

# 歪み補正された変位マッピングを用いた 波面の伝播シミュレーション

吉良 俊亮<sup>1,a)</sup> 中山 雅紀<sup>2,b)</sup> 藤代 一成<sup>2,c)</sup>

**概要:** オブジェクトの変形は、現実世界の多様な物質を表現するうえで欠かせない要素である。近年のCGの進歩に伴い、変形のシミュレーションにもまた、より高精細なものが求められている。本研究では、キューブマップを変位マッピングに転用することにより、種数0のオブジェクト表面上に、テクスチャ空間と実空間の間の歪みを解消した変形シミュレーションを実現する手法を提案する。本稿では、その変形の一例として、波面が伝播するシミュレーションを試みる。

## Visual Simulation of Wave Propagation Using Distortion-free Displacement Mapping

SHUNSUKE KIRA<sup>1,a)</sup> MASANORI NAKAYAMA<sup>2,b)</sup> ISSEI FUJISHIRO<sup>2,c)</sup>

**Abstract:** Deformation plays an essential role in expressing a large variety of materials in reality. Due to advances in computer graphics, deformation simulation also needs to be more accurate. In this study, we propose a new method for deformation simulation on a genus zero surface using displacement mapping. We divert cubemaps to displacement mapping so as to correct possible distortion between texture space and physical space. In this article, we attempt to simulate wave propagation as an example of the deformation.

### 1. 序論

CGにおけるオブジェクトの変形は、現実世界の多様な物質を表現するうえで欠かせない要素である。近年のCGの進歩による映像作品の高精細化から、変形のシミュレーションにもまた、より高精細なものが求められている。

一般的な変形シミュレーション手法として、メッシュを用いた手法が挙げられる。しかし、この手法は、連続体力学に基づいた複雑な式を数値的に解く必要があり、計算時間が多くかかる。そのため、リアルタイム性を重視する場合、衝撃が加わった際にオブジェクト表面が波打つ様子などの細やかな変形表現は描画されないことが多い。

リアルタイム性を重視した変形シミュレーション手法と

して、変位マッピングを用いたアプローチが知られており、実際に海面の表現 [13] 等によく用いられる。しかし、この手法は一様な平面に適用することを想定しているため、テクスチャ空間と実空間との間に非線形な関係が存在するオブジェクト表面に適用すると、変形に歪みが生じてしまう。

そこで本研究では、一般的に環境マッピングに用いられる手法であるキューブマップ [4] を変位マッピングに転用することにより、オブジェクト表面にテクスチャ空間と実空間との間の歪みを解消した変形シミュレーションを実現する手法を提案する。等角球体マッピングを導入することにより、種数0の任意オブジェクト表面で、変形シミュレーションを実行することができる。本手法を用いて、オブジェクト表面上で波面の伝播シミュレーションを行った結果を図1に示す。

本研究の最終目標は、変位マッピングを用いて、任意のオブジェクト表面に、そのオブジェクトの特性に応じた変形を付与することである。本稿では、その変形の一例として、波面の伝播のシミュレーションを試みる。

<sup>1</sup> 慶應義塾大学 大学院理工学研究科  
Graduate School of Science and Technology, Keio University

<sup>2</sup> 慶應義塾大学 理工学部  
Faculty of Science and Technology, Keio University

a) shunsuke.kira@fj.ics.keio.ac.jp

b) nakayama@fj.ics.keio.ac.jp

c) fuji@ics.keio.ac.jp

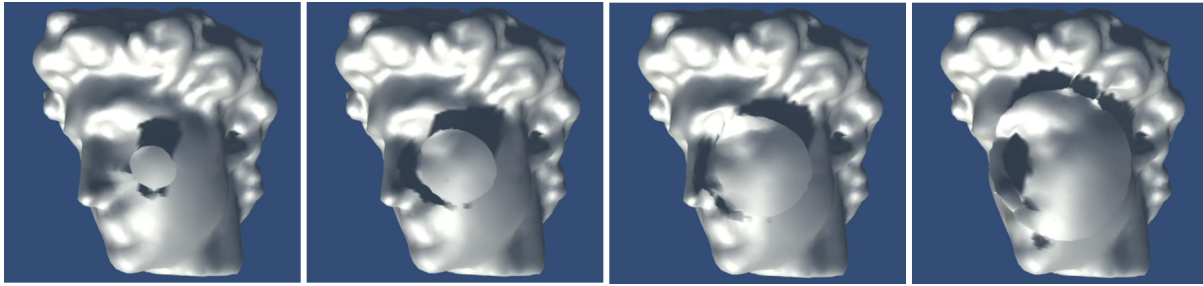


図 1: 提案手法による波面の伝播シミュレーション実行例. 画像は左から右に時系列順に並んでおり, 波面がモデル表面を均一に伝播していく様子が確認できる. 本手法は, 種数 0 の任意のオブジェクト表面に適用することができる.

## 2. 関連研究

オブジェクトの変形シミュレーション手法に関する関連研究を挙げ, 本研究の位置づけを明確にする.

### 2.1 連続体力学に基づいた手法

物理的に正確な変形シミュレーション手法として, 連続体力学に基づいた手法が知られている.

Terzopoulos ら [12] は, 有限要素法 (FEM) を CG の変形シミュレーションに導入し, 連続体力学に基づいてオブジェクトの変形をシミュレーションする手法を提案している. Martin ら [5] は, FEM による変形シミュレーションに, ユーザが設定した変形例に基づく弾性ポテンシャルを導入し, FEM による変形シミュレーションに監督可能性を追加した手法を提案している. Sulsky ら [11] は, 粒子法を用いた変形シミュレーション手法である Material Point Method (MPM) を提案している. MPM では, 各粒子が連続体力学に基づいて動作するため, オブジェクトの変形に加え, 物体の断裂や結合などの物理現象もシミュレーションすることができる.

連続体力学に基づいた手法は, 物理的にきわめて正確であり, 細やかな変形もシミュレーション可能であるが, 計算時間が多くかかることから, リアルタイム性を重視したアプリケーションには適さない.

### 2.2 連続体力学に基づかない手法

前項の手法に対し, 計算時間を削減するため, 連続体力学に基づかない手法が提案されている.

Müller ら [8] は, FEM による計算は物理的には正しいが, その分計算時間が多くかかることを問題視し, 位置情報に基づき, 拘束条件を満たす方向に位置を反復して更新することで最終的な位置を決定する Position Based Dynamics (PBD) を提案している. Bouaziz ら [2] は, PBD における拘束条件を FEM に基づいて概算することで, 物理的正確性を高めた手法を提案している. Müller ら [7] は, 変形の対象となるメッシュを, より解像度の低いメッシュで覆

い, 解像度の低いメッシュに対する変形結果を対象となるメッシュに適用する手法を提案している.

連続体力学に基づかない手法は, 小さな計算量で変形をシミュレーションできるが, 細やかな変形をシミュレーションすることができない.

### 2.3 変位マッピングを用いた手法

変位マッピングは, オブジェクトの表面に凹凸をつけるために用いられる手法であるが, テクスチャ上での変形シミュレーション結果をオブジェクト表面に与える手法が提案されている.

Schäfer ら [10] は, 物理シミュレーションによって決定された位置に, ユーザが設定した変形を変位マッピングを用いて付与する手法を提案している. Nykl ら [9] は, テクスチャ空間上でオブジェクトの衝突を計算し, ユーザが設定した変形を付与する手法を提案している. また, 変位マッピングを用いた手法は海面の表現 [13] にもよく用いられる.

変位マッピングを用いた手法は, テクスチャ空間上でシミュレーションを行うことで, 軽量に変形を計算することができる. しかし, 一様な平面にマッピングすることを想定しているため, テクスチャ空間と実空間との間に非線形な関係が存在するオブジェクト表面に適用すると, 変形に歪みが生じてしまう. 本手法では, 実空間座標を用いて変形を計算することで, この歪みを補正する.

## 3. 手法

提案手法の手順を以下に述べる. 本手法は, 一般的に環境マッピングに用いられるキューブマップを変位マッピングに転用することで, テクスチャ空間にオブジェクト表面の実空間座標を格納し, テクスチャ上で実空間座標を用いた変形シミュレーションを計算する. 先行報告 [1] では, 重心から立方体の各セルに光線を飛ばした際, 表面との交点が一位に定まるオブジェクトを対象としていたが, 本稿では, 種数 0 の任意のオブジェクト表面に拡張した.

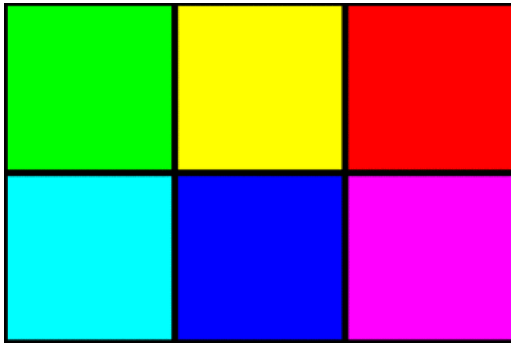


図 2: 本手法で用いているテクスチャアトラス. 黒以外の色がついている領域が立方体の各面に対応付けられており, 黒い領域は波面の伝播計算時には参照されない.

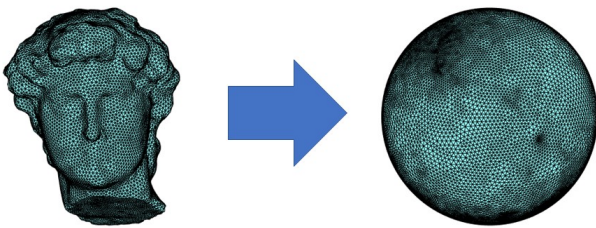


図 3: 種数 0 のオブジェクト表面に等角球体マッピングを施した結果. 種数 0 の任意のオブジェクト表面を単位球にマッピングする.

### 3.1 立方体の設定

オブジェクトの中心座標が重心となる立方体を実空間上に設定し, テクスチャアトラスにおける正方領域を立方体の各面に対応付けた. 本手法で用いたテクスチャアトラスを図 2 に示す.

テクスチャ空間上で変形をシミュレーションするにあたり, 各テクセルで隣接セルの情報を参照する必要がある. しかし, 複数のテクスチャによって覆われたオブジェクトでは, テクセル間の隣接関係が不連続かつ複雑であるため, 手動による隣接関係の設定が困難だった. そこで, 本手法ではキューブマップ [4] を用いた. キューブマップでは, 立方体の各面としてテクスチャアトラスを定義するため, 波動の伝播に必要なテクセル間の隣接関係を, 設定が容易な立方体の面同士の隣接関係に置き換えることができる.

### 3.2 オブジェクトを単位球に変換

等角球体マッピング [3] を用いて, オブジェクトを単位球に変換した. オブジェクトに等角球体マッピングを施した結果を図 3 に示す. 等角球体マッピングは, ポリゴンの形状を保ったまま単位球に変換することができるため, 種数 0 の任意のオブジェクト表面に対し, 本手法を適用することができる.

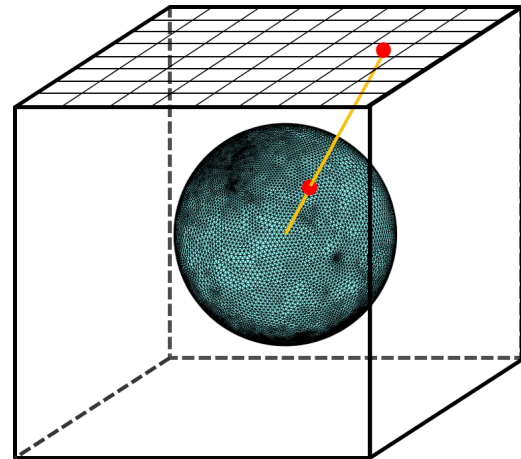


図 4: 実空間座標の取得方法. 等角球体マッピング後の単位球へ, 立方体に対応付けた各テクセルの中心座標から光線を飛ばすことで, 各テクセルに対応するオブジェクト表面の実空間座標を取得する.

### 3.3 実空間座標の取得

テクスチャ空間で計算を行った変形をオブジェクト表面に適用するにあたり, テクスチャ空間と実空間との間に非線形な関係が存在する場合, 変位マッピングによってオブジェクト表面に付与した変形にも歪みが生じてしまう. この歪みを補正するには, 各テクセルに対応するオブジェクト表面の実空間座標を格納し, それを用いて変形シミュレーションを計算する必要があるが, テクセルごとに対応する実空間の座標を設定することは困難であった.

そこで, 本手法ではキューブマップを用いた. キューブマップによる実空間座標取得の概要を図 4 に示す. 立方体の中心座標から, 立方体に設定された各テクセルへと光線を飛ばし, 等角球体マッピング後の単位球との交点座標を求めた. 実空間座標を取得する交差判定には Tomas Möller のアルゴリズム [6] を用い, 交差するポリゴンを全探索した.

単位球との交点座標  $T(u, v)$  は,

$$u \geq 0, v \geq 0, u + v \geq 0$$

を満たす実数  $u, v$  を用いて, 次式によって示される:

$$T(u, v) = (1 - u - v)v_0 + uv_1 + uv_2$$

ここで,  $v_0, v_1, v_2$  は交差するポリゴンの各頂点座標である. 等角球体マッピングは, ポリゴンの形状を保ったままオブジェクト表面を単位球に変換するため, 単位球における頂点座標を, 元のオブジェクト表面の頂点座標に置き換えて計算することで, 対応する元のオブジェクト表面の座標を求めることができる. これにより, 各テクセルに対応するオブジェクト表面の実空間座標を格納した.

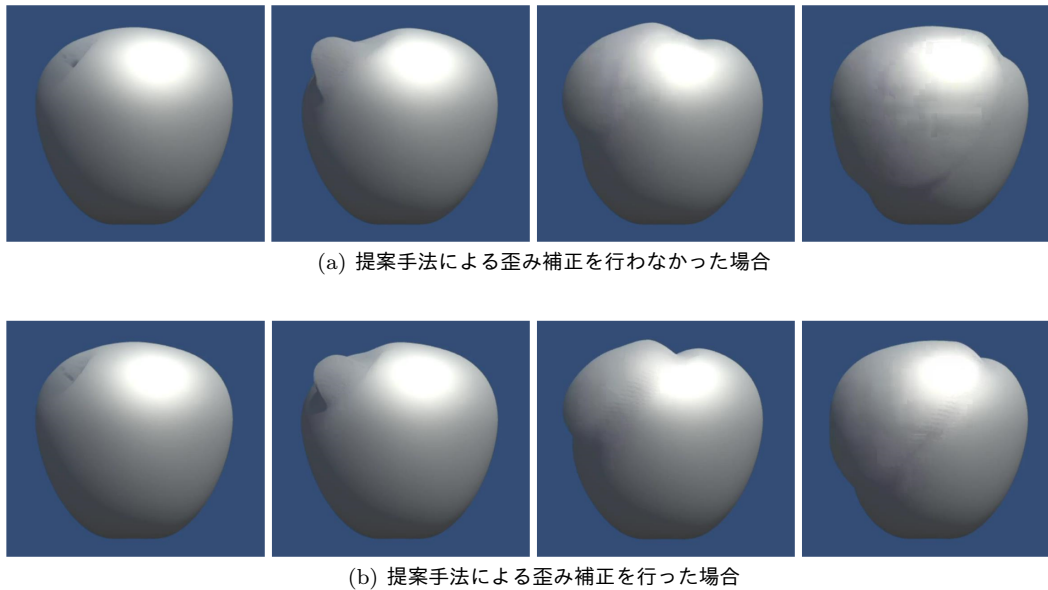


図 5: 単純なオブジェクト表面に提案手法を適用した場合における補正効果の比較。(a) では波面の歪みが発生しているが、(b) では発生していないことが確認できる。

### 3.4 テクスチャ座標の設定

テクスチャ空間での計算結果を変位マッピングとして付与するため、キューブマップを用いて作成したテクスチャアトラスに対応するテクスチャ座標をオブジェクト表面の各頂点に設定する必要がある。そこで、前項と同様のアルゴリズムを用い、立方体の中心座標から等角球体マッピング後の単位球の各頂点に向かって光線を飛ばし、立方体の各面との交点座標を求め、その結果からテクスチャ座標を計算した。

### 3.5 波面の伝播

本手法では、テクスチャ空間上での計算式を変更することで、オブジェクト表面で発生するさまざまな変形をシミュレーションすることができる。本稿では、変形の一例として、波面が伝播するシミュレーションを試みた。

本手法では、各テクセルにおいて、波面の伝播を並列に計算する。前フレームにおける、自身とその周辺セルが保持する高さ情報を用いて、各フレームにおけるセルの高さを計算することができる。キューブマップを用いることで、テクスチャアトラスにおける複雑な隣接関係を立方体の面間における隣接関係として定義し、各セルにおける適切な隣接関係の設定を容易にした。

時刻  $t = t_n$  における各セルの波の加速度  $a_n$  は、次式のように計算できる：

$$a_n = (d/s)^2 \sum (i_n - h_n) - \zeta v_n$$

ここで、 $d$  は注目セルと周辺セル間の距離、 $s$  は波の伝播速度、 $h_n$  は注目セルの高さ、 $i_n$  は周辺セルの高さ、 $\zeta$  は減衰係数、 $v_n$  は注目セルにおける速度である。

各パラメータを変更することで、波を変化させることができる。減衰係数を変更することにより、波がどのくらい長く滞在するかを設定することができ、減衰係数を大きくすれば、波は速やかに減衰する。波の伝播速度を 0 にすることで、波が伝播しない領域を作ることにもできる。また、これらのパラメータは各テクセルごとに設定することができるため、オブジェクトの特性、例えば顔の皮膚下の骨格や筋肉分布などをシミュレーションに反映させることができる。

セル間の距離の計算には、各セルに格納された、対応するオブジェクト表面の実空間座標を用いた。これにより、実空間座標を用いて波面の伝播シミュレーションを計算することで、テクスチャ空間と実空間との間の歪みを補正した。

平面上における波面の伝播シミュレーションでは、対象セルと辺を共有する 4 セルだけを周辺セルとして計算する。しかし、複数のテクスチャに覆われたオブジェクトの表面上でシミュレーションする場合、テクスチャ空間の不連続により、テクスチャアトラス上の境界を波が超える際に、波の進行方向が変わってしまう。そこで、各セルから円形に波が出ていると仮定し、周辺 8 セルを対象に波面の伝播シミュレーションを計算した。

### 3.6 計算結果の付与

各セルにおける計算結果を GPU に送信し、そのテクスチャを頂点シェーダにおいて、オブジェクト表面に変位マップとして付与した。GPU に送信した計算結果は、次フレームの計算に利用される。

## 4. 結果

実装環境として、CPU: Intel Core i7-8700K 3.70 GHz, RAM: 16.0 GB, GPU: NVIDIA GeForce GTX 1070 Ti を用い、Unity 2018.4.19f1 上で実装を行った。

### 4.1 波面の伝播

本手法を用い、各セルにおける波の伝播速度を一様に設定し、種数 0 の単純なオブジェクト表面における波面の伝播シミュレーションを行った結果を図 5(b) に示す。図 5(a) と比較し、不自然な波面の歪みや折れが発生することなく、波面が伝播している様子が確認できる。波の初期値は、ユーザがオブジェクト表面の任意の地点に、任意の強さで設定することができ、計算時間を増やすことなく、複数の波を同時に発生させることも可能である。また、シミュレーションの実行中にいつでも停止、実行結果のリセットを行うことができ、カメラの視点を操作することで、波面の様子を多角的に確認できる。

本手法を用いた、種数 0 の複雑なオブジェクト表面上における波面の伝播シミュレーションの実行例を図 1 に示す。立方体から射影した際、交点が一位に定まらないオブジェクトの表面上でも、波面の伝播シミュレーションが可能であることが確認できる。このとき、 $50 \times 50 \times 6$  画素のテクスチャを用い、21,338 枚のポリゴンをもつオブジェクト表面に提案手法を適用した結果、フレームレートは約 32 fps となった。

また、本手法では、テクスチャの解像度を自由に設定することができ、テクスチャの解像度に応じて変形の解像度を変更することができる。

### 4.2 歪みの補正

実空間座標を用いずに計算したシミュレーション結果を図 5(b) に示す。実空間座標を用いなかった場合、波面にゆがみが発生しているのが確認できるが、図 (a) では、歪みが発生していないことが確認できる。

また、実空間座標を用いずに計算した場合と、本手法によって歪みを補正した場合のフレームレートは共に約 32 fps となった。実空間座標を用いた距離計算は、実空間座標を取得した段階で計算しているため、本手法を用いない場合と比較しても、本手法の計算時間は変化しないことが確認できた。

## 5. 結論と今後の課題

本稿では、キューブマップを変位マッピングに転用することにより、テクスチャ空間と実空間の間の歪みを補正した変形シミュレーションを実現する手法を提案した。等角球体マッピングを本手法に組み込むことにより、通常は立方体から射影できない種数 0 の任意のオブジェクト表面で

も、軽微な計算コストで波面の伝播シミュレーションが可能であることを確認した。

本手法について、今後取り組むべき課題を以下に提示する。

### 5.1 任意オブジェクトへの拡張

本手法は、等角球体マッピングを適用できない種数が 1 以上のオブジェクトの表面には適用できないことが課題として挙げられる。本手法を任意のオブジェクト表面に適用するため、種数 1 以上のオブジェクト表面に対するパラメータ化手法の導入を検討する必要がある。

### 5.2 オブジェクト同士の衝突への適用

本手法は、変位マッピングを用いて変形シミュレーションを実現することを目的としたものである。現在、本手法は単一のオブジェクトにしか適用することができず、波の初期値を手動で設定している。汎用化に向けて、複数のオブジェクト同士の衝突に本手法を適用する必要がある。

### 5.3 オブジェクトの凹みへの適用

本手法において、波の初期値を与えた後、波面の伝播をシミュレーションすることができる。しかし、継続的に力が加わることによるオブジェクトの変形をシミュレーションすることができない。より汎用的な手法とするには、上記のシミュレーションを実装する必要がある。

### 5.4 GPU を用いた実装

現在、本手法はテクスチャ空間における波面の伝播を CPU によって計算し、GPU によって、変位マッピングによるオブジェクトの変形を描画している。しかし、テクスチャ空間上の波面の伝播計算はテクスチャセルごとに並列して計算することができ、GPU による計算に適している。

## 謝辞

本研究の一部は、令和 2 年度科研費基盤研究 (A)17H00737 の支援により実施された。

## 参考文献

- [1] 吉良 俊亮, 中山 雅紀, 藤代 一成: 変位マッピングを用いた任意サーフェスにおける波動シミュレーション—キューブマッピングによる歪み補正—, 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 44, No. 10, pages 17–20, 2020.
- [2] Sofien Bouaziz, Sebastian Martin, Tiantian Liu, Ladislav Kavan, and Mark Pauly: “Projective dynamics: fusing constraint projections for fast simulation,” *ACM Transactions on Graphics*, Volume 33, Issue 4, Article Number 154, 2014.
- [3] P. T. Choi, K. C. Lam, and L. M. Lui: “FLASH: Fast landmark aligned spherical harmonic parameterization for genus-0 closed brain surfaces,” *SIAM Journal on Imaging Sciences*, Volume 8, Issue 1, pages 67–94, 2015.

- [4] Ned Greene: “Environment mapping and other applications of world projections,” *IEEE Computer Graphics and Applications*, Volume 5, Issue 11, pages 21–29, 1986.
- [5] Sebastian Martin, Bernhard Thomaszewski, Eitan Grinspun, and Markus Gross: “Example-based elastic materials,” *ACM Transactions on Graphics*, Volume 30, Issue 4, pages 1–8, 2011.
- [6] Tomas Möller and Ben Trumbore: “Fast, minimum storage ray-triangle intersection,” *Journal of Graphics Tools*, Volume 2, Issue 1, pages 21–28, 1997.
- [7] Matthias Müller, Bruno Heidelberger, Matthias Teschner, and Markus Gross: “Meshless deformations based on shape matching,” *ACM Transactions on Graphics*, Volume 24, Issue 3, pages 471–478, 2005.
- [8] Matthias Müller, Bruno Heidelberger, Marcus Hennix, and John Ratcliff: “Position based dynamics,” *Journal of Visual Communication and Image Representation*, Volume 18, Issue 2, pages 109–118, 2007.
- [9] Scott Nykl, Chad Mourning, and David Chelberg: “Interactive mesostructures with volumetric collisions,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Volume 20, Issue 7, pages 970–982, 2014.
- [10] Henry Schäfer, Benjamin Keinert, and Marc Stamminger: “Real-time local displacement using dynamic GPU memory management,” in *Proceedings of the 5th High-Performance Graphics Conference*, pages 63–72, 2013.
- [11] Deborah Sulsky, Shi-Jian Zhou, Minchen Li, and Howard L. Schreyer: “Application of a particle-in-cell method to solid mechanics,” *Computer Physics Communications*, Volume 87, Issue 1–2, pages 236–252, 1995.
- [12] Demetri Terzopoulos, John Platt, Alan Barr, and Kurt Fleischer: “Elastically deformable models,” *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, Volume 21, Issue 4, pages 205–214, 1987.
- [13] Jerry Tessendorf: “Simulating ocean water,” *Simulating Nature: Realistic and Interactive Techniques*, Article Number 47, 2001.