

皮膚表面上を流れ落ちる血液のビジュアルシミュレーション

上田 和英 大野 義夫 藤代 一成

慶應義塾大学 理工学部 情報工学科

1 背景と目的

近年、コンピュータグラフィックスは、映画などの映像制作現場において多く用いられている。特に流体に関しては、物理法則に基づくシミュレーションによって視覚的リアリティの高い表現ができる。CG 映像作品において、液体の挙動は大きなインパクトをもっており、出血シーンもその一つである。出血シーンは、年齢制限が課されることから分かるように血液自体の意味合いも強く重要なシーンであり、そこで視覚的リアリティを欠くと作品全体の質を下げてしまう。

近年流体シミュレーションの分野において、大きな位相変化を簡単に扱える粒子指向の SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法が広く用いられている。本研究では、SPH 法のナビエ・ストークス方程式に、ファンデルワールス力による吸着力を加えることで皮膚表面を沿う流れや皮膚表面への付着を表現する。さらに、空気との反応による粘性の変化も実装し、血液の硬化作用も考慮できるようにする。また、傷口からの出血は、出血量、傷口の太さなどを考慮した体内の血流モデルを計算することで、より現実に近いモデリングを実現する。

2 手法

2.1 SPH 法

3次元空間の流体の支配方程式は、質量保存則と運動量保存則から構成される:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \mathbf{f}^{\text{pressure}} + \mathbf{f}^{\text{viscosity}} + \mathbf{f}^{\text{adsorb}} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}^{\text{surface}} \quad (2)$$

式(2)をナビエ・ストークス方程式とよぶ。ここで、 ρ を粒子の密度、 \mathbf{v} を速度ベクトルとし、圧力 $\mathbf{f}^{\text{pressure}}$ 、粘性力 $\mathbf{f}^{\text{viscosity}}$ 、表面張力 $\mathbf{f}^{\text{surface}}$ は Müller[1] らのように計算する。

2.2 吸着力

一般的な SPH 法では、液体が物体表面を沿って流れる現象や物体表面への付着を表現できない。これらは物理吸着による現象で、ファンデルワールス力によって吸着が起きている。Clavet

ら [2] は、物体表面を沿って流れる現象を表現するために擬似的に 2 次関数で表された粘着力を与えたが、物理的な根拠はなく物体表面への付着も表現できない。ファンデルワールス力は物体間の距離の 7 乗に反比例する力なので、我々は以下の式により吸着力を加えた:

$$\mathbf{f}_i^{\text{adsorb}} = -\rho \left(k \frac{1}{(d_i - d^{\text{adsorb}})^7} + a^{\text{adsorb}} \right) \mathbf{n} \quad (3)$$

ここで、 d_i は粒子と表面との距離、 d^{adsorb} は表面までの距離に関する定数、 a^{adsorb} は加速度に関する定数、 \mathbf{n} は表面の法線ベクトルである。これによって液体が物体表面を沿って流れる現象や物体表面への付着を表現した。

2.3 硬化

血液は空気と触れると、血小板の働きによって硬化する。本手法では、各粒子の粘性力を空気と触れる時間により変化させる。粘性力は以下の式により計算する:

$$\mathbf{f}_i^{\text{viscosity}} = \sum_j \mu_j m_j \frac{\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i}{\rho_j} \cdot \nabla^2 W(\mathbf{r} - \mathbf{r}_j, h) \quad (4)$$

粘性係数 μ_i を図 1(a) のように変化させることで硬化現象を表現する。また、粒子は血液表面からの距離によって毎ステップ図 1(b) のように 3 段階で区別する。各粒子に硬化タイマーを与え、段階に応じてタイマーを進めることで表面に近い粒子ほど早く硬化させる。

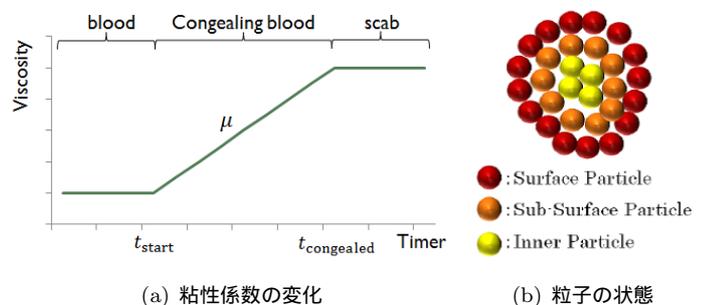


図 1: (a) 空気と触れる時間による粘性係数 μ_i の変化。粒子の硬化タイマーが t_{start} を超えると硬化が始まり、 $t_{\text{congealed}}$ に達すると完全に硬化する。(b) 血液表面からの距離による粒子の状態。表面粒子、表面下粒子、内面粒子の 3 つの状態に区別する。

Visual simulation of bleeding on skin surface
Kazuhide Ueda Yoshio Ohno Issei Fujishiro
Department of Information and Computer Science, Keio University

2.4 刃物による傷口

ユーザが描いたストロークを皮膚表面上に投影することで傷口を生成する。傷口の広さや深さは刃物の種類によって決定する。

傷口から図2のような角錐台の体内血流モデルを生成し、流体シミュレーションを行う。モデル内では皮膚表面の法線方向に加速度を与える。出口ポリゴンに粒子が衝突した場合は出血したとする。

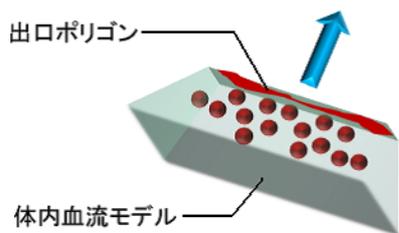


図2: 体内のシミュレーションの様子。青い矢印は粒子に与える加速度である。

2.5 等値面抽出

血液の表面は Adams らのゼロレベルセット法 [3] を用いて定義し、マーチングキューブ法 [4] を用いて表面メッシュを抽出した。

3 実験結果

開発環境として、プロセッサ: Intel Xeon E5540 2.53GHz CPU, 実装メモリ: 12.0GB を用い、C++と OpenGL でモデリングのプログラミングを行った。レンダリングにはオープンソースのレイトレーサである POV-Ray を用いた。

3.1 傷口からの出血

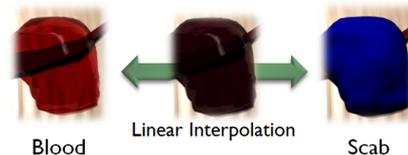
図3では、ユーザが指定した傷口から出血し、皮膚表面を沿うように血液が流れているのがわかる。また、一度流れた筋には血液が付着している様子も観察できる。



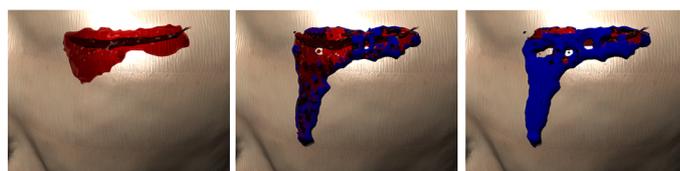
図3: 傷口から出血し、皮膚表面を沿って流れる様子。

3.2 硬化

流れる血液と硬化してかさぶたとなった血液とを区別するために図4(a)のように擬似的に色を変更して可視化した。図4(b)において、先に出血した血液から固まってゆき、傷口付近では出血し続けているので、硬化が遅れている様子が観察できる。



(a) 色と透明度



(b) 硬化現象

図4: (a) 固まる前の血液は半透明の赤、かさぶたは不透明の青とし、その間は色と透明度を線形補間する。(b) 空気との反応により血液の粘性が徐々に高まり、硬化する様子。

4 結論と今後の課題

本研究では、皮膚表面上の血液の流れの再現に SPH 法を用いた。SPH 法に吸着力を追加することで、皮膚表面を沿う流れや、皮膚表面への付着を表現できた。傷口の指定から体内の血流モデルを計算することで、切り傷による出血を再現することができた。

今後の課題としては、体毛と血液の相互作用や、GPU によるアルゴリズムの高速化などが挙げられる。

参考文献

- [1] Müller, M., Charypar, D., and Gross, M.: "Particle-based Fluid Simulation for Interactive Applications," in *Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, pp. 154-159, 2003.
- [2] Clavet, S., Beaudoin, P., and Poulin, P.: "Particle-based Viscoelastic Fluid Simulation," in *Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, pp. 219-228, 2005.
- [3] Adams, B., Pauly, M., Keiser, R., and Guibas, L. J.: "Adaptively Sampled Particle Fluids," *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 26, No. 3, Article 48, 2007.
- [4] Lorensen, W. E., and Cline, H. E.: "Marching Cubes: A High Resolution 3d Surface Construction Algorithm," in *Proceedings of the 14th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pp. 163-169, 1987.