

動的接触角を考慮したインタラクティブな水滴表現法

Interactive Water Drop Modeling Considering Kinetic Contact Angles

佐藤 正記[†] 森谷 友昭[†] 高橋 時市郎[†]
Masaki Sato[†] Tomoaki Moriya[†] Tokiichiro Takahashi[†]

1. まえがき

物理法則を考慮した流体シミュレーションは、自然現象をコンピュータグラフィックス(CG)で表現する上で効果的な手法の一つである。その中でも、液体の写実的な表現は重要なテーマの一つである。

写実的な液体の流れを表現するには計算流体力学の手法を用いることが有効であるが、計算コストが非常に高く、ゲームなどインタラクティブな処理を必要とする環境で用いることは難しい。

これまでに、粒子法を拡張したSmoothed Particle Hydro-dynamics (SPH法)により、インタラクティブに水滴を表現する研究が行われている[1]。しかし、この手法では水滴の形状に大きな影響のある動的接触角を正確に表現し切れていない。

そこで、本研究では、ビデオゲームなどのインタラクティブな処理が必要な環境で用いることができ、かつ動的接触角を考慮した水滴の表現を試みる。

2. 従来手法

安部ら[1]は、水滴をインタラクティブに描画するため、SPH法を拡張し、水滴の接触角を表現するために、界面張力モデルを用いたシミュレーション手法を提案した。固体との界面付近にある粒子の近傍粒子数と、接触線からの距離との関係に着目し、接触線からの距離に応じた力を粒子に界面張力として与えるモデルを考案した。これにより、接触角の異なる水滴形状や、体積の大きい水滴の扁平な形状を表現することを可能にしている。

しかしながら、この手法では、水滴が動く際に現れる動的接触角を考慮していないため、正確さを欠いている。

3. 水滴形状を決定する要素

本章では、接触角を考慮した水滴形状の表現のために、水滴の形状を決定する要素について述べる。水滴の形状は、大量の水の形態とは大きく異なり、界面との接触角と毛管長がその形状を決定する要素となっている。

3.1 接触角

接触角とは、液体がその接する固体表面となす角を指す。固体表面が滑らかであるとき、接触角 θ_E は、ヤング-デュプレの法則により、気体、液体、液体が接する固体表面のそれぞれ2層の間における界面張力の大きさにより一意に決まる。ヤング-デュプレの法則は、次式(1)で表される。

$$\cos \theta_E = \frac{\gamma_{SO} - \gamma_{SL}}{\gamma} \quad (1)$$

ここで、 γ は液体と気体、 γ_{SO} は固体表面と気体、 γ_{SL} は液体と固体表面との間の界面張力である。

本研究では、液体は水、気体は空気と限定する。水滴が接している固体表面の違いによる接触角への影響を考えると、水滴と空気の間働く界面張力は一定の値を取るため、無視することができる。また残る2つの界面張力も水滴が接する固体表面が決定すれば一意に定まる。

3.2 動的接触角

前節で述べた接触角は、液体が固体表面で静止していることが前提である。しかし、液体と固体の界面が動いている場合、接触角の大きさに差異が生じる。これを動的接触角といい、前進している方向の接触角を前進接触角、その反対側の接触角を後退接触角という(図1)[2]。



図1 前進接触角・後退接触角

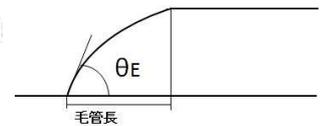


図2 毛管長

3.3 毛管長

水滴(液滴)への重力の影響は、液滴の体積がある範囲を超えない限り支配的とならない。その範囲では界面張力の影響が支配的となる。この範囲を毛管長 κ^{-1} と表す。毛管長 κ^{-1} は、液体密度を ρ 、重力加速度を g とすると、次式で表せる。

$$\kappa^{-1} = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho g}} \quad (2)$$

液滴の高さは接触線から毛管長 κ^{-1} の範囲まで増大していく。また、体積の大きな液滴の場合、液滴の高さは接触線から毛管長 κ^{-1} の範囲まで増大し、それより内側では一定となる(図2)。

水の場合、毛管長 κ^{-1} はおおよそ2.7mmであり、これを超える半径の水滴は扁平な形状を取ることとなる。

4. 提案手法

本研究では、安部らのモデル[1]を参考にSPH法を拡張し、接触角の表現の向上を図る。安部らの手法により水滴形状を形成するのに寄与している粒子群から、接触角の形

[†]東京電機大学大学院 未来科学研究科

Graduate School of Science and Technology for
Future Life, Tokyo Denki University

成に関係している粒子を探査し、進行方向の逆方向に力を加えることで接触角へ影響を与え、動的接触角の表現へとつなげる。

4.1 安部らの界面張力モデル

安部らの界面張力モデル[1]では、粒子*i*の一定範囲内にある粒子の数 N_i^{neighbor} の逆数に、界面張力の強度を調節する定数 k^{ift} をかけたものを界面張力 F_{ij}^{ift} とし、固体表面付近の各粒子に F_{ij}^{ift} を与えている。図3に N_i^{neighbor} を示す。図3のように、 N_i^{neighbor} は接触線付近の粒子で最も小さな値を取り、水滴の内側にある粒子ほど大きな値を取る。よってこれを固体表面付近にある粒子に界面張力として与え、さらに定数 k^{ift} により強度を調整している。

また、水滴の毛管長による扁平形状の表現をするため、 N_i^{neighbor} がある閾値 c 以上の値を持つ粒子の界面張力 F_{ij}^{ift} を0とすることで、接触線付近の粒子にのみ界面張力を与えている。界面張力 F_{ij}^{ift} は次式(3)で表される。 \hat{x}_{ij} は粒子*i*から近傍粒子*j*へ向かう単位ベクトルである。

$$F_{ij}^{\text{ift}} = \left(k^{\text{ift}} / N_i^{\text{neighbor}} \right) \cdot \hat{x}_{ij} \quad (3)$$

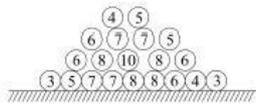


図3 N_i^{neighbor} の例[1]

4.2 動的接触角モデル

本研究で提案する動的接触角モデルでは、界面張力を与えられている粒子*i*について、*i*の速度方向の逆方向に力を加え、それを抵抗力とすることで動的接触角の表現を行う。

粒子*i*の速度方向の単位ベクトル \hat{v}_i と、与えられている界面張力方向の単位ベクトル \hat{f}_i^{ift} の内積をとり、その絶対値に定数 k^{ca} を掛け合わせたものを係数とし、強度を調節する(図4)。 \hat{v}_i と \hat{f}_i^{ift} の内積の絶対値は、粒子*i*に与える抵抗力の比率として作用し、粒子*i*が水滴の前方または後方に位置するほど強く、側面で最少になる。

抵抗力 F_i^{ca} は次式で表される。 \hat{c}_i は進行方向の逆方向の単位ベクトルである。

$$F_i^{\text{ca}} = \left(k^{\text{ca}} \left| \hat{v}_i \cdot \hat{f}_i^{\text{ift}} \right| \right) \cdot \hat{c}_i \quad (4)$$

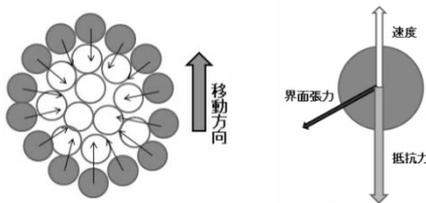


図4 動的接触角モデル

5. 実験

提案手法により、前進接触角と後退接触角が表現されるか検証を行った。実験の結果画像を下の図5に示す。粒子数はいずれも150とし、全体に左に向かって力を加えられたために、粒子が左に移動している最中の画像である。

界面張力を受けている粒子を赤く着色している。

図5より、本手法を適用することで、粒子群の移動の際に動的接触角が作用していることが分かる。特に後退接触角は顕著に表れている。

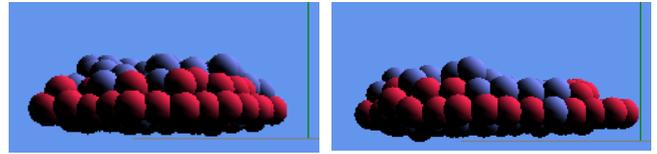


図5 動的接触角の違い

図6は、提案手法において、粒子数を変えたときの平均FPSである。この結果から、粒子数400程度まではインタラクティブな速度で実行できることがわかる。なお実験を行った環境は、CPU : AMD Phenom™ II X6 シックスコア・プロセッサ 1075T 3.00GHz, メモリ : 8.00GB RAM である。

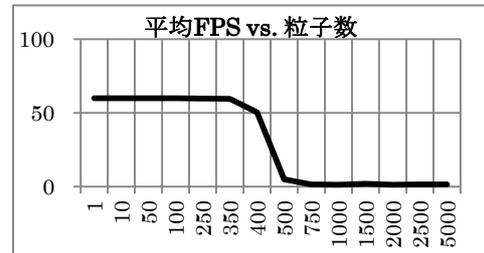


図6 粒子数あたりの平均FPS

提案手法により配置した粒子を、水滴としてレンダリングした。粒子数は250個である。レンダリングには、レイトレーシングソフトウェアPOV-Rayを使用している。図7に、安部らの手法と本提案手法の比較画像を示す。図7左が安部らのレンダリング結果、図7右が本提案手法のレンダリング結果である。

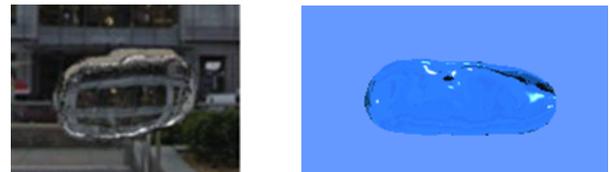


図7 水滴のレンダリング結果の比較

6. むすび

研究では、安部らのモデルをベースにSPH法を拡張し、動的接触角を考慮したインタラクティブな水滴表現の手法を提案した。この手法により、動的接触角が表現可能となり、更にリアリティが向上した水滴の挙動をインタラクティブに表現することが可能となった。

今後は、シミュレーションの高速化を行い、より多くの粒子数でのインタラクティブなシミュレーションを行うことが可能となるよう、検討を重ねる。

参考文献

- [1] 安部拓也, 井村誠孝, 池田聖, 眞鍋佳嗣, 千原國宏: 「水滴表現のための粒子ベース液体シミュレーション」, 映像情報メディア学会誌, Vol.63, No.7, pp.951~956 (2009)
- [2] Specialty Polymer, <http://finepolymer.nof.co.jp/>