# 種数 0 サーフェスの ヤコビアンフリーな変形シミュレーション

吉良 俊亮<sup>1)</sup> 中山 雅紀<sup>2)</sup>(正会員) 藤代 一成<sup>2)</sup>(正会員)

1) 慶應義塾大学 大学院理工学研究科 2) 慶應義塾大学 理工学部

## Jacobian-free Deformation of Genus-0 Surfaces

Shunsuke Kira<sup>1)</sup> Masanori Nakayama<sup>2)</sup> Issei Fujishiro<sup>2)</sup>

Graduate School of Science and Technology, Keio University
Faculty of Science and Technology, Keio University

{shunsuke.kira, nakayama, fuji}@fj.ics.keio.ac.jp

## 概要

CG におけるオブジェクトの変形は,物質の多様な性質を表現するうえで,欠かすことのできない要素である.近年,映像作品の 高精細化から,変形にもより高精細なものが求められるようになった.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.一方,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いるが,この手法は二次元平面上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,ヤコビ行列を用いた座標変換による歪みを変形に生 じさせてしまう.そこで,本論文では,射影によりテクスチャに格納した実空間座標を用いて計算することで,テクスチャ空間と 実空間との間の歪みを解消した,変位マッピングによるヤコビアンフリーな変形シミュレーションを,種数0の任意オブジェクト 表面において実現する手法を提案する.

キーワード:変形,波動シミュレーション,変位マッピング,キューブマップ

#### Abstract

Deformation plays an essential role in expressing various properties of materials. In recent years, as video works have become increasingly high-definition, higher-definition deformation has also come to be required. One of the most common deformation simulation methods is mesh-based. However, due to the large amount of computation time, real-time applications cannot render detailed deformation such as the rippling of the object's surface. On the other hand, an approach using displacement mapping is known as a deformation simulation method that realizes real-time performance. However, this method is designed to be applied to a two-dimensional plane, and hence, when applied to an object surface which has a nonlinear relationship between the texture space and the real space, the deformation will be distorted by Jacobian to translate the coordinates. In this paper, we propose a novel method to simulate Jacobian-free deformation of arbitrary genus-0 surfaces by displacement mapping, which uses the real space coordinates to eliminate the distortion between the texture space and the real space.

Keywords: Deformation, wave simulation, displacement mapping, cube mapping.

## 1 序論

CG におけるオブジェクトの変形は,現実世界の物質 の多様な性質を表現するうえで,欠かすことのできない 要素である.近年の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 るようになった.

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 体力学に基づく支配方程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、リアルタイム性が重 視される場合、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.

一方,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 [17] 等によく用いられ る.しかし,この手法は二次元平面上に適用することを 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場合 には,ヤコビ行列による座標変換を行う必要があり,変 形に歪みが生じてしまう.

そこで、本論文では、一般的に環境マッピングに用い られるキューブマップ [5] を変位マッピングに転用する ことで、テクスチャ上に対応するオブジェクト表面の実 空間座標をキューブからの射影によって取得し、格納し た実空間座標によりヤコビ行列を用いず変形シミュレー ションを計算する手法を新たに提案する.等角球体マッ ピングを導入し、種数 0、すなわち穴が開いていない任意 オブジェクト表面で、テクスチャ上に対応するオブジェ クト表面の実空間座標を格納できる.それにより、オブ ジェクト表面で、歪みを解消した変形シミュレーション を実現する.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. 歪みなく波面が伝播している様子が確認できる.

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.先行報告 [1] では、波面 の伝播シミュレーションを CPU を用いて実行していた が、本論文では、GPU を用いてシミュレーションを並 列計算し、処理を一層高速化した. 本論文は6つの章から構成され,次章では,本論文に 関連する研究を紹介する.3章では,提案手法の概要と 具体的な処理について説明する.4章では,本手法の実 行結果を示し,先行報告[1]と比較する.5章では,他の シミュレーション手法との利害得失を考察する.6章で は,本研究の結論を述べ,今後の課題に言及する.

## 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、本論文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.

Terzopulous ら [16] は,有限要素法 (FEM) を CG に おける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を変形する手法を提案している. Martin ら [8] は,FEM を用いた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.Sulsky ら [15] 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,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、解像度の大きい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

前節の手法に対し,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 [11] は, FEM による計算は物理的には正 しいが,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 [3] 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 [10] 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.



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,球がオブジェ クトに衝突した場所から波が拡がっていく様子が確認できる.映像は添付ビデオを参照.

上記の手法 [11][3][10] は、少ない計算量で変形をシ ミュレーションできるが、オブジェクト表面が波打つよ うな微細な変形をシミュレーションする際には、過剰な コストがかかってしまう.

提案手法と同じく、オブジェクト表面の変形に特化し た手法も存在する. Goes ら [6] は、弾性力学の解析解に 基づいて、オブジェクト表面における波面や衝撃の伝播 をリアルタイムに計算する手法を提案しており、本論文 で提案する手法に最も近いものの一つである. Goes ら の手法 [6] は近似的な精度ではあるが、任意の種数をも つメッシュにも安定して伝播計算を行うことができる反 面,空間変形手法であるため,オブジェクト表面の3次 元的形状を考慮した変形を付与できない点がデメリット として挙げられる. それに対し、表面変形手法である提 案手法は, 種数に制限はあるが, パラメータを調整する ことでメッシュの形状やその表面下組織に依存した変形 結果を与えることができる. 例えば、人の顔に波面を伝 播させる場合,骨が表面付近に存在する箇所とそうでな い箇所では、波の伝播しやすさが異なる.また、鼻や耳 といった箇所では波が反射する. Goes らの手法ではそ ういった物理的特性を変形に反映させることができない が、提案手法ではパラメータの設定により、波の伝播し やすさや境界条件を自由に設定できるため、オブジェク ト表面の3次元形状やその特性に合わせて変形を付与で きる. さらに, 提案手法は変位マッピングを用いるため, 既存のレンダリングパイプラインへの組込みも, Goes らの手法より容易である.

## 2.3 変位マッピングを用いた手法

変位マッピングは、本来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 [13] 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 [12] 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 [17] 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、メッシュを用いた手法 と比較して、小さな計算コストで変形を計算することが できる.しかし、二次元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.提案手法では、テクスチャ空 間における二次元座標ではなく、オブジェクト表面の実 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.

## 2.4 流体シミュレーションを行う手法

変形シミュレーションではないものの,オブジェクト 表面上で流体シミュレーションを行う手法は,テクス チャ上で流体シミュレーションを計算する本手法と関連 性が強い.



図 2: 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 の任意オブジェクト表面を単位球 にマッピングしている.

Stam ら [14] は、Catmull-Clack 表面をパラメータ化 手法として用い、二次元平面上での流体シミュレーショ ン結果を、オブジェクト表面に対して適用する手法を提 案している. Catmull-Clack 表面はオブジェクト表面を 正方領域に分割するパラメータ化手法で、任意の種数の オブジェクト表面に対して適用できることがメリットで あるが、正方領域の境界で歪みが生じてしまうほか、オ ブジェクト表面の三次元的形状を考慮できない点がデ メリットである. Hill ら [7] は、極座標をパラメータ化 手法として用い、球面上で高品質な流体シミュレーショ ンを行う手法を提案している.しかし、この手法は球面 以外のオブジェクト表面上に適用した場合、テクスチャ 座標とオブジェクト表面上の実空間座標との間の歪みか ら、シミュレーション結果にも歪みが生じる.提案手法 では、キューブマップをパラメータ化手法として用い、 射影により実空間座標を取得することで、実空間座標を 用いた流体シミュレーションをテクスチャ上で行う.

## 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,立方体からの射影によりテク 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,波面の伝播シミュレー ションを CPU を用いて実行していたが,本論文では, GPU を用いてシミュレーションを並列計算し,処理の さらなる高速化を実現する.



図 3: テクスチャの粗密によって波面が歪んでしまう場 合の概略図.(a)のような形状の波が理想であるが,テ クスチャの粗密が存在することで波面の速度が変化し, (b)のように波面が歪み,意図しない形状になってしま う.

## 3.1 立方体の設定

オブジェクトの重心が中心座標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る.

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であった. そこで、本手法ではキューブマップ[5]を用いる.キュー ブマップでは、立方体の各面に対応するテクスチャアト 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 等角球体マッピング

等角球体マッピング [4] を用いて,オブジェクトを単 位球に変換する.オブジェクトに等角球体マッピングを 施した結果を図2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.

#### 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,一般的に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.この場合,ヤコ



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 から光線を射出することで,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.

ビ行列による座標変換が必要なため、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.波面の歪みの例を図3に示す.テクスチャ空 間と実空間との間の非線形な関係から、オブジェクト表 面上でテクスチャの疎密性に差が生じてしまい、波面に 歪みが現れてしまう.歪みを考慮して変形を作成するこ ともできるが、作成者に負担を強いてしまう.この歪み を自動で補正するには、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、実空間座標を用いて変 形シミュレーションを計算する必要がある.しかし、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、 従来の手法では困難であった.

そこで、本手法ではキューブマップを用いることにした。本手法におけ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射出し、等角球体マッピング後の単位球との交点座標を求める。交差判定にはTomas Möllerのアルゴリズム [9] を用い、交差するポリゴンを全探索する.

単位球との交点座標 T(u, v) は,

$$u \ge 0, v \ge 0, u + v \ge 0$$

を満たす実数 u, v を用いて,次式によって示される:

$$\boldsymbol{T}(u,v) = (1-u-v)\boldsymbol{v}_0 + u\boldsymbol{v}_1 + u\boldsymbol{v}_2$$

ここで, v<sub>0</sub>, v<sub>1</sub>, v<sub>2</sub> は交差するポリゴンの各頂点の三 次元座標である.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,単位球の頂点座標を,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 納する.

## 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、本手法を適 用する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、前節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する.このと き、オブジェクトに元々設定されているテクスチャ座標 は保存されることに注意してほしい.

## 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.本論文では、変形 の一例として、有限体積法による波面の伝播シミュレー ション [2] を計算する.

本手法では,各テクセルに格納した実空間座標とその 周辺テクセルの実空間座標を二次元平面に近似し,有限 体積法を用いて波面の伝播をテクセルごとに計算する. 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.

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、nはシミュレーション中のステップの項番、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、



図 5: 種数 0 の複雑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.映像は添付ビデオを参照.

*v<sub>n</sub>* は注目セルにおける速度である. 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.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.

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設けることもで きる.また,これらのパラメータは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.さらに,波の発生フレームや個 数を自由に設定することができ,他のオブジェクトとの 衝突タイミングに合わせてユーザが自由に波を発生させ ることができる.また,ユーザは波に任意の初期形状を 与えることができ,任意形状の凹凸を好きな位置に与え ることも可能である.

#### 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する.

本手法では、変位マッピング用のテクスチャ座標のほ か、一般的なテクスチャマッピングに用いるテクスチャ 座標を別に送信することができ、他のテクスチャによる オブジェクトの色付けや波の伝播領域設定を行うことが できる. 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,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.

また,より複雑なオブジェクト表面における歪みのな い波面の伝播を図5に示す.ここでは,50×50×6 画素のテクスチャを用い,21,338枚のポリゴンをもつオ ブジェクト表面に適用した結果,フレームレートは約32 fpsとなり,描画の前段階である実空間座標の取得にか かった時間は2分57秒であった.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,解像度に応 じて変形の解像度と計算時間を変更することができる.

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る.また,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.シミュレーションの実行中にいつでも シミュレーションの停止,実行結果のリセットを行うこ



(a) 提案手法による歪み補正を行わなかった場合



(b) 提案手法による歪み補正を行った場合

図 6: 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.映像は添付ビデオを参照.

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.

### 4.2 歪みの補正

提案手法と同じくキューブマップによるパラメータ化 を行い,実空間座標を用いずにテクスチャ空間における 距離値を用いて計算したシミュレーション結果を図 6(a) に示す.実空間座標を用いない場合,オブジェクト上の 波面に歪みが発生しているが,図(b)では,歪みが発生 していないことが確認できる.さらにそれらの歪みの拡 大図を図7に示す.キューブマップでは,テクスチャア トラスが立方体の各面に分割されており,各面の境界で テクスチャの連続性が崩れる.それにより,波面の伝播 の連続性が崩れ,波面に歪みが生じてしまう.また,テ クスチャ座標を用いて波面の伝播計算を行っているた め,テクスチャ座標と実空間座標との間の歪みが波面に も反映され,徐々に歪みが発生する.

キューブマップは,立方体の各面の境界でテクスチャ 座標の連続性が途切れるため,波面の歪みが発生するの は当然といえる.しかし,テクスチャ座標の連続性が保 たれる球面座標などのパラメータ化手法を用いた場合 も、テクスチャの粗密により伝播速度に歪みが生じてし まうため、波が伝播する過程で波面が歪んでしまう.

また、本手法によって歪みを補正した場合と、補正し なかった場合のフレームレートはともに約 32 fps となっ た. 描画の前段階で、実空間座標の取得と距離計算を 行っているため、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. 歪み を補正した場合、前段階の実空間座標の取得と距離計算 にかかった時間は 2 分 13 秒となった. 前段階の計算 で得られた値はオブジェクトごとに固有のものであるた め、初回の描画以降は、前段階の計算を省略することが できる.

#### 4.3 波の伝播領域設定

本手法では、変位マッピング用のテクスチャのほかに、 一般的なテクスチャと波面の伝播領域を設定するための テクスチャ、減衰テクスチャを付与することができる. 図1で用いたテクスチャを図8に示す.図1では、目の 部分は波が伝播しにくいように設定されている.



(a) 歪んだ波の形状

(b) 補正された波の形状

図 7: 図 6 の左から 2 枚目の画像における波の歪みの拡 大図.(b)と比較し,(a) では,波に不自然な歪みが発生 しているのが確認できる.

## 4.4 計算時間の比較

本手法は,波面の伝播シミュレーションに用いられる テクスチャの解像度と,シミュレーション結果を適用す るオブジェクトのポリゴン数に計算時間が依存すると考 えられる.そこで,波面の伝播シミュレーション計算に CPUを用いた先行報告 [1] の手法のフレームレートを表 1(a) に,GPUを用いた本論文の手法のフレームレート を表 1(b) に示す.先行報告 [1] と比較し,本論文では, 計算時間のテクスチャ解像度への依存度が小さくなって おり,GPUによる並列計算の効果が確認できる.また, オブジェクトのポリゴン数は両者ともに依存度がきわめ て小さく,本手法はオブジェクトのポリゴン数によらず 適用可能なことが確認できる.

#### 5 考察

提案手法では、シミュレーションの適用対象となるオ ブジェクト表面に、種数の制限が存在する.任意種数の サーフェス上で変形シミュレーションを行う手法は存 在しており、FEM を用いた手法がよく知られている. FEM を用いた手法の多くは、提案手法とは異なり、オ ブジェクト表面の頂点単位で変形シミュレーションを計 算する.シミュレーションの精度を変更したい場合、リ メッシュによってメッシュの大まかな形状を保ったまま 頂点数を変更するが、オブジェクト表面の形状が変化し てしまう.これにより、頂点の三次元座標が変更され、 元のオブジェクト上でそのままシミュレーションした 場合と比べてシミュレーション結果に差が生まれてしま



(a) 色付けに用いたテクスチャ

(b) 減衰テクスチャ

図 8: 図1のオブジェクトに用いているテクスチャ.(a) でオブジェクトに色を付け,(b)で波の伝播領域を指定 している.黒い領域では波が伝播しにくい.

う.また、リメッシュ自体に複雑な処理が必要という点 もデメリットとして挙げられる.それに対し、提案手法 では、テクスチャの解像度を変更することで、オブジェ クトの形状を保ったまま容易にシミュレーションの精度 を変更できる点、そして、変位マッピングを用いている ため、既存のレンダリングパイプラインに組み込みやす い点がメリットである.また、種数1以上のオブジェク ト表面に適用可能なパラメータ化手法を本手法に合わせ ることで、本手法の適用範囲を拡張することができると 考えている.

## 6 結論と今後の課題

本論文では、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、テクスチャ空間の座標ではなく実空間 座標を用いることで、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.

### 6.1 内部構造を考慮した変形シミュレーション

本手法では,波の伝播領域を指定する減衰テクスチャ を用いることによって,オブジェクト表面の部位ごと に波の大きさを設定することができる.このテクスチャ を,オブジェクトの物質特性に合わせて作成することに

() []			•	
ポリゴン数 テクセル数	2,696	5,680	10,652	21,308
$20 \times 20 \times 6$	72.8	71.7	72.0	72.4
$28 \times 28 \times 6$	71.3	69.9	69.6	70.4
$40 \times 40 \times 6$	62.1	62.7	62.3	61.4
$56 \times 56 \times 6$	33.6	33.2	34.0	34.2

表 1: 提案手法と先行報告 [1] の手法間の計算時間の比較 (a) 先行報告 [1] におけるフレームレート (fps)

#### (b) 提案手法におけるフレームレート (fps)

ポリゴン数 テクセル数	2,696	5,680	10,652	21,308
$20 \times 20 \times 6$	72.5	72.4	72.2	72.4
$28 \times 28 \times 6$	72.0	72.1	71.8	72.0
$40 \times 40 \times 6$	71.0	70.4	70.1	70.9
$56 \times 56 \times 6$	63.7	64.9	64.4	64.1

より,オブジェクトの内部構造まで考慮した波面の伝播 シミュレーションを行うことができると考えている.現 在は,減衰テクスチャの作成は利用者の手で行っている が,CT データなどからオブジェクトの内部構造を読み 取り,内部構造を考慮した減衰テクスチャを自動生成す ることを考えている.

#### 6.2 オブジェクト同士の衝突への実装

本手法は Unity 上で実装しているため,他のオブジェ クトとその移動を自由に設定し,衝突のタイミングで波 面が発生するように設定できる.それをさらに拡張し, オブジェクト同士の衝突に合わせて波面を自動生成する ように実装することで,本手法の汎用性をより高めるこ とができる.その際,複数オブジェクトに本手法を同時 に適用することで,オブジェクト同士の相互変形を表現 することができるようになる.

## 6.3 多様な変形表現の実装

本手法では,有限体積法を用いた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,テクスチャ上で 計算手法を変形することにより,オブジェクトの特性に 合わせた,より多様な変形を容易に実装することができ る.より汎用的な手法であることを示すため,様々な変 形手法を,本手法上で実装する必要がある.

## 6.4 任意オブジェクトへの拡張

本手法は,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,トポロジーの自由 度を上げたオブジェクト表面に対するパラメータ化手法 の導入と,そのパラメータ化手法に対応したテクスチャ アトラスの構築を検討する必要がある.

### 謝辞

本研究の一部は,科研費基盤研究 (A)17H00737 および 21H04916 の支援により実施された.

## 参考文献

- 吉良 俊亮, 中山 雅紀, 藤代 一成: "種数 0 のサー フェスにおけるヤコビアンフリーな変形シミュレー ション", 芸術科学会 NICOGRAPH 2021 予稿集, Pages F-2:1-F-2:8, 2021.
- [2] 酒井 幸市: OpenGL + GLSL による物理ベース CG アニメーション 2, 株式会社工学社, 2012.
- [3] Sofien Bouaziz, Sebastian Martin, Tiantian Liu, Ladislav Kavan, and Mark Pauly: "Projective dynamics: Fusing constraint projections for fast simulation," ACM Transactions on Graphics, Vol-

ume 33, Issue 4, Pages 1–11, 2014.

- [4] 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.
- [5] Ned Greene: "Environment mapping and other applications of world projections," *IEEE Computer Graphics and Applications*, Volume 6, Issue 11, Pages 21–29, 1986.
- [6] Fernando De Goes and Doug L. James: "Dynamic kelvinlets: Secondary motions based on fundamental solutions of elastodynamics," ACM Transactions on Graphics, Volume 37, Issue 4, Pages 1–10, 2018.
- [7] David J. Hill and Ronald D. Henderson: "Efficient fluid simulation on the surface of a sphere," *ACM Transactions on Graphics*, Volume 35, Issue 2, Pages 1–9, 2016.
- [8] 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.
- [9] Tomas Möller and Ben Trumbore: "Fast, minimum storage ray-triangle intersection," *Journal* of Graphics Tools, Volume 2, Issue 1, Pages 21–28, 1997.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.

- [13] Henry Schäfer, Benjamin Keinert, and Marc Stamminger: "Real-time local displacement using dynamic GPU memory management," in *Proceed*ings of the 5th High-Performance Graphics Conference, Pages 63–72, 2013.
- [14] Jos Stam: "Flows on surfaces of arbitrary topology," ACM Transactions on Graphics, Volume 22, Issue 3, Pages 724–731, 2003.
- [15] Deborah Sulsky, Shi-Jian Zhou, Minchen Li, and Howard L. Schreyer: "Application of a particlein-cell method to solid mechanics," *Computer Physics Communications*, Volume 87, Issue 1–2, Pages 236–252, 1995.
- [16] Demetri Terzopoulos, John Platt, Alan Barr, and Kurt Fleischer: "Elastically deformable models," ACM SIGGRAPH Computer Graphics, Volume 21, Issue 4, Pages 205–214, 1987.
- [17] Jerry Tessendorf: "Simulating ocean water," Simulating Nature: Realistic and Interactive Techniques. SIGGRAPH, Volume 1, Issue 2, Pages 1–5, 2001.

吉良 俊亮



2020 年慶應義塾大学理工学部情報工学科卒業.2022 年慶應義塾 大学大学院理工学研究科修士課程 修了.大学院では,軽量な変形シ ミュレーションの研究開発に従事.

### 中山 雅紀(正会員)



2002 年慶應義塾大学理工学部卒 業.2004 年慶應義塾大学大学院理 工学研究科修士課程修了.修士(工 学).2010 年同大学院博士課程単 位取得退学.現在情報工学科藤代 研究室研究員兼日蓮宗玉泉山安国 院住職.フォトリアルレンダリン グ,球面幾何に基づくモデリングや

情報処理,球面ディスプレイ,ステレオグラム,3D人 体計測,等の研究開発に従事.情報処理学会,画像電子 学会,他会員.

## 藤代 一成(正会員)



東京大学,筑波大学,お茶の水女 子大学,東北大学を経て,2009年 より慶應義塾大学理工学部情報工 学科教授.1988年理学博士(東京 大学).CG・可視化や知的環境メ ディアに関する研究に従事.第16 回CG Japan Award 受賞.本会で

は副会長,評議員,NICOGRAPH International アド バイザリ委員等を歴任.日本工学会,情報処理学会フェ ロー,画像電子学会名誉会員,IEEE,ACM シニア会員. IEEE Visualization Academy 会員.現在,日本学術会 議連携会員,可視化情報学会会長,情報処理学会 CGVI 研究会主查.