



臓器の剥離操作練習のための 紐状弾性体と柔軟シートによる触力覚提示

Tactile Presentation Using String Elastic and Flexible Sheets
for Organ Dissection Training

和田佳久¹⁾, 伊藤香²⁾, 矢野博明³⁾

Yoshihisa WADA, Kaori ITO, and Hiroaki YANO

- 1) 筑波大学 システム情報工学研究群 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1, y_wada@vrlab.esys.tsukuba.ac.jp)
- 2) 帝京大学 医学部外科学講座 Acute Care Surgery 部門 (〒173-8605 東京都板橋区加賀 2-11-16, itok0806@med.teikyo-u.ac.jp)
- 3) 筑波大学 システム情報系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1, yano@iit.tsukuba.ac.jp)

概要: 腹部外傷外科領域における開腹手術では、腸管や周辺組織の層を剥離し、目標とする臓器や血管を露出させる。このとき、医師は視覚情報がほとんどない状況で手指から得られる触力覚情報を頼りに剥離操作を行うが、手指が適切な剥離箇所に入った場合は抵抗が少ない一方で、誤った剥離箇所に入った場合は尿管などに干渉して手応えが変化する。本稿では、紐状弾性体と柔軟シートを組み合わせ、手指が誤った剥離箇所に入った場合に干渉に気付いて立ち戻る練習を行うためのシステムのプロトタイプシステムの概略とそれを用いた評価実験結果について報告する。

キーワード: 手術シミュレータ, Off-JT, 剥離操作, バーチャル臓器

1. はじめに

近年、交通事故件数が減少し、自動車工学の進歩により患者の重症化が軽減されていることに加えて、重症外傷患者の非手術的治療の進歩によって外傷手術の件数は減少の傾向にある[1]。このような状況にあっても依然として手術でないと救命できない症例が存在している。医学生や研修医ら若手が実際の現場での OJT(On-the-Job Training)から手術手技を習得できる機会が減少している状況で、シミュレーションなどによって手術手技の要点を繰り返し訓練できる Off-JT(Off-the-Job Training)が重要になる。カダバートレーニング[2]や動物の臓器を用いて訓練を行う例[3]があるが、倫理的な問題や実施に多大な費用が必要であること、繰り返し訓練することができないなどの課題があり、幅広く活用できる体制にない。このような背景により、Virtual Reality(以下、VR)技術によるバーチャルな物体を用いた訓練システムの適用が期待される。

外傷により大量の腹腔内出血がある患者の開腹手術で有効な止血効果を得るためには、出血している下大静脈を隠している臓器を適切に剥離・脱転させ、止血部位を露出させる必要がある。これまで、開腹手術シミュレータとして、縫合、切開、圧排などの操作が可能になっている

[4][5][6]。しかし、これらの手術手技と異なり、剥離操作はほとんど視覚情報がない状況で手指の表裏から得られる触力覚情報を頼りに実施される。医師が臓器を剥離・脱転するとき、最初に上行結腸の外側の後腹膜を電気メスで切開し、外側円錐筋膜に沿って手指を挿入する。次に前腎筋膜に沿って、上行結腸・後腹膜の層と周囲の脂肪などの組織との癒着を剥離させていく(図 1)。そして、上行結腸と後腹膜の層を左上腹腔内に脱転し、下大静脈を露出させる。手指が前腎筋膜より奥の、誤った箇所へ入った場合は、腎臓から出ている尿管に干渉し、巻き込んで損傷させるなどの重大な医療過誤に繋がる恐れがある。剥離操作は、手指を挿入するための入口を切開すべき箇所は決まっている一方で、正しい剥離箇所へ入ったかどうかは手指を挿入してからでないと判断することはできない。また、医師は誤った剥離箇所に入った場合、尿管に触れる手応えがあることで誤っていることを判断している。視覚情報に頼れない盲目的操作であるため、実施するためには経験が必要になる。

本稿では、腹部大静脈止血手術における臓器剥離操作の練習方法を提案し、そのプロトタイプシステムを開発したシステムの評価として、臓器の層と周辺組織を剥離させ、

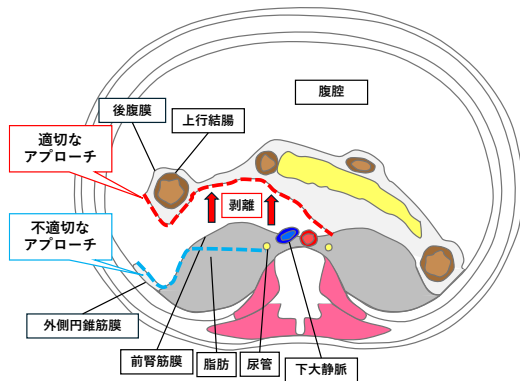


図 1: 人体の断面図 ([7]を一部改変)

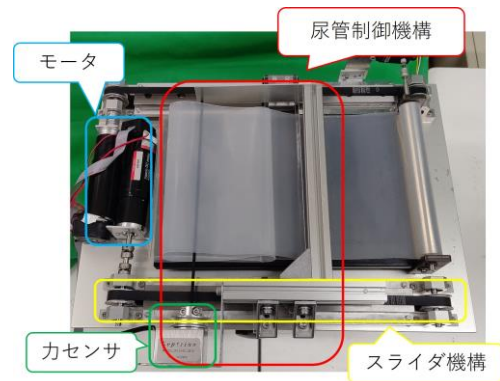


図 2: システム概観 (上面図)

尿管に干渉したら気付いて剥離開始時の位置に立ち戻る手技の練習への適用可能性を検証した。

2. プロトタイプシステム

2.1 プロトタイプシステム概要

腹部大静脈止血手術における臓器の剥離操作に必要な要素として、臓器および組織の触力覚提示、臓器と組織との癒着を剥離する感覚、誤った剥離箇所に入って尿管に干渉した場合の抵抗感などが考えられる。

本システムでは、臓器および組織の触力覚提示は、外傷外科医の主観的評価を基に上行結腸・後腹膜の層はゴムシートを、その下に脂肪などの周辺組織を模したゲルシートを配置し、尿管に見立てたゴム紐を用いて手応えの提示を行った (図 2, 3)。電気メスでの切開後の剥離しやすい状況を再現するように平面な土台上に、ゲルシートを敷き、その上に土台よりも長いゴムシートを図 5 のように折り返して載せた。臓器と組織との癒着は、2種類のシートの粘着によって再現され、この間に手指を挿入していくことで剥離する感覚を提示できる。さらにゴムシートの内側にゴム紐を通して実際と同様に尿管に直接接触れないが手応えがある状況を再現した尿管の有無を提示できるように電動スライダを用いてゴム紐を左右に移動可能とした。誤った剥離箇所に入って尿管に干渉する場合の抵抗感は、剥離を進めていき、手指がひだに内在するゴム紐に接触することで手応えの提示を行える。また、電動スライダで尿管を右に移動させることで、尿管と干渉しない状況を再現できる。

また、手応えによって触り方を変える様子を計測することで触り方のフィードバックができる可能性もあることから、ゴム紐の一端に6軸のカセンサを取り付けた。

また、図 1にあるように、本来は手指を前腎筋膜まで挿入してから下大静脈に向かうまでには勾配が存在する。医師の報告から、患者毎で勾配の大きさに個人差があることが分かっており、この点については本稿のプロトタイプシステムでは実装していない。

触力覚情報の提示に併せて、さらにヘッドマウントディスプレイ (以下、HMD) による視覚提示を組み合わせたシステムを開発した (図 5)。HMD で CG の臓器モデルの映

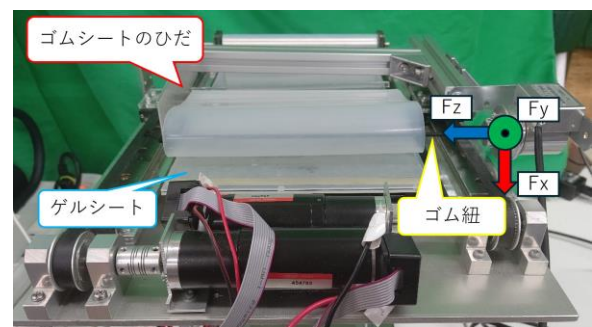


図 3: システム概観 (側面図)

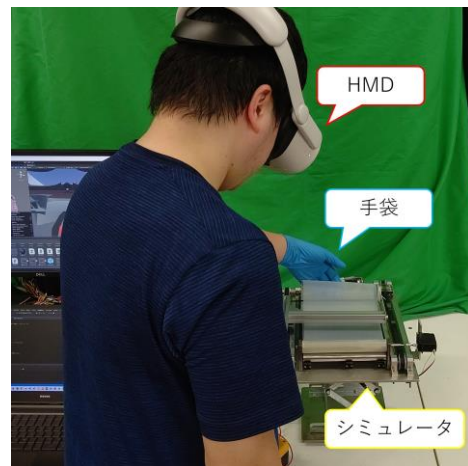


図 4: 実験中の様子

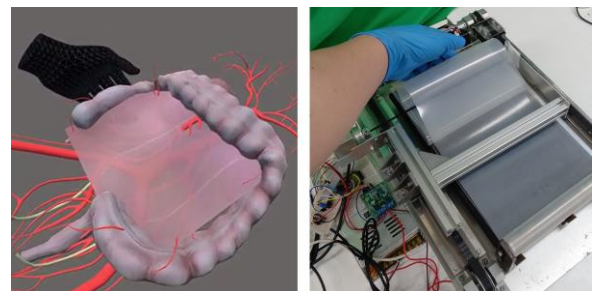


図 5: 提示映像 (左図) と現実 (右図)

像と実世界の効果器との位置合わせを行い、重なっているように見えるようにして、臓器モデルを操作している感覚

を提示した。

2.2 ハードウェア構成

本シミュレータのハードウェアは、提案システムのゴムシートのみとゲルシート、尿管移動機構と映像提示を行う HMD から構成される。

ゴムシートのひだは、平面な台の上にシリコンゴムシート (K-125(50), 硬度 50, 1mm 厚) をひだ (空洞) を作るように設置した。

尿管移動機構は、ゴム紐 (直径 3mm, 伸び率 200%) とアルミフレーム、アルミ板を「コ」の字に組み合わせてゴム紐の張りを一定に保ちつつ、DC モータ (maxon 社製, 定格出力 11W, 最大許容回転 10400rpm) に減速比 1/23 のギアヘッド (同社製, GP32A) を取り付け、ロータリーエンコーダには同社製 HEDL5540 (分解能 500) を使用した。駆動用の電源供給は外部電源 (スイッチング電源, 0-24V, 20A, 50/60Hz) を使用した。また、制御用ポートには ESP-WROOM-32 (以下, ESP32) を使用した。この制御ボードを PC と USB 接続し、PC から送信される指令によってバーチャルな尿管を移動させる。また、スライダの可動範囲は最大約 200mm である。また、尿管に加わる力を計測するためにゴム紐の一端に 6 軸力覚センサ (Leprino 社製, FFS080YA501U6) を取り付けた。力センサの座標系はゴム紐のせん断方向のうち、土台に垂直な成分を X 軸、土台に水平な成分を Y 軸、ゴム紐が伸びる方向が Z 軸である (図 3)。

2.3 ソフトウェア構成

本システムは、バーチャル空間における物理計算およびバーチャル物体の描画が可能な統合開発環境の Unity (Unity Technology 社) を使用したシミュレーション用ソフトウェアと ESP32 による尿管移動機構の位置制御、6 軸力覚センサによる力の計測から構成される。

HMD を装着することで、バーチャルな 3D モデルを 1 人称視点で見ることができ、手指位置のトラッキングが行われると同時に VR 空間内で手のモデルとして動きが反映される (図 5 左)。

3. プロトタイプ評価実験

3.1 実験概要

本稿では、開発した手術シミュレータの評価を行うために、腹部大静脈から大量の腹腔内出血がある場合の開腹手術における臓器の剥離操作を想定し、

1. 正しいアプローチで剥離しているパターン
2. 誤ったアプローチで剥離しているパターン

の 2 通りを実験として行った。

実験参加者に HMD と左手にゴム手袋 (ニトリル製パウダーフリー) を装着させ、患者の右側に立っている想定で装置に正対して立たせ、各シナリオに沿って剥離操作を行わせた。

評価項目は、尿管を模したゴム紐への接触到気付いて立

ち戻ることができたか、その際にゴム紐に加えた力を計測した。また、実験中の手技の様子をビデオ撮影し、剥離操作時の触動作について観察した。

また、6 軸力覚センサに取り付けたゴム紐はスライダのベルトやゴムシートのひだ、ゲルシートなどに複数の箇所まで接触しているため、手指がゴム紐に触れていない状態であっても常に一定の力が加わる。そのため、各試行開始時には加わり続けている力のオフセット分だけ、以降の力の時系列データから減算した。

実験参加者は本手技の処置経験が豊富な外傷外科医 1 名と研修医 1 名、20 代の視覚や歩行に障害がなく、VR 酔いの経験がない健康な成人男性 (本手技の経験がない) 3 名で実験を行った。

3.2 実験手順

実験の手順を以下に示す。

1. HMD, 手袋を装着して装置に正対する。
2. 尿管移動機構を動作させ、正しいアプローチのパターン、誤ったアプローチのパターンのいずれかをセット。
3. 装置の位置と重畳する映像の位置合わせを行い、手袋を装着した左手を映像の開始位置に移動。
4. 力センサの値をキャリブレーション。
5. ひだとゲルシートの間の手を挿入していき、粘着を剥離。この時、指先がゴム紐 (尿管) に当たったと判断した段階で手を挿入する前の状態まで戻し、試行を終了。ゴム紐に触れた感触がなければ、止める指示があるまで剥離。
6. 実験の開始地点に左手を移動。
7. 1~5 の手順を正しいアプローチのパターン、誤ったパターンで無作為に 5 回ずつ、計 10 回試行。その間に、ゴム紐に作用した力を 6 軸力覚センサより時系列データとして取得。

4. 結果

ID01 の実験前半の様に誤答した場合、指先がゴム紐の下に入り、ゴム紐が大きく持ち上げられることによって、最大値が他の参加者と比較して最も大きくなった。また、ID01 の剥離動作について、前半では常に手指を大きく押し込みながらシートを持ち上げるように剥離を進めていた。一方で、後半では手指を互い違いに細かく水平に動かしながら剥離を進めていた。

ID02 は前半では手指を同時に屈伸させながら水平に動かしながら剥離を進めていて、後半では手指を細かく互い違いに水平方向に動かしながら剥離を進めていた。

ID03 は前半では把持しつつ持ち上げるように剥離を進めていて、後半では手指を細かく互い違いに水平方向に動かしながら剥離を進めていた。

研修医は前半・後半のいずれも手指を互い違いに細かく、やや持ち上げるようにしながら水平方向に動かしながら

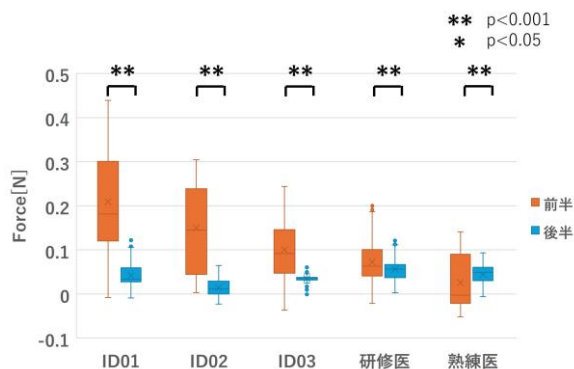


図 6: Z 軸成分の力の平均値

剥離を進めていた。前半と後半で剥離動作に大きな変化は見られなかったが、干渉時に押しこんで抵抗を確認する回数が減少していた。

熟練医は前半・後半いずれも手指を互い違いに細かく動かしながら剥離を進めており、前半・後半で大きく変化は見られなかった。

実験参加者のうち、本手技の経験のない参加者 3 名 (ID01~03) のうち、ID01 のみ、3.1 節の「誤ったアプローチで剥離しているパターン」の 5 回中 3 回を、ゴム紐と指先の干渉に気付かず剥離を進めた。尿管に気がつかずに尿管の下を潜り抜けて剥離を進めることが多かったことから、力センサのデータのうちゴム紐が伸びる方向の力が試行を進めるうちに小さくなったことが考えられる。そこで、実験参加者 5 名の実験中の力の時系列データから、手がゴム紐に触れてから離すまでの区間をトリミングして比較解析を行った。

図 6 は力の時系列データのうち、前半の試行と後半の試行のゴム紐が伸びる方向の成分の平均値を箱ひげ図で示した。また、点で示しているデータは外れ値である。実験参加者ごとの値の比較にはノンパラメトリックな検定法であるマンホイットニーの U 検定を用いた。有意水準はいずれも 0.05 とした。その結果、全ての参加者において $p<0.001$ で有意差が認められた。即ち、尿管に加わる力が小さくなるよう剥離を慎重に行うようになったと言える。

5. 考察

いずれの実験参加者においても $p<0.001$ で有意差が認められたことから、本提案システムは剥離操作の経験のない初学者、研修医の訓練だけでなく熟練医のイメージトレーニングにも活用できる可能性が示唆された。

力の時系列データの引っ張り成分について、全参加者で有意差が見られた中で、医師よりも特に本手技の経験のない参加者で大きく減少する傾向が見られた。これは、医学的知識がなく、本来の腹腔内の術野の広さによる触動作の制約に関わらず自由に剥離を進めていたことによると考えられる。

6. まとめと今後の展望

本研究の結果、硬度の異なる 2 種類の柔軟シートとゴム紐を用いたプロトタイプは、処置の経験のない初学者や若手医師、熟練の医師のいずれに対しても腹部外傷外科手術における臓器の剥離操作練習に活用できる可能性があると考えられる。今後は、熟練医の剥離動作を研修医ら若手に視覚的にフィードバックするなどして、手技取得の効率化を図るアプローチが考えられる。しかし、今回のような物体同士の狭い隙間に手を入れていくような操作に対して、従来の光学式モーションキャプチャなどで手の位置や姿勢をセンシングするのは困難である。グローブ型といった装着型のデバイスで手指の位置や姿勢をセンシングする例[8]も存在するが、本来の手袋を介した臓器の触力覚情報の妨げになるため使用することはできない。そのため、これらの課題を解決する手法を明らかにする予定である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 19K09443 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 渡部広明, 比良英司, 中尾彰太: 外科専門医のための外傷外科手術 off-the-job training (OFF-JT), 日本外科学会雑誌, Vol. 118, No. 5, pp. 527-531, 2017.
- [2] 七戸俊明, 村上壮一, 倉島 庸, 平野 聡: 遺体による手術手技研修の現状, 日本外科学会雑誌, Vol. 118, No. 5, pp. 539-543, 2017.
- [3] 成島道昭: 昭和大学横浜市北部病院外科手技スキルアップセミナー (Northern Yokohama Skill-up Seminar; NYSS) 開催の経験, 昭和学術会雑誌, Vol. 78, No. 6, pp. 649-655, 2018.
- [4] J. Berkley, G. Turkiyyah, D. Berg, M. Ganter and S. Weghorst: Real-Time Finite Element Modeling for Surgery Simulation: An Application to Virtual Suturing, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 10, No. 3, pp.1-12, 2004.
- [5] 中尾 恵, 黒田知宏, 小山博史, 小森 優, 松田哲也, 高橋 隆: 物理特性に基づいた高精細かつ対話的な軟組織切開手法, 情報処理学会論文誌, Vol. 44, No. 8, pp. 2255-2265, 2003.
- [6] Y. Kuroda, M. Hirai, M. Nakao et al., "Organ Exclusion Simulation with Multi-finger Haptic Interaction for Open Surgery Simulator", Stud. In Health Tech. and Inform. Vol. 125, pp. 224-249, 2007.
- [7] M. A. Meyers: Acute extrapitoneal infection, Semin Roentgenol, Vol. 8, No. 4, pp. 445-464, 1973.
- [8] 高田峻介, 志築文太郎, 高橋伸: 導電繊維編み込み手袋を用いた手形状認識手法, 日本ソフトウェア科学会論文誌, Vol. 35, No. 3 pp. 45-56, 2018.