



ネオ・フックアン制約によるリアルタイム弾性体切断シミュレータの開発

Development of a Real-Time Deformable Body Cutting Simulator Using Neo-Hookean Constraints

王 旭¹⁾, 青木 大地¹⁾, 村上 壮一¹⁾, 下江 隆司²⁾, 妹尾 拓¹⁾,

伊達 宏昭¹⁾, 七戸 俊明¹⁾, 安部 崇重¹⁾, 金井 理¹⁾, 近野 敦¹⁾

Xu WANG, Daichi AOKI, Soichi MURAKAMI, Takashi SHIMOE, Taku SENOO, Hiroaki DATE, Toshiaki SHICHINOHE, Takashige ABE, Satoshi KANAI and Atsushi KONNO

1) 北海道大学 (〒 060-0808 北海道札幌市北区北 8 条西 5 丁目, wang.xu@ist.hokudai.ac.jp)

2) 和歌山県立医科大学 (〒 641-8509 和歌山市紀三井寺 811 番地 1)

概要: 本研究では、ネオ・フックアン制約に基づく位置ベース法を採用し、変形体に対するリアルタイム切断シミュレーションフレームワークを提案する。ネオ・フックアン制約の導入により、応力テンソルの計算を可能とし、エッジ間制約を考慮せずに GPU 並列処理を簡素化した。また、切断後の断面を視覚化するため、四面体メッシュと表皮メッシュを同時にレンダリングする手法を開発した。さらに、提案した切断シミュレータを Meta Quest3 と統合し、腸の簡易切断シミュレーションを試作し、良好な結果を得た。本フレームワークは、GPU 並列化による高速な切断シミュレーション計算手法を開発し、複合現実システムと統合しても 40fps の応答を可能とするものであり、仮想手術支援や遠隔災害医療への応用が期待される。

キーワード: 切断シミュレーション, ネオ・フックアンモデル, 位置ベースダイナミクス

1. はじめに

自然災害や事故現場では、即時の医療処置が生存率向上に不可欠である。特に遠隔医療支援が必要な状況では、拡張現実 (XR) 技術を活用したリアルタイムシミュレーションが注目されている。XR デバイスを介して被災地の状況を遠隔地の医師と共有し、迅速な救命方針を提示できれば、救助活動の効率化が期待できる。しかし、XR アプリケーションは計算負荷が高く、パフォーマンス不足による 3D 酔いや操作性の低下が課題となる。

一方、人体の軟組織を物理的に再現するシミュレーションは、計算コストの高さからリアルタイム処理が困難である。有限要素法 (FEM) は高精度だが、切断や大変形を伴うケースでは計算コストが高く、リアルタイム処理に適さない。位置ベースダイナミクス (PBD) [1] は高速性と数値的安定性を両立する手法として知られるが、従来の PBD は幾何学的制約に依存し、非線形エネルギーモデルに基づく応力分布の計算が困難であった。このため、切断シミュレーションにおける切断面の動的生成や応力評価をリアルタイムで実現することは難しかった。

本研究では、災害救助や仮想手術 (例: 腸の切断シミュレーション) を想定し、ネオ・フックアン制約を導入した拡張位置ベースダイナミクス (XPBD) [2] を採用することで、リアルタイム切断シミュレーションと内部応力分布の

同時計算を実現するフレームワークを提案する。本手法は、GPU 並列化を用いた物理シミュレーションと複合現実技術の統合により、平均 40fps での性能を達成し、遠隔医療や救助訓練への応用が期待される。

2. 切断シミュレータ

2.1 ネオ・フックアン制約

従来の PBD 法は、力計算を伴う制約条件に対応できず、さらにシミュレーションの時間刻みに剛性係数が依存するため、ヤング率やポアソン比を用いた制御が困難であるという問題があった。これに対して、XPBD 枠組みで採用されるネオ・フックアン制約 [3] は、体積保存やせん断抵抗を表現する、以下のような最小化すべきエネルギー関数に基づいて定式化される。体積保存成分は

$$E_H(\mathbf{F}) = \det(\mathbf{F}) - 1, \quad (1)$$

せん断抵抗成分は

$$E_D(\mathbf{F}) = \sqrt{\text{tr}(\mathbf{F}^T \mathbf{F})} \quad (2)$$

として定義される。ここで、 $\mathbf{F}$ は変形勾配である。

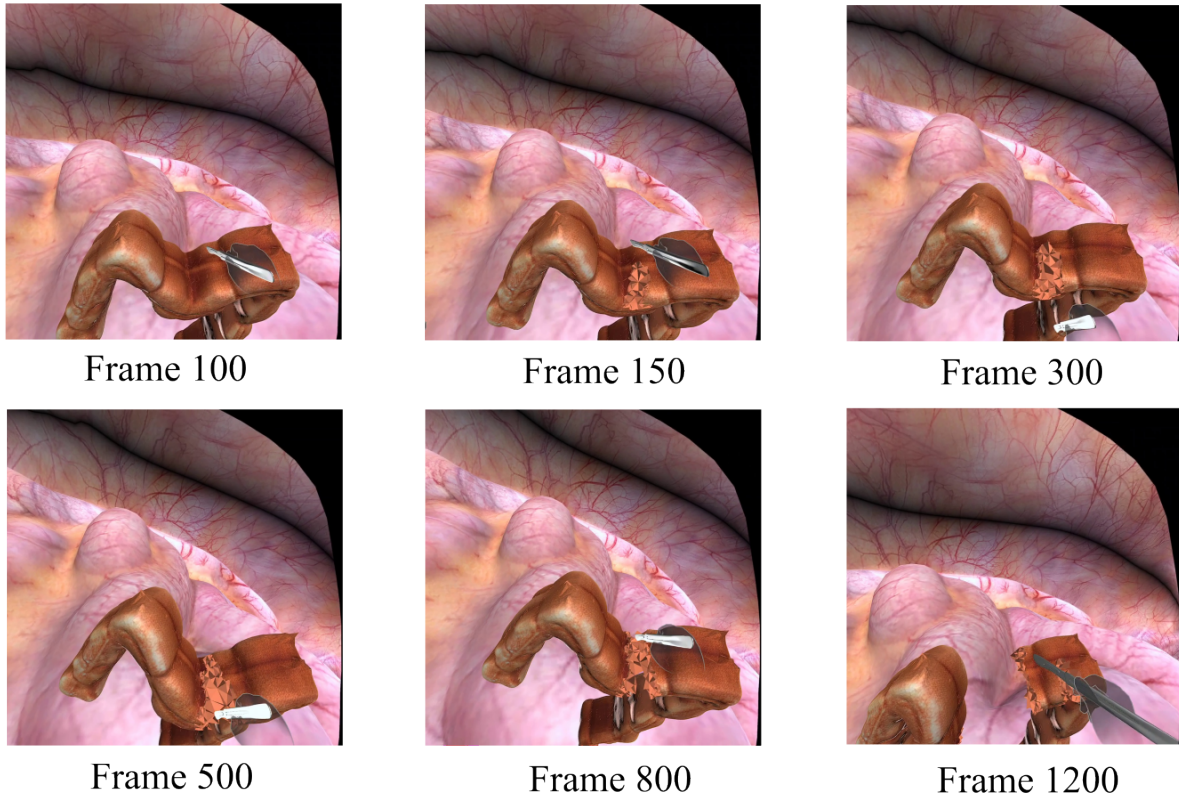


図 1: 腸の簡易切断シミュレーションにおける切断面のリアルタイムな可視化例

2.2 応力計算

ネオ・フックアンモデルに基づく応力テンソルは、形状保持成分（偏差応力 σ_D ）と体積保持成分（静水圧応力 σ_H ）に分解される：

$$\sigma_T = \underbrace{\mu \left(\frac{\mathbf{R}^T \mathbf{F} + \mathbf{R} \mathbf{F}^T}{2} - \mathbf{I} \right)}_{\sigma_D} + \underbrace{\frac{\lambda_H}{\Delta t^2 V_{\text{rest}}} \mathbf{I}}_{\sigma_H} \quad (3)$$

ここで、 $\sigma_T \in R^{3 \times 3}$ は四面体要素の総応力テンソル、 $\mathbf{R}$ は $\mathbf{F}$ の極分解から得られる回転行列、 μ はラメ定数、 λ_H は体積保存成分のラグランジュ乗数、 $\mathbf{I}$ は単位行列、 V_{rest} は静止状態の四面体要素の体積である。

2.3 切断メカニズム

切断シミュレーションでは、四面体要素の応力状態に基づき動的なメッシュ更新を行う。応力評価には von Mises 応力を使用し、以下のように定義する：

$$\sigma_T^{\text{vM}} = \sqrt{\frac{3}{2} \|\sigma_{\text{dev}}\|_F^2} \quad (4)$$

$$\sigma_{\text{dev}} = \sigma_T - \frac{1}{3} \text{tr}(\sigma_T) \mathbf{I}$$

ここで、 σ_T^{vM} は四面体要素の von Mises 応力、 σ_{dev} は偏差応力テンソル、 $\|\cdot\|_F$ はフロベニウスノルムである。

切断条件は以下で与えられる：

$$\sigma_T^{\text{vM}} > \sigma_{\text{threshold}} \quad (5)$$

この条件を満たす四面体要素は、GPU メモリ内のデータ削除を回避するため、物理的な削除の代わりにその制約を解除する。さらに、表皮メッシュについて、制約が解除された四面体要素に関連する三角形面はレンダリングから除外される。これにより、切断面の動的表示とリアルタイムでの可視化を可能にする。

3. 実験結果

本実験では、NVIDIA RTX 5090 を搭載した PC を用い、Meta Quest 3 と統合して腸の簡易切断シミュレーションを実施した。シミュレーション対象は腸の四面体メッシュで、初期状態では 22,725 個の頂点と 34,345 個の四面体から構成される。四面体メッシュとの接触においては、仮想メスの前端に複数の球体プリミティブを配置し、符号付き距離関数を用いて変形体との接触を評価する。貫通が検出されたノードには制約条件を適用し、非貫通状態を維持する。開発したシミュレータは、図 1 に示すように、切断面のリアルタイムな可視化を実現し、ユーザーが仮想メスを用いた直感的な切断操作を行えることを確認した。性能評価（図 2）では、切断操作がない場合に約 50fps、切断操作時には 30～35fps を達成し、全体として平均 40fps でのリアルタイム処理が可能であることを検証した。

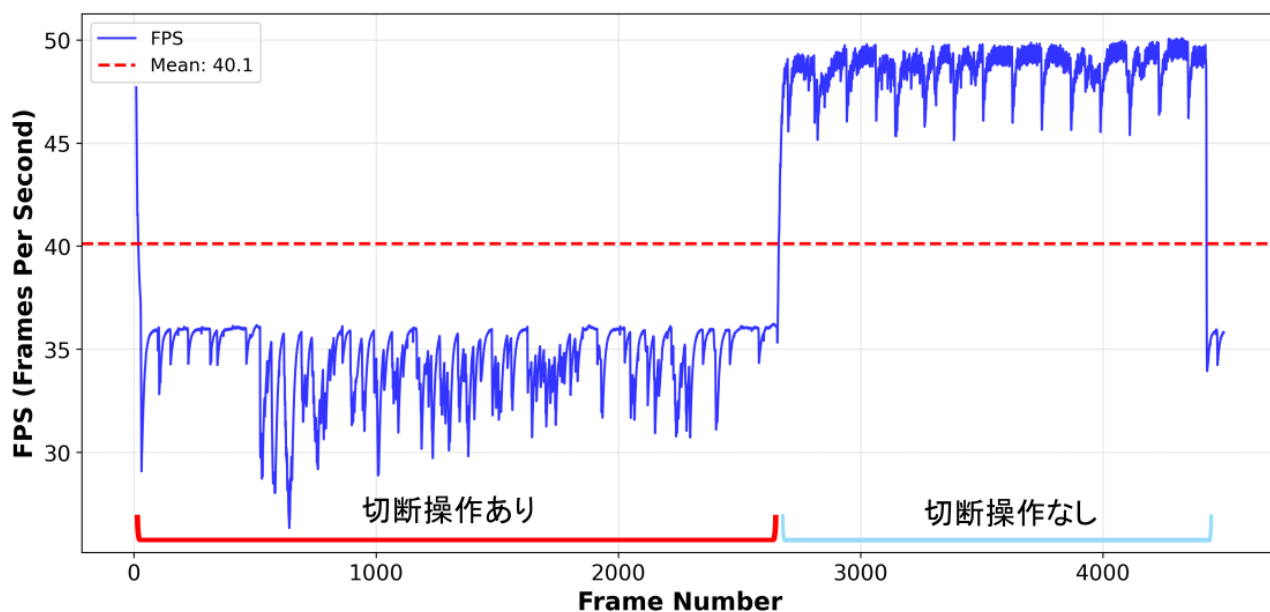


図 2: 切断シミュレーションの性能評価

4. まとめ

本研究では、ネオ・フックアン制約に基づく拡張位置ベースダイナミクスを採用し、リアルタイム切断シミュレーションフレームワークを開発した。GPU 並列化を用いた物理シミュレーションと複合現実技術の統合により、平均 40fps で切断面のリアルタイムな可視化を実現し、仮想手術支援や遠隔災害医療への応用可能性を示した。今後の課題として、切断面の物理的特性を高精度に再現するレンダリング手法の改良や、さらなるパフォーマンス向上が挙げられる。また、von Mises 応力に基づく切断条件にダメージ係数を導入するとともに、切断部エッジにおける応力集中による破壊現象の取り扱いについても検討し、切断面の力学的挙動を考慮したモデルの表現力を高める。

謝辞 本研究は、防衛装備庁が実施する安全保障技術研究推

進制度 JPJ004596 の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] M. Müller, B. Heidelberger, M. Hennix, and J. Ratcliff, “Position based dynamics,” *Journal of Visual Communication and Image Representation*, vol. 18, no. 2, pp. 109–118, 2007.
- [2] M. Macklin, M. Müller, and N. Chentanez, “Xpbd: position-based simulation of compliant constrained dynamics,” in *Proceedings of the 9th International Conference on Motion in Games*, pp. 49–54, 2016.
- [3] M. Macklin and M. Müller, “A constraint-based formulation of stable neo-hookean materials,” in *Proceedings of the 14th ACM SIGGRAPH Conference on Motion, Interaction and Games*, pp. 12:1–7, 2021.