

## 特集 ■ 医療から見た VR

## 内視鏡下手術訓練システムの現状と今後の展望



藤原道隆  
FUJIWARA MICHITAKA

名古屋大学



岩田直樹  
IWATA NAOKI

名古屋大学



田中千恵  
TANAKA CHIE

名古屋大学



渡邊卓哉  
WATANABE TAKUYA

名古屋大学



小寺泰弘  
KODERA YASUHIRO

名古屋大学



中尾昭公  
NAKAO AKIMASA

名古屋大学

## 1. はじめに

医学教育において手術手技修練は、長らく手術書と手術室での実習からなっていたが、1990年頃の内視鏡下手術の導入後、大きく変革しつつある。2002年に、大きく報道された内視鏡下手術における事故があり、トレーニングの問題が注目を集めた。手術教育の変革に大きな影響を与えているのは、手術支援技術と表裏一体とも言える、画像処理、情報技術である。本稿においては手術教育システムの最近の動向と今後の展望について述べる。

## 2. 従来の手術教育

手術書で解剖、手術手順を頭に入れて、手術に参加しながら、手術手順を身につけていく方法(OJT: on the job training)である。手術参加は、まず第2-3助手として、鉤をひいて手術野の展開に参加したり、時には単に見学に近いこともある。第1助手(前立ち)となると、術野を展開し、臓器に牽引をかけて適切な剥離層や面を出していく、という手術遂行に大きな役割を果たすことになる。この間、部分的に術者と助手の役割を交代したりして、少しずつ手技も行っていく。そして、術者として、指導医に前立ちをしてもらいながら手術を行い、次の展開がわからなくて立ち往生するとか、出血などのトラブルに指導医に助けをもらいながら、徐々に指導医なしで自立して行えるようになる。ある程度のレベルになると、上手な手術を見て自分の手技に組み込んでいくことが可能になり、同じ手技にも術野の展開法はいくつかあり、自分と違った流儀も取り入れながら、成長していくことになる。こうした課程はエンドレスでリタイアするまで連続することになる。こうした従来のオープン(開胸、開腹)手術

の修練課程は、まったく過去の遺物というわけではなく、内視鏡下手術の時代においても変わらない部分も多い。

## 3. 内視鏡下手術導入期からの手術教育

1987年に始まった内視鏡下手術においては、二次元のモニター画像を見ながら三次元の構成を頭の中で構築し、モニターとは違う位置にある対象(患者)に対して両手さらにフットスイッチの操作を協調させて行う能力が必要となった。これらは、eye-hand coordinationやpsychomotor skillと呼ばれ、内視鏡下手術に必要な特有の能力とされている。また、手術器具は長く、トロッカーから体内に挿入するため、動作に制限がある状況である。このため、当初、内視鏡下手術は、従来のオープン(開胸、開腹)手術に比べて難しく特殊な技能を要すると考えられたため、トレーニング・ボックスや動物を使用したシミュレーション・トレーニングが行われるようになった。

### 3.1 ボックス・トレーニング

カプセルの移動など基本的な鉗子操作に加えて、結紮、縫合操作を練習できる。疑似体壁にトロッカーを挿入してCCDカメラ画像を見ながら、実際の手術で用いる鉗子、持針器、針糸を用いて操作する。ボックス内には、動物の臓器を入れることもあり、ドライ、ウェット両方のトレーニングに使用される。手術器械は実物なので操作感は現実的であるが、指導者が同席しないと、間違った手技や、我流に陥る危惧がある[1]。ビデオ録画すれば記録が可能であり、PCと接続でき携帯も可能なi-Sim(iSurgicals)という製品もある。

### 3.2 動物 (ブタ) 手術でのトレーニング

1990 年代から現在に至るまで多く行われている方法で、現在、日本内視鏡外科学会 (JSES) の技術認定取得に必要な講習受講歴の中で特に推奨される項目になっている。上部腹腔内の解剖はブタと人間で類似点が多いため、ある程度のシミュレーションが可能であり、基本的な内視鏡下操作に加えて腸管吻合、胃癌リンパ節郭清などの応用的な実習も可能である。実際に近い結紮環境、血管を損傷すれば出血する臨場感、自動縫合器、吻合器 (ステープラー) 使用の実習が可能という利点があるが、動物と人間の解剖の細部が異なる、動物を犠牲にする、コストが高い、という問題点がある。

### 4. 最近の内視鏡下手術教育 バーチャルリアリティ (VR) トレーニングシミュレータの導入

教科書は、紙のテキストだけだった時代から Web-Surg のような e-text が出現しており、Web-Surg 受講歴は、JSES 実技認定のための講習受講歴に加算できるようにもなった。実技教育の多くはいまだに手術室での OJT によっている現状ではあるが、基礎的な部分は、なるべく実際の手術ではなくシミュレーションで行いたい、というのが世界的な潮流である。前項のボックスや動物に加え、バーチャルリアリティ (VR)・シミュレータが開発された。これまでに LS500 (Xitact→Mentice), MIST (Mentice), LapSim (Surgical Science), LapMentor (Symbionix), SEP (SimSurgery), LapVR (Immersion) などが市販された。また、VR と模型の hybrid の Pro-MIS もある (表 1)。VR に関しては、特に MIST, LapSim に関して多くの検討がなされ、基本的な psychomotor skill の習得

に VR シミュレータが有用である、VR シミュレータが示す評価は被験者の外科経験を反映している (construct validity) という報告が多い [2]。VR シミュレータの reality や有効性に関しては、この後機種別に述べるが、糸の質感の無さや膜の剥離が表現できない、というのが共通の弱点で、リアル感では hybrid シミュレータの方にやや分がある [3] [4]。VR シミュレータは、概して高価で普及しているとは言い難いが、新モジュールの追加や新機種の登場が続いており、シミュレーション・トレーニングの中核になる期待が高い。以下、我々が実際に手術教育に用いてきた機種について性能、有効性について述べる。

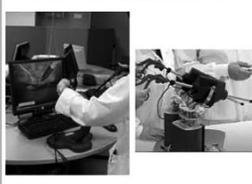
#### 4.1 MIST (Mentice 社), LapSim (Surgical Science 社)

現在のシミュレータの原型となるチュートリアル機能、ステップバイステップ方式、難易度調節機能などが以後のシミュレータに踏襲されることになった。LapSim には胆嚢摘出術や婦人科手術モードも付属している。胆摘では、胆嚢動脈損傷に伴ってカメラが激しく血を浴びるシーンなど critical な状況を表現するなど、当初から手術シミュレータに期待されたプログラムが書き込まれている。ただ、本モジュールで胆摘操作を学習することは困難で、我々はこれまで使用することはなかった。最近 LapMentor のような内視鏡用のデバイスが追加された。

#### 4.2 Lap Mentor (Symbionix 社)

内視鏡視野は術者が設定可能で、内視鏡用の独立したデバイスが装備されるようになった。術者鉗子は、持針

表 1 主な VR シミュレータ

ProMIS アイルランド Haptica社	MIST スウェーデン Mentice社	LapSim スウェーデン SurgicalScience社	LapMentor アメリカ Symbionix社	LapVR アメリカ Immersion Medical社
				
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ hybrid simulator : VRと組織模型、実体のある手術器械、臨床用の針、糸を併用する。</li> <li>■ 手術器械の軌跡をCCDカメラで写して計測し、PCで解析する。</li> <li>■ 基本タスク (VR) 結紮縫合手技 (実際の針、糸をボックスに入れて行う)</li> <li>■ Ver.3で結腸切除、Nissen、虫垂切除、胆摘のモジュール追加</li> <li>■ オープンモジュールが追加され、施設独自のカリキュラムを作成しパフォーマンスを計測・評価できる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ virtual reality (VR) simulator</li> <li>■ 入力デバイス: 右手+左手 (haptic feedback無し)</li> <li>■ 標準: 基本タスク、結紮縫合手技</li> <li>■ インストラクション機能、ステップバイステップ方式、難易度調節 (3段階) など、以後のVR simulatorの原型となった機能。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ virtual reality (VR) simulator</li> <li>■ 入力デバイス: 右手+左手 (haptic feedbackオプション)、カメラ (最新版で追加)、フットスイッチ (パワーソース)</li> <li>■ 標準: 基本タスク、結紮縫合手技</li> <li>■ オプション: 胆嚢摘出術、婦人科手術</li> <li>■ 基本タスクの難易度を調整するパラメータ機能など教育、評価、研究機能が充実。縫合結紮や胆摘などの術式ソフトウェアは付録程度。</li> <li>■ 最新型はハードウェアが変更され、カメラ・デバイス追加、日本語版が登場した。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ virtual reality (VR) simulator</li> <li>■ 入力デバイス: 右手+左手 (haptic feedbackオプション)、カメラ、フットスイッチ (パワーソース)</li> <li>■ 標準: 基本タスク、胆嚢摘出術</li> <li>■ オプション: 結紮縫合手技、S状結腸癌手術、減量手術、婦人科手術</li> <li>■ 基本タスクも装備されているが (難易度調整機能無し)、縫合手技や胆摘の手術ソフトに重点。</li> <li>■ 新しく追加された大腸癌手術モジュールではハードウェアもバージョンアップし、画像がよりリアルとなり助手鉗子の設定切り替えも可能。解剖ナビゲーション機能もついた。ステープラー操作も豊富。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ virtual reality (VR) simulator</li> <li>■ 入力デバイス: 右手+左手 (haptic feedbackあり)、カメラ、フットスイッチ (パワーソース)</li> <li>■ 標準: 基本タスク、胆嚢摘出術、結紮縫合手技、腸管操作</li> <li>■ オプション: 婦人科手術</li> <li>■ 基本タスクは系統びを入れて5項目 (3段階の難易度)、画面は洗練され、より臨床に即した内容となっている。</li> <li>■ 腸管操作には癒着剥離操作あり</li> <li>■ 胆摘は3段階の難易度に6通りの解剖パターン</li> </ul>

器以外は LapSim 同様画面上で各種手術器械を選択することが可能である。基本手技に加え、胆嚢摘出術のような一連の手術手技に関して初めてある程度使えるシミュレーション環境を提供した。胆摘は、手術行程を四つに分け、鉗子で把持したりクリップする位置を機械が示し、手術の流れを学ぶ procedural mode と、病態や解剖学的バリエーションが様々な 18 症例をインストラクション無しに通して手術する virtual patient mode がある。画像のリアル感が進化した。臓器の変形処理は違和感がある。剥離操作に近いことも可能ではあるが、フック型電気メスや鉗子で線維のような組織をつまみあげて切る操作は、本機の画像処理上の約束ごとに従って(ゲーム的に)進める必要があり、我々は、実際の胆摘を既に行った医師には、このプログラムの有用性は少ないと考えている。結紮縫合モジュールは、MIST で見られたチュートリアル機能が強化されており、紙の教科書よりもわかりやすく、魅力的な画面である(図1)。しかし、VR 上の実技は、特に糸のリアル感が欠如するため有効性が低い。2008 年末に左側大腸癌手術のモジュールが発売され、リンパ節郭清を含む高難度手術に対する初めての VR シミュレータである(図2)。消化器外科領域で重要な助手鉗子の設定が可能となり、従来多くの臨床医が欠如

を問題視していた膜構造剥離の概念が取り入れられるなど画期的な点がある。さらに血管解剖のナビゲーション機能、手術機器に超音波凝固切開装置やステープラーが加わった。しかし、画像処理は胆摘モジュールと大差が無く実技訓練には厳しい。このため、実際の手術ビデオを参照する機能が付加されている。本モジュールの意義は、これから大腸の腹腔鏡下手術を行う医師が手術書を読んで手順を学ぶのに替わって、よりビジュアルに学べる電子テキストと考えた方がよい。

**4.3 LaparoscopyVR (Lap VR) (Immersion Medical 社)**

新しい機種で画面も洗練されている。インターフェイスの構成は LapMentor と類似している。ソフトウェアは、Essential skills (移動、クリップ、切開、糸結びなど)と呼ばれる基本タスク、腸管操作、縫合結紮手技などからなる procedural skills、胆嚢摘出術、卵巣手術のような手術モードなどからなる(図3)。基本タスクからは、ゲーム的な項目は無くなり、手術に必要な基本スキルの訓練という意図がより明確になっている。縫合結紮手技は、電子テキストとして完成度は高いが、やはり糸のリアル感が欠如している。腸管操作は、LapSim と類似した腸管の把持、長さの測定などのほかステープラーも画面に入っているが、癒着剥離などの実技は画像処理技術が充分ではない。胆嚢摘出術は LapMentor に近い画像や操作感で、本機のモジュールも、やはり手術経験が無い医師が、従来の手術書に替わって手順を学ぶツールと考えている。

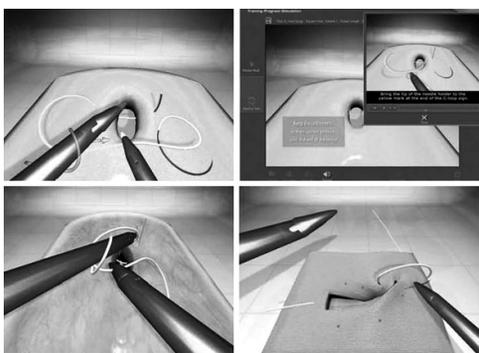


図1 LapMentor 結紮縫合モジュール



図2 LapMentor 大腸癌手術のモジュール  
\*口絵にカラー版掲載



図3 LapVR

**5. 手術教育における VR シミュレータの位置づけ**

VR シミュレータの比重は高まりつつあるが、これだけでの手術教育は不可能で、OJT、e-learning を含めた各手法を組み合わせたカリキュラムを構築する必要がある。VR シミュレーション教育を手術教育の中でどのように位置づけるかは今後とも重要な問題である。現在、

内視鏡下手術の基本スキルの教育は、これから外科の修練を行う若い外科医に対する導入訓練と、既にオープン手術の十分な経験がある医師が、同手技を内視鏡下で行うための訓練の二つの側面があるが、VR シミュレータ訓練の有効性は、術者が企図する操作を、鏡視下で的確に行うための内視鏡下基本スキル訓練にあると言える。問題は、この次のステップで、オープン手術経験が十分な医師は、基本スキル導入後、難易度の高い手術手技に比較的スムーズに入っていけると考えられるが、(内視鏡、オープンを問わず)初めて手術を習得していく医師の教育は現在の VR シミュレータのプログラムだけでは不可能である。VR シミュレータの手術モードは、従来の教科書に替わって視覚的、魅力的に手術手順を学ぶ電子テキストであると割り切ることが必要である。一方、縫合、結紮手技は、本来、外科の基本手技だが、内視鏡下での操作は、基本と呼ぶには難易度が高く、広く普及している胆嚢摘出術ではあまり必要ないので、鏡視下手技では基本スキルに分類しない方が現実的である。各機種の説明で述べたように、手順を VR シミュレータのチュートリアル機能で学び、実技はボックス(あるいはハイブリッド・シミュレータ)で行うのが有効である。

## 6. 今後の手術教育 VR シミュレーションの方向性

知識教育に関しては、e-learning を含めた電子テキストの比重が増加していき、基本手技の訓練は、動物訓練から VR シミュレーションへのシフトが進むと思われる。一方、前項で指摘した初心者の基本卒業後の訓練、さらに経験ある医師が一連の手術手技において、“腕を磨く”という目的には、将来的にもシミュレーションで対応していくのが望まれる分野なのか、今のところ不明である。一定以上の技術レベルにある医師は、実習より他人の手術を見ることの方が有効であり、より精細な手術画像の配信が効果的である。今後のシミュレーション教育に関して、次のような発展方向を考えている。

### (1) 研修歴などの certificate, 技術の認定

もともと評価機能は VR シミュレータの特性の一つである。概して欧州では手術訓練プログラム、および評価、認定に VR シミュレータの導入が進んでいるが、内視鏡下手術参加の条件として VR シミュレータのスコアを求める施設もある。SAGES で開発された、もともとボックス用の基本タスク (FLS) が VR シミュレータのプログラムとして搭載されるなど、今後、ある程度、共通の尺度で基本タスク評価ができる可能性がある。我が国を含めて世界的に VR シミュレータ講習歴

がより重要な研修歴として扱われるようになっていくと考えられる。

### (2) 患者個別シミュレーション

術前検査で得られた患者(解剖学的)情報をもとに、トロッカーの配置や手術器械の臓器に対する角度などをシミュレーションする、いわば<手術予行>が可能になる。あるいは、患者への術前手術説明(IC)に使用できる可能性がある。

### (3) 自習機能の強化

以前から期待されている機能であるが、今後、解剖のバリエーションのより詳細な情報や模範的な実ビデオなどをさらに豊富に搭載していくことが望まれる。ただ、我々のこれまでの経験では、VR シミュレータ教育においても、動物ラボと同様にインストラクターがついた方が教育の効率が良い。しかし、特に本邦の医学教育では、教育スタッフの数が圧倒的に少ない問題がある。Tele-mentoring のようにシミュレータをネット接続して遠隔指導で対応する方法などが考えられる。

### (4) ロボット手術シミュレータ

ロボット手術訓練とシミュレータは従来の内視鏡下手術以上に親和性が高い。SEP Robot (SimSurgery) が実用化された [4]。

### (5) ハイブリッド・シミュレータ

現状では、膜構造の剥離などを VR で表現するのが困難なので、当面は VR と模型を組み合わせたハイブリッドタイプが有望かもしれない。

### (6) チーム機能

LapMentor の大腸モジュールで助手鉗子設定可能となり、LapVR の基礎タスクの一部でも術者とカメラ医が協調する必要があるが、今後、術者、助手、カメラ医の 3 者の操作が同時に表現でき、チームのパフォーマンスを評価できることが望まれる。

### (7) Open 手術への応用

現在、新しい手術訓練システムの模索は、内視鏡下手術が先行しているが、オープン手術へフィードバックされていくと思われる。

## 参考文献

- [1] Tanoue K, Ieiri S, Konishi K, et al.: Effectiveness of endoscopic surgery training for medical students using a virtual reality simulator versus a box trainer: a randomized controlled trial. Surg Endosc 22, pp.985-990 (2008)
- [2] 藤原道隆, 三澤一成, 中尾昭公: 内視鏡下手術のバーチャルリアリティ・トレーニングの現状, 医療情報学

28 (suppl), pp.253-255 (2008)

- [3] Botden SM, Buzink SN, Schijven MP, et al. Augmented versus virtual reality laparoscopic simulation: what is the difference? A comparison of the ProMIS augmented reality laparoscopic simulator versus LapSim virtual reality laparoscopic simulator. *World J Surg* 31, pp.764-772 (2007)
- [4] Lin DW, RomanelliJR, Kuhn JN, et al.: Computer-based laparoscopic and roboticsurgical simulators: performance characteristics and perceptions of new users. *Surg Endosc* 23, pp.209-214 (2009)

#### 【略歴】

藤原道隆 (FUJIWARA Michitaka)

名古屋大学大学院医学系研究科 画像情報外科学 准教授  
1987年名古屋大学医学部卒業, 1988年一宮市立市民病院, 1993年名古屋大学第2外科, 2004年名古屋大学医学部画像情報外科学助教授(現大学院医学系研究科画像情報外科学准教授). 外科専門医, 日本外科学会指導医, 消化器外科専門医, 内視鏡外科学会技術認定. 日本外科学会, 日本消化器外科学会, 日本内視鏡外科学会(評議員), 日本胃癌学会(評議員), 日本コンピュータ外科学会, 日本VR医学会, Society of American Gastrointestinal and Endoscopic Surgeons (SAGES) など所属. NPO 日本から外科医がいなくなることを憂い行動する会幹事. 主な研究内容: 内視鏡外科(特に胃外科), IT技術による手術支援, 手術トレーニング・システム.

岩田直樹 (IWATA Naoki)

名古屋大学大学院医学系研究科 消化器外科学  
画像情報外科学

2001年名古屋大学卒業. 同年公立陶生病院研修医. 2003年同外科医員. 2006年名古屋セントラル病院(旧JR東海病院)外科医員. 2008年現研究科入学. 現在バーチャルリアリティーシミュレーターの有用性とその臨床応用について研究中.

田中千恵 (TANAKA Chie)

名古屋大学大学院医学系研究科 消化器外科学

1998年福島県立医科大学卒業, 1998年愛知県厚生農業協同組合連合会昭和病院研修医, 1999年名鉄病院勤務, 2005年市立四日市病院勤務, 2006年4月名古屋大学大学院医学系研究科消化器外科学入学. 日本外科学会認定医, 外科専門医, 消化器外科専門医. 主な研究テーマ: 3次元仮想腹腔内画像を利用した手術シミュレーショ

ン, VRシミュレーションを用いた腹腔鏡下手術教育, 消化器癌における分子生物学的研究など.

渡邊卓哉 (WATANABE Takuya)

名古屋大学医学部附属病院 消化器外科 2

1999年名古屋大学医学部卒業, 1999年市立四日市病院研修医, 2001年市立四日市病院外科医員, 2006年愛知県厚生連昭和病院外科医長, 2008年名古屋大学医学部附属病院消化器外科 2, 画像情報外科医員. 日本外科学会認定医, 外科専門医, 消化器外科専門医, 日本内視鏡外科学会会員. 現在の主たる研究: 腹腔鏡手術におけるトロッカー挿入(optical法)VRシミュレータの開発.

小寺泰弘 (KODERA Yasuhiro)

名古屋大学大学院医学系研究科消化器外科学 准教授

1985年名古屋大学医学部卒, 同年5月より小牧市民病院で研修後, 同外科勤務. 1991年4月名古屋大学医学部第二外科非常勤医員として上部消化管癌の臨床, 研究に従事. 1994年6月より愛知県がんセンター消化器外科医長として主に胃外科を担当. 2002年1月に名古屋大学大学院医学研究科病態制御外科学講座(現消化器外科)助手となり, 2004年10月より同講師, 2008年1月より現職. 日本外科学会, 日本消化器外科学会, 日本消化器病学会専門医, 日本消化器外科学会, 日本癌治療学会, 日本臨床外科学会, 日本胃癌学会, 日本食道学会評議員, Faculty of the American College of Surgeons.

中尾昭公 (NAKAO Akimasa)

名古屋大学大学院医学系研究科消化器外科学 教授

1973年名古屋大学医学部卒業. 1983年名古屋大学医学部第二外科助手, 1987年同講師, 1989年米国ピッツバーグ大学留学, 1992年名古屋大学医学部第二外科助教授. 消化器癌の診断, 外科治療に従事. 腫瘍マーカー, 癌免疫組織化学, 癌遺伝子診断と治療等の研究を手掛る. 特に膵癌手術においては多くの新手術術式を考案. 1999年同教室(現, 名古屋大学大学院医学系研究科消化器外科学)教授就任後は, 従来の研究の発展とともに, 癌ウイルス療法共同研究などの新たな癌治療研究を進める. 第110回日本外科学会定期学術集会会頭, 第41回日本膵臓学会大会会長, タイ王立外科学会名誉会員, NPO法人日本から外科医がいなくなることを憂い行動する会理事, 他.