

適応的変形・階層的接触計算による柔軟物シミュレーションの高速化

田川和義†¹ 栗木 諒†¹ 谷 典子†¹ 田中弘美†¹

概要: 本報告では、文部科学省「私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」および立命館大学「立命館グローバル・イノベーション研究機構 研究拠点事業」にて開発中のVR手術シミュレータを紹介し、その肝の要素技術となる軟組織等の仮想柔軟物の高速な変形・接触シミュレーション法について述べる。提案手法では、二分木表現された柔軟物の高速な変形・接触シミュレーションを実現するための方法として、バイナリオンラインリメッシュを用いた非線形変形計算およびバイナリツリーを用いた階層的接触計算を用いる。

キーワード: 柔軟物, 変形シミュレーション, オンラインリメッシュ, 干渉計算, 力覚提示

1. はじめに

本報告では、文部科学省「私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」および立命館大学「立命館グローバル・イノベーション研究機構 研究拠点事業」にて開発中のVR手術シミュレータを紹介し、その肝の要素技術となる軟組織等の仮想柔軟物の高速な変形・接触シミュレーション法について述べる。

2. 遠隔協働型・多様な術野の提供を可能とするVR手術シミュレータの概要

近年、諸外国のみならず我が国でも医師不足が問題となっている[1-6]。特に外科における若い世代の減少が著しいことは後進への指導環境の悪化につながり、外科を志向する学生が減少するという悪循環に陥るため、若い世代への技術指導の効率化が望まれている。また、医師の地域偏在化（地方での医師不足）も問題となっている。その要因として、制度上の問題や、勤務が多忙であること、都会の大病院の方が症例数も多く新たな技術を常に学ぶことができるなど自らのキャリア形成につながるなどがあげられる。上記の問題の根本的な問題解決が望まれることは言うまでもないが、対症療法として若い世代の技術指導を効率化し、中堅医の負担を軽減しなければならない。さらに、地方に居ながらにして、常に新たな技術を学ぶことを可能とするシステムの開発も求められる。

また、ヒトの臓器の形状／トポロジには個人差があり、例えば腹腔鏡下胆嚢摘出術では脈管（胆嚢管、胆嚢動脈等）に走行異常がしばしば見られ、手術リスクの一因となっている[7]。胆嚢管・総肝管・肝臓下部で囲まれる三角形はCalot三角と呼ばれ、この領域内を走行する脈管（胆嚢管、総肝管、胆嚢動脈等）に走行異常が出現することが多い[8]。これら異常走行の出現率は決して低くはなく、胆嚢管と総肝管の合流部だけでも、走行異常の出現率は35%程度であるといわれている[9]。このため、これらを再現可能なVR手術シミュレータが望まれている。

そこで我々は、遠隔地からの指導や遠隔多地点間での協働作業が可能な、遠隔協働手術訓練／遠隔地間の手術手技指導／複数被訓練生の同時指導といった本システム固有の手術訓練を可能としている[10]。さらに我々は、臓器の多様な異型バリエーションを考慮可能な、シナリオ可変型手術シミュレータの構築も行っており、30%程度の高い頻度で現れる典型的な異型や、非常に希にしか現れない異型を有する術野での実戦的な手術訓練を可能としている[11]。

3. 適応的変形・階層的接触計算による柔軟物シミュレーションの高速化

手術シミュレータを実現するためには、実物体との整合性が取れ、高速処理（500~1kHz程度の力覚レートでの処理）と多様な操作（変形・切断・剥離・穿刺等の操作）が可能な軟組織変形モデルが必要となる。

我々は多重解像度モデリングを目的として適応的四面体メッシュモデルの研究を行ってきた[12]。このモデルでは直方四面体を再帰的に二分割することで生成される二分木が用いられる（図1下中央）。この二分割の過程で生成される四面体形状は3種類のみであり、メッシュ品質が高く等方性を満たし、解像度の変化が滑らかという特長がある。

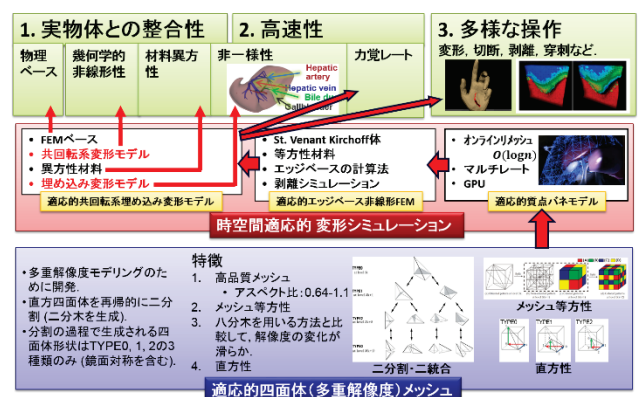


図1 適応的四面体メッシュと適応的変形シミュレーション
Figure 1 Adaptive tetrahedral mesh and deformation simulation.

†¹ 立命館大学
Ritsumeikan University

3.1 二分木表現された柔軟物の適応的変形計算法

我々はこのモデルをオンラインリメッシュ型の非線形変形シミュレーションへと応用している[13-15].

ここで手術においては、臓器をめくり上げる等の操作の際に、回転運動が発生するため、幾何学的非線形性の考慮が必要となる。近年、CGの分野では、共回転系変形モデルが提案されている[16]。共回転系変形モデルでは、変形前後の要素間で形状マッチングを行い、ローカル座標系を定義し直すことで、回転を含む運動成分を除去する。その上で線形変形モデルを用いて変形計算を行うため、幾何学的非線形性の考慮が可能となる。しかし、上記の回転運動成分の抽出処理に多くの計算時間を要する問題があった。

そこで我々は、効率的な変形計算を可能とする新たな共回転系変形モデルとして、オンラインリメッシュ型の回転抽出と変形計算を用いる新たな共回転系変形シミュレーションを提案している。提案手法では主に、上位階層の要素の回転行列を下位階層の要素の回転行列として代用することにより計算コストの削減を図っている。評価実験を行った結果、変形および反力の精度を維持しつつも最大約70%の計算コストの削減が可能であることを確認した[17].

さらに我々は、オンラインリメッシュ型変形計算を陰解法を用いて解く場合において、ELL形式[18]で圧縮した全体剛性行列を高速更新するための手法を提案した[19]。加えて、オンラインリメッシュに伴い細かな四面体要素が発生したとき、変形計算の精度維持のためには小さな時間刻みを用いる必要があるが、メッシュ全体で小さな時間刻みを用いると計算量が増大する問題がある。そこで、各ノード固有の時間刻みをもとに、ノードごとに必要最低限の更新レートで変形計算を行うマルチレート・オンラインリメッシュ型の有限要素変形計算法の研究も進めている[20].

3.2 二分木表現された柔軟物の階層的接触計算法

柔軟物の接触計算は事前処理が難しいことから計算コストが高くなるため、何らかの効率的な接触計算法が必要となる。従来の効率的な接触計算法の1つとして、対象物体を球や直方体等の単純な形状で階層的に近似する境界ボリューム階層法があげられる。しかし、対象が柔軟物の場合、物体の変形に伴い球や直方体の位置・大きさを更新する必要があり、四面体の階層構造を用いる我々の手法では、かえってこれらの更新処理に時間を要することが予想された。

そこで、我々は二分木探索と隣接探索とを併用する方法を提案している。始めに二分木探索でリーフ四面体まで探索し、リーフ四面体に接触点が含まれていなかった場合は隣接探索へ切り替え、接触点までの探索を行う。提案手法の試験的実装を行い、評価実験を行った結果、全探索と比較して約20倍程度の高速化を確認している。

4. まとめ

本報告では、開発中のVR手術シミュレータの紹介と、仮想柔軟物の高速変形・接触シミュレーションについて述べた。今後は、引き続きシミュレーションの精緻化を図ることで、緻密な手術手技のVR訓練を可能としていきたい。

参考文献

- [1] Cauchon, D.. Medical miscalculation creates doctor shortage. USATODAY.com, 2009.
- [2] Ramirez, M.. Rural doctor shortage called "a crisis" in Washington. The Seattle Times, 2009.
- [3] Halsey III, A.. Primary-care doctor shortage may undermine reform efforts. The Washington Post, 2009.
- [4] Feasby, T.. Medical schools are working hard to help cure the doctor shortage. The Globe and Mail, 2009.
- [5] Scalpel, S.. A shortage of general surgeons: coming soon? Physician's Weekly, 2012.
- [6] “厚生労働省 平成24年(2012年)医師・歯科医師・薬剤師調査” http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/ishi/12/dl/kekka_1.pdf, (参照 2016-12-11).
- [7] 来見良誠(著). Q&A 腹腔鏡下胆嚢摘出術 こんなときどうする? 医学書院, 1996.
- [8] 松本純夫(編). 動画でわかる腹腔鏡下胆嚢摘出術. 中山書店, 2008.
- [9] Netter, F. H.. Atlas of human anatomy (4th edition). Saunders, 2007.
- [10] Tagawa, K., Tanaka, H. T., Kurumi, Y., et al.. Evaluation of network-based minimally invasive VR surgery simulator. Stud Health Technol Inform, 2016.
- [11] 田川和義, 小森 優, 近江奈帆子, 他. 多様なVR術野構築のための漿膜・結合組織のT型分岐構造モデリング. 日本VR学会論文誌, Vol.14, No.1, pp.1-8, 2016.
- [12] 高間康文, 木村彰徳, 田中弘美. ボリュームデータの適応的四面体メッシュ表現並列アルゴリズム. 情報処理学会論文誌, Vol.48, pp.67-78, 2007.
- [13] 高間康文, 辻野圭則, 堀 洋介, 他. 柔軟物体の適応的四面体ボリュームメッシュのオンラインリメッシュ法. 日本VR学会論文誌, 13(1), pp.69-78, 2008.
- [14] 田川和義, 佐々木康行, 田中弘美. オンラインリメッシュ型変形計算のGPUによる高速化と大規模仮想柔軟物体との力覚インタラクション. 日本VR学会論文誌, Vol.16, No.3, pp.479-487, 2011.
- [15] 田川和義, 中川智史, 田中弘美. 直方四面体ベース・オンラインリメッシュ型非線形有限要素モデルによる効率的な変形・剥離シミュレーション. 日本VR学会論文誌, Vol.18, No.1, pp.73-80, 2013.
- [16] Müller, M., Dorsey, J., McMillan, L., et al.. Stable real-time deformations. Proc. SCA, pp.49-54, 2002.
- [17] 田川和義, 山田隆洋, 田中弘美. オンラインリメッシュ型回転抽出と変形計算による共回転系変形シミュレーションの高速化. 信学論, Vol.J99-D, No.9, pp.959-968, 2016.
- [18] Kincaid, R. D., Oppe, C. T., Young, M. D.. ITPACK 2.0 User's Guide. Technical Report CNA-150, Center for Numerical Analysis, University of Texas, 1979.
- [19] 栗木 諒, 田川和義, 田中弘美. オンラインリメッシュ型有限要素法変形計算のための最適な行列保持法の選定. VR学研報, Vol.20, No.HDC16, pp.17-18, 2015.
- [20] Kuriki, R., Tagawa, K., Tanaka, T. H., et al.. A fast update approach of a stiffness matrix for a multi-rate finite element deformation simulation. Proc. AsiaHaptics, 2016.