

# 磁性ゲル形状ディスプレイの開発と インタラクション手法の検討

中野 亜希人<sup>1,a)</sup> 脇田 玲<sup>1</sup>

受付日 2012年6月27日, 採録日 2013年1月11日

**概要:** 近年, 実世界の様々なモノの形を変える研究が注目を集めている. 剛体や弾性体など固体を用いた形状ディスプレイについて多くの研究がある一方, 流体に着目した形状ディスプレイの研究はあまり進められていない. そこで筆者らは, 磁力に引き寄せられ, 変形, 移動する磁性ゲルの形を幾何的かつ位相的に操作することが可能な形状ディスプレイを開発している. 実世界の流体の形を操作することができれば, まったく新しいデザイン支援や発想支援の可能性を切り開くと考えられる. 筆者らは, 磁力の ON/OFF を制御する装置と, 攪拌棒ジェスチャによるインタラクションシステムを構築し, 磁性ゲルの多様な変形を実現した. 本論文では, 磁性ゲル形状ディスプレイのシステムおよびそのインタラクション手法を示す.

**キーワード:** 磁性ゲル, ソフトマター, ディスプレイ, プログラマブル・マター

## The Development and Interaction Study of Magnetic Gel Shape Display

AKITO NAKANO<sup>1,a)</sup> AKIRA WAKITA<sup>1</sup>

Received: June 27, 2012, Accepted: January 11, 2013

**Abstract:** In recent years, researches on shape displays have been getting popular, which produce the new interaction between human and physical objects. We have developed an environment where we can manipulate the shape of gel geometrically and topologically with the use of our unique magnetic gel via the stirring rod. On/off control of magnetic power varies the gel shapes. We describe the details of the system and the interaction method with the stirring rod gesture.

**Keywords:** magnetic gel, soft matter, display, programmable matter

### 1. はじめに

近年, 実世界の様々なモノの形を変える研究が注目を集めている. 紙 [1], [2] や布 [3], [4], [5] を変形する試みや面の凹凸を利用した形状ディスプレイ [6], [7], [8], [9], ゴム人工筋肉やエアシリンダを使用した伸縮する構造物 [10], [11] は, モノと身体との新しいインタラクションを生み出している.

剛体や弾性体など固体を用いた形状ディスプレイについて多くの研究がある一方, 流体を用いたその研究はあまり

進められていない. 磁性流体のスパイク現象を利用したメディアアート作品 [12] はこの可能性を示したが, 流体の形を制御するシステムモデルを提案し, そのインタラクション手法まで言及した試みは筆者らの知る限り存在しない. 筆者らには, Blinn によって提案された, 有機的な形状をレンダリングする手法であるメタボール [13] を物質化するというモチベーションがある. 実世界の流体の形を操作することができれば, まったく新しいデザイン支援や発想支援の可能性を切り開くと考えられる.

そこで筆者らは独自に生成した磁性ゲル pBlob (Programmable Blob) の形を幾何的かつ位相的に操作することが可能な環境 [14], [15] を使用し磁性ゲル形状ディスプレイ Blob Display を開発している. pBlob は, 磁力に引き寄せられ, 変形, 移動する粘弾性体である. 筆者らは図 1 に示

<sup>1</sup> 慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科  
Graduate School of Media and Governance, Keio University,  
Fujisawa, Kanagawa 252-0882, Japan

<sup>a)</sup> akito@sfc.keio.ac.jp

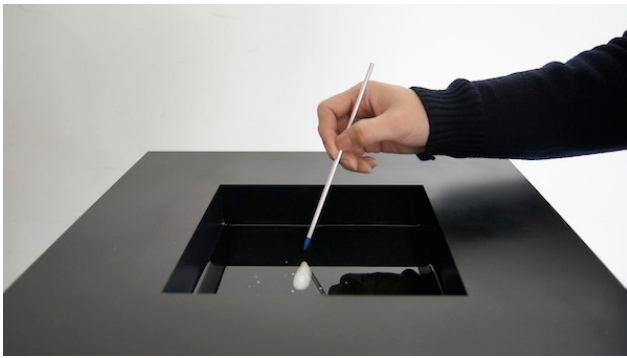


図 1 磁性ゲル形状ディスプレイ Blob Display  
Fig. 1 Magnetic gel shape display “Blob Display”.

すように磁力の ON/OFF を制御する装置と、攪拌棒ジェスチャによるインタラクションシステムを構築し、pBlob の多様な変形を実現した。

以下、本論文では 2 章で関連研究をあげる。3 章では磁性ゲル形状ディスプレイ Blob Display における流体の操作方法について解説する。システム構成については 4 章に、攪拌棒ジェスチャインタフェースについては 5 章に述べる。6 章ではアプリケーションの具体例を紹介する。本研究によって得られた知見は 7 章で議論し読者と共有したい。8 章ではまとめと今後の展望について述べる。

## 2. 関連研究

### 2.1 プログラマブル・マター

実空間における形状構築技術の 1 つであるプログラマブル・マター [16] が注目を集めている。Goldstein らは小型モジュラーロボットの連結を制御し動的に形を構築する技術であるクレイトロニクス [16] を研究している。M-TRAN [17] は、三次元的な配置を自律分散的に組み換え、変形、移動するモジュラーロボットである。Zykov らは、実空間でセルオートマタを形成するモジュラーロボットを実現している [18]。このように、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) による固体の形の操作技術がさかんに研究される一方で、流体を用いたその研究は少ない。

### 2.2 キネティックな TUI

Topobo [19] は、樹脂製ブロックに内蔵されたサーボモータの揺動角度を、ユーザがそのブロックを捻ることで入力する TUI (Tangible User Interface) である。ブロックを組み合わせた様々な自動化機構を作ることができる。垂直にピストン運動するロッドの高さを手で押して入力する面型形状ディスプレイの事例もある [20]。より柔軟な素材に着目すると、人工筋肉を縫合した布の四辺の曲がり具合を手で布を折り曲げて入力するタンジブルな自由曲面の事例がある [21]。堅いものであれ柔らかいものであれ、固体に対してユーザは、それを手で掴み形の操作を入力することができる。しかし、流体の形を我々の手で直に操作するこ

とは困難である。水をすくう動作をインタラクションに応用する研究 [22] もあるが、本研究の初期段階における展示において、鑑賞者がオイルや pBlob に手を浸すことをためらったため、筆者らは攪拌棒インタフェースを提案した [15]。

### 2.3 流体インタラクションのセンシング技術

流体とのインタラクションにおいては、多くのセンシング技術が提示されている。Submerging Technologies [23] では、静電体との距離に応じて変化する水の静電容量をセンシングする手法、高輝度 LED を層流中に照射し、遮蔽物によって減少する光量をセンシングする手法、FTIR (Frustrated Total Internal Reflection) と呼ばれる、接触などにより乱れた水面から拡散する赤外線カメラでセンシングする手法の 3 つの手法を示している。磁性流体とのインタラクションにおいては、ホール効果を利用し、グローブに装着した磁気検出デバイスと水面との距離に応じて変化する磁場をセンシングする事例もある [24]。本研究は、カメラにより攪拌棒のジェスチャをセンシングする点で異なる。

### 2.4 スライム教材

スライムの調合方法は Casassa [25] らによって紹介され、初等教育における化学実験の題材として広く普及している。磁石に反応し伸縮する磁性スライムも紹介されている [26]。固体に近い粘弾性体であるスライムは我々の手で掴むことができ、人は、捏ねる、引きちぎる、落とす、壁につけるなど固体を意識したインタラクションを意識する傾向がある。一方、pBlob はオイル中に浮遊している不透明な粘弾性体であり、人はオイルや pBlob に手や指を浸さずに pBlob に風を吹きかけたり、揺らしたり、攪拌棒など道具を使ってインタラクションを試みる傾向がある。

## 3. Blob Display

Blob Display においてユーザは攪拌棒のジェスチャ (以下、ジェスチャ操作コマンドと呼ぶ) を組み合わせ、pBlobs の多様な変形を操作する。図 2 に示すように、筆者らは 6 つのジェスチャ操作コマンドを実装した。以下にこれらの詳細について論ずる。

pBlob のジェスチャ操作コマンドは、幾何的な操作と位相的な操作に大別される。幾何的な操作として、*Translate*, *Stretch*, *Shrink* を実装した。*Translate* は、pBlob を別の座標値に移動する操作である。ユーザは、攪拌棒で床面をタップし終点を指定する。すると、pBlob は現在の座標値を始点とし、終点に向かって移動する。*Stretch* は、pBlob を伸ばす操作である。ユーザは pBlob に攪拌棒を挿入し、伸ばす方向にスライドする。*Shrink* は、伸びた pBlob を縮める操作である。ユーザは pBlob に攪拌棒を挿入し、戻

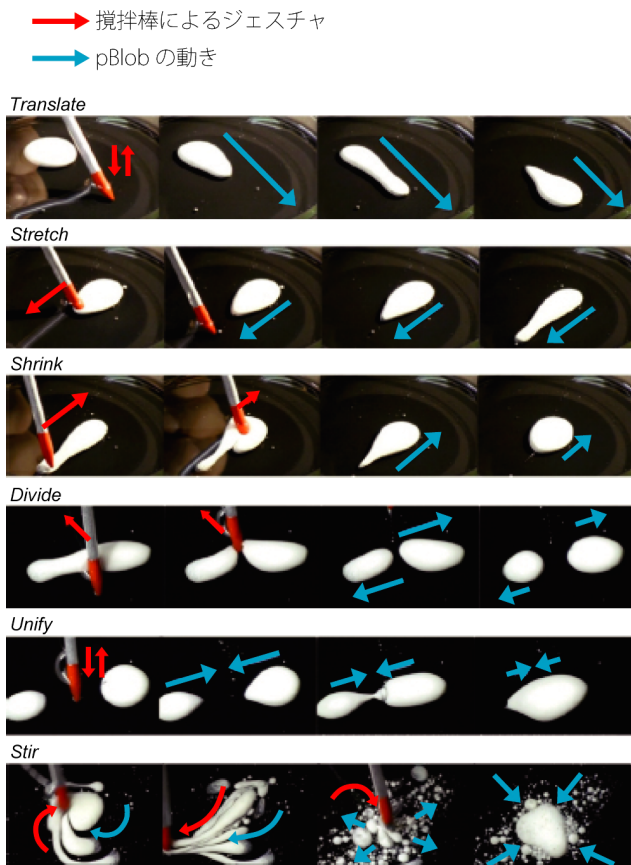


図 2 pBlob のジェスチャ操作コマンド

Fig. 2 Gesture commands for transformation of pBlobs.

り先の中心点に向かってスライドする。Divide は、pBlob を 2 つに分離する操作である。ユーザは、pBlob の中心を分断するように攪拌棒をスライドする。Unify は、2 つの pBlob を融合する操作である。ユーザが 2 つの pBlob の中間点を攪拌棒でタップすると、pBlob は互いに向かい合って移動を開始する。2 つの pBlob が隣接すると、自然に 1 つに融合する。Stir は、pBlob を攪拌棒でかき混ぜ様々な大きさや形の pBlob を生成する操作である。Stir は意図しない、創発的な形状を生成する。一方、前述の 5 つの操作は意図的な形状を作成するための操作である。これらの 6 つの操作を組み合わせることで様々な形状のモデリングが可能である。

#### 4. システム構成

図 3 に示すように、本システムは、pBlob、磁石シリンダ、Arduino を用いた電子回路、攪拌棒、シャーレ、カメラ、ソフトウェアで構成される。シャーレと電子回路、磁石シリンダを収めた筐体の大きさは幅 400×奥行 400×高さ 295 mm である。磁石シリンダは 5×5 の計 25 個を格子状にシャーレの下部に配置した。シャーレの底面の大きさは 195×195 mm である。カメラは、シャーレの上方に設置し、pBlob と攪拌棒の映像を USB 経由でソフトウェアに送信する。ソフトウェアは、後述する攪拌棒のジェスチャ認識でそれらを

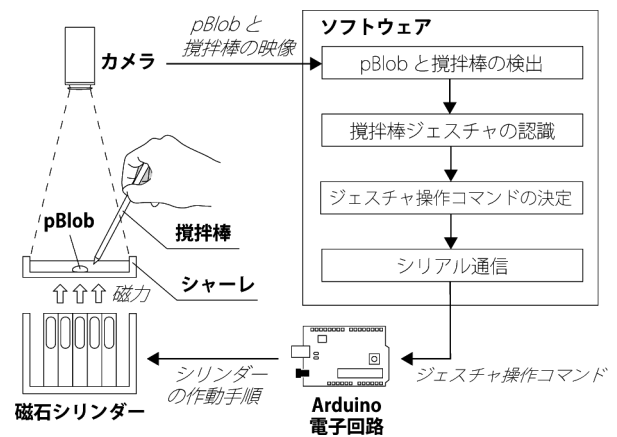


図 3 システム構成図

Fig. 3 System configuration.

処理し、シリアル通信によってジェスチャ操作コマンドを Arduino に送る。Arduino では、受信したジェスチャ操作コマンドに応じて、プロブウェアコマンドを実行する。プロブウェアコマンドは、4.3 節 (2) で後述する。

#### 4.1 pBlob の生成方法

筆者らは初等教育の講義で実践されているスライムの作り方を参考に pBlob を調合した [26]。まず、水、PVA (PolyVinyl Alcohol)、ホウ砂飽和水溶液を混ぜ合わせ、市販のスライムに近い物質を作った。次に、この物質に磁性を与えるため鉄粉を、着色するために水彩絵の具を加えた。この状態で磁性を持った粘弾性体を作成することができたが、床面との摩擦が強く、強力な磁石を近づけてもスムーズに移動させることは困難であった。また、鉄粉を使用しているため徐々に赤く錆びてしまい劣化してしまう点も問題であった。鉄粉の代わりに四三酸化鉄を用いることで錆びの問題を解決できた。床面との摩擦は、ポッピーオイルを満した容器に pBlob を入れることで改善された。以下に、筆者らが試行錯誤の末にたどり着いた pBlob のレシピを示す。材料は、水、PVA、ホウ砂飽和水溶液、四三酸化鉄、水彩絵の具を、50 : 50 : 1 : 2 : 1 の割合で配合する。

- 手順 1 : 水に水彩絵の具を溶かし、着色する。
- 手順 2 : 着色された水に四三酸化鉄を混ぜる。
- 手順 3 : PVA を混ぜ、よく攪拌する。
- 手順 4 : ホウ砂飽和水溶液を混ぜ、よく攪拌する。
- 手順 5 : ポッピーオイルで満たされた容器に入れる。

図 4 に示すように、pBlob はポッピーオイルと混ざり合わず、表面張力と重力の影響を受けてポッピーオイル中で半球形状に安定する。pBlob は、四三酸化鉄が集中した下層、水、PVA、水彩絵の具、ホウ砂が混ざり合った上層の 2 層構造になっている。また、図 5 に示すように、pBlob の色は手順 1 で調合する水彩絵の具で決定される。pBlob

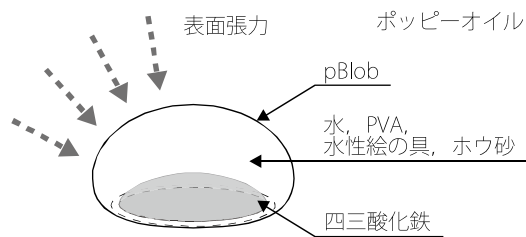


図 4 pBlob のメカニズム  
Fig. 4 The mechanism of a pBlob.

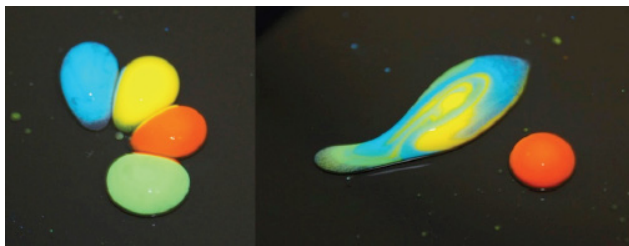


図 5 pBlob のカラーバリエーション  
Fig. 5 Color variation of pBlobs.

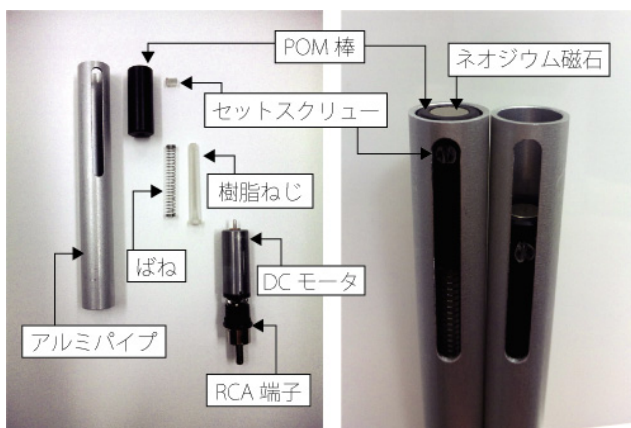


図 6 (左) 磁石シリンダの構成, (右) 磁石シリンダ上昇/下降時の様子  
Fig. 6 Left image shows the configuration of a magnet cylinder. Right image shows its up-down movement.

をポッピーオイルに注入した際に四三酸化鉄が上層に分散し黒色を示す場合があるが、底部から磁力を与えることで四三酸化鉄は下層に引き寄せられ、溶かした水彩絵の具の色が表面に現れる。

#### 4.2 ハードウェア

筆者らは、FEELEX [27] の送りねじの機構を参考に、頂上にネオジウム磁石を搭載したシリンダを上下させる磁力ユニットを開発した。ソフトウェアからシリンダの上昇/下降を制御する。図 6 (左) に示すように磁石シリンダは、アルミパイプ、POM 棒、ねじ、セットスクリュー、ばね、DC モーター、ネオジウム磁石、RCA 端子で構成される。アルミパイプは、長さ 90 mm、内径  $\phi 10$ 、外径  $\phi 12$ 、A6063 の引き抜き材を使用した。POM 棒は、外径  $\phi 9.8$ 、長さ

25 mm である。その頂上に、外径  $\phi 8$ 、高さ 2 mm のネオジウム磁石を接着した。POM 棒の内側には、ピッチ 0.5 mm のねじ山を作った。DC モーター (最大定格 6 VA, 最大トルク 36 gcm/4.8 V) のシャフトに、ねじ (M3, 長さ 30 mm) を装着する。POM 棒がねじと締結するのを防ぐため、ねじにばねを通す。ばねは、線形  $\phi 0.25$ 、平均径  $\phi 3.6$ 、総巻数 27.5、自由高 28 mm、ばね定数は 3.5 gf/mm のものを使用した。ばねが縮んだ際に、ばねとねじが絡むことを防ぐため、ばねの巻き方向は左巻きとした。DC モーターには、RCA 端子を半田付けした。DC モーターが逆転すると磁石が上昇し pBlob に磁力を与える。DC モーターが正転すると磁石は下降し、pBlob へ磁力は届かなくなる。図 6 (右) に磁石シリンダが上昇/下降している様子を示す。

#### 4.3 ソフトウェア

ジェスチャ操作コマンドは、ハードウェアコマンドと、それを組み合わせたプロブウェアコマンドで構成される。ハードウェアコマンドとは、磁石シリンダの動作を指示するコマンドを意味する。プロブウェアコマンドとは、pBlob の変形を指示するコマンドを意味する。openFrameworks と OpenCV を用いて開発したソフトウェアを、Windows 7 (64 bit), CPU 1.6 GHz, RAM 4.00 GB で動作させた。以下では、ジェスチャ操作コマンドの詳細について述べる。なお、pBlob および攪拌棒の検出、攪拌棒のジェスチャ操作コマンドの決定については 5 章に後述する。

##### (1) ハードウェアコマンド

磁石シリンダ内部の DC モーターを指定した時間だけ正転/逆転する *forward/reverse* コマンドを実装した。続いて、磁石シリンダの頂上に搭載された磁石を上げたり下げたりするコマンド *up/down* コマンドを開発した。*up* コマンドは *forward* コマンドを、*down* コマンドは *reverse* コマンドを内包する。また、システム起動時にすべての磁石シリンダの磁石を下降状態に初期化する *initialize* コマンドを実装した。

##### (2) プロブウェアコマンド

pBlob の幾何的な変形を指示するコマンドとして *Translate* コマンド、*Stretch* コマンド、*Shrink* コマンドの 3 つを、位相的な変形を指示するコマンドとして *Unify* コマンドと *Divide* コマンドの 2 つを実装した。

##### (3) pBlob の変形の実装

図 7 に示すように、pBlob の 5 種類の変形は磁石シリンダの *up/down* コマンドを適切な順序で呼び実装している。本項ではこの 5 種類の変形の実装を解説する。

以下では、pBlob が位置する座標を  $P_i$ 、その場所の背面にある磁石シリンダを  $M_i$  と呼ぶことにする。*Translate* コマンドの実装方法について述べる。磁石シリンダ  $M_0$  に対して *up* メソッドが実行され、pBlob が座標値  $P_0$  に位置しているとする。その近傍点である  $P_1$  に位置する磁石

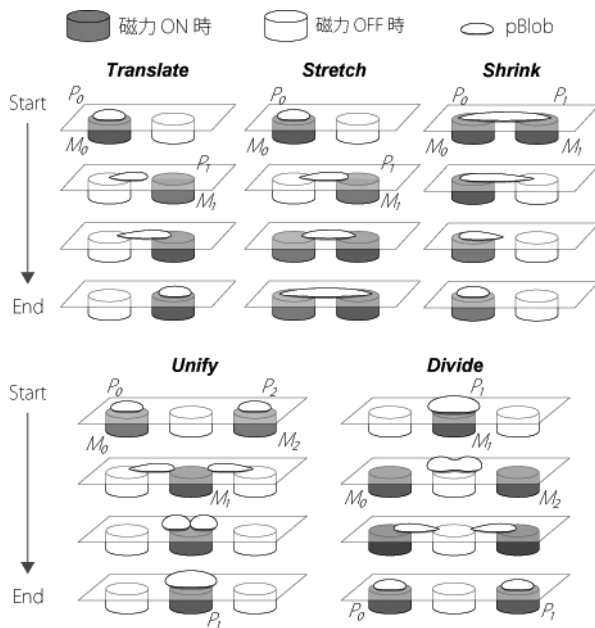


図 7 pBlob の変形の実装

Fig. 7 The implementation of pBlob transformation.

シリンダ  $M_1$  に対して *up* コマンドを実行し、 $M_0$  に対して *down* コマンドを実行すると、pBlob は  $P_0$  から  $P_1$  に移動する。次に、*Stretch* コマンドの実装方法について述べる。*Translate* と同じ要領で pBlob を  $P_0$  から  $P_1$  に移動させる。細長くなりながら移動している途中で、磁石シリンダ  $M_0$  に対して *up* コマンドを実行する。すると pBlob は  $P_0$  と  $P_1$  の両方に引き寄せられ、細長い形状を維持する。近傍の複数の点で磁石シリンダに対して *up* コマンドや *down* コマンドを実行することで様々な変形が可能である。*Shrink* コマンドの実装方法について述べる。 $P_0$  と  $P_1$  に伸びた pBlob が位置しているとする。この状態で磁石シリンダ  $M_1$  に対して *down* コマンドを実行すると、伸びた pBlob は  $M_0$  に引き寄せられ  $P_0$  に戻る。*Unify* コマンドの実装方法について述べる。2つの pBlob がそれぞれ  $P_0$ 、 $P_2$  に位置しているとする。その中間地点にあたる  $P_1$  の磁石シリンダ  $M_1$  に対して *up* コマンドを実行し、 $M_0$  と  $M_2$  に対して *down* コマンドを実行する。すると 2つの pBlob は  $P_1$  に向かって移動する。 $P_1$  で 2つの Blob が接触すると、pBlob どうしは自然に結合する。*Divide* コマンドは *Unify* コマンドの逆の操作である。pBlob が  $P_1$  に位置しているとする。その両端の磁石シリンダ  $M_0$ 、 $M_2$  に対して *up* コマンドを実行し、 $M_1$  に対して *down* コマンドを実行する。すると pBlob は両側からの引力により細長くなり 2つに分離する。

## 5. 攪拌棒ジェスチャインタフェース

pBlob と攪拌棒のジェスチャを検出するため、シャーレの上方に USB カメラを設置した。USB カメラは、CMOS 130 万画素、最大解像度  $1280 \times 1024$  ピクセルの BUFFALO

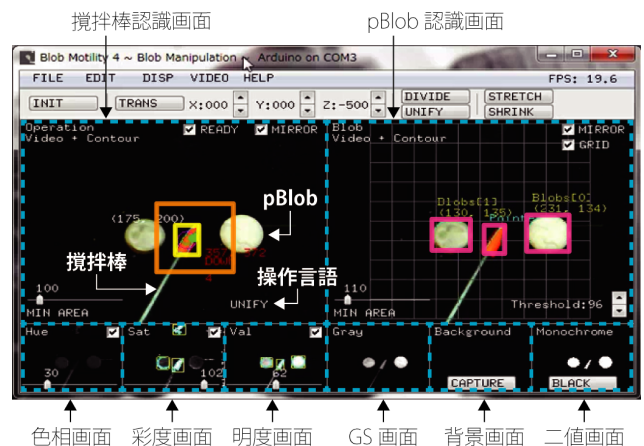


図 8 ソフトウェアの外観。左側が攪拌棒の認識画面、右側が pBlob の認識画面である

Fig. 8 The left window shows a detection of the stirring rod and the right window shows a detection of the pBlobs.

社製 BSW13K05H シリーズを使用した。認識の精度を高めるため、攪拌棒の先端は青または赤に着色した。また、pBlob 内の四三酸化鉄が攪拌棒に吸着するのを防ぐため、攪拌棒は木やアクリルなど非磁性体の素材を用いている。

### 5.1.1 pBlob の検出

pBlob の検出には背景差分法を用いる。まず、pBlob や攪拌棒が映り込んでいない状態で USB カメラを動作させ、背景画像  $I_m$  を撮影する。背景画像  $I_m$  は、図 8 に示す背景画面に表示される。次に、USB カメラの現在のフレーム映像をグレースケール変換し、画像  $I_g$  を得る。画像  $I_g$  は、図 8 に示す GS 画面に表示される。そして、画像  $I_g$  の画素と背景画像  $I_m$  の画素の差分の絶対値を算出し画像  $I_o$  を得る。画像  $I_o$  を閾値  $L_b$  で閾値処理する。すなわち、画像  $I_o$  の画素の輝度を  $L$  とすると以下の条件式 (1) を満たす画素を pBlob の画素として検出し、満たさない画素を背景画素として検出する。pBlob の画素は、図 8 に示す二値画面に白く表示される。

$$-L_b \leq L \leq L_b \tag{1}$$

### 5.1.2 攪拌棒の検出

図 9 のステップ  $S01$  からステップ  $S05$  までが攪拌棒の検出処理である。まずステップ  $S01$  において、攪拌棒の色相成分  $L_h$ 、彩度成分  $L_s$ 、明度成分  $L_v$  の閾値を設定する。これらの値は、初期設定ではすべて 10 に設定されているが、図 8 に示す色相画面、彩度画面、明度画面下部のスライダーによって調整することが可能である。次にステップ  $S02$  において USB カメラの現在のフレーム映像を HSV 変換し画像  $I_{hsv}$  を得る。図 8 の色相画面、彩度画面、明度画面はそれぞれ、画像  $I_{hsv}$  の色相、彩度、明度成分を表示している。ここで、画像  $I_{hsv}$  の色相成分を  $I_h$ 、彩度成分を  $I_s$ 、明度成分を  $I_v$  とすると、条件式 (2) をすべて満たす画素を攪拌棒の画素として検出し ( $S04$ )、満たさない画

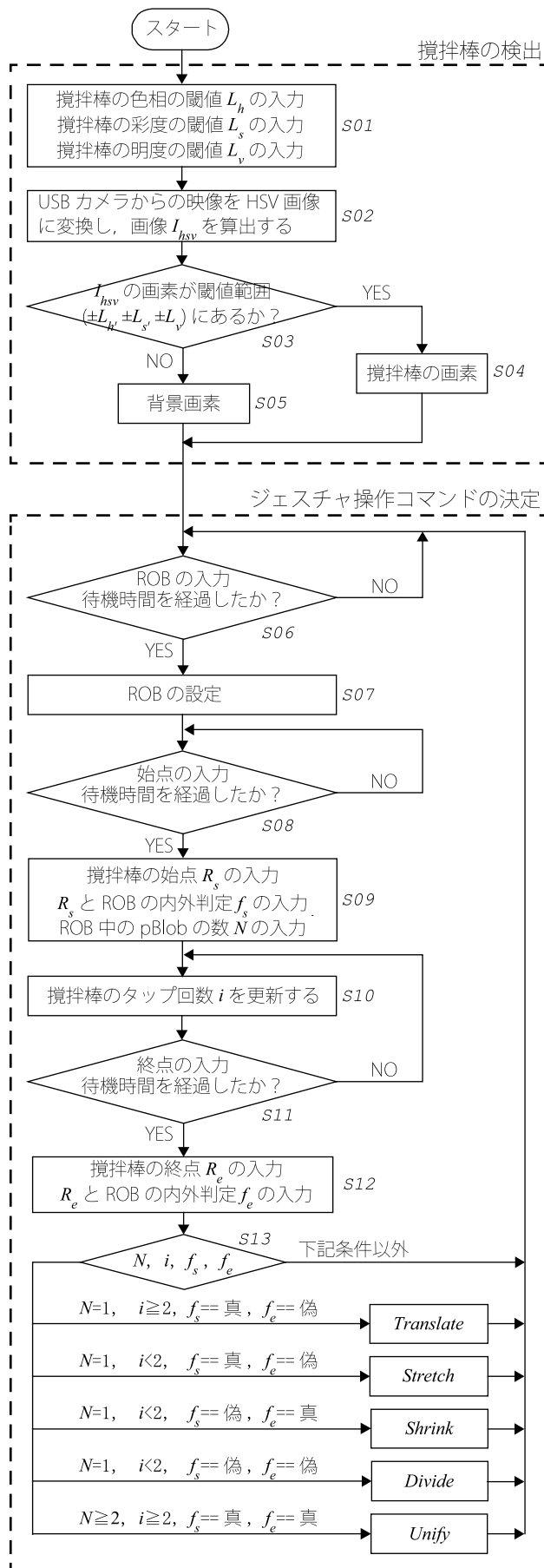


図 9 搅拌棒の検出とジェスチャ操作コマンドの決定のフロー  
Fig. 9 Manipulations correspond to the stirring rod gesture.

素を背景画素として検出する (S05). 搅拌棒の画素は図 8 の搅拌棒認識画面に黄色の矩形で表示される.

$$\begin{aligned}
 -L_h &\leq I_h \leq L_h \\
 -L_s &\leq I_s \leq L_s \\
 -L_v &\leq I_v \leq L_v
 \end{aligned} \tag{2}$$

### 5.1.3 ジェスチャ操作コマンドの決定

ジェスチャ操作コマンドは, 対象領域 (以下, *ROB: Range Of Boundary*) 中の pBlob の数  $N$ , 搅拌棒をタップした回数  $i$ , *ROB* と搅拌棒の始点  $R_s$  との内外判定  $f_s$ , *ROB* と搅拌棒の終点  $R_e$  の内外判定  $f_e$  の 4 つの条件に紐付けされている. 以下では, ジェスチャ操作コマンドの決定の流れについて述べる.

5.1.2 項で搅拌棒が検出されると, プログラムは *ROB* の入力待機状態に入る. ユーザは *ROB* に含めたい座標の中心に搅拌棒の先端を置き待機する. 入力待機時間が終わると (S06), 搅拌棒画素の中心点を中心とした *ROB* が生成される (S07). *ROB* は, 図 8 の搅拌棒認識画面で橙色の矩形で表示される. 次にプログラムは始点  $R_s$  の入力待機状態に入る. ユーザは始点に設定したい座標に搅拌棒の先端を置き待機する. 始点の入力待機時間が終わると (S08), 搅拌棒画素の中心点が始点  $R_s$  として入力される (S09). このとき,  $R_s$  が *ROB* の内側にある場合  $f_s$  は真となり, 外側にある場合  $f_s$  は偽となる. また, *ROB* の内側にある pBlob の個数が  $N$  に入力される. 引き続き, プログラムは終点  $R_e$  の入力待機状態に入る. ユーザは終点に設定したい座標に搅拌棒の先端を置き待機する. *ROB* 決定時の搅拌棒画素の面積を  $S_{rod}$ , 任意の変動率を  $\delta$ , 基準となる面積を  $S_{base}$  とすると, 搅拌棒の上昇は以下に示す条件式 (3.1) によって, 下降は条件式 (3.2) によって検出することができる. 数式 (3.1) と数式 (3.2) を順に満たした場合に搅拌棒をタップしたと判定し, 搅拌棒の終点  $R_e$  の入力を待機する間, タップの回数  $i$  を数え続ける. 終点  $R_e$  の入力待機時間が終わると (S11), そのときの搅拌棒画素の中心点が終点  $R_e$  に入力される (S12). このとき,  $R_e$  が *ROB* の内側にある場合  $f_e$  は真となり, 外側にある場合  $f_e$  は偽となる.

$$S_{rod} \geq \delta S_{base} \tag{3.1}$$

$$S_{rod} \leq \delta S_{base} \tag{3.2}$$

*ROB* の内側の pBlob の数が 1 つの場合 ( $N = 1$  のとき) の場合の条件分岐について述べる. 搅拌棒の始点  $R_s$  が *ROB* の内側にあり ( $f_s == \text{真}$  のとき), かつ搅拌棒の終点  $R_e$  が *ROB* の外側にあると ( $f_e == \text{偽}$  のとき), タップ回数が 2 回を超えた場合 ( $i \geq 2$  のとき) は *Translate* コマンドを実行する. 2 回を超えない場合 ( $i < 2$  のとき) は *ROB* の内側から外側に搅拌棒をスライドしたと判定し,

*Stretch* コマンドを実行する. また, 攪拌棒の始点  $R_s$  が  $ROB$  の外側にあり ( $f_s ==$  偽 のとき) かつ攪拌棒の終点  $R_e$  が  $ROB$  の内側 ( $f_e ==$  真 のとき) にあると, タップ回数が 2 回を超えない場合 ( $i < 2$  のとき) は  $ROB$  の外側から内側に攪拌棒をスライドしたと判定し, *Shrink* コマンドを実行する. 攪拌棒の始点  $R_s$  が  $ROB$  の外側にあり ( $f_s ==$  偽 のとき) かつ攪拌棒の終点  $R_e$  が  $ROB$  の内側 ( $f_e ==$  偽 のとき) にあると, タップ回数が 2 回を超えない場合 ( $i < 2$  のとき) は  $ROB$  を横切ったと判定し, *Divide* コマンドを実行する.  $ROB$  中の pBlob の数  $N$  が 2 つ以上の場合 ( $N \geq 2$  のとき) の場合について述べる. 攪拌棒の始点  $R_s$  が  $ROB$  の内側にあり ( $f_s ==$  真 のとき) かつ攪拌棒の終点  $R_e$  が  $ROB$  の内側にあると ( $f_e ==$  真 のとき), タップ回数が 2 回を超えた場合 ( $i \geq 2$  のとき), *Unify* コマンドが実行される. ジェスチャ認識が成功しコマンドが実行された場合, ステップ  $S06$  に戻り, 再びジェスチャ認識を開始する. また, 以上に述べた条件を満たさない場合 ( $S13$ ), ジェスチャ認識は無効と判定され, ステップ  $S06$  に戻る.

## 6. アプリケーション

本章では, 磁性ゲル形状ディスプレイ Blob Display の応用例を 2 つ述べる. 以下ではまず, pBlob の形に着目し, その輪郭線を有機的な形状デザインへ応用する例を示す. また, pBlob の振舞いは, 筆者らの想像以上に鑑賞者に生物的な幻想を与え, 我々の感受性や創造性を刺激した. そこで, pBlob の振舞いに着目し, pBlob を疑似的な生物になぞらえエンタテイメントへ応用する例を紹介する.

### (1) 有機的な形状デザインへの応用

筆者らには, CG (コンピュータ・グラフィックス) におけるメタボール [13] を実空間に拡張する, というモチベーションがある. メタボールとは, Blinn によって提案された有機的な形状をレンダリングする手法である. 筆者らは, CG ではなく, 滑らかな質感と振舞いをともなう実世界の液体による形状モデリングが, 我々の創造性を刺激すると考え, Blob Display を有機的な形状デザインツールに応用した.

Blobitecture や Blobject [28] に代表されるように, 近年は建築やプロダクトデザインで有機的な形状の人工物が多く作られている. pBlob を用いこのような人工物を対象とした有機的な形状をモデリングすることができる. 例として, 本研究を建築デザインとして利用する試みを図 10 に示す. この例では, ジェスチャ操作コマンド *Unify* を実行中の pBlob の輪郭線を CG ソフトにインポートし, 階層上に積み上げ, 輪郭線の間を曲面で補間している. pBlob の変形した痕跡を建築物に与え, 躍動力に富む形状を生成することができる.

コンピュータを活用した建築設計であるアルゴリズムミッ

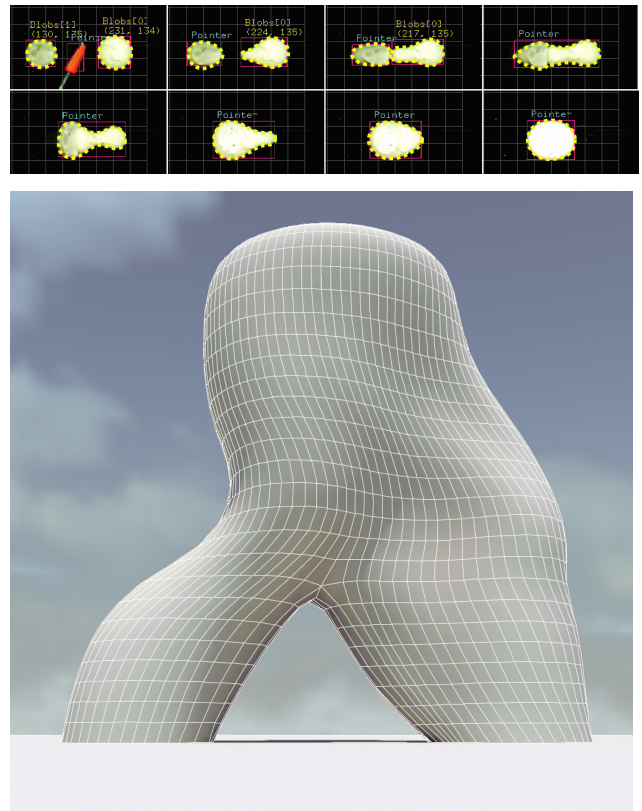


図 10 (上) ジェスチャ操作コマンド *Unify* を実行中の pBlob の輪郭線を抽出し, (下) CG ソフトで輪郭線を積み上げ, 補間した 3 次元オブジェクトのレンダリング結果

Fig. 10 Create an organic shape (top). Rendered image (bottom).

クデザインに特化した研究を行っている, 建築を専攻とする大学生 10 名 (男性 8 名, 女性 2 名) に本研究の概要を説明し, 建築への応用例としてデザインした図 10 の結果を見せたところ, 以下のコメントが得られた.

- 有機的な形が美しい.
- 実際の液体から設計した建築デザインは新しい.
- 輪郭線ではなくて, pBlob の形をそのまま建築物の形にはできないのか.
- 数式や NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) で曲面を生成するより, 液体の形を制御して建築の外壁を設計するのは直感的だと思われる.

総合的には「実際の流体を建築のデザインに使うのは直感的であり, 新しい試みである」という感想であった. 一方で, 「風の流れをシミュレーションする機能」の追加を求める意見も見られた. これについては, ソフトウェアを改良し, 得られた形状に対して流体との干渉を計算する機能を加える必要がある. また, 3D プリントで出力したモデルに対し風洞実験を行うことも検討していきたい.

### (2) エンタテイメントへの応用

原始生物を思わせる pBlob の振舞いは, エンタテイメントへの利用が考えられる. 図 11 に示すように, ユーザは攪拌棒を用いてジェスチャ操作コマンド *Translate* を実行

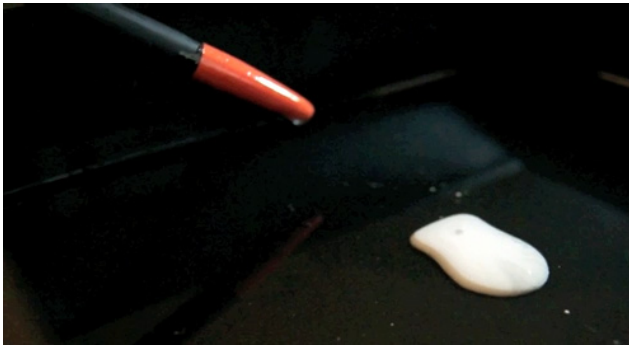


図 11 攪拌棒の示す先に pBlob を呼び寄せる様子

Fig. 11 pBlob is moving to where stirring rod is tapped.

することで、攪拌棒の示す先に pBlob を呼び寄せることが可能である。攪拌棒による入力がある場合、ランダムな位置に *Translate* が実行され、シャーレの中を pBlob が移動し続ける。

インタラクションでのユーザの行動を観察したところ、ユーザは攪拌棒のジェスチャによって pBlob を呼び寄せたり、ランダムに動く pBlob を眺めたりしていた。この際に「意図しない場所に pBlob が移動する場合や、攪拌棒に反応しない場合もあるが、そのもどかしさが生き物らしい」といった意見や、シャーレの中を pBlob が移動する様子を見て「白い虫が動いている」といった意見があった。一方で、「気持ち悪い」といった意見もあり、オイル中を移動する pBlob に嫌悪感を示すユーザも見られた。

## 7. 議論

### (1) pBlob の生物性

非生物でありながらも、pBlob の湿り気を持った緩やかな振舞いは、鑑賞者に生物的な幻想を与える。認知心理学の分野においては、個体あるいは群体の物体の振舞いを観察した場合、人間がその物体に生物性を感じることをアニメシー知覚という [29]。我々の知覚システムには運動量保存の法則を判別する仕組みがあり [30]、自動力を想定しなければ、物体の運動が不自然な場合に生物性を知覚することも知られている [31]。pBlob に感じた生物性は、pBlob を黒色以外に着色したことにより、pBlob の変形に磁力を利用していることが隠蔽されていることに起因していると考えられる。

### (2) 磁気ユニットの耐久性とメンテナンス性

システム開発の初期段階で筆者らは Actuated Workbench [32] を参考に電磁石を用いた磁気ユニットを開発した。電磁石をアルミニウムで覆いサーキュレータで風冷したが、密集した状態では排熱効率が悪く、ユニットの一部が長時間の通電時に発生する抵抗熱で焼損した。この問題を解決するために筆者らは、機械的に磁力を制御するユニット、磁石シリンダを開発した。磁石シリンダは、pBlob に磁力を与える際に発生する熱を最小限にすること

ができ、つねに一定の磁力を pBlob に与えることが可能となった。また、磁石シリンダは下部の RCA 端子で電子回路とつながっているため、モータの摩耗時に容易に交換することができ、システムのメンテナンス性も向上した。

### (3) 攪拌棒ジェスチャの正確性

攪拌棒ジェスチャによる pBlob の操作は、上方に設置した USB カメラの映像を処理し決定される。攪拌棒の検出は色認識で行うため、環境光やポッピーオイルからの反射光の影響を受けやすい。*Stretch*、*Shrink*、*Divide* 操作は攪拌棒と pBlob が接触するために、USB カメラから見える攪拌棒の着色部位が減り、ジェスチャの誤検知が発生した。この問題は、攪拌棒の先端に赤外線 LED を取り付け、赤外線カメラからの映像を処理することで解決することを検討している。

### (4) pBlob の変形の正確性

*Stretch* の操作を実行した際、*Divide* の操作のように 2 つに分離してしまう誤動作があった。また、*Divide* の操作を実行した際に 2 つに分離せず、*Stretch* の操作のように長く伸びてしまう誤動作が確認された。これらの問題は、*Stretch* や *Divide* の操作を実行した際の、pBlob の大きさや量に応じた磁力の ON/OFF の時間調整が失敗したためだと考えられる。今後磁性ゲル pBlob を用いた形状ディスプレイとしてさらに開発を進める中で、pBlob の大きさや量と、与える磁力の強さや時間について、評価実験を行う予定である。

### (5) Blob Display の保全性

pBlob は水、PVA、ホウ砂飽和水溶液の混合物に粒状の四三酸化鉄が分散した懸濁液と考えられる。そのため、沈静化した状態が長く続くと四三酸化鉄が pBlob の底に凝集し、やがて混合物と隔離してしまう。この問題に対して筆者らは、pBlob の形を維持しながら磁力を断続的に与え、pBlob 下層の四三酸化鉄をつねに攪拌させ続けることで解決した。また、ポッピーオイルは時間の経過とともにゼリー化する。pBlob の滑らかな振舞いを維持するためには、定期的な交換が必要である。このように、有機素材を用いたシステムは、素材の管理、メンテナンス方法が重要な課題になる。

## 8. まとめと今後の展望

本論文では、磁力に引き寄せられ、変形、移動する磁性ゲルの形を幾何的かつ相位的に操作することが可能な磁性ゲル形状ディスプレイおよびそのインタラクション手法について論じた。以下に、今後の展開の方向性を 3 つ示す。

### (1) スケーラビリティ

磁性ゲル形状ディスプレイの性能向上のため、pBlob が可動する領域の解像度を向上させる。現行のシステムでは、シャーレの下部に配備した磁石シリンダの個数が解像度に直結しているため、解像度の増加にともないシステム



の複雑化, コストの増加を招く. そこで筆者らは, XY 軸ステージに複数の磁石シリンダを搭載し, 磁力の発生源の位置を XY 軸で, 磁力の ON/OFF の制御を磁石シリンダの up/down コマンドで制御する手法を検討している.

### (2) pBlob のカラーコンピューティング

磁性ゲルを用いたディスプレイの可能性をさらに広げるため, 筆者らは pBlob の色のプログラムを試みている. 具体的には, サーモクロミックインクや液晶インクを pBlob に調合し, 動的に変色する pBlob の作成を目指している. pBlob の色の制御が実現できれば, 攪拌棒ジェスチャ時に操作対象の pBlob を変色させることができる. また, *Divide* や *Unify* をするごとに, 色が薄くなったり濃くなったりする pBlob を作ることも可能になる.

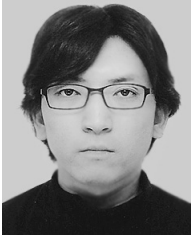
### (3) pBlob の固化

樹脂や石膏といった素材を積層し造形する 3D プロトタイプリングがさかんである. pBlob を固化させて取り出すことができれば, 流体形状プロトタイプリングが可能になる. pBlob に光硬化樹脂を配合し, 攪拌棒の先端にブラックライト照射器を付け, 形状が決定した部分から固化させていくことができれば, 局所的なモデリングも実現できる.

謝辞 磁性ゲル形状ディスプレイの開発にご協力いただいた柿崎勇晃氏に, 謹んで感謝の意を表する.

### 参考文献

- [1] Coelho, M., Hall, L., Berzowska, J. and Maes, P.: Pulp-based computing: A framework for building computers out of paper, *Proc. CHI EA '09*, pp.3527-3528, ACM (2009).
- [2] Qi, J. and Buechley, L.: Electronic popables: Exploring paper-based computing through an interactive pop-up book, *Proc. TEI'10*, pp.121-128, ACM (2010).
- [3] Coelho, M., Ishii, H. and Maes, P.: Surfex: A programmable surface for the design of tangible interfaces, *Proc. CHI EA '08*, pp.3429-3434, ACM (2008).
- [4] Coelho, M. and Maes, P.: Shutters: A permeable surface for environmental control and communication, *Proc. TEI'09*, pp.13-18, ACM (2009).
- [5] Berzowska, J. and Mainstone, D.: Skorpions: Kinetic Electronic Garments, *Proc. SIGGRAPH'08*, p.92, ACM (2008).
- [6] HypoSurface Corp: HYPOSURFACE, available from (<http://hyposurface.org/>) (accessed 2012-06-26).
- [7] Poupyrev, I., Nashida, T. and Okabe, M.: Actuation and tangible user interfaces: The Vaucanson duck, robots, and shape displays, *Proc. TEI'07*, pp.205-212, ACM (2007).
- [8] Leithinger, D. and Ishii, H.: Relief: A scalable actuated shape display, *Proc. TEI'10*, pp.221-222, ACM (2010).
- [9] Raffle, H., Joachim, M.W. and Tichenor, J.: Super cilia skin: An interactive membrane, *Proc. CHI EA '03*, pp.808-809, ACM (2003).
- [10] Oosterhuis, K. and Bioria, N.: Interactions with proactive architectural spaces: The muscle projects, *Comm. ACM*, Vol.51, pp.70-78 (2008).
- [11] Leading Edge Design: Ephyra, available from (<http://www.lleedd.com/portfolio/ephyra/>) (accessed 2012-06-26).
- [12] Kodama, S.: Dynamic ferrofluid sculpture: Organic shape-changing art forms, *Comm. ACM*, Vol.51, pp.79-81 (2008).
- [13] Blinn, J.F.A.: Generalization of Algebraic Surface Drawing, *ACM Trans. Graphics*, Vol.1, No.3, pp.235-256 (1982).
- [14] Wakita, A., Nakano, A. and Kobayashi, N.: Programmable blobs: A rheologic interface for organic shape design, *Proc. TEI'11*, pp.273-276, ACM (2011).
- [15] Wakita, A. and Nakano, A.: Blob manipulation, *Proc. TEI'12*, pp.299-302, ACM (2012).
- [16] Goldstein, S.C., Campbell, J.D. and Mowry, T.D.: Programmable Matter, *IEEE Computer*, Vol.38, No.6, pp.99-101 (2005).
- [17] Kurokawa, H., Tomita, K., Kamimura, A., et al.: Distributed Self-Reconfiguration of M-TRAN III Modular Robotic System, *Int. J. Rob. Res.*, Vol.27, pp.373-386 (2008).
- [18] Zykov, V., Mytilinaios, E., Adams, B., et al.: Self-reproducing machines, *Nature*, Vol.435, No.7038, pp.163-164 (2005).
- [19] Raffle, H.S., Parkes, A.J. and Ishii, H.: Topobo: A constructive assembly system with kinetic memory, *Proc. CHI'04*, pp.647-654, ACM (2004).
- [20] Blackshaw, M., Devincenzi, A. and Lakatos, D.: Recompose: Direct and gestural interaction with an actuated surface, *Proc. CHI EA '11*, pp.1237-1242, ACM (2011).
- [21] Wakita, A., Nakano, A. and Ueno, M.: SMAAD Surface: A Tangible Interface For Smart Material Aided Architectural Design, *Proc. CAADRIA '11*, pp.355-364 (2011).
- [22] 池田道弘, 平川正人: 水を用いたマルチディスプレイインタフェース, 情報処理学会論文誌, Vol.51, No.11, pp.2103-2111 (2010).
- [23] Dietz, P.H., Westhues, J., Barnwell, J., et al.: Submerging technologies, *Proc. ACM SIGGRAPH 2006 Emerging technologies Article (SIGGRAPH'06)*, p.30, ACM (2006).
- [24] Koh, J.T.K.V., Karunanayaka, K., Sepulveda, J., et al.: Liquid interface: A malleable, transient, direct-touch interface, *Proc. ACE'10*, pp.45-48, ACM (2010).
- [25] Casassa, E.Z., Sarquis, A.M. and Van Dyke, C.H.: The Gelation of Polyvinyl Alcohol with Borax: A Novel Class Participation Experiment Involving the Preparation and Properties of a "Slime", *J. Chem. Educ.*, Vol.63, No.1, pp.57-60 (1986).
- [26] 山本進一: 手づくりスライムの実験, さ・え・ら書房 (1996).
- [27] Iwata, H., Yano, H., Nakaizumi, F., et al.: Project FEELEX: Adding haptic surface to graphics, *Proc. SIGGRAPH'01*, pp.469-476, ACM (2001).
- [28] Waters, J.K.: *Blobitecture: Waveform Architecture and Digital Design*, Rockport Pub. (2003).
- [29] Heider, F. and Simmel, M.: An Experimental Study of Apparent Behavior, *AJP*, Vol.57, No.2, pp.243-259 (1944).
- [30] Kaiser, M.K. and Proffitt, D.R.: Observers' sensitivity to dynamic anomalies in collisions, *Perception & Psychophysics*, Vol.42, No.3, pp.275-280 (1987).
- [31] Tremoulet, P.D. and Feldman, J.: Perception of animacy from the motion of a single object, *Perception*, Vol.29, No.8, pp.943-951 (2000).
- [32] Pangaro, G., Maynes-Aminzade, D. and Ishii, H.: The actuated workbench: Computer-controlled actuation in tabletop tangible interfaces, *Proc. UIST'02*, pp.181-190, ACM (2002).



中野 亜希人

慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科。昭和 60 年生。平成 21 年慶應義塾大学環境情報学部卒業。平成 23 年慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科修士課程修了。現在、同研究科後期博士課程に在籍中。



脇田 玲 (正会員)

慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科。昭和 49 年生。平成 11 年ラティス・テクノロジー株式会社に入社。ソリッドモデリングカーネルの研究開発に従事。平成 14 年慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科博士課程修了。

複数のインターフェイス制作会社を経て、平成 16 年慶應義塾大学環境情報学部専任講師、平成 19 年同准教授。現在に至る。スマートマテリアル、3 次元 CAD、情報視覚化、等の研究に従事。博士 (政策・メディア)。