

特集 ■ 医療から見た VR

手術支援システムの現状と期待



滝内秀和
TAKIUCHI HIDEKAZU

西宮市立中央病院



田ノ岡征雄
TANOOKA MASAO

兵庫医科大学



山本新吾
YAMAMOTO SHINGO

兵庫医科大学



橋爪 誠
HASHIZUME MAKOTO

九州大学

1. はじめに

近年、腹腔鏡手術を代表とする内視鏡手術が臨床の現場で普及しつつある。この背景には、体になるべく負担の少ない手術（低侵襲手術）を行い、傷の痛みを軽減する医学的な理由や、入院期間を短縮し早期に社会復帰することにより、社会資源を有効に利用しようという経済的な側面もある。

しかし、これまでお腹を大きく切開し行われてきた開腹手術と比較して、腹腔鏡手術には様々な制約があり、それが術者への大きな負担になると同時に、合併症や医療過誤の原因にもなっている。その理由の一つが、本来人間に備わっている感覚器官をできるだけ活用して行われるべき手術操作が、腹腔鏡手術では手の触覚を利用できずに、視覚情報だけに依存して行わなければならない点にある。しかもこの視覚情報も奥行き判らない2次元の視覚情報に基づいて行われる。例えば、開腹手術では拍動を指で触知することで動脈の位置を認識できたが、腹腔鏡手術ではそれができない。そこで、動脈の位置を視覚情報として術者に提示することができれば、手術の安全性が向上するものと期待され、バーチャルリアリティ技術を用いた手術支援に大きな期待が寄せられている。今回、泌尿器科医としての立場から、腹腔鏡下の腎臓摘出術を例に、手術支援システムの現状を説明し、今後への期待を考察する。

2. 腹腔鏡手術

通常の腹腔鏡手術は、炭酸ガスで膨らませたお腹の中に内視鏡を挿入し、その2次元画像をモニター上に映し出しながら、手術器具を操作することで行われる。

腹腔鏡手術が難しい要因としては、以下のような理由が挙げられる。

- ①腹腔内の器具先端の動きは、腹壁を支点としているために術者の手の動きと逆になること。
- ②内視鏡を対象物に近づけると拡大視するために、実際の対象物の大きさや長さが判り難いこと。
- ③重力の方向がモニター上からは判別できないこと。
- ④手術映像は2次元視で立体感がないこと。
- ⑤触覚が欠如していること。
- ⑥手術器具の動きに制限があること。

例えば調理の際に、手首を固定された状態で、決められた穴から腕を通して、しかも片目を閉じて料理する状況を想像すれば、腹腔鏡手術がどれ程難しい手術であるかは容易に理解できる。従って、人に本来備わっている感覚器官の一部しか使えず、しかも、制限された動きでもって行わなければならない腹腔鏡手術では、必然的に高度の技術が要求される。

3. バーチャルリアリティによる手術支援

バーチャルリアリティを用いた腹腔鏡手術支援の方法には、様々なものがあり、以下に詳述する。

3.1 術前手術計画

手術対象となる臓器や分野により、術前にどんな情報が必要なのかは個々に異なる。ここでは、1分間に500mlもの血液が流れている腎臓の摘出術を例に、術前計画につき説明する。

腹腔鏡下腎摘術の成否は、その血流量の多さから、腎動脈や腎静脈を如何に安全に処理するかにより決まると

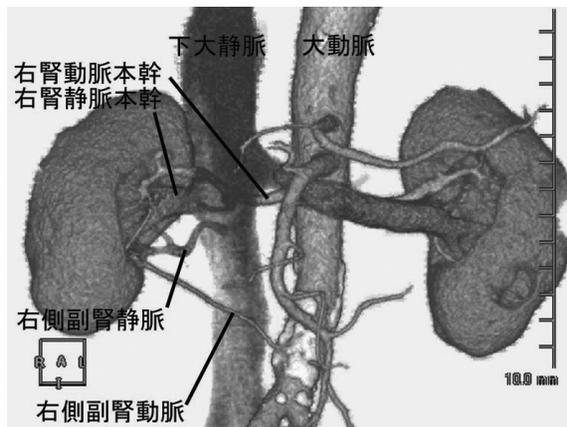


図 1 腎血管系

言っても過言ではない。そのためには、腎動脈および腎静脈の本数、腎静脈に流入する副腎静脈や性腺静脈の合流位置、腎動脈と腎静脈との相対位置関係などの 3 次元解剖の理解が欠かせない [1]。最近、マルチスライス CT の撮影能力向上と、それを処理するワークステーションの能力向上に伴い、詳細な血管解剖を術前に 3 次的に理解することができるようになった (図 1)。

腎摘術の際には、先ず動脈の血流を遮断してから離断し、静脈の血流を遮断後離断する必要がある。そこで、腎動脈のどの位置で処理を行い、腎静脈はどこで処理するのかを事前に検討しておくことで、安全な手術が可能となる。

一方、腎臓に到達する方法には、経腹膜到達法と後腹膜到達法の二つがある。経腹膜到達法は、体の背中側に位置している腎臓に、お臍の方向からアプローチする方法であり、腎臓は本来の位置に存在しているため、手術前の CT で撮影された血管の位置情報が有益である。一方、腎臓に対して背中の方からアプローチする後腹膜到達法では、腎臓の後ろにバルーンで作業腔を作成する必要がある。しかし、腎臓がお臍側に移動してしまうために、腎臓の血管の位置も変位してしまい、手術前に撮影された CT 情報の有用性が低下せざるを得ない。

そこで、我々は後腹膜到達法での腎臓の変位を、術前の仰向けで寝た体位で撮影した CT 情報からシミュレーションする方法を確立した [2] (図 2)。後腹膜到達法の際には、術前に予め準備しておいたシミュレーション画像上で、腎血管の処理を行う位置を決定しておくことも可能となった。

3.2 術中手術支援

手術中の医療画像情報による支援方法には、複数の方法がある。

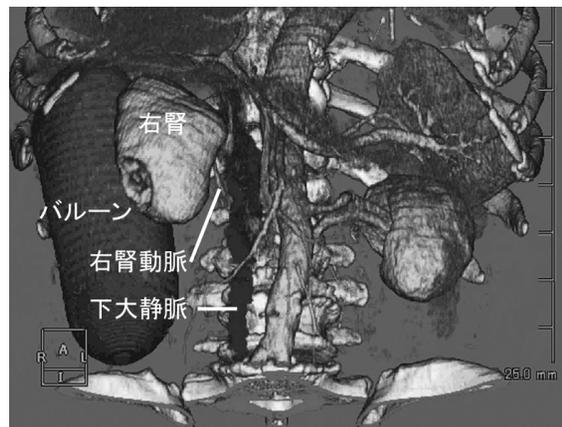


図 2 腎後面に挿入したバルーン拡張後の腎変位シミュレーション

最も簡単なものとしては、手術画像映写用モニターとは別のサブモニター上に、その都度必要な画像情報を提供するという方法である。当然のことながら、サブモニターに術者が必要とする医療情報を提供できる臨床工学士 (ナビゲータ) が必要となる。術者がサブモニターを見る際には、手術モニターから眼を逸らす必要があるため、できれば手術モニター上に必要な医療画像情報を提供できる Augmented Reality (AR) を用いた手法が理想的である (図 3)。

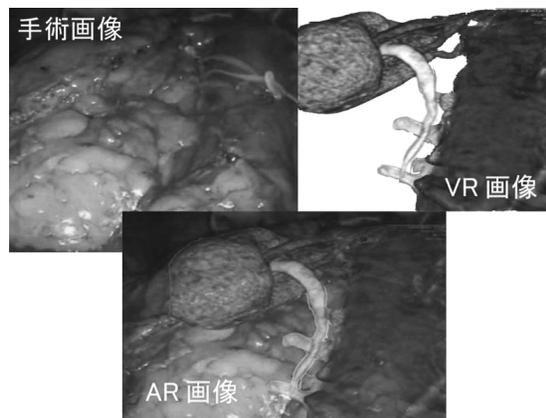


図 3 AR ナビゲーション画像表示

手術画像上に、CT 情報から再構成した 3 次元画像を重畳表示するためには、ナビゲータには工学的な知識ばかりでなく、医学的に高度な知識も要求される。ナビゲーション用 3 次元画像作製の段階では、術者がどの臓器の何をしたいのかを理解し、CT 情報からそれらの対象物を抽出する作業が不可欠である。しかも、手術室では腹腔鏡の内視鏡が対象物に対して、どれくらいの距離から、どの角度で見ているのかという要素も考慮してナビゲー

ション画像を作製する必要がある。残念ながら、この方法による術中手術支援は、どこ施設でも対応できる訳ではなく、人的なコストの問題もあり普及が進む状況下にはない。

そこで、ナビゲータを必要としない3次元位置計測器を用いたナビゲーションシステムを利用する方法がある。術前にCT情報から対象物を抽出する作業は必要となるが、3次元ナビゲーション画像情報の空間位置座標と、患者の空間位置座標を合わせるレジストレーション作業を行えば、内視鏡の位置に合わせたナビゲーション画像が自動的に作製され、手術画像上に重畳表示される。このシステムは、赤外線や可視光を用いて、内視鏡に固定されたマーカーの位置を計測することにより、内視鏡先端の位置から見たナビゲーション画像をリアルタイムに作製するものである。究極のナビゲーションシステムと言えるが、腹部臓器を対象とした場合には、術前CT検査の際の体位と手術時体位とに誤差が生じ、手術画像上にナビゲーション画像を正確に重畳表示できない可能性がある。そこで、解剖学的特異点(血管の分岐部など)や体内で比較的直線に近い下大静脈、性腺静脈のような構造物の2点を、手術中に位置計測しそれらの情報を基にレジストレーションを自動補正する手法も開発されている[3]。

最も正確にレジストレーションするためには、手術室内でのCTあるいはMRI検査が理想的であり、しかも手術操作により、逐次変化する臓器の状態を、ナビゲーション情報として反映させることができる。実際に、肝腫瘍に対するラジオ波治療の際に、体表に貼付したマーカーの位置や穿刺用超音波プローブに装着したマーカー

の位置を、赤外線を用いた3次元位置検出器で検出し、超音波画像情報をMRI画像上に重畳表示し、しかもopen MRI検査を行いながらリアルタイムで腫瘍の位置や治療された範囲を重畳表示することにより、確実に腫瘍を治療することを可能とした高度なシステムを用いた手術も行われている[4](図4)。

3.3 将来期待される手術支援

現在行われている手術支援としては、術前に撮影された画像情報に基づくものが殆どであるが、手術中にCTやMRIなどの撮影を行い、臓器抽出を短時間で行うことができれば、手術進行を妨げずに正確なレジストレーションが可能となる。このためには、CT情報から目的とする臓器や対象物の自動抽出技術の開発が必要となる。現時点では、完全自動抽出は技術的にも難しく、どうしても一部は人手で処理を行う必要がある。従って、実際にこれらの作業を手術開始から行うことは、手術室で取得可能なデータ情報量が限られている点や得られたデータ処理時間の点から、現段階では実施困難な状況下にある。従って、どうしても術前に撮影されたデータを基に準備された精細なナビゲーション画像が必要となる。これを如何に手術操作により生じた変形や変位に応じて修正することができるかが今後鍵の技術となる。手術操作による臓器の変形や変位の計測には、手術処理後に逐次MRIやCTの撮影を行う方法が理想的ではあるが、撮影に時間を要することや被爆の点から、より侵襲が少なく短時間で施行可能な計測方法が望まれる。具体的には、超音波プローブに3次元位置センサーで検知可能なマーカーを装着することで、超音波画像の断面に映し出された臓器の3次元位置を計測する方法や、体内へ挿入可能な3次元位置センサー用マーカーを装着した棒状の器具(ポインター)で、ポインターの先端位置情報を取得する方法などがある。それにより得られた3次元位置情報を基に臓器の変形や変位をリアルタイムにナビゲーション画像に反映する技術の開発が期待される。

近年、鏡視下手術では内視鏡画像のハイビジョン化が進行しつつあり、ハイビジョン画像に対応した精細なナビゲーション画像の作製技術も今後必要になると考えられる。さらに、内視鏡画像も2次元画像から3次元画像への進化も遂げつつあり、ハイビジョン立体内視鏡画像下での3次元ナビゲーションが行われることも近い将来可能となるものと思われる。

近年、より侵襲の少ない単孔式腹腔鏡下手術(Laparo-

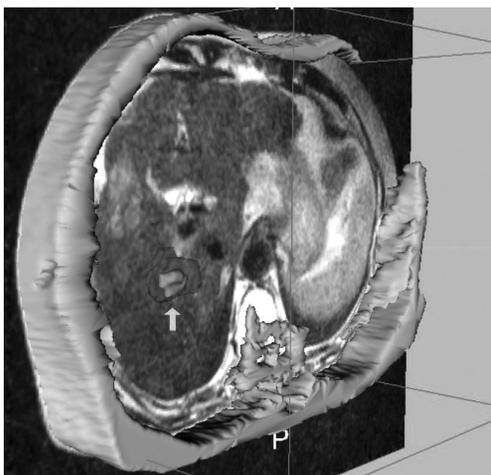


図4 腫瘍焼灼術終了直後のMRI画像
腫瘍(緑)、赤(焼灼領域) *口絵にカラー版掲載

Endoscopic Single Site surgery:LESS) や胃壁や膈壁などから腹腔内に到達して行われる NOTES(Natural Orifice Transluminal Endoscopic Surgery) などの手技が導入されつつあり、この分野においてもナビゲーションは必要不可欠の技術になるものと予想される。

また、蛍光物質を腫瘍や腫瘍近傍に注射しておき、腹腔鏡下に sentinel リンパ節を検出し、これを確実に切除することができるようになれば、生存率の向上に寄与するものと考えられ、この際にもナビゲーション技術の果たす役割は重要なものになると考えられる。

さらに、かつて開腹手術では普通に利用していた触覚を、VR 技術を応用することで、手術画像上に臓器の固さや表面の性状を提示することができれば、鏡視下手術はいっそう進化を遂げるものと期待される。

以上述べた VR 技術を駆使した手術を行うために、手術室もそれに対応したインテリジェント手術室へと進化し、臓器の3次元位置情報に基づいた正確で安全な手術が行われるようになることは間違いない。

参考文献

- [1] 滝内秀和, 中尾 篤, 丸山琢雄, 近藤宣幸, 野島道生, 森 義則, 島 博基, 田ノ岡征雄, 平山伸一, 中尾宣夫: 腎腫瘍に対する鏡視下腎摘術プランニングにおける3DCT画像の有用性に関する検討, 日本 Endourology・ESWL 学会誌, Vol.18, pp.111-115 (2005)
- [2] Takiuchi, H., Mori, Y., Shima, H., Tanooka, M., Hirayama, S. and Nakao, N.: KIDNEY DISPLACEMENT SIMULATOR FOR RETRO-PERITONEAL LAPAROSCOPIC NEPHRECTOMY, J Urol., Vol.174, pp.2111-2114 (2005)
- [3] 黒田嘉宏, 金守恒志, 滝内秀和, 田ノ岡征雄, 井村誠孝, 黒田知宏, 大城 理: AR 手術のための直線対応体内レジストレーション, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.14, No.4, pp.435-444 (2009)
- [4] Maeda T, Hong J, Konishi K., Nakatsuji, T., Yasunaga, T., Yamashita, Y., Taketomi, A., Kotoh, K., Enjoji, M., Nakashima, H., Tanoue, K., Maehara, Y. and Hashizume, M.: Tumor ablation therapy of liver cancers with an open magnetic resonance imaging-based navigation system, Surg Endosc., vol.23, pp.1048-1053 (2009)

【略歴】

滝内秀和 (TAKIUCHI Hidekazu)

西宮市立中央病院 泌尿器科 部長

1982年岐阜大学医学部卒業, 1999年兵庫医科大学泌尿

器科学教室講師. 2004年より現職. 専門は腹腔鏡手術, 尿路悪性腫瘍, 手術ナビゲーション. 著書『免疫研究法ハンドブック』.

田ノ岡征雄 (TANOOKA Masao)

兵庫医科大学 中央放射線部 技師

1986年大阪物療専門学校第一放射線科卒, 1986年診療放射線技師資格取得, 2009年兵庫医科大学大学院医科学生体応答制御系医学物理学博士課程. 1998年より現職. 放射線治療品質管理士, 放射線治療専門放射線技師, 医療情報技師, 医用画像情報管理士.

山本新吾 (YAMAMOTO Shingo)

兵庫医科大学 泌尿器科 教授

1987年京都大学医学部卒業, 1995年アラバマ大学客員研究員, 1996年京都大学博士課程修了, 2000年京都大学大学院泌尿器科助手, 2002年同講師, 2005年兵庫医科大学泌尿器科助教授, 2009年より教授. 専門は, 腹腔鏡手術, 尿路性器感染症, 腎移植.

橋爪 誠 (HASHIZUME Makoto)

九州大学大学院 医学研究院先端医療医学 教授

1979年九州大学医学部卒業, 1984年同大学院医学研究科修了(第一病理), 1998年同大医学部第二外科助教授などを経て, 1999年より同大学院医学研究院災害救急医学教授. 現在, 九州大学病院先端医工学診療部長および救命救急センター長なども兼任する. 専門は, 消化器外科学, コンピュータ外科学, 災害救急医学, 門脈圧亢進症. 2006年に, 文部科学大臣表彰科学技術賞(科学技術振興部門)を受賞, 2007年には, MR画像誘導下小型手術用ロボティックシステムで「今年のロボット」大賞2007審査委員特別賞を受賞した. 著書『ROBOTIC SURGERY』.