作る場合などにおいて、従来のディスプレイは入力移動・変形のみであり、入力が少ない。一方、Oil Bubble Display は移動・変形・結合・分裂の四つのインタラクションが可能であり、結合・分裂は各オイルバブル間での情報のやり取りができるため、入力の幅が広がる。したがって、これらを利用することでインタラクティブなコンテンツの開発が可能になると考えられる。今後は、Oil Bubble Display により音情報を操作するなど、視覚以外を操作するインタラクティブなシステムへの応用を検討している。また、水流を制御することで、例えば、水面を揺らして映像を振動させたり、渦を作って流体の動きに従った映像とのインタラクションを可能にするなど、より柔軟なディスプレイとしての拡張が期待できる。

## 参考文献

- [1] Parinya Punpongsanon, Daisuke Iwai, and Kosuke Sato. Deform: projection-based visualization of deformable surfaces using invisible textures. In *Proceedings of the SIGGRAPH ASIA 2013 Emerging Technologies*, p. 8. ACM, 2013.
- [2] 小池英樹, 高橋陽一, 的場やすし. Aquatop display : 浴室での情報閲覧を目的としたインタラクティブ・サーフェス・システム. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 18, No. 4, pp. 517–526, 2013.
- [3] 八木明日華, 井村誠孝, 黒田嘉宏, 大城理. 多視点観察可能なインタラクティブフォグディスプレイ. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 17, No. 4, pp. 409–417, 2012.
- [4] Paul Dietz and Darren Leigh. Diamondtouch: a multi-user touch technology. In *Proceedings of the 14th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 219–226. ACM, 2001.
- [5] Otmar Hilliges, Shahram Izadi, Andrew D Wilson, Steve Hodges, Armando Garcia-Mendoza, and Andreas Butz. Interactions in the air: adding further depth to interactive tabletops. In *Proceedings of the 22nd annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 139–148. ACM, 2009.

- [6] Pranav Mistry and Pattie Maes. Sixthsense: a wearable gestural interface. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH ASIA 2009 Sketches*, p. 11. ACM, 2009.
- [7] Mariko Isogawa, Daisuke Iwai, and Kiminori Sato. Making graphical information visible in real shadows on interactive tabletops. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 20, No. 9, pp. 1293–1302, 2014.
- [8] Antti Virolainen, Arto Puikkonen, Tuula Kärkkäinen, and Jonna Häkkinen. Cool interaction with calm technologies: experimenting with ice as a multitouch surface. In *Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, pp. 15–18. ACM, 2010.
- [9] Chris Harrison, Hrvoje Benko, and Andrew D Wilson. Omnitouch: wearable multitouch interaction everywhere. In *Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 441–450. ACM, 2011.
- [10] Peter C Barnum, Srinivasa G Narasimhan, and Takeo Kanade. A multi-layered display with water drops. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 29, No. 4, pp. 76:1–76:7, 2010.
- [11] Ismo Rakkolainen, Stephen DiVerdi, Alex Olwal, Nicola Candussi, Tobias Hüllerer, Markku Laitinen, Mika Piirto, and Karri Palovuori. The interactive fogscreen. In *Proceedings of the ACM SIGGRAPH 2005 Emerging technologies*, p. 8. ACM, 2005.
- [12] Jun Noguchi, Koichiro Kimura, Masayoshi Ohuchi, Hiromi Shimizu, Takafumi Aoki, Jiro Baba, Shoichi Hasegawa, and Makoto Sato. Powder screen: a virtual materializer. In *Proceedings of the ACM SIGGRAPH 2006 Emerging technologies*, p. 27. ACM, 2006.
- [13] Web content accessibility guidelines (wcag) 2.0. <http://www.w3.org/TR/WCAG20/> (reference 2016-01-14).
- [14] 大津展之. 判別および最小 2 乗基準に基づく自動しきい値選定法. 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J63-D, No. 4, pp. 349–356, 1980.
- [15] インタラクション 2015. <http://www.interaction-ipsj.org/2015/> ( accessed 2015-6-15 ).
- [16] Jp2015 情報・印刷産業展. <http://jp-ten.jp/regulation> ( accessed 2015-6-15 ).

井手口 裕太



2017 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。博士（工学）。同年日本電気株式会社入社，現在に至る。三次元計測に関する研究に従事。

川口 純輝



2016 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。同年株式会社デンソー入社，現在に至る。生体計測に関する研究に従事。

浦西 友樹



2008 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。博士（工学）。同年日本学術振興会特別研究員 PD。2009 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教。2012 年大阪大学大学院基礎工学研究科助教。2014 年京都大学医学部附属病院助教。2016 年大阪大学サイバーメディアセンター准教授，現在に至る。

2011 年フィンランド・オウル大学客員研究教授。三次元形状計測，拡張現実感，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。電子情報通信学会，システム制御情報学会，日本バーチャルリアリティ学会，日本生体医工学会，IEEE 等に所属。

吉元 俊輔



2012 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。博士（工学）。同年同研究科助教，現在に至る。力触覚，生体計測に関する研究に従事。IEEE，日本生体医工学会，日本バーチャルリアリティ学会，電子情報通信学会等に所属。

黒田 嘉宏



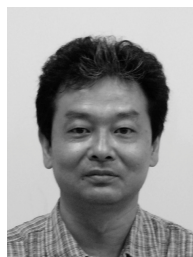
2005 年京都大学大学院情報学研究科博士後期課程修了。博士（情報学）。同年京都大学大学院医学研究科特任助手。2006 年大阪大学大学院基礎工学研究科助教。2013 年大阪大学サイバーメディアセンター准教授。2016 年大阪大学大学院基礎工学研究科准教授，現在に至る。医用 VR，触覚情報処理，教育訓練システムに関する研究に従事。ACM，IEEE，日本バーチャルリアリティ学会，日本生体医工学会，日本 VR 医学会等に所属。

井村 誠孝



2001 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。博士（工学）。同年同研究科助手。2007 年同研究科助教。2009 年大阪大学大学院基礎工学研究科准教授。2015 年関西学院大学理工学部教授，現在に至る。人工現実感，ヒューマンコンピュータインタラクションおよび生体医工学に関する研究に従事。IEEE，情報処理学会，日本生体医工学会等に所属。

大城 理



1990 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了。工学博士。同年住友金属工業（株）入社。1993 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助手。1994 年同大学先端科学技術研究調査センタ助教。2003 年大阪大学大学院基礎工学研究科教授，現在に至る。医用画像処理，生体信号処理に関する研究に従事。日本生体医工学会，システム制御情報学会，電子通信情報学会等に所属。