

“るつぼ”—リアルタイム流体シミュレーションとインタラクティブメディアアートの新しい融合

平戸 淳正^{†1} 河口 洋一郎^{†2}

本論文で紹介する“るつぼ”は、2次元リアルタイム流体シミュレーションと映像キャプチャ技術を組み合わせたインタラクティブメディアアート作品であり、人間の体を水やゼリーのような質感に変えることができる。本作品はSPH法に基づいた流体計算とバネマスモデルの計算を行うが、ノートPC1台でリアルタイムの処理を行っているため、展示物としてのポータビリティの高さも兼ね備えている。自分の体が予想のつかない挙動を示すことで、体験者は仮想空間ならではの斬新な体験を得ることができる。

RUTSUBO: Novel Combination of Real-time Fluid Simulation and Interactive Media Art

JUNSEI HIRATO^{†1} and YOICHIRO KAWAGUCHI^{†2}

“Rutsubo” which means melting pot is a novel interactive media art work that combines two-dimensional real-time fluid simulation with the image capturing technique, and it makes possible for your body to change into water and jelly. This work also have grate portability because we calculate both fluid simulation based on the SPH and a spring-mass model in real-time only by a laptop. You can go through novel experience that your own body deforms unpredictably by this work.

^{†1} 東京大学大学院学際情報学府

Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, The University of Tokyo

^{†2} 東京大学大学院情報学環

Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo

1. はじめに

コンピュータは我々の体験を仮想空間に拡張し、実世界ではありえないような様々な体験をさせてくれる。近年ではメディアアートの幅も広がり、パフォーマンスアート、ビデオアート、インスタレーションなど様々な形で発展してきており、芸術表現においてメディア技術は着実にその重要性を増していることは疑いないだろう。

インタラクティブアートとして代表的なものにKawaguchi²⁾によるGemotion Danceがある。このパフォーマンスでは人の動きに艶めかしく反応するCGによってダンスの臨場感が増し、また空間演出としてもCG映像の中に取り込まれるような感覚に至ることができる。また、人やオブジェクトの変形を扱った映像作品の例として代表的なものに岩井⁵⁾によるマシュマロスコープがある。この作品では時間に着目した変形を扱っており、映像の時間軸を前後させることでモニタを覗いた先の人や物が変形して見える。これらのように、コンピュータだからこそできる現実感の拡張、もしくは仮想世界の構築がメディアアートの醍醐味の1つといえる。

本論文で紹介する作品“るつぼ”は、流体シミュレーション技術と映像キャプチャリング技術を用いて、人間が水やゼリーのような質感に変わって変形し、次々と堆積してゆくという新感覚インタラクティブメディアアート作品である。本作品は岩井⁵⁾が時間に着目した変形を行ったのに対し、流体力学などにおける物理法則に着目して変形を行ったことが独自性のポイントとなっており、さらにKawaguchi²⁾が用いたものと同様の画像処理システムを用いてインタラクティブ性を付加することで新しい体験を生み出す作品となっている。

メディアアートの世界に近年目覚ましい発展をとげてきた物理シミュレーションの技術に応用することによって、メディアアートの可能性はより高まり、我々にこれまでにないまったく新しい体験をさせてくれると考えられる。

2. 実装

2.1 展示概要

展示の概略図を図1に示す。人間をDVカメラでキャプチャし、その姿を水やゼリーなどの質感に変えるための計算をPC上で行い、巨大な水槽の中に水やゼリーと化した人々が衝突し、混ざり合いながら堆積してゆく様子がプロジェクタからスクリーン上に投影される。

2.2 SPH法

流体シミュレーションにはSPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法を用いた^{3),4)}。

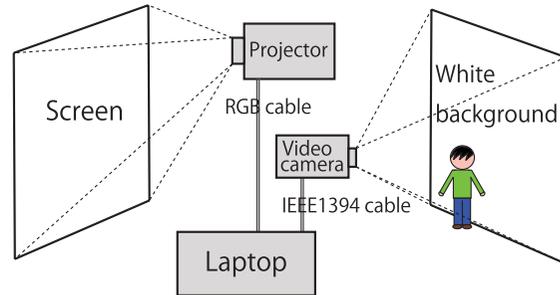


図 1 展示設備概略図
Fig. 1 Floorplan overview of a demo.

SPH 法は粒子法の 1 つであり、流体を粒子の集まりとして計算する．ここでは計算の高速性を重視し、非圧縮性を考慮せずに計算を行う．すなわち、以下の運動量保存の式を離散化する．直接的には非圧縮の式を解かないが、圧力係数を高くとることによって擬似的に非圧縮性が表現されることになり、水のような挙動が表現できる．

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \nu\nabla^2\mathbf{u} + \mathbf{f} \quad (1)$$

ここで、 ρ 、 \mathbf{u} 、 P 、 ν 、 \mathbf{f} はそれぞれ流体の密度、速度、圧力、動粘性係数、流体にかかる外力である．本作品では外力は重力のみとした．以下の式により各粒子の密度 ρ_i と圧力 p_i を求め、圧力項による力 f_i^{press} と粘性項による力 f_i^{vis} をそれぞれ陽的に求める．また、粒子速度と位置の時間積分には一次のシンプレクティックスキームを用いた．

$$\rho_i = \sum_j m_j W_{rho}(\mathbf{r}_{ij}) \quad (2)$$

$$p_i = k(\rho_i - \rho_0) \quad (3)$$

$$\mathbf{f}_i^{press} = \sum_j m_j \frac{p_j - p_i}{2\rho_j} \nabla W_{press}(\mathbf{r}_{ij}) \quad (4)$$

$$\mathbf{f}_i^{vis} = \mu \sum_j m_j \frac{\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i}{\rho_j} \nabla^2 W_{vis}(\mathbf{r}_{ij}) \quad (5)$$

ここで、 m_j は流体粒子の質量、流体粒子 i, j の位置ベクトルをそれぞれ $\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j$ として $\mathbf{r}_{ij} = \mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i$ 、 k^{press} は圧力係数、 μ は流体の粘性係数、 ρ_0 は密度の閾値である． W_{rho} 、 ∇W_{press} 、 $\nabla^2 W_{vis}$ は重み関数であり、様々な式が提唱されているが、本作品では以下の式

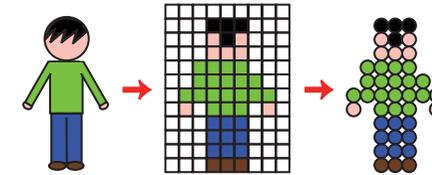


図 2 画像キャプチャから粒子生成までの説明図．まず人間を左図のようにキャプチャし、中央図のようにピクセル化する．色が背景壁と異なる要素をオブジェクト要素と見なし、各オブジェクト要素を右図のように粒子化する
Fig. 2 An explanatory illustration of workflow from image capturing to generation of particles. First of all, we capture the image of human as shown in left figure, and then pixelize as shown in center figure. Then we generate particle as shown in right figure, identifying pixels which have the color different from the background wall as object pixels.

に従って実装した³⁾．

$$W_{rho}(\mathbf{r}_{ij}) = \frac{315}{64\pi r_e^9} (r_e^2 - |\mathbf{r}_{ij}|)^3 \quad (6)$$

$$\nabla W_{press}(\mathbf{r}_{ij}) = -\frac{45}{\pi r_e^6} (r_e - |\mathbf{r}_{ij}|)^2 \frac{\mathbf{r}_{ij}}{|\mathbf{r}_{ij}|} \quad (7)$$

$$\nabla^2 W_{vis}(\mathbf{r}_{ij}) = \frac{45}{\pi r_e^6} (r_e - |\mathbf{r}_{ij}|) \quad (8)$$

ここで r_e は影響半径であり、 $|\mathbf{r}_{ij}| \geq r_e$ の条件を満たす場合、上式のすべての重み関数の値は 0 とする．

2.3 画像認識と粒子生成

人や物体の映像のキャプチャには、背景差分法を用いた．カメラでキャプチャした映像を幅 × 高さ = 64 × 96 の要素に分割（ピクセル化）し、各要素において RGB それぞれの値を 0 から 1 に正規化する．本作品をセットアップする前段階として、キャプチャする範囲に白い壁を作っておくと、人間が入っていなければ白い壁だけが映るので、RGB それぞれの値がほぼ 1 になる．そこで、閾値を 1 に近い値に定め、RGB のすべての値が閾値より小さい値のときそこには人間が入っていると判断し、その要素をオブジェクト要素とする．各オブジェクト要素を 1 つの粒子と見なし、SPH 計算を行う．画像認識から粒子生成までの流れを図 2 に示す．

本作品における計算の全体の流れを図 3 に示す．

2.4 バネモデルを用いたゼリーの質感表現

水のような挙動だけでなく、ゼリーのような柔らかい挙動を表現できるように応用した．

オブジェクトをキャプチャした直後に近傍粒子をバネでつなぐことによってゼリーの質感を表現する．通常バネで弾性体を表現するとき，ダンパを組み合わせた減衰項を持つ計算モデルを用いるが，本作品ではバネの力に加えて流体と同様に圧力と粘性による力を計算することによって，ダンパを用いなくても力を減衰させ，さらに圧力による反発力によってゼリーどうしの衝突を表現することができる．ゆえに，粒子 i がバネでつながった近傍粒子 l から受ける力 f_i^{spr} は以下の式で表される．SPH による力を計算した直後にバネによる力を計算し，その後時間積分を行い粒子の速度と位置を更新する．

$$f_i^{spr} = - \sum_l k(|r_{il}| - r_{0il}) \frac{r_{il}}{|r_{il}|} \quad (9)$$

ここで k はバネ定数， r_{0il} は粒子 i, l の平衡距離である．

2.5 安定した計算のための工夫

本作品では，水槽のように矩形の計算領域を設けてその中に流体やゼリーと化した人間が堆積していくが，粒子数が増えていくにつれて計算が発散する可能性が大きくなる．そこで，シミュレーションステップの中に以下に示す 2 つの工夫を施した．

2.5.1 境界付近の挙動

水槽境界では，境界にめり込んだ粒子の位置を境界まで強制的に位置変更したうえで，粒子の境界法線方向の速度成分を 0 とし，それ以外の速度成分も適宜減衰させる（本作品では，境界と平行な速度成分を 0.5 倍などとした）．これは，壁境界での摩擦を簡易的に考慮していることになり，境界条件により速度誤差が蓄積して計算が発散するのを抑えることができる．本作品では，この境界条件によりペナルティ法を用いるよりも安定な結果が得られた．視覚的には，速度が突然減少することにより壁付近の一部の粒子の挙動に不自然さが見

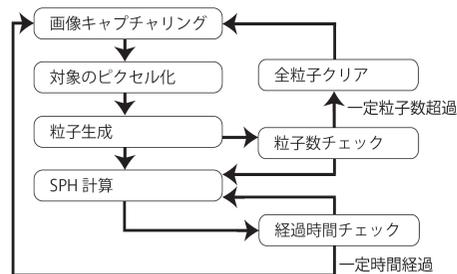


図 3 計算の概略フローチャート

Fig. 3 Flowchart of the calculation pipeline.

られたが，全体としての流体の挙動に大きな影響はなかった．

2.5.2 水深が深い部分の挙動

ある程度粒子が溜まってくると，水深が深い部分の粒子は圧力誤差が蓄積して計算が発散することがある．そこで，水深が深い部分の粒子速度を恣意的に減衰させる（本作品では全方向の速度成分を深さに応じて 0.5 倍などとした）．これは水深が深い部分の粒子の粘性を上げることと類似した処置であり，処置を行わないときよりも発散を抑えることができた．底の方の流体が固まって見えるため物理的には不自然な挙動となるが，本作品では人々が堆積することでできた模様が固定されることになるため，視覚的に面白い効果にもなっている．

3. 結 果

C++と OpenGL で実装・描画を行った．重力下で水槽に堆積するように粒子計算した．描画の際，粒子は陰影なしの二次元円とし，さらにその円を六角形で近似することによって高速に描画を行った．プロセッサ Core 2 T7200 (2 GHz)，メモリ 1 GB × 2，OS Windows XP を搭載したノートパソコン 1 台でリアルタイムに計算することができた．粒子数と fps の関係を図 4 に示す．10 fps 前後になると人間の目にはやや動作がぎこちなく見えるので，粒子数が 10 fps を下回るまで増えたあたりで粒子をいったんすべてクリアし，再び計算を開始した．2007 年 12 月に開催された東京大学制作展 “iii exhibition 8” において本作品を展示した様子を図 5，図 6 に示す．この展示では計算時間の関係から，粒子数をあまり増やさないようにオブジェクトのピクセル化を 64×96 というあまり多くない要素数で行ったため，スクリーンに映された映像が若干粗くなっているが，粒子法の GPU による高速化が

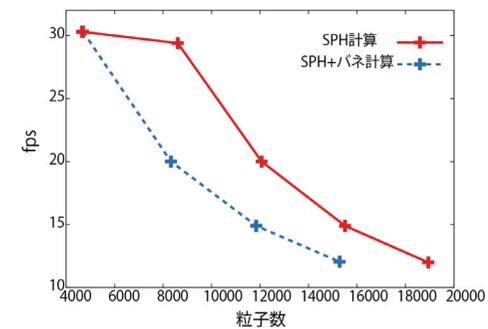


図 4 粒子数-fps グラフ

Fig. 4 The graph relating the number of particles to frames per second.



図 5 水のような質感を持つ人間。左図が“iii exhibition 8”での展示の写真で、右図が PC から直接映像を切り出したもの

Fig.5 Demo1; People deform like water. The left figure is a photo at “iii exhibition 8”, and the right figure is an image extracted from laptop directly.



図 6 ゼリーのような質感を持つ人間。“iii exhibition 8”での展示の写真

Fig.6 Demo2; People deform like jelly. This is a photo at “iii exhibition 8”.

Harada ら¹⁾によって提唱されており、このような技術を本作品に応用すればより細かい対象のピクセル化と精緻な粒子の描画が可能となるだろう。

4. おわりに

来場客の反応としては、「気持ち悪いが面白い」また、逆に「気持ち良い」と様々な意見が得られた。体が非現実的な挙動を示す仮想空間ならではの体験は、人に何らかの斬新な快感を与えることができたと思う。現在ではいくつかのセカンドライフ表現のように仮想空間内で現実に類似した経験をすることもできるが、本研究のように現実とは異なる新しい経験を与えることもこれからのバーチャルリアリティの重要な役割であると思われる。新しい刺

激を受け続けることで、人間の感性は多角的に磨かれていくのではないだろうか。

謝辞 本研究を援助して下さった JST CREST に感謝します。また、本作品の作成、展示を支援して下さったすべての制作展メンバに感謝します。

参考文献

- 1) Harada, T., Koshizuka, S. and Kawaguchi, Y.: Smoothed particle hydrodynamics on GPUs, *Proc. Computer Graphics International*, pp.63–70 (2007).
- 2) Kawaguchi, Y.: Gemon Dance, *ACM SIGGRAPH 2006 Art Gallery*, p.113 (2006).
- 3) 越塚誠一：粒子法シミュレーション—物理ベース CG 入門，培風館 (2008).
- 4) Monaghan, J.: Smoothed particle hydrodynamics, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, Vol.30, pp.543–574 (1992).
- 5) 岩井俊雄：マシユマロスコープ (2002). ICC オープン・スペース 2008 など展示。

(平成 20 年 10 月 10 日受付)

(平成 21 年 1 月 7 日採録)



平戸 淳正

昭和 59 年生。平成 19 年東京大学工学部システム創成学科 SIM コース卒業。同年東京大学大学院学際情報学府入学。平成 20 年 4 月修士課程 2 年。刺胞動物を中心とした水棲生物の運動シミュレーションとコンピュータグラフィックスの研究に従事。



河口洋一郎 (正会員)

昭和 27 年生。昭和 53 年東京教育大学大学院 (現、筑波大学大学院) 修了。平成 4 年筑波大学芸術学系助教。平成 10 年東京大学大学院工学系研究科・人工物工学センター教授。平成 12 年東京大学大学院情報学環教授。昭和 50 年から CG に着手し、世界的 CG アーティストとして活躍中。第 100 回ベネチアビエンナーレ日本代表芸術家に選ばれる。ACM-SIGGRAPH, ASIAGRAPH, 日本バーチャルリアリティ学会等各会員。