

表面の流れを考慮した石鹸泡のシミュレーション

天羽 賢一 松沢 敬一 宮崎 玲 岩崎 慶 西田 友是

東京大学

1. はじめに

薄膜による光学的効果は非常に美しく、興味深い研究対象である。本研究では、石鹸泡のシミュレーションと表示に焦点を当てる。石鹸泡の膜の厚さが可視光の波長付近であるとき、光の波長により干渉が起こり、様々な色の変化を見ることができる。石鹸泡をリアルに表現するためには、表面の液体の流れによる膜の厚さの変化と膜による光の干渉を考慮することが重要となる。本稿では、曲面上での2次元の流体シミュレーションで石鹸泡表面の流れを表現する。また、光の干渉による色の変化を事前に計算しテクスチャとして用いる高速なレンダリング手法を用いて、石鹸泡のリアルな表示を行った。

2. 提案法の概要

石鹸泡表面の厚さの違いにより、光の干渉による複雑な模様ができる。本稿では、石鹸泡表面の流れを表現するために Stam による Catmull-Clark 細分割曲面上での流体シミュレーション[1]を、レンダリングには松沢らによる干渉光の色を前計算により求めテクスチャとして用いる手法[2]を、それぞれ組み合わせて用いる。

3. 石鹸泡表面の流体シミュレーション

石鹸泡表面の流れのシミュレーションには、Stam による手法[1]を用いる。この手法では Catmull-Clark 細分割曲面[3]と流体ソルバーである Stable Fluids[4]を組み合わせている。

Catmull-Clark 細分割曲面は、区分的な双3次 B スプライン曲面を任意のトポロジーのメッシュへと一般化したものである。ここでは分割前の最も粗いメッシュであるベースメッシュが四角形のみから構成されると仮定する。これにより一般性を失うことはない。もし四辺形のみでない場合は、一度分割を行えば四角形のみから構成されるメッシュとなる。

この手法では Catmull-Clark 細分割曲面のベースメッシュの四角形1つ1つに対して1つの流体シミュレーションの計算領域を割り当て、複数のシミュレーションを合わせて曲面全体での流体シミュレーションとする。流体ソルバーには曲面上で用いるために拡張された Stable Fluids ソルバーが用いられる。

Stable Fluids は非圧縮流体の Navier-Stokes 方程式のソルバーで、Navier-Stokes 方程式の各項の効果を4つのステップに分けて計算する。速度場の更新の規則に加えて、流体に浸された密度の動きの計算法も含んでいる。

4. 石鹸泡表面の色

石鹸泡表面の厚さは数百～数千 nm 程度と泡の半径に比べ非常に小さいため、その表面は局所的に平面であるといえる。表面の厚さが光の波長と同程度である時は反射光同士が干渉し色を生じる。

干渉光の計算には Peng らのモデル[5]を用いる。図1において、干渉光は入射光 ϕ が膜の内部で複数回反射して出てくる光 $\phi_{r0}, \phi_{r1}, \phi_{r2}, \dots$ の位相差を考慮した総和として求められる。電磁気の性質から求めた電磁波の垂直成分と平行成分に対応する振幅反射率 R_{\perp}, R_{\parallel} を用いると、入射光に対するエネルギー反射率 k_r は1回反射時の位相差 δ を用いて以下のように計算できる。 λ は波長、 n は屈折率、 d は薄膜の厚さ、 θ は入射角を表している。

$$k_r = \frac{R_{\perp} \bar{R}_{\perp} + R_{\parallel} \bar{R}_{\parallel}}{2} \quad (1)$$

$$= 2R_{\perp}^2 \frac{1 - \cos\delta}{1 + R_{\perp}^4 - R_{\perp}^2 \cos\delta} + 2R_{\parallel}^2 \frac{1 - \cos\delta}{1 + R_{\parallel}^4 - R_{\parallel}^2 \cos\delta},$$

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda} nd \cos\theta. \quad (2)$$

光源の色をスペクトルの分布で与え、各波長ごとに上記の反射率を乗じて反射後のスペクトルおよび色を求めている。

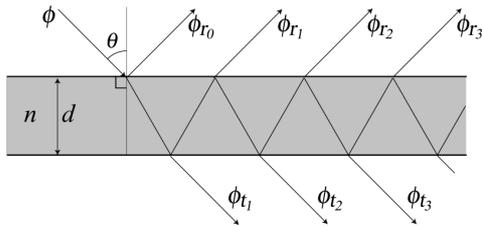


図1 干渉光の計算

5. レンダリング手法

5.1. 概要

石鹸泡の描画には松沢らの方法[2]を拡張したものをを用いる。石鹸泡上の点 P から視線に到達する光 L_p の輝度は以下のような式で表現できる。

$$L_p = L_t \times (1 - k_r) + L_r \times k_r. \quad (3)$$

ここで L_t は透過光, L_r は周囲からの反射光である。 k_r は式(1)で求められる反射係数であり, 波長 λ , 入射角 θ , 膜の厚さ d で決定される。

ここで, k_r は膜の厚さ d と入射角 θ のみで決定されるため, d と $\cos \theta$ によるルックアップテーブルを前処理で作成する。このテーブルをテクスチャとして用いることで, ハードウェアを用いて高速に石鹸泡を表示する。

本稿では, 反射光を光源からの反射光と環境からの反射光に分けて考える。これは2つのダイナミックレンジが異なるからである。

5.2. 光源からの反射光の表現

光源の色は RGB の輝度値でなくスペクトルの分布で与える。スペクトルの各波長 λ に対応する反射率 k_r を掛けた値を求め, 得られるスペクトルを RGB 値に変換すると求める光源からの反射光の色が求められる。得られた色をテーブル化してテクスチャとして用いる。

5.3. 環境からの反射光の表現

反射光は環境マッピングの1つであるキューブマップ法を用いて表現する。周りの物体の映り込みには, RGB の各色の波長に対応する反射率 k_r をテーブル化してテクスチャとして用いる。

5.4. 描画手順

泡を構成する個々の三角形は, まず OpenGL のブレンディング機能を用いてフレームバッファと $(1 - k_r)$ の積の RGB 値を描画する。その上にマルチテクスチャの機能を用いて, 背景テクスチャと 5.3 節で述べた反射率 k_r の値から生成するテクスチャの RGB 各成分同士との積の値を加える。最後に, 光源からの反射光のテクスチャの値を加えることで最終的な色が描画される。反射率

k_r や光源からの反射光テクスチャのテクスチャ座標を指定するためには, 膜の厚さと入射角が必要となる。提案法では, この膜の厚さを求める際に流体シミュレーションでの密度分布を用いる。

6. 実験結果

提案法によるレンダリングの結果を図2に示す。ここでは Catmull-Clark 曲面のベースメッシュとして立方体を使用した。

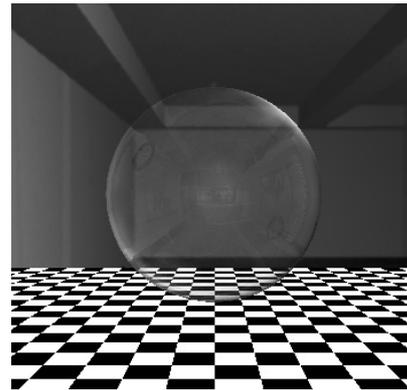


図2 結果画像

7. まとめ

表面の流れを考慮した石鹸泡の画像を生成する手法を提案した。膜の厚さに流体シミュレーションの結果を反映させることで, 詳細な光の干渉による模様を描いた。

参考文献

- [1] J. Stam, "Flows on Surfaces of Arbitrary Topology", In *SIGGRAPH 2003 Conference Proceedings, Annual Conferences Series*, July 2003.
- [2] 松沢敬一, 天羽賢一, 岩崎慶, 西田友是, 「干渉光を考慮した変形する石鹸泡の高速なレンダリング手法」, 画像電子学会 VCシンポジウム, pp. 93-98, 2003-6.
- [3] E. Catmull and J. Clark, "Recursively Generated B-spline Surfaces On Arbitrary Topological Meshes", *Computer Aided Design* 10, 6, 350-355, 1978.
- [4] J. Stam. "Stable Fluids", In *SIGGRAPH 99 Conference Proceedings, Annual Conference Series*, pp. 121-128, 1999.
- [5] Q. Peng, J. Li, "A New Illumination Model for Scenes Containing Thin Film Interference", In *Proceeding of Pacific Graphics*, pp.133-146, 1996.