総説論文

VR 手術シミュレータの 20 年と今日的意義

藤原道隆^{1, 2, 3)}, 岩田直樹³⁾, 三澤一成⁴⁾, 丹羽由紀子⁵⁾, 高見秀樹^{3, 6)},
田中千恵³⁾, 小寺泰弘^{2, 3)}

1. はじめにーVR 手術シミュレータ (VRSS) の導入から現在

医学教育におけるシミュレーション訓練は、1960 年代に米国で模擬患者 (SP) が導入された頃から長い歴史があるが、各種の手技に関しては、マネキンや臓器モデルに始まり、1990 年代の終わ

りにコンピュータを内蔵した救急領域向け高機能マネキン型シミュレータとともに、腹腔鏡下手術手技のバーチャル・リアリティ (VR)・手術シミュレータ (VRSS) が実用化された¹⁾。

VR シミュレータは、腹腔鏡手術とともに内視鏡検査手技のシミュレータも早い時期に実用化され、その後、血管内放射線治療や眼科、耳鼻科手術の

20 Years of VR Surgical Simulator and its Positioning Today

Michitaka FUJIWARA, Naoki IWATA, Kazunari MISAWA, Yukiko NIWA, Hideki TAKAMI,
Chie TANAKA, Yasuhiro KODERA

Abstract :

It has been about 20 years since the commercial use virtual reality (VR) surgical simulator was launched.

We have used VR surgical simulator for surgical education from early stage. At present, the weight of the VR simulator in current surgical education is lower than initially expected. This has been mainly due to the discord between the expectation for the functions of the VR simulator of the coaching surgeon and the actual use of the VR simulators without essential comprehension of simulation training. In addition, the focus of developers of the VR simulators has been besides the points.

In this article, we summarize the situation of VR simulator so far, and describe the future measures of surgical training using VR simulators more effectively from the view point of clinician.

Key words :

virtual reality surgical simulator, VR simulator, laparoscopic surgery, surgical training

1) 名古屋大学医学部附属病院 医療機器総合管理部, Dept of Medical Devices, Nagoya University Hospital

2) 名古屋大学大学院医学系研究科附属クリニカルシミュレーションセンター, Clinical Simulation Center, Nagoya University Graduate School of Medicine

3) 名古屋大学大学院医学系研究科 消化器外科学, Dept of Gastroenterological Surgery, Nagoya University Graduate School of Medicine

4) 愛知県がんセンター病院 消化器外科, Dept of Gastroenterological Surgery, Aichi Cancer Center Hospital

5) 東京女子医科大学 八千代医療センター 消化器外科, Dept of Gastroenterological Surgery, Tokyo Women's Medical University Yachiyo Medical Center

6) 名古屋大学医学部附属病院 卒後臨床研修・キャリア形成支援センター, Center for Postgraduate Clinical Training and Career Development, Nagoya University Hospital

シミュレータも登場したが、現在でも腹腔鏡手術向けの製品が圧倒的に多い。手術手技の中で婦人科や泌尿器科も含めた腹部領域の手術が多いこと以外に、ディスプレイを見ながら行う手術である、限られたアクセスポートからしか行えない制限がある、など、VRSS を作成しやすい手技であるのと、腹腔鏡手術の基本手技に対する off the job トレーニング (Off-JT) の有効性が早くから示されたこと²⁾、などが大きな理由であると思われる。VRSS には当初大きな期待が寄せられ、基本スキルだけでなく胆嚢摘出術、卵管切開 / 切除術のような術式モジュール³⁾ が早い時期から市販化され、さらに多くの手術手技が VR モジュール化され、いず

れ手術訓練の主流になると期待されていた。VRSS が市販レベルで登場して約 20 年が経過したが (表 1)、その後の VRSS 普及は頭打ちで、トレーニングの主役になっているとはいえない。

手術のシミュレーション訓練は、VRSS 以外に、ボックス・トレーニング、ファントム (臓器モデル) のほか、本邦では西欧諸国と異なり動物ラボも相変わらず隆盛で、さらに近年カダバー手術トレーニング (cadaver surgical training: CST) も可能になった。こうした現状にあって、VRSS はどのような存在意義があるだろうか？

われわれは、2004 年に MIST (Mentice, Göteborg, Sweden) や Lap Sim (Surgical Science, Göteborg,

表 1 代表的 VR 腹腔鏡手術シミュレータ

	virtual reality (VR) シミュレータ		
	MIST Mentice 1997 ~	LapSim / LapSim Haptic Surgical Science 2001 ~	LAP Mentor Simbionix (現3D Systems) 2003 ~
特徴	Immersion製の腹腔鏡手術鉗子型入力デバイスを備えた、商業ベースに乗った最初のVR手術シミュレータ。validationに関して多くの研究がなされた。インストラクション機能、難易度調節など、以後のVRシミュレータの原型となった。	現在販売されている機種では最も古くからあるが、中身の変化が大きい。初期のバージョンに対してvalidationに関する多くの報告がある。Ver.3.0でhaptic feedbackがついたが、その後無くなり、現行型のLap Sim Hapticで再びhaptic feedbackが装備された。最初は基本動作と胆嚢摘出術のCalot剥離だけであったが、術式モジュールが次第に追加されていった。	Xitact LS500をプラットフォームに開発。両手、フットスイッチに加えカメラの入力デバイスが加わった。モデルチェンジされ、2014年から現在のLAP Mentor IIIになった。LS500が胆嚢摘出術訓練機であり、初代から術式モジュールが多いのが特徴。LAP Mentor IIIのTAPPモジュールはimmersive VRであるvirtual ORモードを備えている。
触覚 (haptic feedback)	なし	なし/あり	あり (無い簡易版もある: LAP Mentor Express)
基本動作	基本的な動作、縫合、結紮	カメラ操作、両手協調運動、カメラ鉗子協調、把持、切開、クリップ、縫合	カメラ操作、FLSモジュール(ペグ移動、パターン切離、ループ結紮)、クリップ、縫合・結紮、など
術式モジュール		胆嚢摘出術 婦人科手術(卵管結 腎摘出術 虫垂切除術 肥満手術(胃banding)	胆嚢摘出術 婦人科手術(卵巣摘出、卵管切開) 腎摘出術 癒痕ヘルニア修復術 S状結腸切除術 肥満手術 (Gastric bypass) 虫垂切除術 鼠径ヘルニア手術(TAPP)

Sweden) を導入して以来、手術を含む多領域の VR シミュレータを導入してきた。現在は、基本手技のスキルスラボとは別に、手術訓練を中心としたスキルスラボ (Sim サージ) を運用しており、多くの外科系診療科の医師が使用している。本稿では、VRSS 20 年の歴史をふりかえり、われわれの Sim サージにおける VRSS 利用状況も紹介しながら、手術トレーニングにおける現在の VR 手術シミュレーションの位置づけについて述べたい。

2. 腹腔鏡手術に対する Off-JT の導入

腹腔鏡手術が普及し始めた 1990 年代は、対象臓

器を直接見ないで 2 次元画面の視覚情報にもとづいて手を動かし (eye-hand coordination), 長くて扱いにくい手術器械をオープン手術と同じように無意識に動かすことができる能力 (psychomotor skill) の修得のためには、手術室外のトレーニング (Off-JT) の重要性が指摘された。孔が開いた箱のような簡単な構造のもの (ボックス・トレーナ) から、コンピュータ内蔵の VRSS までさまざまな練習機器: シミュレータが開発された。米国外科学会と内視鏡外科学会は、手術を実施するのに必要な教育と評価プログラムとして Fundamental Laparoscopic Skills (FLS) を作成し、実際に手術を行うのに FLS の修了を必要としているが、このうち実技は、簡便なシ

表 1 代表的 VR 腹腔鏡手術シミュレータ

virtual reality (VR) シミュレータ		hybrid (augmented reality) シミュレータ	
Laparoscopy VR / LapVR Immersion / CAE Healthcare 2008 ~	Lap PASS 三菱プレジジョン 2015 ~	Lap X / Lap X Hybrid Epona Medical 2012 ~	ProMIS Haptica → CAE Healthcare 2005 ~
Immersion MedicalからCAE Healthcareに変わり現行型にモデルチェンジした。現在のところ、LAP Mentorと並ぶ代表的なフル仕様のVRシミュレータ。	腹壁を模した本体に多数の孔が開いており、トロッカーの位置を自由に設定できる。患者のCT/MRI画像データに基づきトロッカー位置のシミュレーションが可能 (PASS-GEN)。	DeltaTechのSIMENDOの後継機と考えられる。もともと入カデバイスとして実際の手術用鉗子を用いていたが、2016年、ボックス内に模型を入れて使用する機能を付加したLap X Hybridも発売された。持ち運びもできる簡易な構成。	実質的に唯一のハイブリッド (augmented reality) シミュレータ。マーキングされた手術器械の軌跡を CCDカメラで計測し、PCで解析する。基本動作では、ガーゼやペグの実物を使用し、術式モジュールでは臓器模型を使用する。
あり	あり	なし	(Hybridは実機使用)
カメラ操作、カプセル移動 (peg transfer という名であるが、FLSのペグ移動とかなり異なり難しい)、パターン切離、ループ結紮、縫合・結紮、腸管操作、癒着剥離、など	カメラ操作、両手協調操作、切離、クリップ、運針	VR: カメラ操作、把持、ペグ移動、パターン切離、クリップ、運針、ユニークなパズル作成、など	Hybrid: ペグ移動など (模型使用)
胆嚢摘出術 婦人科手術 (卵管閉塞、卵巣摘出、子宮外妊娠) 虫垂切除術	腎全摘術 副腎切除術 のほか、胆嚢摘出術、肝部分切除、胃部分切除、子宮全摘術、子宮筋腫核出術など	虫垂切除術 胆嚢摘出術 腎摘出術	Nissen fundoplication 虫垂切除術 胆嚢摘出術 結腸切除術

ミュレータ（ボックス・トレーナー）で行うペグ移動、パターン切開、ループ結紮、縫合／結紮（ノットプッシャー使用）、体内縫合／結紮の5つのタスクからなっている。既に、いくつかのVRSSも使用可能な状況だったにもかかわらず、ボックス・トレーナーが選ばれたのは、安価、携帯性、再現性が考慮された⁴⁾。FLSプログラムが開発された2003年頃は、VRSSの開発も盛んで、LAP Mentor（Symbionix 現 3D Systems, Cleveland, OH）には、FLSモジュールという、FLS実技そのもののいくつかをVR化したプログラムが搭載された⁵⁾（図1）。

3. 腹腔鏡手術 VRSS

3.1 触覚機能

各種あるVRSS（表1）で、大きく異なるのは、鉗子に触覚（力覚フィードバック：haptic feedback）が付加しているかどうかである。触覚が無いタイプは、簡易な構成で持ち運びが可能なものもあり価格が安いので、一般に高価とされるVRSSの価格上昇の要因は触覚機能付加のためと言えよう。触覚の意

義については古くて新しい問題である。触覚の有効性が主張されている一方⁶⁾、懐疑的な見解も少なくない^{7,8)}。実際、針、糸、持針器、臓器の把持感のリアリティはかなり低く、力覚フィードバックは、シミュレータが想定している以外の動きが入力された時に、しばしばシミュレータに“暴走”（入力鉗子デバイスが術者の把持を振り払うような痙攣様の動き、あるいは、激しく回転する事象をわれわれは“暴走”と呼んでいる）を起こすことから、筆者もネガティブな面の方が多いと考えている。

3.2 基本動作訓練

各術式に共通な鉗子移動などの基本動作能力（精神運動 psychomotor 領域）で、ペグ移動、パターン切開、縫合／結紮などFLSと似たタスクに加え、スコープ操作やFLSから除かれたクリッピングなどの基本的動作のメニューを搭載するのが一般的である。単独で時間を問わず訓練でき、繰り返し練習が可能、という利点はボックス・トレーナーと同様であるが、利き手、非利き手の移動距離、速度などの詳細な評価機能を有するのがVRSSの特徴である。ただし、縫合／結紮は、手順を説明する機能はすぐれているが、無重力空間のように浮遊している糸の表現、針や糸の不自然な把持感（haptic feedbackの非現実感）のためにVRSSトレーニングには適していない。

3.2.1 基本動作訓練の validation

VRSS訓練の有効性に関しては、訓練前後でボックス・トレーナーなどでのパフォーマンスを測定する^{9,10)}、VRSS訓練群とコントロール群で訓練後の実際の手術（胆嚢摘出術）をレビューアが評価する¹¹⁻¹³⁾、という方法で、MISTや（初期型）Lap Simに関して、否定的な報告¹⁴⁾もあるものの、多くの肯定的な結果が報告され^{11-13,15)}、VRSSの有効性に関する研究は、現時点でもこの2機種に関するものが多い。ただし、これまでの研究のバイアスが大きい、実際の手術のパフォーマンスを予測できるかどうか（predictive validity: 予測妥当性）についてエビデンスが乏しい、とする見解が

図1 LAP Mentor FLS module
上：ペグ移動 下：エンドループ

あるのは事実である¹⁶⁾。シミュレータ訓練の妥当性 (validity) に関する客観的評価法として、各種の妥当性の概念が導入されたが、比較的容易に証明できる構成妥当性 (construct validity) を調べた研究が多く、その後の LAP Mentor や LapVR (Immersion Medical, Göteborg, Sweden, 現在は CAE Healthcare, Saint-Laurent, Quebec, Canada) も含めて多くの研究結果が報告された¹⁷⁻²³⁾ (図 2)。LapVR の構成妥当性は認められるが、FLS よりかなり弱く、手術評価法である Objective Structured Assessment of Technical Skills (OSATS) で胆嚢摘出術を評価した成績から予測妥当性を検討しても FLS より劣るという研究²⁴⁾ があるが、個々の内容はわれわれの検討²³⁾ とはやや異なる結果であった。同じ著者から、Global Operative Assessment of Laparoscopic Skills (GOALS) を用いた評価と FLS, LapVR の評価がともに関連が無いという報告²⁵⁾ があり、GOALS を用いた別の研究では、LAP Mentor と MISTELS (McGill 大学が開発したシステム) の教育効果を認める結果が示されている²⁶⁾。被験者の属性、人数や測定方法によって異なる結果が出ていることに注目すべきであろう。

以上のようにいまだ議論の余地はあるものの、基本動作訓練において VRSS に有用性があることにはコンセンサスがあり、われわれも実感として有用であると考えている。こうしたことから、腹

腔鏡下手術初心者に対する縫合 / 結紮以外の基本動作の教育は VRSS 中心に行っており、なかでも、introduction としてペグ移動、その次の段階として、円周切開が左右の手の協調運動、力の調節、鉗子の回旋の練習に有用と考えている^{27, 28)}。

3.2.2 ロボット手術

ロボット (da Vinci Surgical System, Intuitive Surgical, Sunnyvale, CA) 支援内視鏡手術に対して、2007 年に発売された dV-Trainer (Mimic Technologies, Seattle, WA) はじめ現在 4 種類の VRSS が市販されているが、メニューはいずれもロボット基本スキルの動作訓練である。dV-Trainer と dVSS (da Vinci skills simulator, Intuitive Surgical) に関しては、既に多くの validity の報告があり、通常内視鏡手術以上に VRSS を用いた訓練の有用性がはっきりしており²⁹⁾、dVSS のように医療機器メーカーが自らシミュレータを開発し、da-Vinci 本体と不可分に運用するスタイルは、よりフライトシミュレータに近いと言えよう。

3.3 術式モジュール

2000 年代初めには既に胆嚢摘出術、卵巣切除 / 切開術などの術式モジュールが開発され、その後、虫垂切除術、結腸切除術、胃バイパス術 (減量手術) などの術式モジュールが追加されていった (図 3)。術式の教育において重要なのは、解剖や手術法の知識、血管などの重要物の損傷を避けて安全に行うための知識やスキル (認知 cognitive 領域) であり、これらを訓練者に伝授する機能が求められる。

3.3.1 術式モジュールの validation

術式モジュールは、当初は「おまけ」? 的な存在と見なされていたのか、有効性について多くは 2010 年以降に報告されるようになった。鉗子移動などの一般的な基本動作能力を向上させるが、術式固有の知識 (認知) 領域を伝授する有効性は十分示されていないのが現状である^{30, 31)}。胆嚢摘出術や卵管手術では構成妥当性があり、訓練者の技量を評価することが可能とされており、卵管手術

図 2 Lap VR の構成妥当性：基本タスクの成績 (タスク完遂時間)

では、知識面での有用性も示されている³²⁾。われわれの検討でも、LAP Mentorの腹腔鏡下胆嚢摘出術モジュールにおいて10項目(metrics)で構成妥当性が示された(図4)。胆嚢摘出術モジュールは、実際に手術を行う前のリハーサルに有用という報告がいくつかあるが³³⁾、効果が期待されるのは、手術経験が無い術者であろう³⁴⁾。したがって、われわれは実際に胆嚢摘出術を行う直前の外科1年目医師に対する手術セミナーにおいて、LAP MentorとLapVRの胆嚢摘出モジュールを中心としたプログラムを実施している。しかし、他術式(虫垂切除、大腸癌手術など)では構成妥当

metrics	median	range	Correlation coefficient (R)	P-value
Total procedure time (min)	49	31-90	0.45	NS
Idle time (min)	11	5-21	-0.27	NS
Grasping of the tumor (Number of occurrences)	2	0-6	-0.25	NS
JMA exposure (%)	25	0-84	-0.36	NS
Distance of JMA distance from origin on the aorta (mm)	7	1-32	-0.63	0.089
Number of clips placed on the vessels	6	3-10	-0.15	NS
Linear stapler jaws were not visualized in the camera view prior to firing (Number of occurrences)	26	3-37	0.24	NS
Number of times the linear stapler was fired during distal division	1	1-4	-0.36	NS
Major vascular injury	0	0	0.00	NS
Injury to a blood vessel	1	0-6	-0.62	NS
Minor bleeding incidents (Number of occurrences)	41	27-55	0.41	NS
Risk of injury to the rectal or colon wall	6	1-11	-0.52	NS
Untreated bleeding incidents (Number of occurrences)	39	24-55	-0.39	NS
Electro-surgery or energy activation (min)	9	1-12	-0.09	NS
Risk of injury to the left hypogastric nerve plexus (sec)	2	0-5	-0.65	NS
Risk of injury to vital structures (sec)	49	22-133	0.31	NS
Electro-surgery or energy activation without appropriate contact with tissue (sec)	38	15-154	-0.14	NS
Unsafe rectal wall exposure using the Harmonic Scalpel (sec)	2	0-4	-0.83	0.016
Safe use of electro-surgery or energy devices (%)	71	56-78	0.25	NS
Mobilization - Safety of medial peritoneal incisions (%)	77	53-100	-0.43	NS
Mobilization - Safety of medial lateral resection (%)	76	41-100	-0.26	NS
Mobilization - Lateral attachments of the colon mobilized (%)	89	66-100	0.32	NS
Mobilization - Incisions performed within 10mm distance from the white line of Toldt's fascia (%)	75	32-86	-0.67	NS
Mobilization - Distance of rectal mobilization from the promontory (mm)	76	8-105	0.16	NS
Mobilization - Distance of lateral rectal mobilization from the promontory (mm)	83	32-97	0.04	NS
JMA distal time (min)	16	4-22	-0.36	NS
IRV distal time (min)	19	11-31	-0.35	NS
Time of distal division of colon (min)	41	31-88	0.36	NS
Time of insertion of circular stapler instrument (sec)	10	3-47	0.31	NS
Time of anal and trocar placement and clip placement (sec)	109	69-233	0.09	NS
Time anastomosis is complete (sec)	153	107-246	0.09	NS
Number of movements of right instrument	3139	1551-7955	-0.34	NS
Number of movements of left instrument	1740	1273-7955	-0.17	NS
Total path length of right instrument (cm)	3279	12319	0.13	NS
Total path length of left instrument (cm)	4093	2774-11004	-0.38	NS
Average speed of right instrument movement (cm/sec)	3.4	3.0-5.8	0.83	0.021

Niwa Y. et.al., EAES, 2014

図5 LAP-Mentor 大腸モジュール
手術経験とシミュレータの測定項目の関連

図3 術式モジュール

上左：胆嚢摘出術 (LAP Mentor)
上右：胆嚢摘出術 (LapVR)
下左：結腸切除術 (LAP Mentor)
下右：虫垂切除術 (LapVR)

図 4 LAP-Mentor 胆嚢摘出術モジュール (case 1) の各測定基準 (metrics) の結果

性が認められる項目が少なく、主に非医師の手術体験に多く使用している。LAP Mentor の結腸切除術モジュールでは、解析法が異なるが、われわれの検討では、3項目で手術経験との関連が認められたが（図5）、Shanmugan らの検討では9項目で認めており³⁵⁾、さらに下記の ProMIS (Haptica, Dublin, Ireland) においても Neary らは、3項目においてエキスパートの成績が有意に良く、さらに彼らが重視するエラーが明らかに少ないと報告している³⁶⁾。各項目には軽重があるので、どの程度で全体としての妥当性があるかは研究者の判断が分かれるところとなる。LAP Mentor の特徴は術式モジュールが豊富なことであるが、胃バイパス術（減量手術）モジュールでは、肥満外科医と一般外科医では、シミュレータでの胃パウチの体積と胃空腸吻合の位置とサイズに有意差があり、評価ツールとして使えるという研究がある³⁷⁾。大腸モジュール同様、縫合器のリアリティは高く、各種の「使い道」があるプログラムと思われる。

3.3.2 fidelity と有用性

術式モジュールは、よく fidelity (リアリティ) の低さが指摘されるが、VRSS の製造側もユーザーの医師にアピールしやすい術式モジュールをもっぱら宣伝に使ってきた面がある。このため、VRSS に対する理解が十分でない医療者は、術式モジュール

ルを少し使ってみるとリアリティの低さに失望し、購入した高価な VRSS を結局放置してしまっていることが少なくないようである。しかし、VRSS の主な用途は基本動作訓練にあることと、fidelity と有効性は異なることを認識すべきであると考ええる。当科においても、指導医は特に術式モジュールの fidelity に関して辛い評価であるが、本来コストと有効性のバランスがとれたシミュレーション教育では、無用の fidelity は省略するものである。使える事項について認識し、適切な分野で使用すると、術式モジュールをもっと活用することが可能である。われわれの、現在の VRSS の活用については後述する。

4. AR (hybrid) 手術シミュレータ

手術における Augmented reality (AR) は、現在、リアルタイムの実画像に、術前画像データを加工した画像を重畳させるナビゲーション手術をさすことが多いが、内視鏡手術シミュレータにおける AR は、ボックス内の実機の画像を解析する hybrid タイプのボックス型シミュレータのことで、hybrid シミュレータの呼称の方が実態を表している。ProMIS^{38, 39)} の歴史が長く、最近 LapX Hybrid (Epona Medical, Rotterdam, Netherlands) も製品化されているが、事実上本格的な機種は ProMIS だけである。ボックス・トレーナ内の実機の鉗子先端の軌跡を解析し、VRSS のような評価機能を有する。したがって、AR 手術シミュレータ (ARSS) は、解析機能を付加したボックス・トレーナといえるだろう。

特に、VRSS が苦手とする (本来は VRSS の得意分野になるべきなのだが) 結紮/縫合手技に関しては、ARSS を含むボックス・トレーナでの実器を用いる練習が有効である³⁹⁾。VRSS とボックス・トレーナの訓練効果の比較については、縫合、結紮手技以外の基本タスクについては、同等か、VRSS の方が優れているという報告が多いが⁴⁰⁾、VRSS と ARSS については、ARSS の方が優れているという報告があるが (LapSim 対 ProMIS)⁴¹⁾、

我々の検討では同等であった (LAP Mentor 対 ProMIS)⁴²⁾。最近、実際の内視鏡手術においてフルハイビジョンスコープや 3D ハイビジョンスコープが一般化したため、ボックスや ARSS に搭載されている CCD カメラ画質の悪さが無視できなくなってきた。われわれは既存のボックス・トレーナの HD カメラへの載せ替えや、新規ボックス・トレーナの開発を進めており、旧性能カメラのボックス同様、ARSS もほぼ使用されなくなっている。

5. 本学のシミュレーション・トレーニングセンターの手術部門： Sim サージの利用状況

これまで消化器外科における使用を中心に述べてきたので、泌尿器科、産婦人科、眼科、小児外科、呼吸器外科、心臓外科、血管外科、脳神経外科、耳鼻咽喉科など、他の外科系診療科も含めた手術訓練機器の利用状況を紹介する。2018 年の利用の 6 割はスタッフの自己スキル向上のための使用であったが、VRSS に限ると自己トレーニングは 4 割強にとどまり過半数の利用目的が学生や研修医の指導であった (図 6)。機種別に見ると、自己トレーニングは約 7 割をボックス・トレーナで行い、VRSS の内訳は、外科領域では LapVR が多いが、

図 6 手術訓練機器の利用目的 (回数)

左：全機器 右：VRSS のみ

(名古屋大学臨床シミュレーションセンター
Sim サージ：2018 年 1 月～12 月)

シミュレータ全体では、眼科シミュレータの Eyesi Surgical (VRmagic, Mannheim, Germany) が多かった (図 7)。学生指導では、約 2/3 で VRSS が使用され、LapVR, LAP Mentor, Eyesi 利用が多かった (図 8)。全体的には利用傾向に大きな変化は無いが、ダビンチ手術シミュレータ (dV-Trainer, Mimic, Seattle, WA) の学生教育での利用が 2016 年の 5%⁴³⁾ から 11% に増加しているのが目立つ。泌尿器科では、前立腺手術の標準術式がダビンチ支援手術になっているほかダビンチ手術が多くなっており、学生教育にも反映されていると考えられる。内視鏡外科に従事する中堅医師は、内視

図 7 スタッフの自己トレーニングに使用された訓練機器 (回数)
(名古屋大学臨床シミュレーションセンター
Sim サージ: 2018 年 1 月～12 月)

図 8 学生指導に使用された訓練機器 (回数)
(名古屋大学臨床シミュレーションセンター
Sim サージ: 2018 年 1 月～12 月)

鏡下縫合手技練習をボックス・トレーナで行うことが多いと考えられるが、眼科領域などでは、自己トレーニングでも学生指導でも VR シミュレータ利用が多く、内視鏡外科領域と様相が異なる。

6. 新しい VRSS

6.1 immersive VR

Off-JT の問題点のひとつは緊張感の不足であり、臨場感を高めるためにシミュレータの周囲に映像などでバーチャル手術室空間を作成することが行われてきた。Huber らは、あらかじめ手術室で撮影した 360° 動画と LapSim を組み合わせ、ヘッドマウンテンディスプレイ (HMD) に両者を融合させた VR 画像を表示して、ペグ移動や胆嚢摘出術などのタスクを行う新たな手術トレーニングを報告している⁴⁴⁾。訓練効果に目立った改善は見られないが、参加者の高揚感が大きいという。また、「VR 酔い」も発生しなかったということであった。こうした 3 次元疑似空間の中の VR を immersive (没入型) VR と呼ぶが、off-JT の臨場感を高める魅力的な方法である。

LAP Mentor III の新しい腹腔鏡下ヘルニア (TAPP) 手術モジュールは immersive VR であり、virtual OR モードにすると、訓練者は HMD を装着してシミュレーション訓練を行う (図 9)。訓練者は、LAP Mentor を操作するが、あたかも手術

図 9 LAP Mentor III TAPP モジュール

室内で操作しているようであり、画像内のバーチャル指導者が適宜指示を行う。非常に魅力的で、今後の方向性のひとつを示すものであるが、現在のところ、HMD 装着のため訓練者の横にいる実在の指導者が直接指導できない、という実用上大きな問題がある。

6.2 患者個人の画像情報から VR 画面を作成するシミュレータ

患者の術前解剖情報を入力し個々の手術のリハーサルが行える VRSS が我が国から市販に至っている (Lap PASS, 三菱プレシジョン, 鎌倉)。訓練機器としてまだ機能が不十分であるが、患者の個別解剖情報を入力したシミュレーションが可能 (実際に情報処理にかかる手間が大きい) という点で画期的である⁴⁵⁾ (図 10)。今後の術式モジュール発展の方向を示しているといえよう。

7. 腹腔鏡手術トレーニングの中で VRSS の位置づけと問題点

手術教育は、解剖や、手術器械、手術方法の知識 (cognitive) 領域、いわゆる「手が動く」という動作 (psychomotor) 領域、いろいろな場面での状況判断 (情意 affective 領域) といった要素からなる。情意領域に関しては、患者安全の観点から他スタッ

フとのコミュニケーション能力のようなノンテクニカル・スキルが重要視されるようになった。

7.1 基本動作 (動作領域)

動作トレーニングは現在も今後も VRSS 訓練が中心である。反復練習可能であり、他人の目を気にせず、VRSS の評価を見ながら、ステップアップしていけるので、自習もある程度有効である。ただし、縫合 / 結紮手技は、結紮法のガイダンス機能は良いのだが、前述のように、針、糸のリアリティが低すぎてほとんど使用されていない。現在、ボックス・トレーナで訓練するのが標準であるが、内容から見て本来最も VRSS 訓練に適しているはずの手技であり、今後、VRSS での訓練が標準化できるように改良を期待したい。われわれのセンターでは、縫合 / 結紮トレーニングのために、針糸の消耗品のほか、持針器 (意外に早く痛む) の修理、更新に毎年多額の予算を必要としており、ボックス・トレーナ訓練は中長期的に見れば、必ずしも VRSS より安価というわけではない。VRSS を開発、製造する企業は、一度リリースしたモジュールの改良にはあまり力を入れていないようである。縫合 / 結紮手技と後で述べる胆嚢摘出術は、VRSS が優位であるべき分野であり、ぜひ改良が望まれる。

7.2 各術式トレーニング (動作+認知)

術式の教育 (伝授) には、動作訓練以外に、各術式に応じた認知領域の伝達が欠かせない。当然、動物ラボや CST のようなウェットラボのほか、ドライラボにおける臓器モデルと実際の手術機器を用いたトレーニングなどと使い分けていくことになる。

それぞれの特色を改めてまとめると、VRSS は、解剖を提示し、術式をインストラクションする機能、すなわち教科書としての機能も併せ持つ利点がある。そして詳細な評価機能を有していることである。ただし、これは弱点でもあって、多くの VRSS が多数のパラメータを表示するため、結果画面の解釈が難しい。評価がわかりにくいと、訓練者が VRSS を使ってどのポイントを練習し到達すべきなのかが曖昧になってしまう。多くの研究

図 10 Lap PASS シミュレータと患者データから作成した VR 画像

者がさまざまな validity を調べているので、今後の研究結果の蓄積が待たれる。すべての評価項目に妥当性があるわけではないので、必要なデータを抽出して判断することが重要である⁴⁶⁾。さらに、VRSS は、現在の手術に不可欠な超音波凝固切開装置 (USAD) が使用できるモジュールに限られており、血管シーリング装置 (VSS) はまったく採用されていないという問題がある。動物ラボは、生体であるので出血するという大きな利点があり、USAD や VSS のようなエナジーデバイスを用いるトレーニングは動物ラボでないと困難である。欠点は、人間の解剖との差異で、この点に関しては CST では人間そのものなので、ふだんの手術では入りこまないところを含めた解剖構造の確認にすぐれている。しかし、血流が無いので、誤った切開をしても出血しない、エナジーデバイスの特性を生かした手技練習ができないという欠点がある。また、動物ラボ同様、実施するコストが高い。

7.2.1 胆嚢摘出術

消化器外科医師が一般に最初に行う腹腔鏡下手術で、実際に手術を行う前に Off-JT でトレーニングを行う意義が最も高い術式である。動物 (ブタ) の胆道系は、解剖の違いのためリアリティが低く、CST は出血しないという迫真性の欠如のため、VRSS が最も良いシミュレーション法である。

実診療でのパフォーマンスの向上というアウトカムを明確にするために、セミナー後に実際に訓練者の手術の前立ち、指導を行う医師も訓練者と共に参加することを原則としている。VRSS で表現できない USAD のようなエナジーデバイス実技のために、ブタのティッシュを用いるボックス・トレーニングも併用するが、VRSS 訓練が主である。指導者が VRSS 画面を素材としつつ、シミュレータのシナリオではカバーされていない手術手技の細かなコツや注意点を動物ラボと同様に伝授することが重要である。臓器牽引の力と方向、クリップや鉗の細かな向きの調整などの技術 (dexterity)、VR と実際の手術で異なっている点は、指導医が直接教授しないと伝達困難である。さらに、大出血

や総胆管損傷が起きたときにどうするのか (術者を交替するタイミングなど) も VRSS 訓練中に議論してもらう。シミュレータが提示する成績は参考にするが、われわれが用いるチェックリストには、参考とするパラメータのみ書き出し (前述のようにこの際の評価画面が見にくい)、指導医によるチェックをより重要視している (図 11)。チェックリストは自己評価も行い、最後に訓練者と指導医がデブリーフィングを行う方法をとっている。

胆嚢摘出術は、術式モジュールの中で最も重要なのだが、LapSim 以外の機種では開発時からほとんど改良されていない。(LapSim では USAD が使用できるようになったが) エナジーデバイスが電気メスのみ、成績画面が見にくい、評価項目の中で critical view of safety の位置づけが弱い、という問題点の早急な改良を期待する。

7.2.2 その他の術式

胆嚢摘出術で確立したスタイルを他の術式に拡張しているところであるが、術式ごとの特性で VRSS 以外の訓練の比重が高まる。胃癌手術のリンパ節郭清手技は、膜構造の剥離、血管処理の練習のため動物ラボ訓練 (学外施設利用) の重要性が高く、食道癌手術のように、胸腔、縦隔内の解剖の理解が重要な術式は、解剖のリアリティが最も高い CST も開始されている。胃癌手術でも、動

腹腔鏡下胆嚢摘出術シミュレーションセミナー			
チェックリスト		氏名 <input type="text"/>	
この内容に必ず目を通してからシミュレータ訓練を行ってください。			
(アレンジして自由に使用してください)			
※ 指導医もモニタリングの項目は、自己評価と指導医評価の両方を行ってほしいと思います。			
※ 本セミナー後のセミナーの発表のため、主要項目の結果を保存させていただきます。			
解剖の知識確認	運動技能・感覚	指導医モニタリング	総合評価
本日は講師 (プレハブ) の内容と同じでも良い)	☐ 牽引手を手首に使用しているか ☐ 牽引手は意図する場所に移動できたか (腹部筋群で移動しているか) ☐ クリップの位置 ☐ 胆嚢管を切開する位置 ☐ 胆嚢管切開が完了したか ☐ 胆嚢管が完全に切開したか ☐ 胆嚢管が完全に切開したか ☐ 胆嚢管が完全に切開したか	☐ コンプライアンスとえば、CVSを作成したか ☐ 結果的に手際よく行っても、CVS未確認はコンプライアンス違反 ☐ 重要臓器が下層に存在することを想定するな ☐ 腹壁を強く押して、腹壁に引っかかる ☐ 腹壁を強く押して、腹壁に引っかかる ☐ 腹壁を強く押して、腹壁に引っかかる	☐ 内視鏡下基本動作は問題無いレベルか (あふげなく操作しているか) ☐ 実臨床で手術OK ☐ 研修医や、学生に教えることができる
シミュレータの評価項目と異なる	シミュレータでは評価できない状況な項目	シミュレータでは評価できない状況な項目	指導医
※タスク毎に記入してください			
シミュレータの成績 (LAP Mentor)	シミュレータの成績 (LAP Mentor)	シミュレータの成績 (LAP Mentor)	シミュレータの成績 (LAP Mentor)
■ 総時間 () 秒	■ 総時間 () 秒	■ 総時間 () 秒	■ 総時間 () 秒
■ 右側 (利き手) 鉗子移動距離 () cm	■ 右側 (利き手) 鉗子移動距離 () cm	■ 右側 (利き手) 鉗子移動距離 () cm	■ 右側 (利き手) 鉗子移動距離 () cm
■ 左側 (非利き手) 鉗子移動距離 () cm	■ 左側 (非利き手) 鉗子移動距離 () cm	■ 左側 (非利き手) 鉗子移動距離 () cm	■ 左側 (非利き手) 鉗子移動距離 () cm
■ 胆嚢管、血管から5mm未満の部位に行われた焼灼時間 () 秒	■ 胆嚢管、血管から5mm未満の部位に行われた焼灼時間 () 秒	■ 胆嚢管、血管から5mm未満の部位に行われた焼灼時間 () 秒	■ 胆嚢管、血管から5mm未満の部位に行われた焼灼時間 () 秒
■ 遠位部クリップと胆嚢管部胆嚢移行部 (infundibulum) の距離 () mm	■ 遠位部クリップと胆嚢管部胆嚢移行部 (infundibulum) の距離 () mm	■ 遠位部クリップと胆嚢管部胆嚢移行部 (infundibulum) の距離 () mm	■ 遠位部クリップと胆嚢管部胆嚢移行部 (infundibulum) の距離 () mm
■ クリップ閉鎖距離 () mm	■ クリップ閉鎖距離 () mm	■ クリップ閉鎖距離 () mm	■ クリップ閉鎖距離 () mm
■ 落とされたクリップ数 () 個	■ 落とされたクリップ数 () 個	■ 落とされたクリップ数 () 個	■ 落とされたクリップ数 () 個

図 11 腹腔鏡下胆嚢摘出術シミュレーションセミナーにおける評価票

物ラボは再建操作になると、胃壁が厚すぎる、小腸が細すぎる、などの問題点が多く、動物ラボは切除までに限り、再建訓練はドライラボで行う方が合理的である。ウェットラボは、頻回に行うのがむずかしくコストがかかるので、さまざまな内容を盛り込み過ぎで、訓練のフォーカスや達成度評価が曖昧になりがちなので、できるだけ、訓練内容を分割した小単位のトレーニングを増やすべきと考えている。腔内吻合などテーマをしぼったドライラボのセミナーはわれわれが重要視するシミュレーション訓練であるが、ステイプラー、針糸などの実機や臓器モデルを使用すると消耗品のコストが相当大きくなる。そこで、LAP Mentorの大腸モジュールや胃バイパスモジュールに搭載されているステイプラーに関するインストラクション機能を部分的に使用するなど、できるだけVRSS画面を素材として使用する方法を模索しているところである。操作法が複雑な電動ステイプラーなど、新しい手術機器の使用法に関するセミナーはドライラボに適しており、本内容のVRモジュールの開発が期待される。

7.3 多職種；ノンテクニカル・スキルのトレーニング

VRSSは、先述のように、学生教育を担当する中堅医師が臨床実習においてもよく使用している、術式モジュールは、学生やコメディカルの手術体験に有用であり、実際彼らに好評である。手術室の多職種セミナーは動物ラボで行われることが多かったが、VRSSを備えたドライラボでも行うことが可能であり、コスト的に有利である。今後、VRSSの使用法として大きな展開が期待されると考えている。

近年、医療スタッフのノンテクニカル・スキル訓練が重視され、突然の大出血などのイベントに対処する多職種からなる医療チームの訓練が、欧米ではシミュレーションセンターの疑似手術室で施行されている。現在、われわれのシミュレーションセンターにおいても、本学情報学研究科によりVR手術室空間を表示可能となっており準備状況である。現時点では、HMD装着が必要なため、コミュ

ニケーション中心のノンテクニカル・スキル訓練には活用できていないが、将来的には、VRシミュレーション活用の大きな柱となると考えている。

8. 内視鏡手術以外の VRSS

ここまで、もっぱら胸腹部外科領域の内視鏡手術シミュレータに関して述べてきたが、特にEyesiのような眼科手術シミュレータがよく利用されている。

8.1 眼科手術用シミュレータ Eyesi (図 12)

白内障手術および網膜硝子体手術用のシミュレータであるが、眼科医が自己トレーニングのために良く使用しており、本学において、最も診療科医師がスキルアップのために使用しているシミュレータである。

8.2 耳鼻科手術シミュレータ Tempo (Voxel-Man, UKE, Hamburg, Germany) (図 12)

7種類の中耳手術トレーニングコースが装備さ

図 12 眼科，耳鼻科手術シミュレータ
上：Eyesi 下：Tempo

れている。画面は3Dで、力覚フィードバックもある。こうした、openな腔内ではなく充実空間（腹部では肝臓内など）の中でのVRSSは、消化器外科領域ではまだ実現されていないが、今後の可能性を示しているかもしれない。

9. 結語 – VRSSの今後への期待

本稿では、VRSSに関する多くの肯定的な研究結果を引用したが、実際にVRSSを使用した実感より良すぎるのではないかと感じる医師もいると思われる。たしかに、被験者として外科的バックグラウンドが無い学生が多い、サンプルサイズが小さい、RCTとはいえバイアスを十分小さくしうる振り分け法でない、などの問題点は否定できない。

しかし、そもそも、手術指導の効果についてこれまでほとんど評価してこなかったものであり、近年の教育理論の導入と、内視鏡手術、VRSS導入のタイミングが重なり、客観的評価法の開発と実施が同時に始まってまもない段階が現状であるという認識が必要と思われる。われわれ臨床系の医師は、過去の「上級医の背中を見て育つ」（放っておいても育つ人は育つ）という時代は終わり、外科手術の教育に関しても、進化した手術機器同様、教育用の多様な高性能機器を使いながら、できるだけ客観的な評価を行って指導することが求められる時代に入ってきたことを認識しなければいけない。評価に関してはレビュアーが行ういくつかのスケールが開発されてきたが、レビュアーによるばらつきは避けられず、スコアを明示するVRSSは評価方法の一つとして今後存在感が増していくと考える。消化器外科領域では、動物ラボに1回参加させて（達成度評価無しに学会認定の修了証が発行される）、あとは手術に参加させながら、という昔ながらの修練法も相変わらず少なくないが、先にも述べたように、例えば最初に行う胆嚢摘出術での動物ラボ訓練は有用性が高くなくVRSSの方が良い。どの段階でどの訓練法を用いるかはもうすこし合理的判断があってよい。手

前勝手な意見かもしれないが、これから実際の手術を行う段階の外科医師は高価な動物ラボに参加させるより、われわれのようなVRSSを運用するセンターで訓練し評価も得た方が有意義と考える。しかし、残念ながら現在使えるモジュールも実際の手術の変化に対応しておらず改良が必要なのは先に述べた通りである。

北米、西欧では、この20年間一貫して動物トレーニングは抑制されてきたのに、日本を中心とした東アジアでは、近年、逆に動物ラボが拡充されるという状況もドライラボの必要性に水を差している。しかし、長期的には、動物ラボを縮小し、VRSS、臓器モデル（ファントム）、CSTを組み合わせたトレーニングシステムを構築していかなければいけないのは明らかであり、コスト的にはVRSSが最も有望である。そして、手術訓練には効率やコストだけでなく、体験してみたいという気持ちも重要であろう。Immersive VRなど魅力的な新技術が現れ、VRSSが登場した頃の「わくわく感」が思い出される。

また、逆に、体験したくないようなcriticalな状況を表現するのもVRシミュレーションだからこそである。VRSSが出て来た当初は、大量の血液がスコープに吹き飛んできて何も見えなくなるような緊迫の画面があったが、最近は、「開腹手術に変更すべき」という指示が淡々と示される程度で、われわれが手術時に感じることもある「背筋が冷たくなるような」状況画面も装備した方が良いと思われる。

また、ノンテクニカル・スキルを中心にした多職種トレーニングが急速に重要度を増しているのは見逃せない。この領域の教育に、最近のVR技術の発展が寄与し新たな多職種手術教育が切り開かれることを期待し、本学会の皆様の関与をぜひお願いしたい。

参考文献

- 1) Taffinder N, Sutton C, Fishwick RJ, et al. Validation of virtual reality to teach and assess psychomotor skills in laparoscopic surgery: result from randomized controlled studies using the MIST VR laparoscopic simulator. *Stud Health Technol Inform* (1998); 50:124-30.
- 2) Ström P, Kjellian A, Hedman L, et al. Validation and learning in the ProCedicus KSA virtual reality surgical simulator. *Surg Endosc* (2003); 17:227-231.
- 3) Schijven M, Jakimowicz J. Face-, expert, and referent validity of the Xitact LS500 laparoscopy simulator. *Surg Endosc* (2002); 16(12):1764-70.
- 4) Peters JH, Fried GM, Swanstrom LL, et al. Development and validation of a comprehensive program of education and assessment of the basic fundamentals of laparoscopic surgery. *Surgery* (2004); 135(1):21-7.
- 5) Pitzul LB, Grancharov TP, Okrainec A. Validation of three virtual reality fundamentals of laparoscopic surgery (FLS) modules. *Medicine Stu Health Technol Inform* (2012); 173:349-355.
- 6) Ström P, Hedman L, Särnå L, et al. Early exposure to haptic feedback enhanced performance in surgical simulator training: a prospective randomized crossover study in surgical residents. *Surg Endosc* (2006); 20:1383-1388.
- 7) Penait L, Akkary E, Bell RL, et al. The role of haptic feedback in laparoscopic simulation training. *J Surg Res* (2009); 156:312-316.
- 8) Våpenstad C, Hofstad EF, Bø LE, et al. Lack of transfer of skills after virtual reality simulator training with haptic feedback. *Minim Invasive Ther Allied Technol* (2017); 26(6):346-354. doi: 10.1080/13645706.2017.1319866
- 9) 三澤一成, 藤原道隆, 小寺泰弘, 他. バーチャルリアリティ手術シミュレータを利用した手術技能の評価. *手術* (2006); 60(11):1765-71.
- 10) Nomura T, Mamada Y, Nakamura Y, et al. Laparoscopic skill improvement after virtual reality simulator training in medical students as assessed by augmented reality simulator. *Asian J Endosc Surg* (2015); 8(4):408-12. doi: 10.1111/ases.1220
- 11) Seymour NE, Gallagher AG, Roman SA, et al. Virtual reality training improves operating room performance: results of a randomized, double-blinded study. *Ann Surg* (2002); 236:458-463.
- 12) Grantcharov TP, Kristiansen VB, Bendix J: Randomized clinical trial of virtual reality simulation for laparoscopic skills training. *Br J Surg* (2004); 91:146-50.
- 13) Ahlberg G, Enochsson L, Gallagher AG, et al.: Proficiency-based virtual reality training significantly reduces the error rate for residents during their first 10 laparoscopic cholecystectomies. *Am J Surg* (2007); 193:797-804.
- 14) Ahlberg G, Heikkinen, Iselius L, et al. Does training in a virtual reality simulator improve surgical performance? *Surg Endosc* (2002); 16:126-9.
- 15) 藤原道隆, 岩田直樹, 田中千恵, 他. 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* (2010); 15:27-31.
- 16) Nagendran M, Gurusamy KS, Aggarwal R, et al. Virtual reality training for surgical trainees in laparoscopic surgery (Review) *Cochrane Database Syst Rev*. (2013); 27(8):CD006575. doi: 10.1002/14651858.CD006575.pub3
- 17) Grantcharov TP, Bardram L, Funch-Jensen P, Rosenberg J: Learning curves and impact of previous operative experience on performance on a virtual reality simulator to test laparoscopic surgical skills. *Am J Surg* (2003); 185:146-9.
- 18) Van Dongen KW, Tournioij E, van der Zee DC et al. Construct validity of the LapSim: can lapSim virtual reality simulator distinguish between novices and expert? *Surg Endosc* (2007); 21:1413-7.
- 19) Eriksen JR, Grantchrov T. Objective assessment of laparoscopic skills using a virtual reality simulator. *Surg Endosc* (2005); 19:1216-9.
- 20) Aggarwal R, Ward J, Balasundaram I, et al. Proving the effectiveness of virtual reality simulation for training in laparoscopic surgery. *Ann Surg* (2007); 246(5):771-9.
- 21) Yamaguchi S, Konishi K, Yasunaga T, et al. Construct validity for eye-hand coordination skill on a virtual reality laparoscopic surgical simulator. *Surg Endosc* (2007); 21:2253-57.
- 22) Woodrum DT, Andreatta PB, Yellamanchilli RK, et al. Construct validity of the LapSim laparoscopic surgical simulator. *Am J Surg* (2006); 191(1):28-32.
- 23) Iwata N, Fujiwara M, Kodera Y, et al. Construct validity of the LapVR virtual-reality surgical simulator. *Surg Endosc* (2011); 25(2):423-8. doi: 10.1007/s00464-010-1184-x
- 24) Steigerwald SN, Park J, Hardy KM, et al. Does laparoscopic simulation predict intraoperative performance? A comparison between the Fundamentals of Laparoscopic Surgery and LapVR evaluation

- metrics. *Am J Surg*. (2015); 209(1):34-9.
doi: 10.1016/j.amjsurg.2014.08.031
- 25) Steigerwald SN, Park J, Hardy KM, et al. The fundamentals of laparoscopic surgery and LapVR evaluation metrics may not correlate with operative performance in a novice cohort. *Med Educ Online* (2015); 4;20:30024. doi: 10.3402/meo.v20.30024.
 - 26) Beyer L, Troyer JD, Mancini J, et al. Impact of laparoscopy simulator training on the technical skills of future surgeons in the operating room: a prospective study. *Am J Surg*. (2011); 202:265-72.
 - 27) 三澤一成, 藤原道隆, 小寺泰弘, 他. 内視鏡外科手術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* (2009); 7:37-43.
 - 28) 藤原道隆, 田中千恵, 岩田直樹, 他. バーチャル・リアリティ手術シミュレータの現状. *臨床外科* (2014); 69:972-980.
 - 29) Bric JD, Lumbard DC, Frelich MJ et al. Current state of virtual reality simulation in robotic surgery training: a review. *Surg Endosc* (2016); 30(6):2169-78. doi: 10.1007/s00464-015-4517-y
 - 30) Yang C, Kalinitschenko U, Helmert JR, et al. Transferability of laparoscopic skills using the virtual reality simulator. *Surg Endosc* (2018); 32(10):4132-4137. doi: 10.1007/s00464-018-6156-6
 - 31) Bjerrum F, et al. Randomized trial to examine procedure-to-procedure transfer in laparoscopic simulator training. *Br J Surg* (2016); 103(1):44-50. doi: 10.1002/bjs.9966
 - 32) Bharathan R, Vali S, Setchell T, et al. Psychomotor skills and cognitive load training on a virtual reality laparoscopic simulator for tubal surgery is effective. *Eur J Obstet Gynecol Reprod Biol* (2013); 169(2):347-52. doi: 10.1016/j.ejogrb.2013.03.017.
 - 33) Moldovanu R, Tarcoveanu E, Dimofte G, et al. Preoperative warm-up using virtual reality simulator. *JSLs* (2011); 15:533-538.
 - 34) da Cruz JAS, Dos Reis ST, Cunha Frati RM, et al. Does warm-up training in a virtual reality simulator improve surgical performance? A prospective randomized analysis. *J Surg Endosc* (2016); 73(6):974-978. doi: 10.1016/j.jsurg.2016.04.020.
 - 35) Shanmugan S, Leblanc F, Senagore AJ, et al. Virtual reality simulator training for laparoscopic colectomy: what metrics have construct validity? *Dis.colon Rectum* (2014); 57(2):210-4. doi: 10.1097/DCR.0000000000000031
 - 36) Neary PC, Boyle E, Delaney CP, et al. Construct validation of a novel hybrid virtual-reality simulator for training and assessing laparoscopic colectomy: results from the first course for experienced senior laparoscopic surgeons. *Surg endsc* (2008); 22:2301-9.
 - 37) Giannotti D, Patrizi G, Casella G, et al. Can virtual reality simulators be a certification tool for bariatric surgeons? *Surg Endosc* (2014); 28:242-8.
 - 38) Neary PC, Mamada Y, Nakamura Y, et al. Laparoscopic skill improvement after virtual reality simulator training in medical students as assessed by augmented reality simulator. *Asian J Endosc Surg* (2015); 8(4):408-12. doi: 10.1111/ases.1220
 - 39) Van Sickie KR, McClusky DA III, Gallagher AG, et al. Construct validation of the ProMIS simulator using a novel laparoscopic suturing task. *Surg Endosc* (2005); 19(9):1227-31.
 - 40) 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* (2008); 22:985-990.
 - 41) Botden SM, Buzink SN, Schijven MP, et al. Augmented versus virtual reality laparoscopic simulation: What is the difference. *World J surg* (2007); 31(4):764-772. DOI: 1007/s00268-006-0724-y
 - 42) 藤原道隆, 福本良平, 田中千恵, 他. 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* (2013); 11(1):7-12.
<https://doi.org/10.7876/jmvr.11.7>
 - 43) 藤原道隆. VR/AR 技術の開発動向と最新応用事例 臨床技能教育・訓練 - 主に手術トレーニングにおける VR シミュレーションの現状 (p.462-470) 技術情報協会, 2018.
 - 44) Huber T, Paschold M, Hansen C, et al. New dimensions in surgical training: immersive virtual reality laparoscopic simulation exhilarates surgical staff. *Surg Endosc* (2017); 31(11):4472-4477. doi: 10.1007/s00464-017-5500-6
 - 45) 山中弘行, 横山和秀, 上野大樹, 他. 患者特異的腹腔鏡シミュレータの実際の手術への応用. *VR 医学* (2013); 11(1):1-6.
<https://doi.org/10.7876/jmvr.11.1>
 - 46) Rivard JD, Vergis AS, Unger BJ, et al. Construct validity of individual and summary performance metrics associated with a computer-based laparoscopic simulator. *Surg endsc* (2014); 28:1921-8.