

## Rheologic Interaction : 流動的プログラマブル・マターを用いた インタラクシオンデザインの試み

脇田玲<sup>†</sup> 中野亜希人<sup>†</sup>

Rheologic Interaction は流動的なプログラマブル・マターを用いたインタラクシオンデザインの試みである。その第一歩として、我々は *pBlob* と呼ばれる独自生成したゲル状の磁性流体を用いて、幾何的かつ位相的にその形態をプログラムできる環境を提案する。これにより、ユーザは CG におけるメタボールのように、有機的な形状の変化を実空間で体験することができる。制御ハードウェアは、ハニカム構造に配置された電磁石によって構成されており、これらの制御によって *pBlob* の多様な変形とアニメーションを実現する。本稿では、素材の合成手法、メカニズムの詳細、変形の操作言語について述べ、この新しいデザイン素材を用いたアプリケーションも提案する。

### Rheologic Interaction – Interaction Design using Rheologic Programmable Matter

Akira Wakita<sup>†</sup> Akito Nakano<sup>†</sup>

Rheologic Interaction is an attempt of interaction design using fluid programmable matters. We have developed an environment where we can program the shape of gel geometrically and topologically using our unique magnetic fluid called *pBlob*. This enables us to experience organic shape changes in real space, like a metaball in the CG world. The control hardware is composed of electromagnets arranged in the honeycomb structure and their control circuits. We describe the method of blob creation, details of the mechanism and the language for transformation control, and propose some applications we are developing at present.



図1 ゲル状の磁性流体 *pBlob*

#### 1. はじめに – Rheologic Interaction に向けて

TUI(Tangible User Interface)は様々な物質の形や振る舞いをプログラミングすることを可能にしてきた。紙[4, 16] や布[1, 5] に新しいインタラクシオンを与えるものや、変形可能な構造を組み立てる環境[14, 18] 等がこれにあたる。また、キネティック・サーフィスの試みは、多様なスケールで壁面やテーブルトップに形状をアクチュエートすることを可能にしている[11, 15, 17]。

このように、堅いものから柔らかいものまで、形の崩れない物質については多くの研究がある一方で、形状が流動的 (Rheologic, レオロジック) なもののプログラミングは、あまり進められていないのが現状である。磁性流体を用いたメディアアート作品[10] はこの可能性を示す数少ない例の1つだが、流体の形や振る舞いを制御可能な一般的なモデルとして提案した試みは我々の知る限り存在しない。

そこで我々は、流動的な物質を用いたインタラクシオンデザインを Rheologic Interaction (レオロジック・インタラクシオン) と命名し、その第一歩として、粘性を持った流体の形状や振る舞いを制御する手法と、そのデザイン原則を提案する。我々のアイデアは、CGにおけるMetaball(もしくはBlob)[2, 3] を実空間に拡張する、というものである。我々は *pBlob*(Physical Blob)と呼ばれる磁性を持ったゲルを独自に生成し、磁力を制御するワークベンチと組み合わせることで、メタモーフィックな形と振

<sup>†</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

る舞いを、幾何的にも位相的にも、制御することを可能にした。

本論文では、流動的な物質のプログラムを実現するための、ハードウェア、素材の合成方法、デザイン原則を述べるとともに、アプリケーションのシナリオを紹介する。

## 2. 関連研究 – プログラマブル・マターの研究動向

近年、形状や色彩をプログラム可能な物質(Programmable Matter, プログラマブル・マター)[7] が大きな注目を集めている。その中でも特に柔軟性の高い不定形な物質に着目した研究はあまり進んでいないのが現状である。Soft Shape-shifting Robot Blob[8] は伸縮性の高いラバーで作られたロボットであり、空気の出し入れを制御することで変形や移動を実現している。形状のデザインに着目すると、Craytronics[7] と呼ばれる、小型のモジュラーロボットによって、ボクセル的に形状を構築する技術が存在する。将来的にはナノスケールにまで小型化されることで、粘土のように柔軟な振る舞いが実現されることであろう。

素材とのハプティックなインタラクションに着目し、本物の粘土を用いる試み[19] も存在する。また、プログラム可能な仕組みは用意されていないが、Magnetic Thinking Putty[12]は、強力なネオジム磁石を用いてその形態を柔軟に変形させることができる磁性を帯びた粘土である。より流体的な素材を扱った事例としては、磁性流体を用いたメディアインスタレーション[6, 10] がよく知られている。磁性流体の特徴であるスパイク現象を利用した作品は見る者のに生物的な幻想を与える。

本研究の目的は、粘土と流体の中間的な粘度をもったゲルに着目し、その形状を自在に変化させる手法を提案することである。独自生成したゲル状の磁性流体を用いることで、位相的にも変形可能な形状ディスプレイを実現している点が特徴である。柔らかく湿り気をもった物質とのインタラクションを通して、全く新しいアプリケーションを生み出すことを目指す。

## 3. メカニズム

*pBlob* はメタボールに類似した振る舞いをするゲル状の磁性流体である。この物質は、液体と個体の中間的な性質を保持した粘弾性体である。通常は円形に収束しているが、磁力に引き寄せられると変形し、離れた場所から強い磁力がかかると移動する。*pBlob* を操作する基本的な仕組みは、この特性を利用しており、床下から磁力を発生させることで、*pBlob* の形状や動きを制御する。以下、我々がプロトタイプしたシステムの詳細を述べる。

### 3.1 Blobware

Metaball のように振る舞う *pBlob* を作るために、我々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した。材料は、水、PVA(Polyvinyl Alcohol)、ホウ砂、

磁性粉末、水彩絵の具、ポッピーオイルである。水、PVA、ホウ砂を混ぜ合わせることで市販のスライムに近いものを簡単に作るができる。この物質をベースとして、磁性を与えるために磁性粉末を、着色するために水彩絵の具を加える。出来上がった *pBlob* は制御を容易にするためにポッピーオイルの満たされた容器に入れる。粘度の低いものはスムーズに動作するためアニメーションに適しており、一方で粘度の高いものは形を維持する特性が強く形状モデリングに向いている。

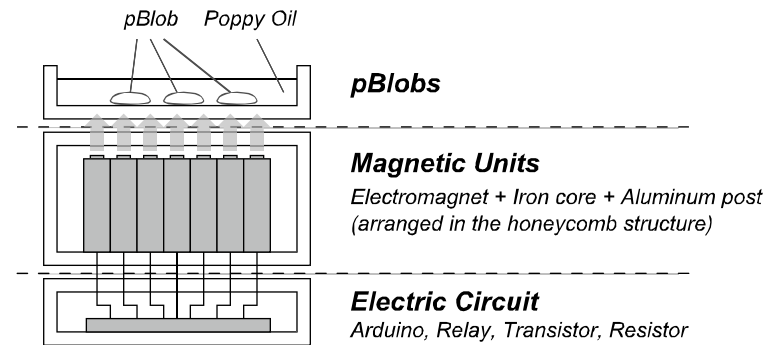


図2 ハードウェア構成

### 3.2 ハードウェア

我々は、電磁石を用いた Tabletop UI である Actuated Workbench[13]の構造を参考に、独自の工夫を加えながらハードウェアをプロトタイプした。磁力ユニットは、電磁石、鉄芯、アルミの柱によって構成される。電磁石のボビン直径25mm高さ30mm、穴径は7mmである。コイルは直径0.4mmのエナメル線を400回巻きしたものである。電磁石の穴に鉄芯を入れることで、磁力を強化している。この電磁石を用いた回路に、DC 25V、2.4Aの電流を与え、Arduinoとprocessingで作成されたソフトウェアによってON/OFFとPWMの制御を行う。

アルミの柱は六角柱であり、その中に電磁石と鉄芯が収められる。アルミの柱は以下の2つの役割を持っている。1つは、熱伝導率の高いアルミ素材を通して電磁石から発生する熱を効果的に逃がすことである。もう1つの役割は、電磁石間の距離を一定にすることである。ユニットは六角柱であるため、ハニカム状に配置することができる。これにより、縦横を揃えた場合のグリッド配列と異なり、隣り合う電磁石間の距離は一定になるため、*pBlob*の制御を容易することができる。

プロトタイプしたハードウェアでは、7個の磁力ユニットをハニカム状に配置しア

クリル容器に収めた。このハードウェア上に *pBlob* が入った容器を設置し、磁力によって形状や動きを制御する。

#### 4. *pBlob* の変形操作

*pBlob* の操作は、幾何学的のみならず位相的な変形を伴う点が最大の特徴である。以下に我々が現在実装している基本的な変形操作を述べる。

##### 4.1 幾何的な変形

幾何的な変形としては *Translate* と *Deform* を実装した。*Translate* は現在の座標値から別の座標値へ平行移動する操作である。以下の説明では、*pBlob* が位置する座標を  $p_i$ 、その場所の背面にある電磁石を  $m_i$  を呼ぶことにする。

まず *pBlob* が座標値  $p_0$  に位置しているとする。この時  $p_0$  の電磁石  $m_0$  は ON になっている。その近傍点である  $p_1$  に位置する電磁石  $m_1$  を ON にし  $m_0$  を OFF にすると、*pBlob* は  $p_0$  から  $p_1$  に並行移動する。粘度が低い場合には移動は高速でスムーズであるが、粘度が高い場合にはゆっくり時間をかけてと線状の形になりながら移動する。移動終了後は、 $m_1$  の電磁石の影響を受け続けるため円形を維持する。

*Deform* は、合力ベクトルによる形状変形の操作であり、円形の *pBlob* が細長くなる操作や、細長くなった *pBlob* がさらに三日月型の形に変形する操作などを意味する。まず *Translate* と同じ要領で *pBlob* を  $p_0$  から  $p_1$  に向けて移動させる。細長くなりながら移動している途中で、 $m_0$  も ON にする。すると *pBlob* は  $p_1$  と  $p_0$  の両方に引き寄せられ、*pBlob* は細長い形状を維持し続ける。

##### 4.2 位相的な変形

位相的な変形の基礎操作としては *Unify*, *Divide* の 2 つを実装している。*Unify* は 2 つの *pBlob* に対してそれぞれ向き合う方向のベクトルを与えることで、1 つのより大きな *pBlob* に結合させる操作を意味する。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  $p_1$  の電磁石  $m_1$  を ON にし、 $m_0$  と  $m_2$  を OFF にする。すると 2 つの *pBlob* は  $p_1$  に向かって移動を開始する。 $p_1$  で 2 つの *pBlob* が接触すると、間の油膜が徐々に排除され *pBlob* 同士に引力が働き自然に結合する。*Divide* は *Unify* の逆の操作である。

我々は基本的な 4 操作を実装しているが、この操作の組み合わせによって複雑な変形を実現することができる。隣り合う電磁石に異なるデューティ比を与えることで形状の重みを制御することや、合力ベクトルにより任意方向に移動させることも可能である。

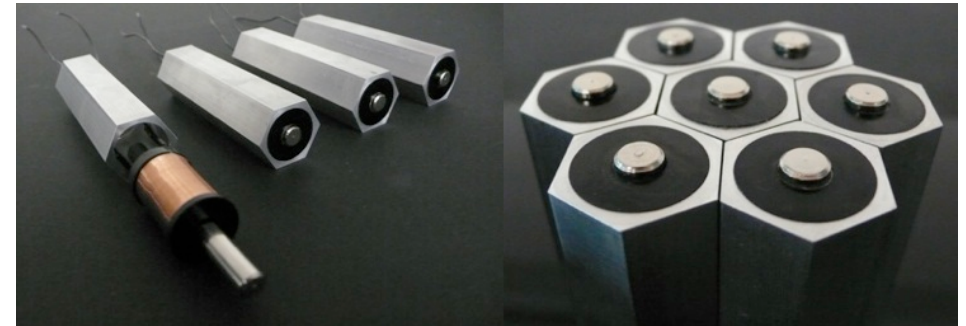


図3 磁気ユニット（左）とそのハニカム状の配列（右）

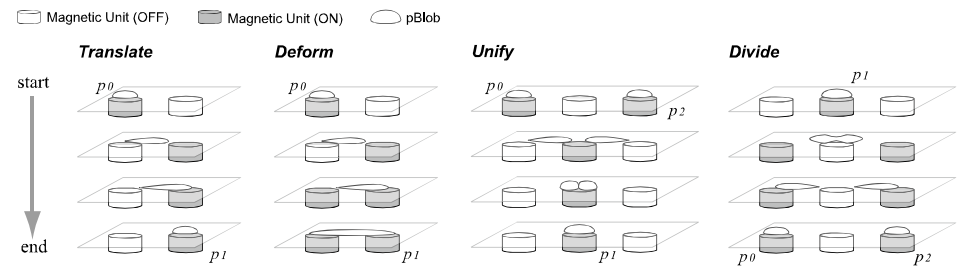


図4 *pBlob* の 4 つの変形とそのための制御ステップ

## 5. アプリケーション

### 5.1 形状デザインツール

*Metaball* の原理をそのまま適用したタンジブルなデザインツールは、スケッチや CG に変わる新しい創作環境になりうる。*Blobitecture* や *Blobject*[9] 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* を用いた形状デザインツールは、このような人工物を対象とした有機的な形状モデラとして利用できる。このモデリングプロセスは、ただ形状を作るのではなく、*pBlob* の有機的な質感と振る舞いが常に伴うものであり、クリエイターの創造性を刺激することも期待できる。



## 5.2 モーフィングを通じた発想支援

多くの人がその幼少期において、空を流れる雲に様々なモノを連想させて遊んだ経験があるであろう。流れる雲、解けゆく氷、燃え盛る炎など、時系列にそって形状を変える素材は、人の創造性を引き出す力を持っている。滑らかに変形する *pBlob* も同様であり、人の発想や創造の支援に応用することができるだろう。電磁石の制御パターンを徐々に変化させて行けば、形状のモーフィングが実現できる。これは雲や氷が徐々に形を変えてゆくと同様に、人の創造性を引き出す可能性がある。

## 5.3 Game / Entertainment

原始生物を思わせる *pBlob* のロコモーションは、ゲームや娯楽への利用も考えられる。人の動きに反応して *pBlob* が近づくインタラクションは、生命のイリュージョンを形成し、*pBlob* をバーチャルなペットに変える。AI と連動させることで新しい種類のエージェントを作ること考えられる。一方で、その動きをジョイスティックなどの UI で操作することで、迷路やバックマンなどのゲームを作ること可能である。

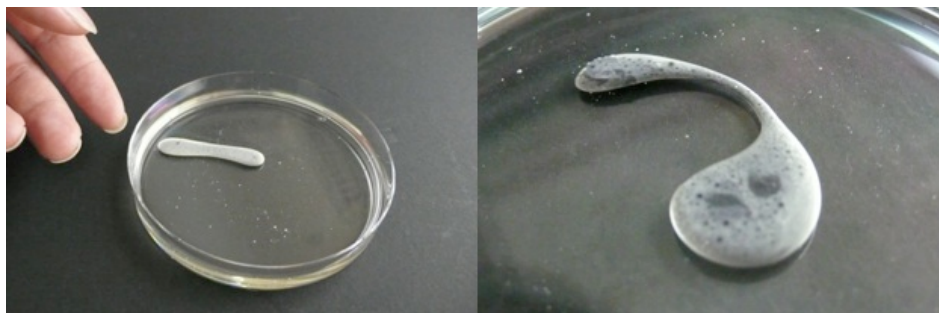


図5 *pBlob* を用いたエージェント

## 5.4 生物シミュレーション

多数の *pBlob* を自律分散的に動かすことによってライフゲームのような生物シミュレーションを行うことができる。ライフゲームの離散的なセルと異なり、*pBlob* は結合や分離という位相的な動きを伴うため、より有機的なパターンが生まれる可能性が高い。場合によっては創発のような現象のシミュレーションをすることも可能だろう。

## 6. 議論

### 6.1 ユーザインターフェイス

水や油といった流体は直接触れる操作が困難であるため（我々は経験から水を掴むことの難しさを知っている）、その設計には工夫が求められる。直接的な接触ではない形で、身体的なインタラクションを引き出すための、*pBlob* をユーザの意思で自然に動かしていると感じさせる操作モデルが求められる。我々はスターウォーズに登場する "Force" の概念を UI に導入することで、自然な *pBlob* 操作に繋がると考えて、システム開発を進めている。例えば、*Divide* の操作では両手を使って仮想の *pBlob* を2つに引き離すようなジェスチャをとる。*Translate* の操作では移動させたい方向にスワイプするジェスチャをとる。これらのインターフェイスは通常のテーブルトップのように天井カメラによってジェスチャを検知することで実現可能である。

### 6.2 長時間の動作

電磁石のコイルは発熱量が多いため、長時間動作させることで熱暴走の問題が想定されたが、そのような状態は観察されなかった。電磁石に挿入した鉄心と六角形のアルミケースがヒートシンクとして働き、熱をうまく逃がすことができたためだと考えられる。

長時間の動作は *pBlob* の動きにも影響を与える。*pBlob* 内部の磁性粉末が自身の重さで沈殿し、動きが鈍くなってしまうのだ。細い攪拌棒で *pBlob* を攪拌すればスムーズな動きは回復するが、長時間の自動運転を想定すると材料レベルで改善が必要になってくるだろう。

## 7. 結論と今後の展望

本論文では、流動的なプログラマブルマターを用いたインタラクションの第一歩として、ゲル状の磁性流体を電磁石により操作することで流体の形状と振る舞いをプログラムするシステムについて述べた。本手法により、*Metaball* のような有機的な形状変化を、幾何的かつ位相的に、実世界で実現することが可能になる。短期的な展望としては、ポッピーオイルなどの媒体をなくし、*pBlob* 単体で動作可能な環境構築を実現したい。長期的な展望としては、現在の2次元のシステムを階層的にすることで3次元化を目指したい。

**謝辞** 本プロジェクトの初期段階において、*pBlob* の合成に尽力してくれた小林展啓氏、ソフトウェア開発を支援してくれた慶應義塾大学環境情報学部の戸塚祥三氏に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) Berzowska, J. et al. Skorptions: Kinetic Electronic Garments, Ubicomp'07.
- 2) Blinn, J. F. A Generalization of Algebraic Surface Drawing. ACM Trans. Graph. 1, 3 (Jul. 1982), pp.235-256.
- 3) Bloomenthal, J. Introduction to Implicit Surfaces. Morgan Kaufmann, 1997.
- 4) Coelho, M. Hall, L. Berzowska, J. Maes, P. Pulp-based computing: a framework for building computers out of paper, In Proc. CHI'09, pp.3527-3528.
- 5) Coelho, M. and Maes, P. Shutters: a permeable surface for environmental control and communication, In Proc. TEI'09, pp.13-18.
- 6) Frey, M. SnOil - Ein plastisches Display basierend auf Ferrofluid, <http://www.freymartin.de/de/projekte/snoil>
- 7) Goldstein, Seth Copen and Campbell, Jason D. and Mowry, Todd C. Programmable Matter, IEEE Computer, vol.38, no.6, p.99-101, 2005.
- 8) iRobot, Shape-Shifting Blob 'Bot, <http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/robotics-software/irobot-soft-morphing-blob-chembot>
- 9) John K. Waters, Blobitecture: Waveform Architecture and Digital Design, Rockport Pub, 2003.
- 10) Kodama, S. Dynamic ferrofluid sculpture: organic shape-changing art forms. Commun. ACM vol.51, no.6 (Jun. 2008), 79-81.
- 11) Leithinger, D. and Ishii, H. Relief: a scalable actuated shape display. In Proc. TEI'10. pp.221-222.
- 12) Magnetic Thinking Putty, <http://www.puttyworld.com/midnightcolors.html>
- 13) Pangaro, G., Maynes-Aminzade, D., and Ishii, H. The actuated workbench: computer-controlled actuation in tabletop tangible interfaces. In Proc. UIST'02. pp.181-190.
- 14) Parkes, A. and Ishii, H. Kinetic sketchup: motion prototyping in the tangible design process. In Proc. TEI'09. pp.367-372.
- 15) Poupyrev, I., Nashida, T., and Okabe, M. Actuation and tangible user interfaces: the Vaucanson duck, robots, and shape displays. In Proc. TEI'07, pp.205-212.
- 16) Qi, J. and Buechley, L. Electronic popables: exploring paper-based computing through an interactive pop-up book In Proc TEI'10, pp.121-128.
- 17) Raffle, H., Joachim, M. W., and Tichenor, J. Super cilia skin: an interactive membrane. In Proc. CHI'03 Extended Abstracts, pp.808-809.
- 18) Raffle, H. S., Parkes, A. J., and Ishii, H. Topobo: a constructive assembly system with kinetic memory. In Proc. CHI'04. pp.647-654.
- 19) Reed, M. Prototyping digital clay as an active material. In Proc. TEI'09. pp.339-342.