

総 説

患者特異的シミュレータの研究開発と手術の数値化

榎山和秀¹⁾, 蓼沼知之¹⁾, 大竹慎二¹⁾, 藤岡あずみ²⁾,
 山中弘行³⁾, 上野大樹⁴⁾, 逢坂公人⁵⁾

¹⁾横浜市立大学大学院医学研究科 泌尿器科学

²⁾横浜医療センター 泌尿器科

³⁾大船中央病院 泌尿器科

⁴⁾横須賀共済病院 泌尿器科

⁵⁾横浜市立大学附属市民総合医療センター 泌尿器・腎移植科

要 旨: 医工連携, 産学連携研究として, 患者特異的腹腔鏡手術シミュレータの開発を行った. 手術予定患者の術前CTから3Dデータを抽出し, シミュレータに入力することでシミュレータ内に患者腹腔内が再現され, 術前にリハーサル手術を行うことができる. シミュレータは腹腔鏡手術を模擬できる. 鉗子の動きに対して, リアルタイムで臓器が変形し手元に臓器の抵抗をフィードバックする. トロカートを任意の位置に設定して腹腔内を観察できるトロカータシミュレーションも可能である.

シミュレータはバーチャルリアリティー技術を使ったもので, シミュレーションには手術の数値化が必要である. シミュレータ開発の過程で手術を数値化する取り組みを行った. 腹腔鏡手術における鉗子のスムーズな動きの指標や臓器や鉗子に加わる力の測定についての知見も述べる.

Key words: シミュレータ (Simulator), 腹腔鏡 (Laparoscope), ロボット手術 (Robotic surgery), 患者特異的 (Patient-specific), 学習曲線 (Learning curve)

はじめに

泌尿器科癌に対する腹部骨盤手術は長い間開腹手術で行われてきたが, この30年間で開腹手術は, 腹腔鏡下手術さらにはロボット支援腹腔鏡下手術に置き換えられている. 開腹手術は術者の対面に助手が居り, 例え経験の浅い術者が執刀していても, 術野を共有する経験豊かな助手(指導医)が直接手術をサポートできる. 一方, 腹腔鏡下手術ではモニターに映った術野は共有できるものの, 術野へアクセスできるポート(トロカータ)に位置と数の制限があり, 助手が直接手術をコントロールしにくい. 助手は助手の役割に徹することが多く, 術者の力量がそのまま手術結果に反映されやすい. ロボット支援腹腔鏡下手術でも同様のことがいえる. 開腹手術は術者と助手の共同作業であるのに対して, 腹腔鏡手術は術者の術者としての役割が大きい. 腹腔鏡下手術のラーニング

カーブが長いのはこのことが一因かもしれない.

腹腔鏡下手術の長いラーニングカーブを手術室に持ち込まないことは, 患者側・医療者側双方の視点から重要である. ラーニングカーブは可能な限り術者になる前に手術室外で消化することが望ましい. そのためには手術室外での適切なトレーニングが必要となる. 技術的なトレーニングツールとして, 動物, 遺体, シミュレータが挙げられる. 動物を使用したトレーニングは倫理・衛生面から頻回に行うことはできない. 遺体を使用したトレーニングは日本では施行可能な施設と機会が限られている. シミュレータはこれらの問題をクリアできるトレーニングツールである.

私たちは, 2006年から三菱プレジジョン, 理化学研究所, 横浜国立大学とともに手術シミュレータを開発してきた. 腹腔鏡手術予定患者の術前CTから3次元(3D)データを抽出し, シミュレータに入れると, 手術予定患

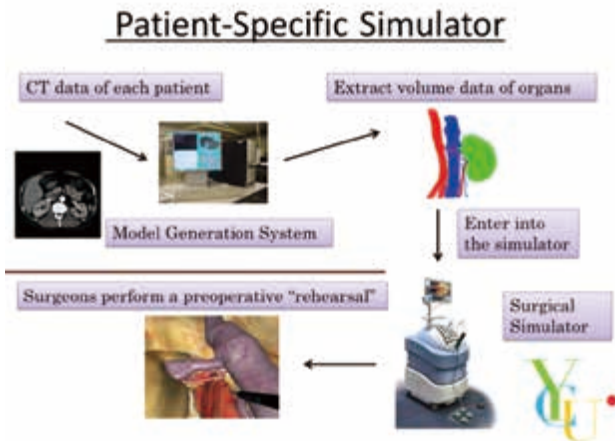


図1 患者特異的シミュレータの概要



図2 Box trainer, 最もシンプルな腹腔鏡手術シミュレータである

者の腹腔内、後腹膜腔内がシミュレータ内に再現される。それを使用することで術前に予行演習手術をすることができる。患者特異的シミュレータである(図1)。患者特異的シミュレータの概要と研究開発において得た知見を概説する。

腹腔鏡手術シミュレータの分類

腹腔鏡手術シミュレータは①Part task trainer type②Task trainer type ③Mission rehearsal typeの3つに分類できる。

①Part task trainer typeはある手術手技の一部をトレーニングするものでBox trainer(図2)が該当する。Box trainerを使用して例えば縫合結紮の練習が可能である。Boxの中に3Dモデルを置いてより実践的なトレーニングも可能である。私たちは、腹腔鏡下腎部分切除術のトレーニングツールとして、エヌコンポジットゲル(NCゲル)を使用して腎臓+腎腫瘍3Dモデルを作成した(図3)。16名の泌尿器科医師がこのモデルを用いてBox内で腎部分切除を行い評価した。Face validity(実際の術野と比較して現実的かどうか)、Content validity(手術のトレーニング器具として有用かどうか)ともに良好な結果であっ



図3 腎臓部分切除モデル, 適切なモデルをBox trainerで使用することで効果的なpart task simulationが可能である

た。また、手術時間と手術技術の評価指標であるGlobal Operative Assessment of Laparoscopic Skills(GOALS) score¹⁾において熟練者と初心者の間には有意差が認められ、両者を区別することが出来るモデルであることを示した(Construct validity)²⁾。

②Task trainer typeは、ある手術手技に対するトレーニングが可能なシミュレータである。例えば腎摘除術や胆嚢摘除術の主要な工程をトレーニングできるものである。一般的にはVirtual reality(VR)技術を利用しているシミュレータが中心である。複数の製品が腹腔鏡またはロボット手術の術式特異的なトレーニングツールとして市販されている。今回開発したシミュレータ、LapPASS[®]は、③のMission rehearsal typeであるが、腎摘除などの術式特異的訓練も兼ねている。LapPASS[®]の術式特異的トレーニング効果の評価するために、腹腔鏡手術未経験の泌尿器科医師12人を2群に分け、腎摘除術のシミュレータトレーニングの有無がブタの腎摘除におけるパフォーマンスに違いが出るかを評価した³⁾。ブタ腎摘除の手術時間に違いはなかったが、GOALS scoreはシミュレータで事前にトレーニングした群で有意に良好で、VRシミュレータでの術式特異的訓練が手術に好影響を及ぼす可能性を示した。

③Mission rehearsal typeは、予定されている手術に対するトレーニングが可能なシミュレータであり、患者特異的シミュレータである。前述したように術前CTデータをシミュレータに入れることで手術予定患者の腹腔内を再現し、予行演習手術が出来るものである。近年CTを加工し、3DVR画像として表示するソフトウェアが多数市販されており、術前プランニングに有用である。今回開発した患者特異的手術シミュレータはプランニングだけではなく実際に手術の予行演習を、鉗子を動かし施行可能なものである。

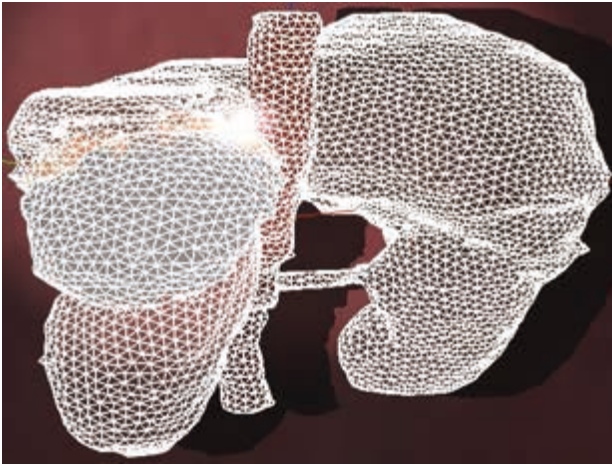


図4 四面体に分割された3Dデータ

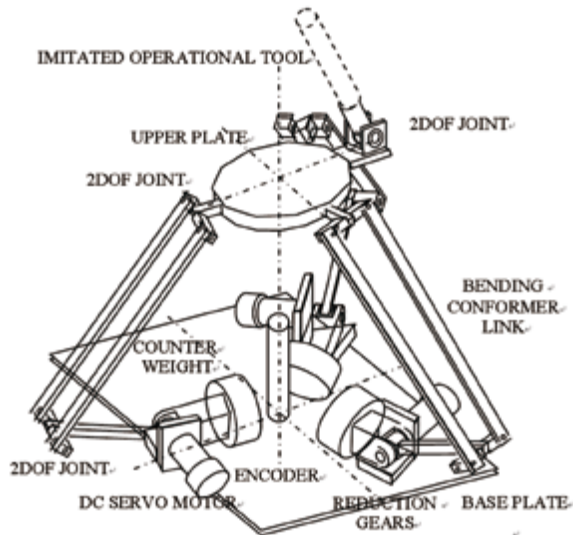


図5 鉗子に抵抗を与える機構，触覚付きシミュレータである

患者特異的シミュレータにおける臓器抽出

CTから臓器別に3Dボリュームデータを抽出する方法について述べる。腎臓などの実質臓器はgraph cut algorithm⁴⁾を用い、動脈など造影効果をはっきりしているものはregion growing method⁵⁾を用い臓器抽出する。静脈や尿路など造影効果が不明瞭な部位は自動化が難しく、しばしば手作業を要する。本研究では手作業が必要な場面で、手作業の量を減らすようなソフトウェアの開発を行った。技術の進歩に伴い、現在市販されているCTから3DVR画像を表示するソフトウェアではかなりの部分が自動化されているが、やはり手作業が必要であり、全自動化に向けて今後の技術開発に期待したい。Artificial intelligence (AI) を応用すれば自動化が可能になるかもしれない。臓器別に抽出した3Dデータを結合し、シミュレータ用に加工する。結合組織や脂肪組織は手術におい

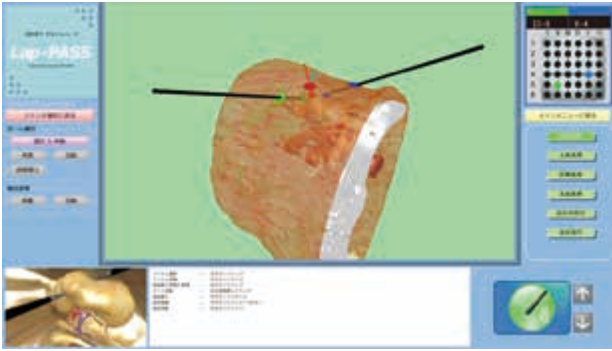


図6 開発当初のPC cluster, 大型だったが最終的には小型化に成功

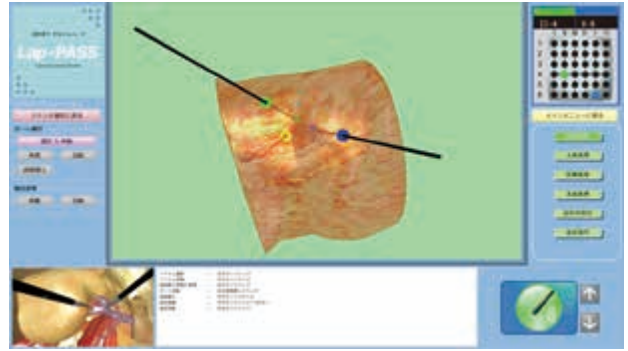
て非常に重要であるが、CTでは結合組織の繊維方向や脂肪組織と脂肪組織の別れ目（いわゆる層, layer）はわからない。したがって結合組織や脂肪組織は抽出した臓器に後付けする形にした。

患者特異的シミュレータにおける臓器変形と臓器抵抗

CTから抽出した3Dボリュームデータは細かい四面体に分割される（図4）。有限要素法に基づく非線形弾性モデルを使用し、鉗子操作に対する臓器変形をリアルタイムに表現している⁶⁻⁸⁾。ある四面体に鉗子が当たると四面体に変形し隣の四面体もその影響で変形するものである。鉗子の先端は内部で3つ股に分かれており、それぞれにモーターが付いていて臓器に加わった力を抵抗として術者にフィードバックする（図5）。つまり触覚がある。鉗子の動きに対してリアルタイムに臓器変形と抵抗のフィードバックを行うためには迅速に多量の計算が必要でPersonal computer (PC) クラスタで並列計算している（図6）。開発当初は大型だったが、最終的には小型化した。四面体が細かいと計算量が増すので、リアルタイム性とリアリティーのバランスを考慮して部位ごとに四面体の大きさを設定した。



経腹膜アプローチ



後腹膜アプローチ

図7 腎部分切除におけるトロカーシミュレーション



図8 患者特異的シミュレータの外観

患者特異的シミュレータにおけるトロカーシミュレーション

腹腔鏡手術においてトロカー位置は重要であり、不適切な位置にトロカーを留置すると手術が著しく困難になる。このシミュレータではCTから抽出した患者体表上の任意の位置にトロカーを留置可能で、対応した腹腔内画像および鉗子位置を表示する。したがって術前に最適なトロカー位置を模索することができる。決定したトロカー位置に模擬術具を移動させて手術シミュレーションを行う。また腎臓手術では経腹膜および後腹膜アプローチを選択できる。このシミュレータはどちらのアプローチにも対応しているため、どちらのアプローチが最適か術前に検討することができる。図7は腎癌に対する腎部分切除術のトロカーシミュレーションである。経腹膜アプローチ、後腹膜アプローチ両方でシミュレーションを行い、

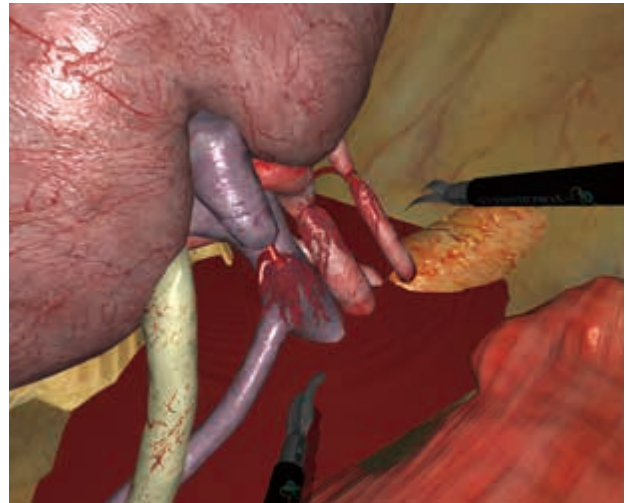


図9 シミュレータ内で意図的に出血させて止血訓練ができる

後腹膜アプローチを採用。さらに後腹膜アプローチにおける最適なトロカー位置をシミュレーションしている。腎腫瘍を切除する際の腫瘍の見え方やハサミの入る角度は重要で手術結果に影響を与える。

患者特異的シミュレータにおける手術シミュレーション

図8はシミュレータ外観である。カメラと2本の腹腔鏡用手術鉗子で手術シミュレーションができる。カメラは直視および30度の斜視鏡を選択可能である。腹腔鏡手術鉗子は、ハサミ、剥離鉗子、把持鉗子などに加え、クリップ、超音波凝固切開装置、自動縫合器などを画面上で選択できる。2種類のフットスイッチで電気凝固や自動縫合が可能である。通常の腹腔鏡手術で使用する機器は概ね使用可能であり、これらを使用し予行演習手術を行う。通常の手術同様、血管を損傷すると出血し、クリップなどで止血が必要となる。出血パターンは動脈性、静脈性、にじみ出血の3種類ある。手術において大出血に

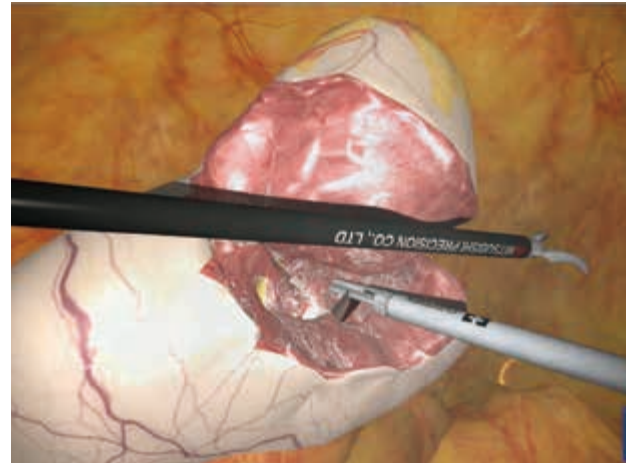
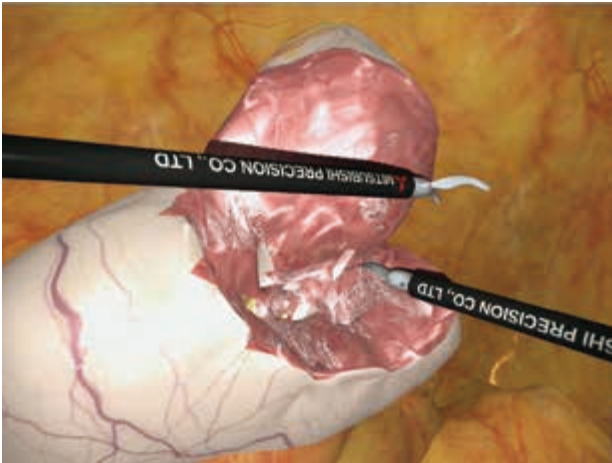


図10 腎部分切除シミュレーション，腫瘍に流入する動脈を剥離（左図）し超音波凝固切開装置で切離した（右図）

対応する能力は重要であるが，外科医が大出血に遭遇することは少ないし，訓練を行う機会は多くはない．大出血などの危機的状態に対する訓練におけるシミュレータの役割は大きいと考えている（図9）．

シミュレーション可能な手術は，腎摘除術，腎部分切除術，副腎摘除術，胆嚢摘除術，肝切除術，胃切除術，子宮摘除術，子宮筋腫核出術である．

患者特異的シミュレータが有用な病態

通常手術は術前にイメージしたように予定通り終了する．つまり手術前に概ねイメージできている．しかしながら，手術前に頭の中で十分にイメージできない場合がある．2次元のCTを頭の中で3Dに再構築する精度は個人の空間認知能力に大きく依存し⁹⁾，3DVR画像を提供されることで，CTで認識するよりも正確に臓器の位置関係を認識することができる¹⁰⁾．患者特異的シミュレータでは3DVR画像のみならず，術野を術前に見ることができ，鉗子を使用して予行演習手術が可能である．患者特異的シミュレータが有用な病態は，術前に手術中の映像がイメージしにくい病態である．解剖が複雑な症例はイメージしにくい．例えば，左腎盂尿管移行部狭窄症で左水腎症を呈する症例に対して腹腔鏡下腎盂形成術を施行したが，左腎動脈が4本，左腎静脈が2本，さらに性腺静脈が2本に分岐している症例を経験した．分岐した性腺静脈に腎静脈の1本が流入し，腎盂尿管移行部狭窄の原因になっていたが，これを術前に患者特異的シミュレータで確認し，予定通りの手術を施行できた¹¹⁾．さらに有用だったのが完全内臓逆位症例である．完全内臓逆位症例では解剖学的誤認や外科操作の改変を要し，通常の手術より難易度が高い．われわれは完全内臓逆位を伴う右腎盂癌に対して腹腔鏡下右腎尿管全摘除術を施行したが，患者特異的シミュレータを使用し，術前に解剖を理

解するのみならず手術操作を予行演習することで，通常の手術時間で特異な解剖に戸惑うことなく手術を安全に施行できた¹²⁾．

T1（7cm以下で浸潤がない）腎癌に対する手術療法は同等の制癌性と腎機能温存を根拠に腎摘除術から腎部分切除術にシフトしている．腎摘除術は腎血管を処理し腎臓周囲脂肪ごと腎を遊離する手術でどちらかというとな一般的に手術が可能である．一方，腎部分切除術は腫瘍の位置，大きさ，形状¹³⁾によって手術戦略が症例ごとに異なる．視野展開の方法や腫瘍切除の角度，隣接する腎血管や尿路との位置関係を症例毎に検討する必要がある．したがって，患者特異的シミュレーションを必要とする術式である．われわれは腎部分切除アプリケーションを開発し，ロボット支援腹腔鏡下腎部分切除術前に患者特異的シミュレータを使用しその有用性を報告した¹⁴⁾．今後症例数を増やし，シミュレータ使用が手術成績に与える影響を検討する予定である．

解剖学的整合性の評価

シミュレーション所見と実際の手術所見は一致する必要がある．腎部分切除術¹⁴⁾および腎摘除術¹⁵⁾で解剖学的整合性の検討を行った．腎部分切除術においては切除ラインの設定によって切除される腎臓内部の構造物が変わってくる．従って同一症例に対して異なる切除マージンで複数のシミュレーションを施行し，解剖学的整合性がほぼ取れていることを示した．腎摘除においては腎動脈と分枝および尿管について解剖学的整合性の評価を行い，細かい血管の付着や前後関係で軽微な解剖学的誤りがあったが，ほぼ正確にシミュレータ上に患者腹腔内を再現されていることを確認した．



図11 センサーを取り付けた腹腔鏡手術鉗子。数値は手術画像と共にリアルタイムに表示記録される

腎部分切除シミュレーション

近年のロボット支援腹腔鏡下腎部分切除術の増加と3DVR画像作成ソフトウェアの発展と商品化に伴い、術前に3DVR画像を腎部分切除術の術前計画に使用する取り組みが増えてきている¹⁶⁻¹⁹⁾。大部分が3DVR画像を任意の角度から観察し、腫瘍部分を非可視化することで切除底の構造物を認識するものである。患者特異的シミュレータの腎部分切除アプリケーション開発過程で、私たちは腎臓を任意の位置で切除した時の切除底面の観察が可能になった。この技術を使用し、腎腫瘍に1-5mmのマージンを付け切除した時に尿路が開放するか否か検討し、実際の手術と比較し尿路開放の有無と位置をほぼ予測できると報告した²⁰⁾。Isotaniら¹⁹⁾も同様の検討を行い、尿路、血管の開放を予測している。完成した患者特異的シミュレータの腎部分切除アプリケーションでは、切除中に患者固有の腎皮質・髓質・腎洞脂肪を認識でき、切除中に遭遇する尿路および血管を認識できるのみならず、ハサミやSealing deviceなどで切除可能である¹⁴⁾ (図10)。

手術の数値化

VRシミュレータは手術手技を数値化して表現しているものである。シミュレータ開発研究において手術を数値化する作業は多々あったが、鉗子にかかる力や鉗子挙動の数値化について述べる。腹腔鏡手術鉗子に多数のセンサーを取り付け、Boxや豚を用いて手術時に鉗子にかかる力などをリアルタイムに測定した²¹⁾。測定できるパラメータは鉗子先端の把持力、鉗子に加わった力(XYZ方向)、鉗子の加速度、鉗子手元の把持力、鉗子手元の開閉角度である(図11)。豚の腎摘除術をセンサー付きの鉗子

を使用して行くと、手術時に鉗子に加わる力は弱く、概ね1N程度で手術は進行する。メリーランド型鉗子で豚腎臓を直角に刺すと、腎破裂する瞬間の力は概ね5Nであった²²⁾。実際の手術中に、鉗子に加わる力をニュートンで表すことはほとんどないが、手術を数値化できれば手術教育の標準化や手術機器開発に有用と考えている。ロボット手術では手術中の数値データを開腹や腹腔鏡手術に比べて取得しやすい可能性があり、手術の数値化は発展する可能性があり、将来手術の自動化につながっていく可能性がある。

手術の数値化の臨床応用

手術の数値化が実臨床に役立てられるか検討した。センサー付き腹腔鏡鉗子を用い、豚腎血管を剥離の際、腎門部にテンションが加わるように腎臓を挙上するというタスクを被検者に課し、鉗子にかかる力や鉗子の把持力を測定した²³⁾。被検者を腹腔鏡手術上級者と初心者に分け、各種パラメータに差が出るか検討した。当初は鉗子に加わる力が上級者の方が弱いと予想していたが、鉗子にかかる力は同等であった。上級者と初心者の差が出たのは鉗子手元の把持力で、上級者が弱い力で鉗子を把持していた。鉗子手元の把持力の標準偏差も上級者で小さく、上級者は手術中に鉗子を安定した弱い力で把持していることを示すことができた。開腹手術の時代から鉗子は軽く握るように指導されてきたが、そのことを数値で示したことになる。吉田ら²⁴⁾は、センサー付き鉗子で血管剥離を行い、上級者では剥離早期に垂直方向に力が働き、初心者では水平方向に力が働く傾向にあることを示した。このように手術操作が有効に数値化・分析されるとデータに裏打ちされた手術教育が可能になる。

腹腔鏡やロボット手術では鉗子交換時に必ずしも鉗子をモニターするわけではなく、トロカー出口から術野まで鉗子は視野外でモニターされずに入ってくる。ロボット手術では鉗子交換時や助手の鉗子挿入時に臓器損傷が発生すると報告されている²⁵⁾。そこで、鉗子をブラインドで挿入する際、どのようにすれば臓器損傷を来たさないか検討した²⁶⁾。被験者はブラインドでトロカーからセンサー付き鉗子を豚腹腔内に挿入し腹壁に当たったところで鉗子を止め、鉗子に加わった力（＝腹壁に加わった力）を測定する。被験者は2種類の鉗子速度、2種類の鉗子把持力で操作した。その結果、鉗子速度が速く、鉗子把持力が強い場合、腹壁に強い力が加わった。強い把持力で早く動かした場合平均2.8N、弱い把持力でゆっくり動かした場合平均1.1Nの力が腹壁に加わった。加えて、速度より把持力が腹壁に加わる力に強い影響を与えていると解析された。鉗子をブラインドで挿入するときには軽い力で鉗子を握りゆっくりと挿入すれば臓器損傷のリスクが減ることが数値で示された。

手術鉗子の動きのスムーズさ

腹腔鏡下手術中に上級者の鉗子はスムーズに初心者の鉗子はぎこちなく動いているように見えるが、これを数値化して評価することは簡単ではない。Hofstadら^{27, 28)}は鉗子の動きのスムーズさを単位時間当たりの鉗子加速度の変化 (m/s^3) と定めた。私たちは鉗子挙動のスムーズさの指標として、Short-Time Power of Difference (STPOD) を開発し評価した²⁹⁾。2点間を鉗子が移動する際、最短距離の直線から鉗子軌道がどの程度離れていたかを定量化するものである。予備実験でパラメータを調整したのち、Boxと3DVRシミュレータを使用し被験者にタスクを与え鉗子操作のスムーズさを評価した。その結果、STPODは上級者と初心者で有意な差があり、両者を区別することが出来る指標といえる (Construct validity)。この研究では、初心者は上級者に比べて鉗子が止まっているBlank timeが長いことを報告したが、Blank timeが初心者と上級者を区別できるかは研究によって結果が分かっている³⁰⁻³²⁾。

患者特異的シミュレータの製品化と転帰

2006年から三菱プレジジョン、理化学研究所とともに産学、医工連携研究として開発してきた患者特異的シミュレータはLapPASS[®]として、CTから3Dデータを構築する生体モデルデータ生成システムはPASS-GEN[®]として、2012年に製品化、販売開始された。関連する特許を16個取得している。患者特異的シミュレータが製品化された例は他になく画期的であったが、残念ながらLapPASS[®]およびPASS-GEN[®]は諸般の事情により2021年

3月31日をもって生産及び販売を終了した。

おわりに

開腹手術から腹腔鏡下手術にシフトしている時期に、患者特異的シミュレータ開発に携わり、関連した手術の数値化に取り組んだ。開腹手術に比べ腹腔鏡下手術の方が、ポートが固定され動きが制限されているので数値化が可能な側面があった。現在は腹腔鏡下手術がロボット手術にシフトしている。ロボット手術は鉗子動作が機械を通して行われるので鉗子動作を数値として記録できる可能性が高い。手術の数値化はロボット手術時代にさらに進歩することが期待される。手術の数値化は、手術教育の質の向上、危険操作を回避する安全装置の開発、新規手術機器の開発に欠かせないと考えられ、飛躍が期待される。

文 献

- 1) Vassiliou MC, Feldman LS, Andrew CG, Bergman S, Leffondré K, Stanbridge D, Fried GM: A global assessment tool for evaluation of intraoperative laparoscopic skills. *Am J Surg*, **190**: 107–113, 2005.
- 2) Ohtake S, Makiyama K, Yamashita D, Tatenuma T, Yamanaka H, Yao M: Validation of a kidney model made of N-composite gel as a training tool for laparoscopic partial nephrectomy. *Int J Urol*, **27**: 567–568, 2020.
- 3) Ohtake S, Makiyama K, Yamashita D, Tatenuma T, Yao M: Training on a virtual reality laparoscopic simulator improves performance of live laparoscopic surgery. *Asian J Endosc Surg*, **15**: 313–319, 2022.
- 4) Rusinek H, Boykov Y, Kaur M et al: Performance of an automated segmentation algorithm for 3D MR renography. *Magn. Reson. Med*, **57**: 1159–1167, 2007.
- 5) Shimai H, Yokota H, Nakamura S et al: Extraction from biological volume data of a region of interest with non-uniform intensity. *Proceedings of SPIE 6051 Optomechatronic Technologies*, **6051**: 1–3, 2005.
- 6) Makiyama K, Nagasaka M, Inuiya T, Takanami K, Ogata M, Kubota Y: Development of a patient-specific simulator for laparoscopic renal surgery. *Int J Urol*, **19**: 829–835, 2012.
- 7) 緒方正人, 長坂 学, 乾谷 徹, 坂本英男, 高波健太郎, 槇山和秀, 窪田吉信: 患者固有の形状データに基づく手術手技訓練用シミュレータ. *情報処理学会論文誌*, **53**: 421–431, 2012.
- 8) Ogata M, Nagasaka M, Inuiya T, Makiyama K, Kubota Y: A development of surgical simulator for training of

- operative skills using patient-specific data. *Stud Health Technol Inform*, **163**: 415 – 421, 2011.
- 9) Lanca M: Three-Dimensional Representations of Contour Maps. *Contemp Educ Psychol*, **23**: 22 – 41, 1998.
 - 10) Tapiero S, Karani R, Limfueco L, Xie L, Jefferson FA, Reinwart C, Okhunov Z, Clayman RV, Landman J: Evaluation of Interactive Virtual Reality as a Preoperative Aid in Localizing Renal Tumors. *J Endourol*, **34**: 1180 – 1187, 2020.
 - 11) Yamanaka H, Makiyama K, Tatenuma T, Sakata R, Sano F, Kubota Y: Preparation for pyeloplasty for ureteropelvic junction obstruction using a patient-specific laparoscopic simulator: a case report. *J Med Case Rep*, **6**: 338, 2012.
 - 12) Makiyama K, Sakata R, Yamanaka H, Tatenuma T, Sano F, Kubota Y: Laparoscopic nephroureterectomy in renal pelvic urothelial carcinoma with situs inversus totalis: preoperative training using a patient-specific simulator. *Urology*, **80**: 1375 – 1378, 2012.
 - 13) Tatenuma T, Ito H, Muraoka K, Ito Y, Hasumi H, Hayashi N, Kondo K, Nakaigawa N, Makiyama K: Roughness of the renal tumor surface could predict the surgical difficulty of robot-assisted partial nephrectomy. *Asian J Endosc Surg*, **15**: 591 – 598, 2022.
 - 14) Makiyama K, Tatenuma T, Ohtake S, Suzuki A, Muraoka K, Yao: Clinical use of a patient-specific simulator for patients who were scheduled for robot-assisted laparoscopic partial nephrectomy. *Int J Urol*, **28**: 130 – 132, 2021.
 - 15) Makiyama K, Yamanaka H, Ueno D, Ohsaka K, Sano F, Nakaigawa N, Yao M, Kubota Y: Validation of a patient-specific simulator for laparoscopic renal surgery. *Int J Urol*, **22**: 572 – 576, 2015.
 - 16) Melnyk R, Chen Y, Holler T, Schuler N, Saba P, Quarrier S, Bloom J, Tabayoyong W, Frye T, Rashid H, Joseph J, Ghazi A: Utilizing head-mounted eye trackers to analyze patterns and decision-making strategies of 3D virtual modelling platform (IRIS™) during preoperative planning for renal cancer surgeries. *World J Urol*, **40**: 651 – 658, 2022.
 - 17) Yoshida S, Sugimoto M, Fukuda S, Taniguchi N, Saito K, Fujii Y: Mixed reality computed tomography-based surgical planning for partial nephrectomy using a head-mounted holographic computer. *Int J Urol*, **26**: 681 – 682, 2019.
 - 18) Shirk JD, Kwan L, Saigal C: The Use of 3-Dimensional, Virtual Reality Models for Surgical Planning of Robotic Partial Nephrectomy. *Urology*, **125**: 92 – 97, 2019.
 - 19) Isotani S, Shimoyama H, Yokota I, China T, Hisasue S, Ide H, Muto S, Yamaguchi R, Ukimura O, Horie S: Feasibility and accuracy of computational robot-assisted partial nephrectomy planning by virtual partial nephrectomy analysis. *Int J Urol*, **22**: 439 – 446, 2015.
 - 20) Ueno D, Makiyama K, Yamanaka H, Ijiri T, Yokota H, Kubota Y: Prediction of open urinary tract in laparoscopic partial nephrectomy by virtual resection plane visualization. *BMC Urol*, **14**: 47, 2014.
 - 21) Ogata M, Makiyama K, Yamada T, Nagasaka M, Yamanaka H, Kubota Y: Dynamic measuring of physical properties for developing a sophisticated preoperative surgical simulator: how much reaction force should a surgical simulator represent to the surgeon? *Stud Health Technol Inform*, **184**: 312 – 318, 2013.
 - 22) Yamanaka H, Makiyama K, Osaka K, Nagasaka M, Ogata M, Yamada T, Kubota Y: Measurement of the Physical Properties during Laparoscopic Surgery Performed on Pigs by Using Forceps with Pressure Sensors. *Adv Urol*, **2015**: 495308, 2015.
 - 23) Araki A, Makiyama K, Yamanaka H, Ueno D, Osaka K, Nagasaka M, Yamada T, Yao M: Comparison of the performance of experienced and novice surgeons: measurement of gripping force during laparoscopic surgery performed on pigs using forceps with pressure sensors. *Surg Endosc*, **31**: 1999 – 2005, 2017.
 - 24) Yoshida K, Kinoshita H, Kuroda Y, Oshiro O, Matsuda T: Analysis of laparoscopic dissection skill by instrument tip force measurement. *Surg Endosc*, **27**: 2193 – 2200, 2013.
 - 25) Sotelo RJ, Haese A, Machuca V, Medina L, Nuñez L, Santinelli F, Hernandez A, Kural AR, Mottrie A, Giedelman C, Mirandolino M, Palmer K, Abaza R, Ghavamian R, Shalhav A, Moinzadeh A, Patel V, Stifelman M, Tuerk I, Canes D: Safer Surgery by Learning from Complications: A Focus on Robotic Prostate Surgery. *Eur Urol*, **69**: 334 – 344, 2016.
 - 26) Makiyama K, Osaka K, Araki A, Ohtake S, Tatenuma T, Nagasaka M, Yamada T, Yao M: How to reduce the risk of organ injuries during surgical instrument insertion in laparoscopic surgery: Pushing/pressing force analysis using forceps with sensors. *Asian J Endosc Surg*, **14**: 504 – 510, 2021.
 - 27) Hofstad EF, Våpenstad C, Chmarra MK, Langø T, Kuhry E, Mårvik R: A study of psychomotor skills in minimally invasive surgery: what differentiates expert and nonexpert performance. *Surg Endosc*, **27**: 854 – 863, 2013.
 - 28) Hofstad EF, Våpenstad C, Bø LE, Langø T, Kuhry E, Mårvik R: Psychomotor skills assessment by motion

- analysis in minimally invasive surgery on an animal organ. *Minim Invasive Ther Allied Technol*, **26**: 240 – 248, 2017.
- 29) Ohtake S, Makiyama K, Yamashita D, Tatenuma T, Yao M: Objective assessment of laparoscopic targeting skills using a Short-Time Power of Difference (STPOD) method. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, **17**: 1029 – 1037, 2022.
- 30) Uemura M, Jannin P, Yamashita M, et al: Procedural surgical skill assessment in laparoscopic training environments. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, **11**: 543 – 552, 2016.
- 31) Pérez-Escamirosa F, Alarcón-Paredes A, Alonso-Silverio GA, et al: Objective classification of psychomotor laparoscopic skills of surgeons based on three different approaches. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, **15**: 27 – 40, 2020.
- 32) Oropesa I, Sánchez-González P, Chmarra MK, et al: EVA: laparoscopic instrument tracking based on endoscopic video analysis for psychomotor skills assessment. *Surg Endosc*, **27**: 1029 – 1039, 2013.

Abstract

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF PATIENT-SPECIFIC SIMULATOR AND QUANTIFICATION OF SURGERY

Kazuhide MAKIYAMA¹⁾, Tomoyuki TATENUMA¹⁾, Shinji OHTAKE¹⁾, Azumi FUJIOKA²⁾,
Hiroyuki YAMANAKA³⁾, Daiki UENO⁴⁾, Kimito OSAKA⁵⁾

¹⁾ *Department of Urology, Yokohama City University Graduate School of Medicine*

²⁾ *Department of Urology, Yokohama Medical Center*

³⁾ *Department of Urology, Ofuna Chuo Hospital*

⁴⁾ *Department of Internal Medicine, Shounan Memorial Hospital*

⁵⁾ *Department of Urology and Renal Transplantation, Yokohama City University Medical Center*

We have developed a patient-specific laparoscopic surgical simulator. By extracting 3D volume data from the preoperative CT of a patient scheduled for surgery and inputting it into the simulator, the patient's abdominal cavity is reproduced in the simulator, enabling rehearsal surgery before the real surgery. In the process of developing the simulator, efforts were made to quantify surgery.