

位置ベース法を用いたシェル形状の塑性シミュレーション

宮口 陽樹[†]熱田 清明[†]東海大学情報通信学研究科情報通信学専攻[†]

1. はじめに

紙のような硬くて薄い物体の挙動は、荷重を加えることで生じるしわや折り目といった塑性変形を考慮する必要がある。有限要素法のような連続体力学に沿った手法は塑性変形や弾性挙動を正確に計算することができるが、リアルタイムアプリケーションでは精度よりもシミュレーションの堅牢さや処理速度が重視されるため適切ではない。そこで本研究では、より処理が高速な Projective Dynamics[1](以下、PD と呼ぶ)に基づいた塑性シミュレーション手法を提案する。提案手法を用いることで、荷重によってメッシュ上のエッジに沿った折り曲げが可能なシェル形状の塑性変形シミュレーションが行える。

2. 提案手法

2.1 シミュレーション概要

本提案手法には、PD のアルゴリズムを用いる。PD は、位置ベース手法の Position Based Dynamics[2](以下、PBD と呼ぶ)と共通した特徴があり、与えられた任意の制約条件を満たすように物体を構成する頂点情報を射影し、頂点座標を修正するソルバーをもつ。PBD は、制約ごとにガウス=ザイデル法で繰り返し射影するため、PD より計算が高速で簡単なアルゴリズムが実装できるが、シミュレーションの時間刻み幅や反復回数、非一様なメッシュによって材質の剛性が変動するデメリットをもつ。一方で PD は、制約ごとにヤコビ法で射影するローカルソルバーと、射影された複数の解を大域的な解に統合するグローバルソルバーの2つをもち、前述したPBDのデメリットを解決することができる。

2.2 非伸縮・曲げ制約条件

本研究では、硬くて薄い材料の非伸縮性や面の張り具合、しわや折り目などの塑性挙動を表現することが極めて重要であると考えられる。従来の塑性表現では、物体のひずみを弾性成分と塑性成分に加算分解して扱い、塑性変形が生じたときに塑性成分が 0 になるように元の形状を更新する。しかし、この手法では塑性成分が更新されるたびに元の形状を計算し直す必要があり処理に時間がかかる。そこで、頂点間の距離を保持する非伸縮制約と Bender らの 2 面角に離散化された等角曲げモデルの曲げ制約[3]と塑性表現を活用することで、元の形状を更新することなく塑性表現を行う。また曲げ制約で扱うモデルは、曲げのみのエネルギーを算出するためにすべてのエッジの長さが不変である必要がある。そのため、ガウス=ザイデル法を用いた手法だと制約ごとに射影する過程で、頂点座標が更新されてエッジの長さが不均一になってしまう。そのため、PBD を用いた手法[4]では事前に曲げ制約の 2 面角を構成するエッジの長さを

非伸縮制約で修正する必要があった。一方で PD はヤコビ法を用いるため、種類の異なる制約の解が干渉せず並列して処理が行える。

2.3 塑性表現

塑性表現は、曲げ制約のローカルソルバー内で行われる。はじめに、2 面角のなす角度からひずみエネルギーを計算する。計算したひずみエネルギーを弾性成分と塑性成分を含めた全ひずみとして扱い、エネルギーが任意の曲率パラメータに基づく閾値を超えた場合、塑性成分を更新する処理へ移行する。更新された塑性成分は 2 面角のグループごとに蓄積する。このときに計算された塑性成分を 2 面角のひずみエネルギーから減算することによって、塑性変形を考慮した弾性成分のみの曲げエネルギーを計算できる。

3. 実験結果

提案手法は C++ で実装し、行列計算に Eigen を用いている。正方形のシェルの両端を図 1 のように合わせた後、上から下に向かって荷重を加えた。その後、除荷した状態が図 2 であり、シェルに塑性変形が生じていることが分かる。



図 1 荷重前のシェル



図 2 除荷後のシェル

4. まとめ

折り曲げによる塑性変形を考慮したシェル形状のビジュアルシミュレーション手法を提案した。現状ではメッシュのエッジに沿った折り曲げのみに限定されているため、計算中にメッシュを再構築するような工夫が必要である。

参考文献

- [1] Sofien Bouaziz, Sebastian Martin et al. (2014) "Projective dynamics: fusing constraint projections for fast simulation" ACM Transactions on Graphics
- [2] Matthias Müller, Bruno Heidelberger, Marcus Hennix et al. (2003) "Position Based Dynamics" VRIPHYS 2003
- [3] Jan Bender, Dan Koschier, Patrick Charrier et al. (2014) "Position-Based Simulation of Continuous Materials" Computers and Graphics Volume 44
- [4] 宮口 陽樹, 熱田 清明, 向井 智彦 (2019) 「位置ベース物理法を用いた紙の折り曲げシミュレーション」情報処理学会 第 81 回全国大会