

粒子ベース伸縮変形体-流体連成シミュレーション

平戸 淳正^{†1} 河口 洋一郎^{†2}

流体と剛体/弾性体の連成シミュレーションはコンピュータグラフィックスの分野で大きな課題の1つである。本論文では、物体の大変形を容易に扱うことができる粒子ベースの計算モデルを用いた伸縮変形体-流体連成シミュレーション手法を提案する。本手法では、SPH法による流体シミュレーションとバネマスモデルによる伸縮変形体シミュレーションを連成して計算を行う。バネの距離に応じて粒子が保持する密度の閾値を変化させることにより、近傍粒子が密になるときは粒子径を小さくし、逆に疎になるときは粒子径を大きくするというような計算と同等の効果が得られ、粒子法の大きな問題点の1つである物体が膨張したときの粒子のすり抜けを起りにくくすることができる。本手法を用いて、伸縮によって様々な密度変化する物体と流体との連成をシミュレーションすることができた。

Particle-based Coupling Simulation of Telescopic Deformable Objects and Fluids

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

The coupling simulation of fluid and rigid/elastic body is one of the most important problems in the field of the computer graphics. In this paper, we propose a simulation method of coupling of fluids and telescopic deformable bodies with particle-based manner which is easy to deal with large deformation of objects. When we calculate coupling of them by the proposed technique, we use the SPH method for simulating fluids and use a mass-spring model for telescopic deformable bodies. In our method, the density threshold values of the particles are changed according to connected-spring distance, and that is equal with calculation that the particle diameter is reduced when the neighboring particles become dense and the diameter is enlarged when becoming sparse oppositely. Hence we can inhabit penetration between particles which is one of the most crucial problems of particle-based simulation when the object is expanded. We succeeded in simulating coupling of fluids and objects which are changed the density by being contracted and expanded.

1. はじめに

流体-剛体または流体-弾性体の連成シミュレーションは、映画やコンピュータゲームにおけるCGアニメーションや、船舶工学、生体シミュレーションなど様々な分野に応用できるため、これまで非常に多くの研究がなされてきた。その中で、流体や剛体、弾性体のシミュレーションには物体の大変形に対応しやすい粒子ベースの手法が広く使われている。田中ら¹⁰⁾は完全に粒子ベースの流体-剛体連成シミュレーションを提案した。Génévauxら²⁾の手法では、流体に粒子法を用い、剛体をバネ係数を高く設定したバネマスモデルで近似している。また、粒子ベースのシミュレーションは近年GPUを用いた並列計算が進展しており、将来的に計算の高速化を見込むことができる。しかし粒子ベースの流体-弾性体連成シミュレーションは粒子のすり抜けなどの問題点があり、とりわけ大きく伸縮する対象を扱うことが困難であったため、既存の研究では流体だけ粒子、弾性体は有限要素法で解くなどの工夫がなされてきた。田中ら⁹⁾の例では、弾性体表面を三角形要素で区切ったメッシュを用いることで弾性体への流体粒子の侵入を防いでいる。本研究では、伸縮可能性と計算コストに焦点を当て、大きく伸縮する弾性体を粒子ベースのモデルだけで統一的に計算することで、粒子と面の衝突判定などのコストの大きな計算を必要としない手法を提案する。

2. 関連研究

弾性体と流体の連成は今なお困難な問題の1つであり、研究例としてはChentanezら¹⁾による格子ベース流体シミュレーションと有限要素法による弾性体の連成手法がある。本研究ではすべてのオブジェクトを粒子ベースで統一的に扱い、伸縮変形体の計算にバネマスモデル、流体計算に粒子法を用いる。バネマスモデルは変形体・弾性体のシミュレーション方法の1つのアプローチとして発展しており、Provotら⁸⁾など多くの研究者がバネマスモデルを用いた変形体の計算手法を進展させている。バネマスモデルは微小変形における応力と工学ひずみが比例するというフックの法則に基づいたモデルであり、物理的な厳密性に欠けるが実装が容易で計算コストが低いことが大きな特徴である。あまり変形が大きくなればフックの法則が良い近似となるため、物理的な信頼性も高くなる。

^{†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

粒子ベース流体シミュレーション手法として、現在 SPH 法や MPS 法が広く使われている。MPS 法は非圧縮性流体の解析のために Koshizuka ら⁵⁾ によって開発されたものであり、粒子数密度を一定に保つことで連続の式を満たしている。SPH 法は圧縮性流体の解析のため Monaghan⁶⁾ によって開発されたものであり、オリジナルの SPH 法では連続の式を厳密に解かない代わりに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することができ、水のような挙動が表現できる。SPH 法は計算負荷が比較的低いため、CG アニメーションなどの目的で用いられることが多い。また粒子法は並列計算によって高速化しやすい性質を持っており、Harada ら³⁾ は GPU を用いて SPH 法を高速化することに成功している。

3. 実装

3.1 流体のシミュレーション

3.1.1 SPH 法

流体シミュレーションには SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法を用いた。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。非圧縮性流体の挙動は以下の連続の式と運動量保存の式に従う。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

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

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。

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。圧力項と粘性項の対称化には、Müller ら⁷⁾ による式を用いた。また、粒子速度と位置の時間積分には越塚ら⁴⁾ による記述に従い、一次のシンプレクティックスキームを用いた。

$$\rho_i = \sum_j m_j W_{rho}(\mathbf{r}_{ij}) \quad (3)$$

$$p_i = k^{press} (\rho_i - \rho_0) \quad (4)$$

$$\mathbf{f}_i^{press} = \sum_j m_j \frac{p_i + p_j}{2\rho_j} \nabla W_{press}(\mathbf{r}_{ij}) \quad (5)$$

$$\mathbf{f}_i^{vis} = \mu \sum_j m_j \frac{\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i}{\rho_j} \nabla^2 W_{vis}(\mathbf{r}_{ij}) \quad (6)$$

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、本研究では Müller ら⁷⁾ と同様の式を用いた。

3.1.2 壁境界条件

SPH 法の計算による粒子速度と位置の更新が終わった後、壁にめり込んだ粒子の座標を壁から 0 距離の位置まで強制的に修正した。また、ノンスリップ条件から、めり込んだ粒子の速度を 0 とした。このような境界条件設定は物理的な厳密性に欠けるが、境界での数値発散が起りにくい。このような境界条件を設定しても、経験的に全体的な流体の挙動がおおむね正しく計算できているため、シミュレーションの目的として壁境界における流体の挙動があまり重要でない場合はこのような簡易境界条件は有用である。

3.1.3 近傍粒子探索

近傍粒子の探索にはバケット法を適用し、計算の高速化を図った。バケット法は、事前に計算空間をバケットと呼ばれる格子に分割してすべての粒子をバケットに格納し、粒子 i と衝突している粒子を粒子 i が存在するバケットと隣接するバケットから探すことで探索のコストを大幅に下げることができる。

3.2 伸縮変形体シミュレーション

3.2.1 バネダンパモデル

ある粒子から接続半径 h_{spr} 内にある粒子をすべてバネでつないでバネマスモデルを構成した。 h_{spr} の値は、初期平均粒子間距離を l_{avr} とすると経験的に $h_{spr} = 1.5l_{avr}$ 以上が適している。

力の計算は、バネに減衰項としてダンパを加えた以下の式を用いる。粒子 i がバネでつながった近傍粒子 q から受ける力 F_i^{spr} は式 (7) で表される。

$$\mathbf{F}_i^{spr} = \sum_q -k(|\mathbf{r}_{iq}| - r_0) \frac{\mathbf{r}_{iq}}{|\mathbf{r}_{iq}|} + d \frac{\Delta l_{iq}}{\Delta t} \frac{\mathbf{r}_{iq}}{|\mathbf{r}_{iq}|} \quad (7)$$

ここで k はバネ係数、 d はダンパ係数、 Δl_{iq} は粒子間距離の変化分、 r_0 は粒子 i, q の平衡距離である。本研究では Δl_{iq} の計算には風下差分を用いた。すなわち、現計算ステップ n での速度 \mathbf{v}_i^n を用いて次の時間ステップ $n+1$ の位置を $\mathbf{r}_i^{n+1} \doteq \mathbf{r}_i^n + \mathbf{v}_i^n \Delta t$ と見積も

り, その値から $n + 1$ の時点での粒子間距離を求め, その値と現在の値の差分を Δl_{iq} とする. 風下差分を用いることで, 粒子間距離の値をメモリに保持しておく必要がなくなる.

3.2.2 粒子径の設定

伸縮変形体が最大 n 倍まで伸びる, または膨張することが見込まれるとき, 伸縮変形体の初期粒子径は流体の粒子径の $1/n$ 以下とすると良い. 本手法では 3.2.3 項で述べるように, 伸びに比例して密度の閾値を変化させることで擬似的に粒子径の大きさを変化させるような計算を行うため, たとえば物体の初期粒子径を流体粒子の $1/n$ と設定すると, 物体が n 倍まで伸びたときにちょうどその粒子径が流体粒子と同程度のスケールとなり, 物体への流体粒子の侵入が起こりにくくなる.

3.2.3 密度閾値の増減

粒子 i と近傍粒子 q について, バネの現在位置と初期位置での長さの逆比 $r_{0iq}/|r_{iq}|$ に重み関数 $W_{lens}(r_{iq})$ を掛けて和をとったものが式 (8) であり, 重み関数が正規化されていないため重み関数の和で割っている. 距離が近いほど影響が大きくなると考えて, 本研究では式 (9) のように初期粒子間距離に近いほど重み関数が大きくなるよう設定した. 三次元の計算空間を扱う場合, 密度変化は長さ変化の 3 乗となるため, 粒子 i の密度閾値 ρ_0 の倍率は式 (10) のようになる. この値を ρ_0 に掛けることによって, 粒子径が $1/L^{leng}$ 倍, 粒子質量が L^{dens} 倍になった粒子と同等の扱いになり, 式 (4) から圧力にも影響するので, それに従って圧力項から受ける力も増減する. その結果, 4.2 節で述べるように密度の変化による浮力の変化も表現できることになる.

$$L_i^{leng} = \frac{\sum_q (r_{0iq}/|r_{iq}|) W_{lens}(r_{iq})}{\sum_q W_{lens}(r_{iq})} \quad (8)$$

$$W_{lens}(r_{iq}) = 1/r_{0iq} \quad (9)$$

$$L_i^{dens} = (L_i^{leng})^3 \quad (10)$$

3.2.4 衝突検出

固体粒子間で衝突が起こる場合を考える. 本研究では物体は密に配置された粒子の集合でモデル化されているため, 衝突は単純に粒子と粒子の衝突として計算することができる.

バネマモデルの自己衝突判定にも, 3.1.3 項で述べたようなバケットの中で判定を行うことで計算を高速化する. 粒子法の衝突判定は粒子間距離が粒子径よりも近くなったときになされるが, 本研究では伸縮する物体を扱うため, 近傍粒子どうしの距離は粒子径よりも

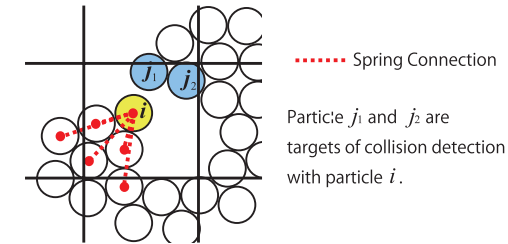


図 1 衝突粒子の検出. 粒子 i と同一バケットにあり, かつバネで接続されていない粒子が粒子 i と衝突している粒子の候補となる

Fig. 1 Detection of colliding particles. Only the particles that are in the same bucket with particle i and not connected to i with springs become candidates for colliding particles with i .

短くなりうる. そこで, バネマモデルの近傍粒子, すなわちバネで接続された粒子は衝突判定から外す. つまり図 1 に示すように, ある粒子 i と衝突判定を行う粒子は, 同じバケット内にあり, かつバネで接続していない粒子 (図では j_1, j_2) のみとなる.

衝突応答にはペナルティ法を適用し, めり込み量に比例した斥力を与えて粒子の速度と位置を更新した. ある粒子の衝突計算を終えると, 別の粒子が新しく衝突してしまっている場合がある. そのため衝突計算は何回かループすることが望まれる. 本研究では, 衝突判定が 1 度も行われなくなるまで伸縮変形体を構成する粒子すべての判定をループした.

3.3 時間積分

計算アルゴリズムの全体の流れを以下に示す. それぞれ \mathbb{F} は流体, \mathbb{T} は伸縮変形体に適用する計算とする. 流体と伸縮変形体のインタラクションは, まず伸縮変形体粒子を流体粒子と同様に計算してからバネの力によって位置を修正する. すなわち, 弱連成によって計算する.

1. \mathbb{F}, \mathbb{T} ; 粒子をバケットに割り当てる
2. \mathbb{F}, \mathbb{T} ; 近傍粒子の探索
3. \mathbb{F}, \mathbb{T} ; 密度 ρ の計算
4. \mathbb{T} ; 密度閾値変化倍率 L^{dens} の計算
5. \mathbb{T} ; $\rho_0 \rightarrow L^{dens} \rho_0$
6. \mathbb{F}, \mathbb{T} ; 圧力 p を計算
7. \mathbb{F}, \mathbb{T} ; 圧力項による力 f^{press} を計算
8. \mathbb{F}, \mathbb{T} ; 粘性項による力 f^{visco} を計算

9. \mathbb{T} ; バネの力 F^{spr} 計算

10. \mathbb{F}, \mathbb{T} ; 外力項 (重力) F^{ex} 計算

11. \mathbb{F}, \mathbb{T} ; $\mathbf{a}(t) \rightarrow \mathbf{a}(t + \Delta t)$

12. \mathbb{F}, \mathbb{T} ; $\mathbf{v}^*(t + \Delta t) = \mathbf{v}(t) + \mathbf{a}(t + \Delta t)\Delta t$

13. \mathbb{F}, \mathbb{T} ; $\mathbf{x}^*(t + \Delta t) = \mathbf{x}(t) + \mathbf{v}(t + \Delta t)\Delta t$

14. \mathbb{T} ; 固体粒子どうしの衝突判定ループ

$$\mathbf{x}^*(t + \Delta t) \rightarrow \mathbf{x}^{**}(t + \Delta t), \mathbf{v}^*(t + \Delta t) \rightarrow \mathbf{v}^{**}(t + \Delta t)$$

15. \mathbb{F}, \mathbb{T} ; 壁境界条件

$$\mathbf{x}^{**}(t + \Delta t) \rightarrow \mathbf{x}(t + \Delta t), \mathbf{v}^{**}(t + \Delta t) \rightarrow \mathbf{v}(t + \Delta t)$$

以上の操作をループすることでシミュレーションを行う。

4. 結果

本手法を用いて様々な実験を行った。流体に用いたパラメータは、初期平均粒子間距離 $l_{avr} = 1.0 \text{ m}$, 影響半径 $r_e = 1.5l_{avr}$, 密度 $\rho = 1,000 \text{ kg/m}^3$, 圧力係数 $k^{press} = 2.2 (\text{m/s})^2$, 動粘性係数 $\nu = 0.3 \text{ m}^2/\text{s}$, また重力加速度 $g = 6.0 \text{ m/s}$ とした。3.1.1 項で述べた離散化手法は計算はコストが低く実装も容易であるが、非圧縮性流体の近似式としては大雑把なものであるため、パラメータにも厳密に現実と同じような値は用いず、水のシミュレーションとして視覚的に良好な挙動を示すものを用いていることに注意する。

4.1, 4.2, 4.3 節の各実験で 3.3 節で述べたシミュレーションループ 1 回あたりにかかった計算時間は、それぞれ平均 0.28 s, 0.12 s, 0.87 s であった。用いたコンピュータは OS: WindowsXP, CPU: Intel Core2 6700 2.66 GHz, RAM: 2.00 GB である。

4.1 ゴム膜と流体

粒子を 3 層に重ねた膜に流体を注ぎ込む実験を行った。結果を図 2 に示す。上段は提案手法を用いたもの。中段はその断面図。下段は従来のバネマスモデルを用いたもの。粒子は初期粒子径で描画を行った。また、膜の縁粒子の座標値は計算空間内に固定されている。提案手法を用いて、膜が流体力によって引き伸ばされても粒子のすり抜けが起こらないようにすることができた。3.2.3 項で述べた密度閾値変化の操作を施さなければ、初期配置で粒子が密に詰まっても、バネが伸びた際にその隙間から粒子のすり抜けが起こってしまう。

4.2 流体中に落下する伸縮直方体

流体中の直方体を伸縮させる実験を行った。直方体を構成する粒子をつなぐすべてのバネに対してバネと平行でバネを近づける側の方向に力を加えることで伸縮させる。このように

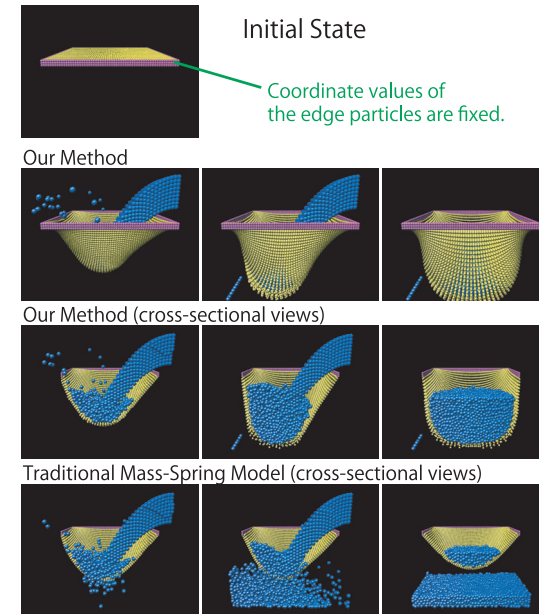


図 2 伸縮するゴム膜と流体とのインタラクション。初期設定した伸縮変形体のパラメータは以下のとおり。粒子径 = 流体の粒子径 $\times 0.5$, 初期比重 1.1, バネ係数 $k = 30.0 \text{ N/m}$, ダンパ係数 $d = 10.0 \text{ Ns/m}$, バネの接続半径 $h_{spr} = 2.1l_{avr} \text{ m}$

Fig. 2 Interaction of a telescopic rubber membrane and a fluid. The default parameter values for the telescopic deformable object are as follows: particle diameter = fluid particle diameter $\times 0.5$, initial specific gravity = 1.1, spring coefficient $k = 30.0 \text{ N/m}$, damper coefficient $d = 10.0 \text{ Ns/m}$, and spring connection radius $h_{spr} = 2.1l_{avr} \text{ m}$.

することで、環境によらずオブジェクトの形状を維持しながら自由に伸縮を表現することができる。結果を図 3 に示す。横軸は時間、縦軸は伸縮させるために加えた力を表す。粒子は初期粒子径で描画を行い、流体粒子のみ水槽断面を表示した。この図は以下の状況を示している。

- ① 初期状態。伸縮のための力がかかっていない。
- ② 流体中に落下。比重が 0.7 であるため、水面に浮遊している。
- ③ 収縮する力がかかり、直方体が縮む。
- ④ 縮んだことにより密度が上がり、水の底に沈む。

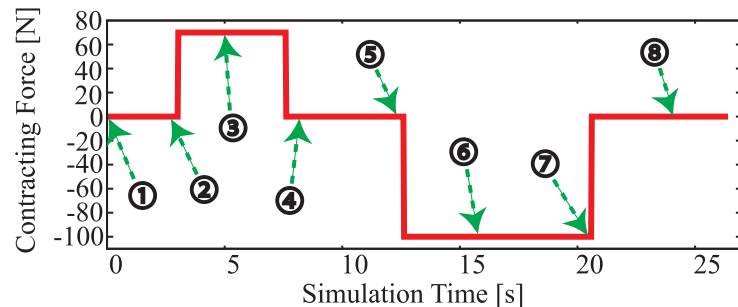
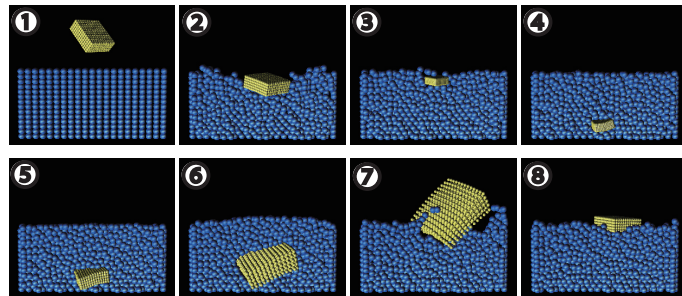


図3 流体中に落下し伸縮する直方体．初期設定した伸縮変形体のパラメータは以下のとおり．粒子径 = 流体の粒子径 $\times 0.5$ ，初期比重 0.7，バネ係数 $k = 10.0 \text{ N/m}$ ，ダンパ係数 $d = 15.0 \text{ Ns/m}$ ，バネの接続半径 $h_{spr} = 2.4l_{avr} \text{ m}$

Fig. 3 A telescopic rectangular solid falls into fluid. The default parameter values for the telescopic deformable object are as follows: particle diameter = fluid particle diameter $\times 0.5$, initial specific gravity = 0.7, spring coefficient $k = 10.0 \text{ N/m}$, damper coefficient $d = 15.0 \text{ Ns/m}$, and spring connection radius $h_{spr} = 2.4l_{avr} \text{ m}$.

- ⑤ 収縮力から解放され，直方体の体積が元に戻っていく．
- ⑥ 膨張する力がかかり，直方体が膨らむ．
- ⑦ 膨らんだことにより密度が下がり，水面に浮上する．
- ⑧ 膨張力から解放され，直方体の体積が元に戻っていき，再び水面に浮遊する．

以上のように，提案手法を用いて伸縮変形体と流体のインタラクション，また，伸縮による密度変化ともなう浮力の変化を粒子の統一モデルで表現することができた．

4.3 応用：クラゲの環状筋の収縮

伸縮変形体を筋肉に応用し，水中のクラゲの噴出推進をシミュレーションした．図4に

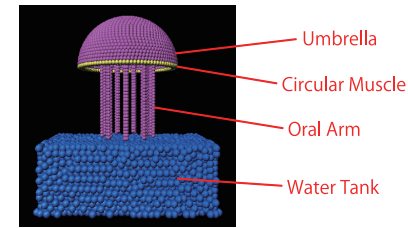


図4 簡易化したクラゲの粒子ベース計算モデル
Fig. 4 A particle-based calculation model of a simplified jellyfish.

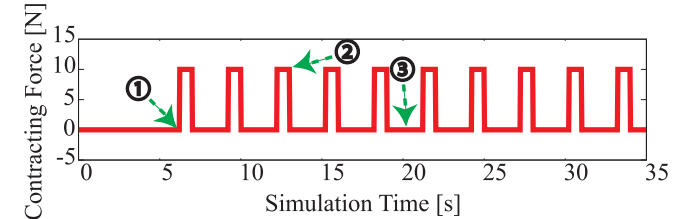
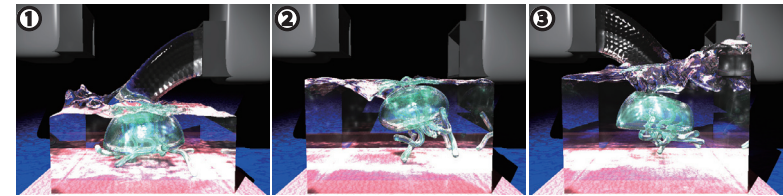


図5 クラゲのシミュレーション．初期設定した伸縮変形体のパラメータは以下のとおり．粒子径 = 流体の粒子径 $\times 0.5$ ，初期比重 1.1，バネ係数 $k = 50.0 \text{ N/m}$ ，ダンパ係数 $d = 10.0 \text{ Ns/m}$ ，バネの接続半径 $h_{spr} = 4.1l_{avr} \text{ m}$

Fig. 5 Simulation of a jellyfish. The default parameter values for the telescopic deformable object are as follows: particle diameter = fluid particle diameter $\times 0.5$, initial specific gravity = 1.1, spring coefficient $k = 50.0 \text{ N/m}$, damper coefficient $d = 10.0 \text{ Ns/m}$, and spring connection radius $h_{spr} = 4.1l_{avr} \text{ m}$.

粒子モデルを示す．クラゲの傘は粒子を2層に重ねた膜とする．クラゲは傘の縁にある環状筋をパルス状の力を加えて伸縮させることで噴出運動を行う．環状筋に加えた力とシミュレーション結果は図5に示す． $t = 3.0 \sim 10.0 \text{ s}$ で図の右側の蛇口から水を流入させ， $t = 15.0 \sim 25.0 \text{ s}$ で左側の蛇口から流入させた．レンダリングにはPOV-Rayを用いた (<http://www.povray.org/>)．粒子の座標情報をもとに，クラゲの傘と流体はメタボール，ク

ラゲの口腕の描画は B-スプライン曲線によってそれぞれ描画した。

5. おわりに

本論文では、粒子モデルで統一的に伸縮変形体と流体のインタラクションを計算するための計算モデルとアルゴリズムを提案した。結果に示されたように、本手法により粒子法の大きな欠点の1つである粒子のすり抜けが起こりにくくなり、伸縮変形体と流体の連成シミュレーションを CG アニメーションに応用することもできた。

しかし、本手法は粒子のすり抜けを完全に防ぎきるものではない。想定外に大きな粒子間距離の伸びが起こったり、時間刻み幅を大きくとりすぎた場合は粒子のすり抜けが起こることがある。その場合、伸縮変形体の粒子をより細かくとるか、時間刻み幅を減少させるなどの措置によって解決することができる。また、本手法は伸縮変形する薄膜と流体の連成シミュレーションを苦手としている。なぜなら、ある流体粒子から見て影響半径が薄膜の後ろ側にまで及ぶ場合、圧力項による力などが小さく計算されてしまい、粒子のすり抜けが起こる要因となってしまうからである。そこで、膜と流体を連成計算したい場合は 4.1 節の例のように膜の粒子を何層にも重ねなければならない。薄膜と流体の完全な粒子ベースの連成計算は、本研究の将来の課題の1つである。

謝辞 本研究を援助して下さった JST CREST に感謝します。

参考文献

- 1) Chentanez, N., Goktekin, T.G., Feldman, B.E. and O'Brien, J.F.: Simultaneous Coupling of Fluids and Deformable Bodies, *ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, pp.83-89 (2006).
- 2) G enevaux, O., Habibi, A. and Dischler, J.-M.: Simulating Fluid-Solid Interaction, *Graphics Interface*, pp.31-38 (2006).
- 3) Harada, T., Koshizuka, S. and Kawaguchi, Y.: Smoothed particle hydrodynamics on GPUs, *Proc. Computer Graphics International*, pp.63-70 (2007).
- 4) 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).
- 5) Koshizuka, S. and Oka, Y.: Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible flow, *Nuclear Science and Engineering*, Vol.123, pp.421-434

(1996).

- 6) Monaghan, J.: Smoothed particle hydrodynamics, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, Vol.30, pp.543-574 (1992).
- 7) M uller, M., Charypar, D. and Gross, M.: Particle-Based Fluid Simulation for Interactive Applications, *Proc. 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, Eurographics Association, pp.154-159 (2003).
- 8) Provot, X.: Deformation Constraints in a Mass-Spring Model to Describe Rigid Cloth Behavior, *Proc. Graphics Interface '95*, pp.147-154 (1995).
- 9) 田中正幸, 越塚誠一: 粒子法を用いた赤血球の変形シミュレーション, *ながれ*, Vol.26, No.1, pp.49-55 (2007).
- 10) 田中正幸, 酒井幹夫, 越塚誠一: 粒子ベース剛体シミュレーションと流体との連成, *Transactions of JSCES*, No.20070007 (2007).

(平成 20 年 10 月 20 日受付)

(平成 21 年 2 月 3 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授。平成 10 年東京大学大学院工学系研究科・人工工学センター教授。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。