



臓器の柔軟性と膜の剥離・切開を再現する 内視鏡手術シミュレータの開発

阿部陽斗¹⁾, 小枝正直¹⁾, 曲渕敏博²⁾, 澤田篤郎³⁾, 大西克彦⁴⁾, 登尾哲史⁴⁾

Haruto ABE, Masanao KOEDA, Toshihio MAGARIBUCHI,

Atsuro SAWADA, Katsuhiko ONISHI, and Hiroshi NOBORIO

1) 岡山県立大学 情報工学部 (〒719-1197 岡山県総社市窪木 111)

2) 京都大学 医学研究科 泌尿器科学教室 (〒606-8507 京都府京都市左京区聖護院川原町 54)

3) 宮崎大学 医学部 (〒889-1601 宮崎県宮崎市清武町木原 5200)

4) 大阪電気通信大学 総合情報学部 (〒575-0063 大阪府四條畷市清瀬 1130-70)

概要: 腎臓手術における膜の剥離から腫瘍の発見までを再現する内視鏡手術シミュレータを Unity と動力学エンジン Obi で開発した。膜の物理挙動を再現し、マウス操作とキーボード操作によって膜の剥離・切開動作を実装した。非医療系学生 9 名による評価では、膜の摩擦の有無や剥離方法により操作時間や引張力に差がみられた。一方で、3 次元空間での操作性や膜の被覆枚数、切開動作のリアリティについては課題が残された。今後は、3 次元空間での切除動作の実現や膜の付着強度の調整を行い、リアリティの向上を目指す。

キーワード: シミュレーション, ロボット支援手術, 動力学エンジン, 手術訓練

1. はじめに

近年の外科手術において、術後の回復の早さや合併症のリスクなどの観点から患者の負担が少ない低侵襲手術の発展が急務となっている。現在行われている低侵襲手術のなかでも内視鏡下手術は、1~2[cm] 程度の切開を 2~3 箇所入れ、鉗子を挿入して行う手術方法である。従来の開腹手術に比べて切除範囲が小さいため、術後の回復が早く、合併症の発症率が少ないことが知られており低侵襲手術の発展において期待されている技術である [1, 2]。特に da Vinci 手術に代表されるロボット支援手術は、世界中の多くの施設で行われ、腎部分切除術における中心的な治療となっている [3]。

実際のロボット支援内視鏡手術の様子を図 1 に示す。ロボット支援下内視鏡手術においては、モニタ画像を見ながら腹腔内の 3 次元の構成を頭の中で構築し、モニタとは違う位置にある対象 (患者) に対し、両手とフットスイッチの操作を協調させて行う能力 (psychomotor skill) が必要である [4]。一方、膜の剥離動作においては、両手操作を主体とし、片方の鉗子で引っ張った膜を保持し、もう片方のアームで膜を剥がす動作を行う。この際、膜を適度な力で把持して引っ張ることで、膜が薄く伸びてテンションがかかった状態となるため、剥離が容易になる。このような手技は安全な手術において重要であり、術前のトレーニングが重要である。

内視鏡下手術の訓練方法の中でも VR 技術を使った手術シミュレータが開発され、その有効性が報告されている [5]。

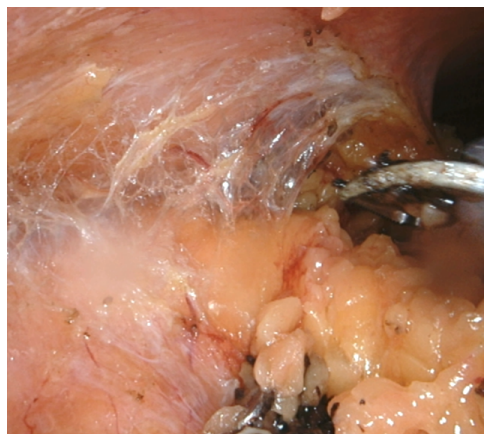


図 1: 膜の剥離動作

VR シミュレータはトレーニングタスクの豊富さや反復練習の容易さをメリットに持つが、膜の剥離が再現できない点が共通の弱点であることが報告されている。例として、LapVR (Immersion Medical 社製) は切開や糸結びといった基本タスクをはじめ、腸管操作、縫合などからなる procedural skills の訓練が可能である [4, 6]。

VR シミュレータでの剥離・切除動作について、糸ら [7] は、計算力学に基づいた変形とせん断応力分布に基づく破断を一括して扱うことのできる軟組織変形破断モデルを提案した。これにより、剥離の成功と失敗までを表現できる力学モデルを提供した。しかし、シミュレーション全体の精度向上とリアリティの追求について課題が残っているこ

とが報告されている。また、島田ら [8] は、Unity Asset の Obi によって柔軟化した腎臓の 3D モデルを用いて膜の附着強度と剥離動作を再現した。しかし、実際のスケールとは異なるモデルを用いてシミュレーションを行っている。

このように、実践的に運用できるシミュレータはまだ実現できていないと言える。そこで本研究では、実寸大スケールにおいて膜の剥離からがんの発見までの一連の動作を再現する腎臓手術シミュレータの開発を目的とした。

2. 膜の剥離動作を再現する手術シミュレータ

2.1 開発環境

本シミュレータの開発には Unity を用い、柔軟物の物理演算には動力学エンジン Obi を用いた。Unity は、Unity Technology 社が開発している統合開発環境である。C# プログラミングによる開発によって、2D/3D の物理シミュレーションが可能である。Obi[9] とは、粒子ベースの Unity 用物理演算 Asset で、布やゼリーのような柔らかい質感を実現する。主な構成要素 (ObiActor) としては布のような動きを扱う ObiCloth、ロープのような動きを扱う ObiRope、ゴムやゼリーのような柔らかい物体を再現する ObiSoftbody、流体を扱う ObiFluid の 4 つがある。なお、ObiCloth と ObiRope については破断シミュレーションが可能である。

本研究では、Unity2022.3.47f1 と Obi7.0.3 を使用し、腎臓の柔軟な動きを再現するために Obi Softbody を、柔軟な膜の再現に Obi Tearable Cloth を使用した。

2.2 配置したモデルとタスク

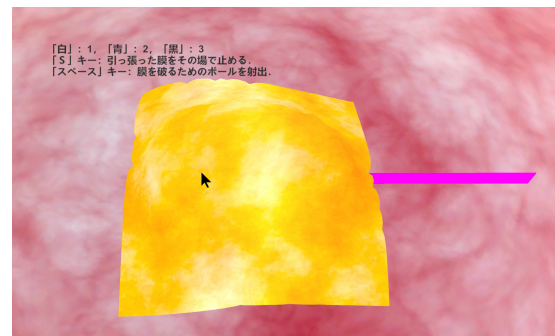
本研究で開発したモデルを図 2 に示す。本シミュレータでは質量 150[g] に設定した縦 6[cm]、高さ 4[cm]、横 11[cm] の臓器モデルと 100[g] に設定した一辺 15[cm] の正方形膜を配置し、臓器の右上奥にあるがんを想定した直径 0.6667[cm] の球体オブジェクトを発見するまでを一連のタスクとして設定した。

膜モデルには ObiTearableCloth を付加し、臓器モデルには ObiSoftbody を付加することにより、柔軟な臓器の動きを実現した。膜を引っ張る動作は ObiParticleDragger スクリプトを追加することで実現した。また、同スクリプトに引っ張った膜を固定する機能を追加した。膜の切開動作についてはスペースキーを押している間マウスカーソルの位置から連続的に微小な球体を射出することで再現した。

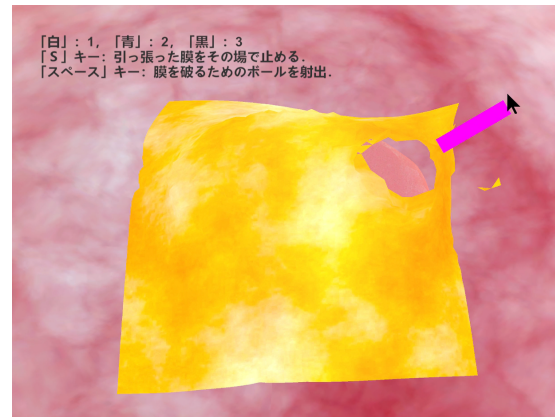
3. 評価実験

3.1 実験手順

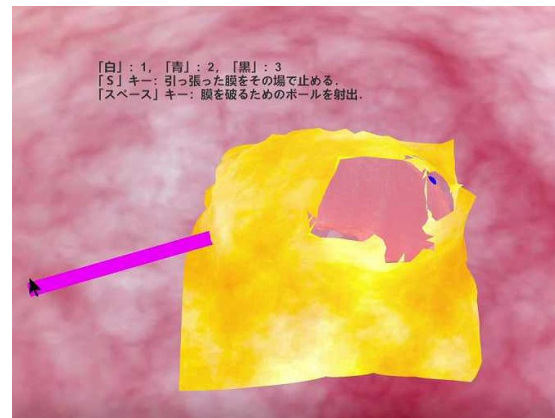
本実験は、18～24 歳の非医療系学生 9 名を対象に行った。まず、事前説明の段階で実際の手術の動画を視聴してもらい、研究対象と実験手順、シミュレータ操作の説明を行った。説明の際には手術動画を見てもらい、手術手技をイメージしてもらうとともに、なるべく切除範囲を小さくするように意識するよう依頼した。その後、以下の 3 条件についてタスクを遂行してもらい、タスククリア時間、オブジェクトを引っ張る力 (引張力)、合計引張時間を計測した。その



(a) タスク初期状態



(b) 膜剥離の様子



(c) ターゲットの発見

図 2: 開発したシミュレータ

際、実験中のシミュレータ画面を記録した。

- 条件 1: 臓器モデルのみ
- 条件 2: 膜あり・摩擦なし
- 条件 3: 膜あり・摩擦あり

3.2 解析

各条件ごとに被験者全体の平均値と標準偏差を算出した。また被験者の動作傾向より、以下の 2 グループに分けてグループごとに平均値と標準偏差を算出した。

- グループ 1: 引張動作を主体に行った被験者群 (4 名)
- グループ 2: ボール射出を主体に剥離動作を行った被験者群 (5 名)

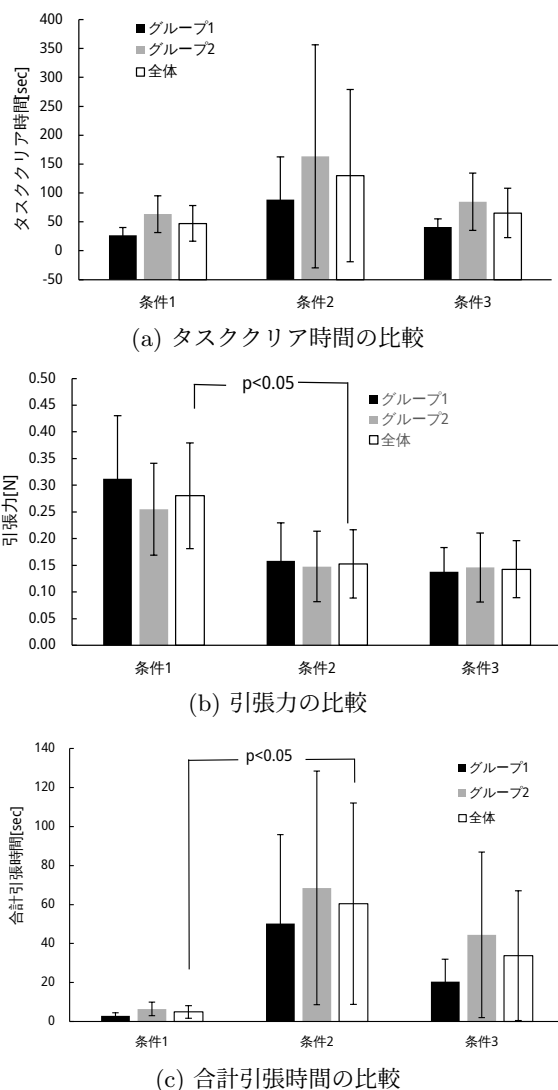


図 3: 実験結果

さらに、得られた結果について条件 1 と条件 2（膜の有無）および条件 2 と条件 3（摩擦の有無）について対応のある t 検定を実施した。

3.3 結果・考察

図 3 に各計測結果を示す。

第一に、タスククリア時間については有意な差は見られなかったが、条件 2 と比較して条件 3 の方がタスククリア時間が短い結果が観測された。しかし、被験者ごとに結果が多様であり、明確な傾向があるとは言えなかった。この点については実験前に操作方法の練習を入れずに行ったため、経過時間には個人差が生じたことが原因であると考えられる。また、被験者の動作傾向別に比較をした際にも有意差は観測されなかったが、各条件について引張動作を主体に行ったグループ 1 と比較してボールによる剥離動作を主体に行ったグループ 2 のほうが長くなった。この結果より、膜を丁寧に剥離するほうがそうでない場合と比べてがんの発見までの時間が短縮され、より効率的な手術動作が可能であるという知見を得られた。

第二に、引張力について条件 1 と条件 2 の間に有意差が見られたが、条件 2 と条件 3 の間に有意差は見られなかった。被験者の動作傾向別に比較をした際にも有意差は観測されなかった。またグループ間では結果が多様であり、明確な傾向があるとは言えなかった。条件 1 と条件 2 については膜の有無によって引っ張るオブジェクトの種類が臓器のみか、膜と臓器両方かが変わるため、引張力に差が生じたことが考えられる。一方、条件 2 と条件 3 については、膜の破れやすさが同一であるため、アプローチに差が生じにくいことや、膜の付着は実装していないことから引っ張る力に差が生じにくかったことが原因として考えられる。

第三に、合計引張時間については、条件 1 と条件 2 の間に有意な差が見られた。この点については、膜の有無によってターゲットを発見する手順が異なることに起因すると考えられる。一方、条件 2 と条件 3 との間には有意差は見られなかったが、条件 2 と比較して条件 3 のほうが合計引張時間が短縮する結果が観測された。この点においてはグループ 1 とグループ 2 で被験者ごとに剥離のアプローチが異なる点が原因として挙げられる。また、摩擦がある場合のほうが膜が破りやすく感じる意見があったことより、膜を引っ張る時間がそれに付随して短縮したことが考えられる。さらに、被験者の動作傾向別に比較をした際にも有意差は観測されなかったが、各条件についてグループ 1 と比較してグループ 2 のほうが長くなった。この点についてはタスククリア時間の短縮に付随して引張合計時間も短縮したことが考えられる。

4. 問題点と改善

ロボット手術の制御方法に関して Zhang ら [10] は、LeapMotion によって手の位置・角度を計測し、6 種類の基本ジェスチャーでロボットを制御し、Aruco マーカから術者の姿勢を推定し、12 種類の微調整命令を実装することでロボット手術における新しい制御方法を実現した。また、外科手術における 3D シミュレーションの例として、Saul [11] らは、仮想カッティングツールでインタラクティブな両手操作による切断を再現した。これは手術器具モデルと円形ガーゼモデルを用いた両手操作の 3 次元手術シミュレーションである。また、円形ガーゼモデルのメッシュの三角形を仮想切断ツールによって交差させ、切断経路に沿ってメッシュの辺を再生成することにより、正確な切除面を生成することが可能である。この手法を応用し、LeapMotion による鉗子操作シミュレーションで切除動作を再現することができれば、前述の 3 次元空間での操作とボール射出に代わる切除動作の再現が実現すると考えられる。また、システム内の改善点として、臓器モデルにメスを当ててはいけない部分を設定し、そこにメスを当てた際にシミュレーション上でアラートを表示することで、シミュレーション実施者に向けて注意を促すことが可能であると考えられる。

引っ張る方向や動作に迷う問題については LeapMotion のシミュレーションに鉗子オブジェクトを組み込むことで

動作方向がわかりやすくなると考えられる。また、膜をつかむ位置を可視化することで動作の迷いは低減されると考えられる。

手術シミュレーションにおける膜の付着強度について、島田ら [8] は、Obi を用いた膜剥離シミュレーションにおいて、CollisionMaterial の値を変更することで膜の付着強度の調整を実現した。本研究では摩擦の有無での比較しかできていないが、この技術を応用することで、膜の付着強度を調整し引っ張る際の感覚をより実際の状況に近づけることが可能であると考えられる。

臓器モデルのサイズや柔軟性、膜の付着強度の個人差の観点について、第一に、臓器モデルのサイズについては、ObiActor を自動生成するプログラムを応用し、生成時に ObiActor のサイズを変更することによって実現可能であると考えられる。臓器の柔軟性や膜の付着強度についても同プログラムの応用によってシミュレーション上での調整は可能である。しかし、医学的観点による体組成や体格との関連性に関する研究は倫理的配慮の観点も含め現在されていない。そのため、患者個人の状態に合わせたシミュレーションの実現については現状不可能であり、今後の研究の発展が期待される。

5. おわりに

本研究より、実寸大スケール下で柔軟な膜の剥離、切開と腫瘍の発見までの動作の再現を行った。一方、マウス操作による 2 次元平面の操作から 3 次元空間を操作することによる操作性や、膜の被覆数、メスの再現方法など、課題が残る結果となった。

今後は、3 次元空間での切除動作の実現や膜の付着強度の調整を行い、リアリティの向上を目指す。

謝辞

本研究の全過程を通じて、様々な面で御世話になり、直接の御指導、ご協力を頂きました（株）かしなシステム國居氏に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] "内視鏡下外科手術 | オリンパス おなかの健康 ドットコム". <https://www.onaka-kenko.com/endoscope-closeup/endoscopic-surgery/>. [閲覧日：2025 年 1 月 6 日].
- [2] "内視鏡（腹腔鏡）手術について — 島根大学医学部附属病院 産科婦人科". <https://www.shimane-u-obgyn.jp/patient/638>. [閲覧日：2025 年 1 月 4 日].
- [3] 稗田圭介, 日向信之. "腎部分切除術". *Japanese Journal of Endourology and Robotics*, Vol. 37, No. 1, pp. 65–70, 2024.
- [4] 藤原道隆, 岩田直樹, 田中千恵, 渡邊卓哉, 小寺泰弘, 中尾昭公. "内視鏡下手術訓練システムの現状と今後の展望". *日本 VR 学会誌*, Vol. 15, pp. 27–31, 2010.
- [5] 藤原道隆, 福本良平, 田中千恵, 小寺泰弘. "腹腔鏡手術スキルに関する augmented reality シミュレータ訓練の有用性の検討-virtual reality シミュレータ訓練との比較". *VR 医学*, Vol. 11, No. 1, pp. 7–12, 2013.
- [6] 三澤一成, 藤原道隆, 小寺泰弘, 小池聖彦, 中山吾郎, 伊藤友一, 中尾昭公. "内視鏡外科手術の教育におけるバーチャルリアリティ手術シミュレータの役割". *VR 医学*, Vol. 7, No. 1, pp. 37–43, 2009.
- [7] 糸 直人, 中尾 恵, 黒田 知宏, 吉原 博幸, 小森優. "VR シミュレータを目指した生体軟組織の剥離シミュレーション". *生体医工学*, Vol. 43, No. 1, pp. 76–84, 2005.
- [8] 島田乃巴流, 小枝正直. "膜のリアルな動きを再現する手術シミュレータの開発". 2024 年電子情報通信学会総合大会 (IEICE2024), D-1607, 2024.
- [9] Virtual Method Studio. "Obi - Unified Particle Physics for Unity 3D". <https://obi.virtualmethodstudio.com/>.
- [10] Zhang, Xinkang and Wang, Jie and Dai, Xiaokun and Shen, Shu and Chen, Xinrong. A non-contact interactive system for multimodal surgical robots based on LeapMotion and visual tags. *Frontiers in Neuroscience*, Vol. 17, p. 1287053, 2023.
- [11] Saul Alexis Heredia Perez, Kanako Harada. "A VR simulator for pattern cutting for surgical skills training". 第 23 回日本 VR 医学会学術大会, S4B-1, 2024.