

コンピュータ外科とバーチャルリアリティ

土肥健純

東京大学大学院工学系研究科

抄録

コンピュータ外科は、コンピュータグラフィックによる三次元再構成医用画像や医用ロボットなどの様々なコンピュータ技術を駆使して低侵襲外科治療などの新しい外科分野を開拓するものである。この三次元医用画像は、医師にとって最も理解しやすい外科医の新しい目である。また医用ロボットは、外科医の新しい手となるものであるが、医師がはさみやメスをもって手術する動作を真似るものではない。この外科医の新しい目と手は、医師に手術用バーチャルリアリティという新しい治療環境を提供するため、コンピュータ外科にとって極めて重要な技術である。近年、これらの技術は、脳外科、肝臓がん治療、腹腔鏡下手術などに積極的に応用され、よい成績を治めている。

Virtual Reality for Computer Aided Surgery

Takeyoshi DOHI

Graduate School and Faculty of Engineering, The University of Tokyo

ABSTRACT

Computer aided surgery (CAS) is a new surgical field to realize minimally invasive surgical therapy, using various computer technologies which are computer graphics, three dimensional medical images, surgical robots and so on. Three dimensional medical image is the most recognizable information for medical doctors and advanced vision for surgeons. A surgical robot is a new advanced hand for surgeons, but it is not a machine to do the same action of a surgeon using scissors or a scalpel. This advanced vision and hands for surgeons offer circumstance of virtual reality for surgical operation. Therefore virtual reality is very important technology for computer aided surgery. Recently, this technology is applied actively to operation in neuro-surgery, liver cancer treatment, laparoscopic surgery, and so on. In these fields, good results are brought by this technology.

1. はじめに

近年のコンピュータグラフィックス技術の進歩や、立体視するためのヘッドマウンテンディスプレイの出現などによりバーチャルリアリティ (Virtual Reality: 以下VRと略す) という言葉が急速に注目を浴びようになってきた。そして、VRに関してあらためてその言葉の持つ意味や対象となりうる事柄を見直してみると、かなり広範囲な領域を占めている。そのため、VRを広義に捉えると、従来VRとして意識せずに行ってきた研究でも、その範疇に入るものがある。特に、三次元画像技術や合成画像技術を用いる研究の中には、VRという言葉を一

ードとして用いると極めて説明し易いものが多いのも事実である。

一方、臨床医学における医用画像は、レントゲンによるX線の発明以来、現代医学の発展に大きく貢献してきた。特に、医学において人体を傷つけることなく体内を観察できることの意義は大きい。そして、医用画像に対する観察方法も種々試みられてきており、その関連研究の中にはVRの概念に近いものが多い。特に、最先端医用画像機器であるX線CTやMRI等の断層像から、人間にとって最も理解し易い三次元画像に再構成した像やその立体表示は、そのみでもVRの一角をなすものと言える。すなわち、医療の分野ではVRの言葉が出現する以前からVRの概念を有する研究が行われていたということであり、かつ、最近のVRの概念の普及と技術の進歩により、その分野の研究が更に加速されていると言える。

2. 外科医の新しい目としてのVR

近年急速に進歩した先端医用画像装置からは、質の良い画像情報が得られるようになった。その結果、生体内の各組織の位置関係を、コンピュータグラフィックス技術により医師にとって理解し易い三次元画像に再構成して提供できるようになった。また、この三次元再構成画像は、拡大、回転、透視、切断といった操作がコンピュータ上で容易に行えるため、外科系の分野では、診断のみならず手術シミュレーションや手術計画にも用いられ始めている。さらに、その情報の正確さと信頼性から、手術支援ロボットなどの手術支援機器の制御用情報源としても十分利用可能である。すなわち、様々な医用画像と画像処理技術は外科医に新しい目を提供し、手術支援ロボットなどの手術支援機器は外科医に新しい手を提供するものと言える（図1）。特に、外科医にとって新しい目となる医用画像は、従来術者が直接肉眼で観察できなかった所を見えるようにしたり、患者に大きな肉体的負担をかけずに患部や術野を拡大立体表示することができたり、さらに、術前に作成した三次元再構成画像と術中画像との統合により実質臓器の内部を透視しながら処置が行えるなど、まさに手術用VRというべきものである。これは、VR技術が、外科手術の分野にその活躍の場を見つけたことを意味する。すなわち、VR技術の外科治療面への積極的な応用は、低侵襲外科治療や遠隔手術といった新しい外科分野を開拓し、かつ飛躍的に発展させ可能性を有している。また、低侵襲手術によりもたらされる、患者の肉体的および時間的負担の軽減は、患者の早期社会復帰と医療費の削減にも大いに貢献し、ひいては、わが国の経済的活性の維持・向上にも寄与するものと期待される。

3. コンピュータ外科¹⁾

VR技術、手術支援ロボット技術、医用画像技術、三次元画像処理技術などは、コンピュータ技術によって支えられている。このように、コン

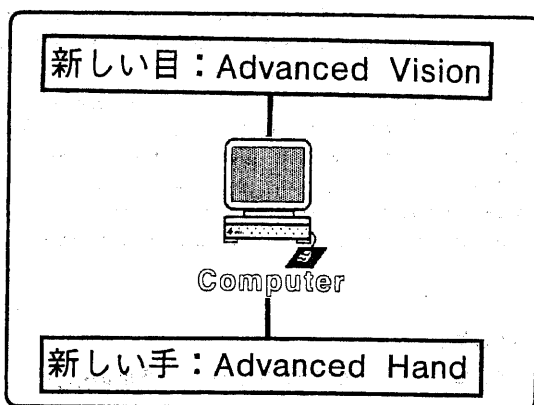


図1. 外科医の新しい目と手

コンピュータ技術を基礎にした様々な技術を手術支援に用いる分野は、コンピュータ外科（Computer Aided Surgery、通称CAS）と呼ばれている。

コンピュータ外科において、低侵襲治療を実現するための最も重要な課題に、術中支援がある。術中支援に欠かせない基幹技術として、医用画像技術、メカトロニクス技術、およびそれらに関するソフトウェアの開発がある。医用画像技術は、X線CT、MRI、超音波画像装置などの画像取得技術、三次元医用画像処理技術、コンピュータグラフィックス技術である。特に、術中の画像情報の取得ならびに術中の術者への画像提示は、術中支援VRとして、これからの大きな課題である。また、メカトロニクス技術は、手術支援用ロボットの基礎技術で、コンピュータ外科の臨床的発展を左右する代表的な技術である。

3. 1. 術中三次元画像技術

実際の手術において、低侵襲で安全確実に病変部位に到達する事は、手術成績に直接影響を与える。しかし、切開部が小さいほど患者への侵襲は少なくなるが、その反面、患部へのアプローチは困難となり危険性は増す。すなわち、たとえ術前のシミュレーションで十分に確認しても、低侵襲手術になればなるほど実際に術者の考え通りに患部にアプローチしているか甚だ不安な場合が多い。特に、病変部位周辺ならびに進入経路周辺に重要な血管や組織などが存在する場合には、病変部位へのアプローチには慎重でなければならず、術中の臓器の経時的変形を含めて、病変部位や進入経路、重要組織などの三次元的位置関係を正確に把握しなければならない。そのためには、術中画像に関するVR技術として、少なくとも下記の機能が必要となる。

- 1) 術前のシミュレーション結果が術中に容易に確認できること
- 2) 新たなシミュレーションが術中に容易に行えること
- 3) 術中の三次元画像が容易にリアルタイムで得られること
- 4) 組織機能の三次元的情報がリアルタイムで得られること
- 5) 形状と機能の三次元情報の統合画像がリアルタイムで得られること
- 6) 手術支援機器などを用いる場合、計測や制御に関する必要な情報を提示できること
- 7) 術者に理解しやすい形で提示できること

また、画像の立体表示は、体内の様々なサイズの術野を奥行感を十分に持たせて術者に分かりやすく表示するものである。この技術はコンピュータ外科のシステムには不可欠な技術で、内視鏡下手術や腹腔鏡下手術に応用され始めている²⁾。なお、現在の表示は単に術野画像のみを表示しているが、シミュレーション画像と術野との重ね合わせ表示や医療情報の表示など、実際には手術に必要な様々な情報を同時に表示する必要がある。

3. 2. 手術支援ロボット³⁾

手術支援ロボットは、医師の手となるもので、機器治療に適した機構を有し、医師の目となる術中支援画像と組合わさって、低侵襲手術を実現するものである。このような直接治療にかかわるロボットは、下記の4点において工業用ロボットと大きく異なるため、この分野への工業用ロボットの安易な応用は極めて危険である。

- 1) 直接患者に接触する
- 2) 作業内容が一律でなく常に変化する
- 3) 動作の試行錯誤ができない

4) ロボットの専門家でない人が使用する

特に、工業用ロボットの安全性が、人とロボットの作業領域を分けることで実現されているのとは大きく異なる。さらに、誤動作等に対する安全対策は、ロボットのハードとソフトの両面から行う必要がある。なお、欧米では冒険的な臨床報告があるが、わが国では安全面から避けるレベルのものである。

4. 低侵襲外科治療の意義

手術支援ロボットなどの支援機器をVR技術と組み合わせて使用することにより、開頭や開腹などの大がかりな手術を必要とした外科的疾患に対して、低侵襲あるいは手術無しで、従来と同等以上の治療を実現することが可能となる。したがって、コンピュータ外科の発展により実現する低侵襲外科治療や様々な術前シミュレーション技術には、下記の効果が期待されている。

- 1) 手術という患者にとって大きな肉体的負担の軽減。
- 2) 入院期間短縮による、患者の早期社会復帰。
(高齢者の寝たきりの回避、術後のリハビリ期間の短縮あるいは不要、医療費削減など)
- 3) 従来の手術よりも安全で正確な処置。
- 4) 従来治療が不可能あるいは困難であった患者の治療。
- 5) 無輸血手術の対象拡大により、患者の輸血感染事故の減少。
- 6) 医療スタッフの肉体的、精神的、および時間的負担の軽減。
- 7) 医療スタッフに対する肝炎やエイズなどの感染事故防止。
- 8) 患者への適切なインフォームドコンセント。
- 9) 医学教育や専門医教育の充実。

5. 臨床研究の代表例

5. 1. 脳神経外科領域

現在、脳神経外科分野におけるVR技術応用によるコンピュータ外科の研究は、主にX線CT誘導定位脳手術が対象となっている。これは、患者の頭部をフレームにより固定し、X線CTやMRIの断層画像により求めた病変部位にカテーテル（治療用針）を正確に穿刺して治療する方法である。カテーテルの穿刺シミュレーションは、脳の三次元再構成画像の作成、病変部位、血管、機能領域の三次元的位置関係の表示、およびその画像を用いて機能領域や血管を避けて病変部位にアプローチする最適穿刺方向と穿刺位置を頭部の三次元情報から計算して行うものである。この際に得られる最適アプローチのデータは、手術支援ロボットとしての穿刺マニピュレータの制御用データとして欠かせない。なお、この再構成三次元画像とシミュレーション結果は、ノート型ワークステーションに移植して、手術室においても同様に操作や表示することも可能で、すでに臨床使用されている。また、脳は軟組織であるため、開頭にともない脳髄液の流出や自重により術中に変形を起こすことが確認されている。このような問題に対して、術中に時間とともに変化する脳の内部形状を有限要素法により解析している研究もある⁴⁾。今後、低侵襲で微細な手術が行われるようになると、この種の解析は手術の成績向上に欠かせない。その他、身近なシミュレーション用のツールとして、Macintosh にX線CT画像を入力して、最適穿刺パスのシミュレーションを行うソフトウェア（通称 Hyper CAS）が既に臨床使用されている⁵⁾。

術中支援の三次元画像の代表的研究として、患部および患部周辺の三次元画像を特殊な乾板に

記録し、裸眼で立体視できる技術 (Volume Graph) が日本ビクター(株)で開発された。この技術を用いて術前に記録した脳腫瘍を三次元的に患者頭部に重ね合わせて行う手術が、東京女子医科大学で世界に先駆けて行われ、良好な成績を挙げている⁶⁾ (図3)。

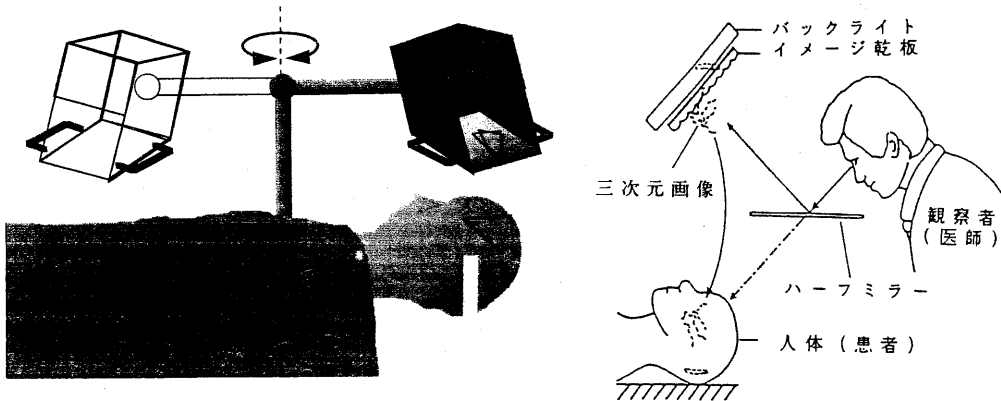


図2. Volume Graph による術前三次元画像と患者頭部の重ね合わせ

また、一般的に術中画像取得には術中超音波断層撮影装置が用いられるが、従来の装置では、プローブを含む平面内の断層像しか得られない。これに対して、従来の画像軸に垂直な断面の画像を、20秒前後の短時間で得られる超音波CTも開発され、臨床的に使用されている⁷⁾。この超音波CTは、術者が画像で確認しながら病変部位へのアプローチや、病変組織の除去を行うことができるため、術中支援ツールとして大いに威力を発揮している。この超音波CTは、MRIのように大がかりな装置でなく、かつ高価でないため、非常に使いやすいものと言える。これに対して、オープン型のMRIの中に患者を寝かせて、そのMRI画像を見ながら行う手術が米国で行われており、良い臨床成績を修めている⁸⁾。

術野の実画像取得に関して、術野の奥行感を術者に分かりやすく立体的に表示することも臨床的に使用され始めている。最近、世界で最小径(外径 4.9mm)の三次元視硬性内視鏡がわが国で開発された⁹⁾。これは、光学管1本からくる術野画像をハーフミラー方式のプリズムにより二分する際に両画像の光軸に視差角が生じるように工夫がしてある。この立体内視鏡は、腹部外科などにおいても臨床使用されている。さらに、ステレオ画像表示に関しても、この種の立体内視鏡から得られたステレオ画像を、立体顕微鏡ではなく、裸眼立体視可能な液晶ディスプレイに表示して行う臨床手術もすでに我が国で行われており、良好な成績を治めている¹⁰⁾。

穿刺マニピュレータに関しては、患部と穿刺マニピュレータ原点の三次元位置をX線CTにより正確に計測し、その情報に基づいて穿刺マニピュレータを制御するものである。欧米では、小型工業用ロボットを臨床的に用いた報告があるが、極めて危険な冒険である。わが国では、マニピュレータの暴走に対する安全対策を機構的に施し、かつ本格的にX線CTの誘導下で穿刺マニピュレータを制御できるものが開発されている(図3、4)¹¹⁾。このマニピュレータは、6個のモータで駆動するようになっているが、穿刺針をセットしない限りどのモータが暴走しても患者や

医療スタッフに危害を加えない安全設計になっている。

図3. X線CT誘導定位脳手術
穿刺マニピュレータ

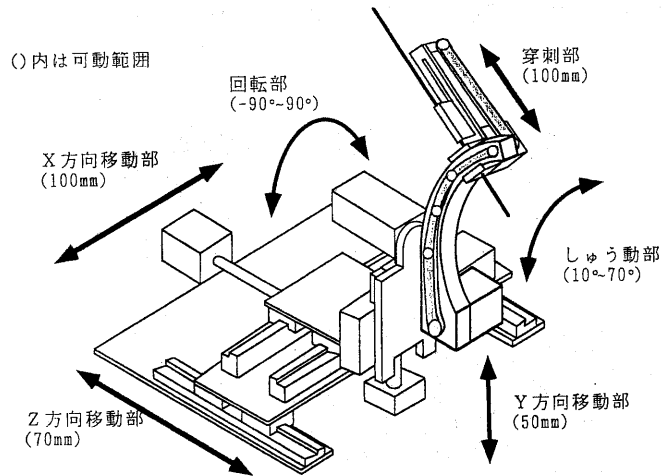
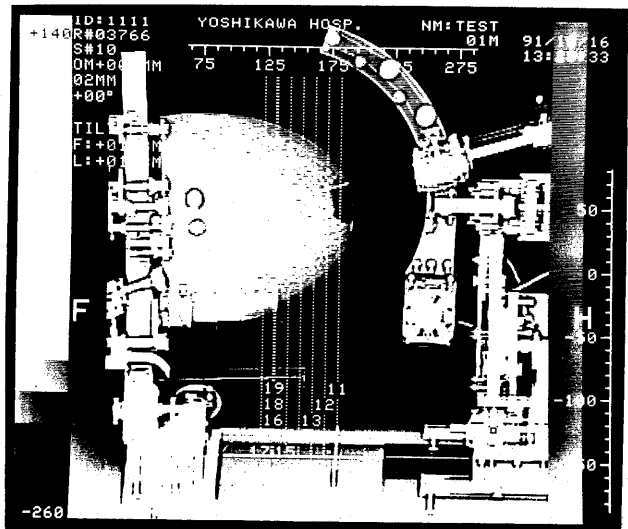


図4. 冬瓜を用いたX線CT誘導下
の穿刺シミュレーション実験
(X線CTによる映像)



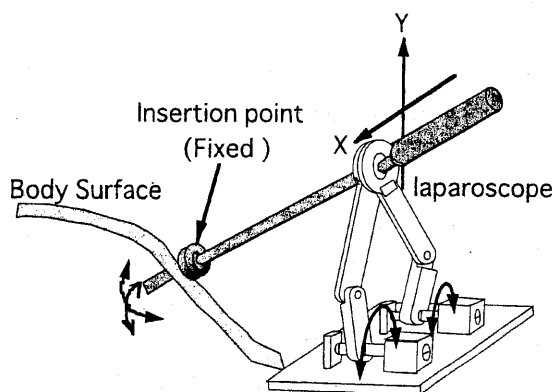
5. 2. 肝臓癌レーザー照射治療¹²⁾

肝臓癌の治療方法の1つに、光ファイバカテーテルによるレーザー穿刺照射治療がある。これは、レーザー導光用光ファイバをカテーテルに通し、開腹下または開腹せずに、体表から腫瘍部に穿刺してレーザーを照射する治療法で、非腫瘍組織に対する侵襲が少ないという特徴を有する。穿刺シミュレーションにより、肝臓内で複雑に走行する血管を避けて、カテーテルを病変部位まで到達させる穿刺の位置と方向を提示するシステムが開発され、臨床的に使用されている。この穿刺危険度マップを体表面に作成し、その結果に基づいて穿刺するロボットを用いれば、開腹せずに直接体表面から経皮的に処置することも可能で、従来アプローチが困難であった背中側からの治療も容易となる。

5. 3. 腹腔鏡下胆嚢摘出¹²⁾

最近、開腹せずに腹部に数カ所穴をあけて、その穴にCCDカメラ付の腹腔鏡、鉗子や電気メスなどを通す数本の金属管（トロッカ）を挿入して、テレビ画面で術野を見ながら外科的処置を行う腹腔鏡下手術が行われている。特に、本方式による胆嚢の摘出手術は、低侵襲治療として盛んに行われている。

図5. 5節リンク式腹腔鏡ナビゲータ



この手術では、通常術野の奥行き感は得られないが、最近では液晶シャッタを利用した立体視画像表示システムも試験的に用いられその有用性が確かめられている。この立体画像表示は、体内における様々なサイズの術野を術者に分かりやすく奥行き感を十分に持った立体画像を術者に提供する術中支援VR技術として、未来の低侵襲外科的治療にとって欠かせない技術である。また、三次元再構成画像を用いた術前のシミュレーションでは、肝臓と胆嚢の接触、処置部近傍の血管走行、総胆管と胆嚢胆管の走行などの関係を様々な角度から確認し、手術の安全を高めている。メカトロニクス技術面では、CCDカメラや各種の道具をマニプレータ化し、安全でより細かい処置を行うシステムの研究も行われている（図5）¹⁰⁾。

なお、手術に際して術野を確保するために、一般的には腹部に炭酸ガスを入れてお腹の中を膨らませる気腹法が用いられているが、最近我が国で腹部を皮下に通したワイヤで吊り上げる方式が開発された。この吊り上げ方式による術野の確保は、気腹法に比較して極めて安全かつ安価に処置が行えるのみならず、VR技術を活かす基本的方法としても優れている。

6. 未来のVR技術とコンピュータ外科

コンピュータ外科は、従来の外科医自身の目と手による手術の限界を打破するために、外科医に最先端技術を駆使した新しい目と手を提供するものである。そして、コンピュータ外科における外科医の新しい目と手は、術者をあたかも患者の体内入り込んで治療するVRマイクロサージェリを実現発展させ、未来の「手術なき外科」の道を切り開くものとなる。「ミクロの決死圏」という昔の米国映画では、患者を体内から治療するために、特殊な水中船に乗り込んだ医師団を船もろともミクロサイズに縮小して血管の中に送り込んでいる。このようなことは100年経って実現不可能であるが、VR技術とマイクロメカトロニクス技術を融合することにより同様な治療を実現することは可能である。また、先天性疾患に対する治療として、胎児に対する早期外科治

療をも可能とする。さらに、手術支援ロボットをはじめとするコンピュータ外科技術を、画像データ送信や画像の立体表示などのVR技術とも融合すれば、過疎地、離島をはじめ、21世紀には遠い宇宙や海底などにいる患者に対する遠隔手術が実現するであろう。

参考文献

- 1) Dohi T. et al : Computer Aided Surgery System (CAS), International Symposium on Visualization in Biomedical Computing, IEEE, 458, 1990
- 2) 橋本大定 : 内視鏡下手術における三次元視、第2回コンピュータ外科研究会論文集、17-18. 1993
- 3) Dohi T. et al : Computer Aided Surgery, BIOJAPAN'96, 75-80. 1996
- 4) 片岡弘之 ほか : 術中脳変形解析に基づいた術前画像からの疑似術中画像の作成、第6回コンピュータ外科学会論文集. 87. 1996
- 5) 鎮西清行 ほか : 手術支援ツール "Hyper CAS" による手術シミュレーション、映像情報(M)、94-OCT. 1190-1193. 1994
- 6) 山根文孝 ほか : Augmented reality を応用した三次元画像投影による術中ナビゲーションの試み、第4回コンピュータ外科学会論文集、99. 1995
- 7) 波多伸彦 ほか : 超音波CT、映像情報(M)、94-OCT. 1194-1198. 1994
- 8) Jolesz F.A. et al : MRI-Guided Surgery. Third international Congress on New Technology and Advanced Techniques in Surgery. Abstract XV. June. 1995
- 9) 辻孝之 ほか : 手術用三次元視モニタリングシステムの開発、第4回コンピュータ外科学会論文集、7. 1995
- 10) 立体内視鏡システムを併設した手術用立体三次元ビデオ顕微鏡、第6回コンピュータ外科学会論文集、23-24. 1996
- 11) 山内康司 ほか : CT誘導定位脳手術用穿刺マニプレータシステムの開発、第30回日本定位脳手術研究会、96. 1991
- 12) Hashimoto D. : Ultrasonographically guided lasers and spheric lasers, Lasers Gastro-enterology, Internation Experiences and Trends, Thieme Med Publ, 134, NY 1989
- 13) 橋本大定 : 腹壁吊り上げ法による腹腔鏡下胆嚢摘出術、南山堂、1994
- 14) 小林英津子、ほか : 腹腔鏡下手術支援用内視鏡マニプレータシステム、第36回日本エム・イー学会大会論文集、242. 1997