人工現実感手術室

3 高次元医用画像とバーチャルリアリティを用いた新しい治療法の開発

東京慈恵会医科大学総合医科学研究センター
高次元医用画像工学研究所
鈴木 直樹　nsuzuki@jikei.ac.jp

Over the past several years, research on medical virtual reality expanded rapidly allowing for routine clinical procedures to be performed. However, virtual reality research into clinical application has lagged behind. Major applications of medical virtual reality are feasible through the interactive real time imaging from the system. There are two major applications of medical virtual reality techniques in the clinical medicine: surgical simulation and data fusion. However both of those applications need particular functions in order for the user to handle elastic organs such as digestive system. This report will outline a virtual surgery system capable of surgical planning on organs of the abdominal region. In addition the system's ability of handle surgical procedures while experiencing tactile sensations will also be explained. The capability of the "data fusion system" which observes the inner structures of operating organs using surgical robot will also be detailed.

生体の3次元，4次元情報の活用

約30年前X線CT装置が実用化された当初から，CTデータを用いた生体構造の3次元画像表示は考えられていたが，これを現実化するためには画像処理を行うことのできるコンピュータの発達を待つ必要があった．医用3次元画像の構築に関する研究例は1980年代から多く見ることができる．そして当時の3次元像表示は，まず整形外科領域の応用をはじめとして徐々に進められた．しかし初期の3次元像は，画像の生成に多くの時間を必要とした．観察者の見たい方向に生体構造を回転させる，その場で不必要な部分を取り除いて内部を見るというような，リアルタイムな画像を生成できるようになったのは，ここ数年といっても過言ではない．そして，このようなリアルタイムイメージングができて初めて本来の高次元情報の活用が可能となるのであり，さらに多くの応用面の可能性を見いだすことができるといえる．特に生体は心血管系の挙動に代表されるように，複雑な3次元的構造を持つ物体が時間的な変化を伴っている4次元的な現象を呈している．これらを可視化するためには，高速に3次元画像，4次元画像を生成するための技術が必要である．1990年代後半に入り，専用のハードウェアによる高速画像処理が可能となり，スーパーコンピュータを使わなくてもインタラクティブに画像を操作できるようになった．そしてこの時期に歩調を合わせるかのように出現したバーチャルリアリティ（VR）技術により，あたかも実際の患者の身体が目の前にあるかのように4次元画像を活用した手術シミュレーションや，体内構造を見ながら手術をする作業などが可能となってきた[1)～6)]．

生体の可視化

軟組織の可視化

MRI，CTデータを用いて，まず定量的に生体の3次元構造を可視化する手法について触れる．生体の3次元構造を可視化し，自由に観察，操作するためには，その前に，データの識別（segmentation）という処理を行う必要がある．つまり画像データを，ここは肝，ここは血管というように解剖学的な区域分けをしなければならない．これを行わないと計量診断，手術シミュレーション，ナビゲーションを行うことはできない．しかしながら通常の画像処理方法で注目部位を自動的にsegmentation可能なのはX線CTで撮られた画像からの骨格部位の抽出のみである．これはCTにおいて硬組織である骨格部位は周囲の軟組織に比して著しくX線吸収率が異なるためである．Fig.1の人体の3次元アトラス製作例では，MRIより各主要臓器をsegmentationした後に再構築した男女の全身の3次元表示例を示している．この図では体表面を半透明とし主要臓器の位置と形状

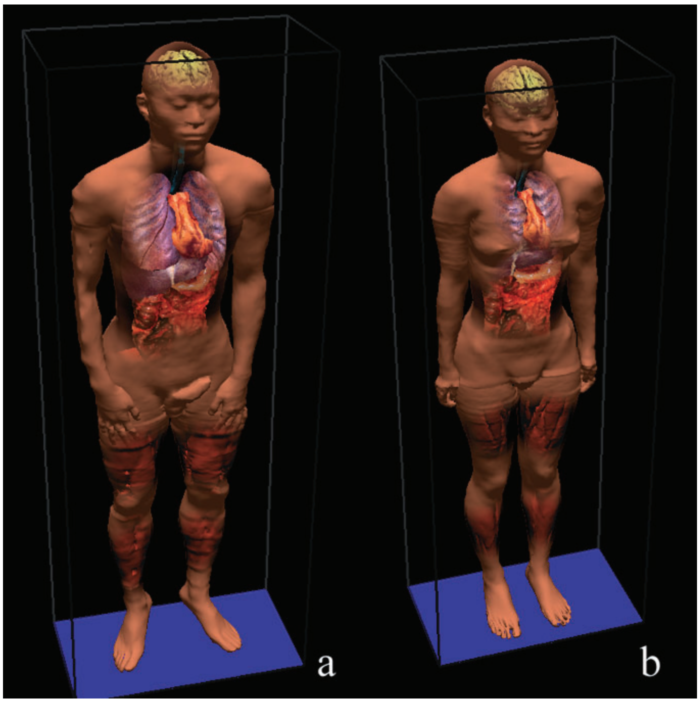

Fig. 1 Whole body models of a male and a female reconstructed from MRI dataset using surface rendering method.

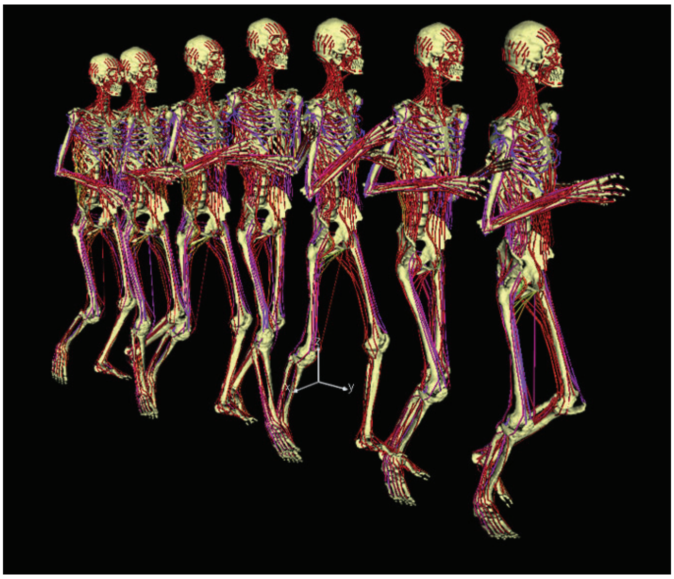

Fig.2 4D skeletal muscular model driven by running motion data.

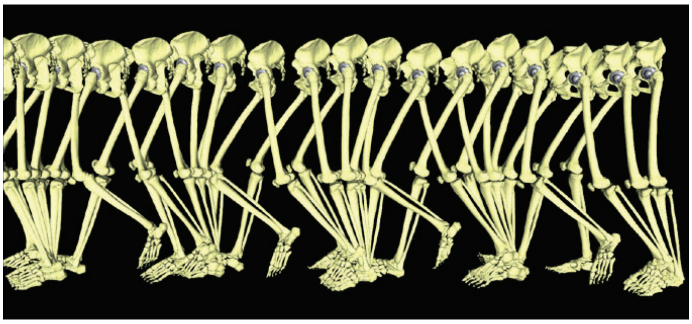

Fig.3 Time sequential images of the patient's skeletal structures with artificial hip joint during walking.

を示している．将来的にはこのようなsegmentationされた画像が臨床でも用いられるであろう．

4次元情報の可視化

医用画像情報の高次元化（3次元化，4次元化）により，観察者が生体の構造と機能の相互的関係を直感として把握できるようになってきた[6]．特に高速なグラフィックワークステーションを用いることにより，3次元画像表示された対象物を観察者の意志でリアルタイムに回転，拡大して観察したり，4次元画像により表示された人体動作を時空間的に自由な視点から解析する手法が生まれた．この医用4次元画像の新しい応用面の代表例の1つは，運動に伴う生体の挙動の可視化と定量化であるといえる．この例として全身動作における骨格と筋肉の連係動作を解析することを目的とした，4次元人体モデルについて紹介する．Fig.2は全身動作に伴う骨格各関節の動きに可視化ならびに骨格を駆動させている各筋肉の協調動作の解析のために作成された“digital dummy”モデルである．この人体モデルでは，被検者から計測したMRIデータセットをもとに，約200の骨格モデルと約600の伸縮する簡易筋肉モデルに統合して全身モデルを構成した．全身モデルは磁気式もしくは光学式計測法により被検者から得た四肢，体幹の動きのデータによりリアルタイムに動作を4次元画像上に再現し，骨格ならびに関連筋群の動作に伴う挙動を定量化し，解析することができる．現在，整形外科，リハビリテーション領域において手術計画，治療効果判定を目的とした臨床応用が進められている．たとえば整形外科領域においては，患者に設置した人工関節と骨格の状況を患者動作の motion capture データを用いてリアルタイムに観察できるようになってきた．Fig.3に歩行動作中の人工関節の状況を可視化し，治療効果判定を行うためのシステムの表示例を示す．

また，我々は全身動作を最大範囲とする人体動作の時空間的計測に焦点を置き，動作の定量的な時空間的解析を目的とする Dynamic Spacial Video Camera（人体動作時空間撮像装置，DSVC）を開発した．Fig.4に本システムの外観を示す．人体動作を360度方向から60台の同期されたカメラで撮影し，これらの映像を時空間的2次元マトリックス状に配置して利用することにより，記録された一連の動作に対して任意の視点を選択できる自由度を持って反復観察できるようにする機能を持たせた．またこれらの画像情報をもとに被検者の動作を定量的な外形形状の4次元モデルとして再構築することができるようにした．60台のディジタルビデオカメラは中央に被検者が自由に動作できる範囲を有する，直径4m（外径）の金属製のリングに6°ごとに同心円状に固定され，すべてのレンズが正確に中央に向くように調整されている．かつこのリングは移動式クレーン

Fig. 4 The appearance of the constructed Dynamic Spacial Video Camera (DSVC) system.

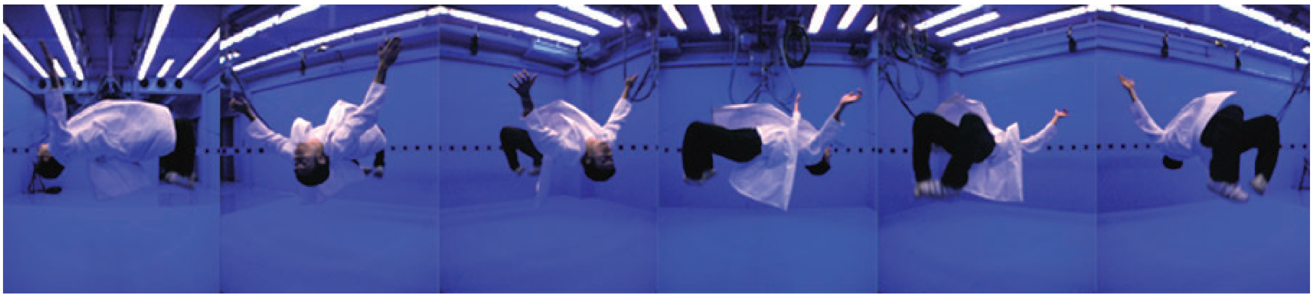

Fig. 5 An example of the free observation in view points during the subject is freezing. In those images, the time is stopped at the point when the position of the body is the highest against the floor, and the view point is moving clockwise to observe its condition from the different directions.

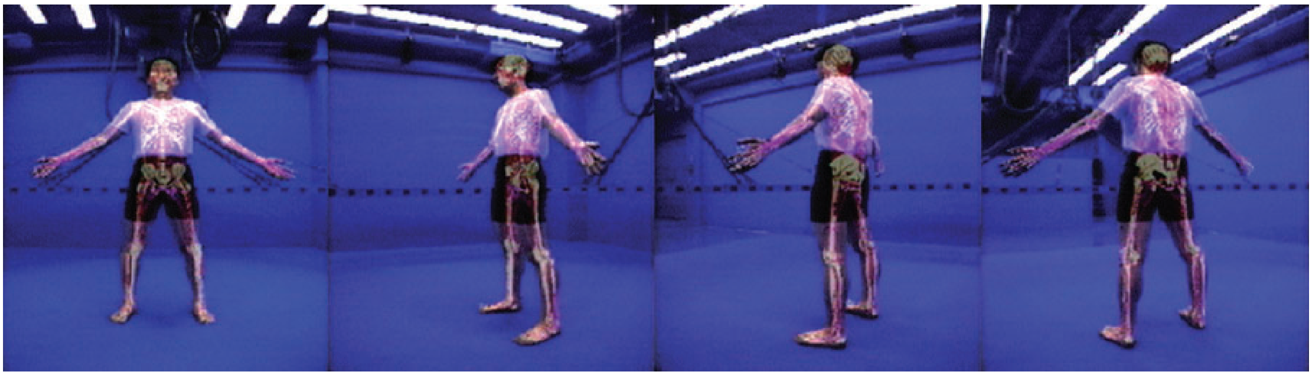

Fig. 6 Blended image of the DSVC images and 4D model of patient skeletal and muscular model.

により吊り下げられ，被検者の移動に追従してカメラを適正な位置に持っていくことも可能とした．また本装置を置く部屋，DSVC本体，移動式クレーンともに一定の彩色の青色に塗装し，クロマキー手法により被検者以外の映像を消去できるようにした．Fig.5は時間軸を止め，空中静止する被検者を，視点を時計回りの方向に回転して観察している様子を示す．さらにFig.6では被検者の画像と骨格筋4次元像を重畳表示させて，自由な視点から動作に対する内部構造の動的変化を表示した様子を示す．

術中支援data fusionシステム

当然ながら手術の際，実際に切開するまでは皮膚や臓器の中にある血管や神経組織を肉眼で見ることができない．しかしVR技術を応用することで，人間の能力を補助し，皮膚や臓器を透視して内部の様子を観察することが可能となる[1]．たとえば，手術室の患者の体内構造の3次元データをリアルタイムに取り出して3次元再構築して術者の視野の実像と重ねて表示させることで，術中に常に注意する必要のあった術野直下の血管

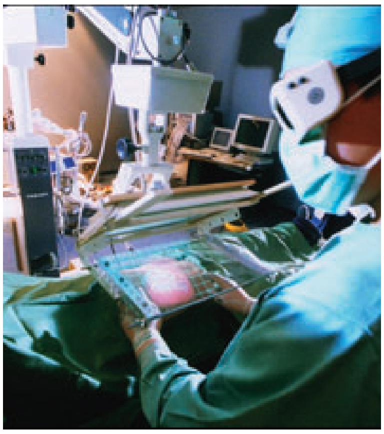

Fig. 7 The developed system named "Floating Window". With this system the surgeon is able to observe an organ's inner condition interactively without using head mounted display.

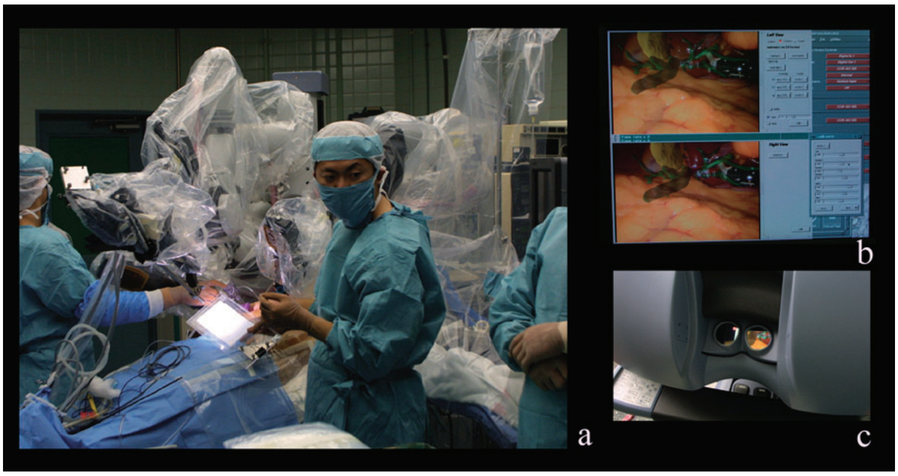

Fig. 8 Clinical application of data fusion system to the surgical robot "Da vinci". (a) Calibration of lapaloscopy camera of the "Da vinci". (b) Blended stereo images for both eyes. (c) Blended image through the finder of the surgeon's console of "Da vinci".

や神経束を，事前に画像で確認しながら避け，手術を行うことができるようになる．こういった実際に見えているものとコンピュータ上で構築した画像を同時に提示して内部を透視しているかのように見せる手法はdata fusion と呼ばれている．**Fig.7**に開発中のdata fusion システムの開発例を示す．図では手術台上の患者の上にある floating window と呼ぶ画像の空間提示装置によってあらかじめ再構築した患者の体内の3次元画像を表示し，患者の体を透視するかのように体内を観察できる様子を示している．また，現在臨床で用いられている手術用ロボットにおいて欠如している要素の1つがナビゲーション機能である．操作コンソールが手術中の患者から離れているため視野の方向感覚を失いやすく，どうしても視野の周囲の構造，術野の下の構造が可視化できることが望ましい．このような観点から，本研究所は九州大学外科橋爪教授らとともに data fusion 機能を持つ手術用ロボット（Da vinci, Intutive Surgical Inc.）の開発を試みた．Da vinciの硬性鏡カメラの位置を常に光学的に計測し，操作コンソールの視野に術野構造の3次元像を重畳できるようにした．これらの3次元画像はリアルタイムにステレオ像として術野映像の上に表示され，カメラの前後左右，回転の移動に追従して内部構造等を表示できる機能を与えることができた．これらの様子を**Fig.8**に示す．今後4次元画像援用によりロボット手術の適用範囲はさらに広くなっていくと考える．

手術計画のためのバーチャル手術システム

医用高次元画像技術の応用面の1つとして，治療シミュレーションがある．そしてこの中の1つとして手術前に想定する術式をコンピュータ上で試行する手術シミュレーションがある[2)～5)]．できるだけ現実に近い手術を行うために，VR技術と精度の高い臓器モデルを用いて仮想空間内で手術シミュレーションを行う．これらは患者から得た形態情報を用いるために，患者ごとの具体的な情報に基づく術式の考案と決定が可能となる．この手術シミュレーションにおいて臓器，血管といった柔らかい組織を画像上で切開することができ，その切開部に現れる内部構造の表示も可能とした3次元手術シミュレーションを実行できるシステムの開発を目指している．本システムは，一連の作業の過程で患者から無侵襲的に得た形態情報を用いているために，特に血管走行の立体的配置を踏まえた手術手順の構築は，実際の手術手技にかかる時間を大きく短縮すると考えている．そしてあまり前例のない疾例や複雑な手技を要する症例についても，その症例に習熟してから現場に臨むことも可能である．また手術中の医師の手の感覚（触覚）は，手術を行ううえで重要な役割を持っているといわれている[3)]．この触覚をバーチャル手術でも体感できる force feedback（触覚提示）装置も開発しており，仮想空間上のものに触れた際に，その柔らかさを各指で感じることができる．この装置は，使用者の両手の甲，親指，人差し指，中指に装置を装着し，各指でコンピュータの仮想空間内のものに触れた感触を得られるものである．**Fig.9**に我々が初めてVirutal surgery用に開発した両手用触覚提示装置を装着したときの様子を示す．また**Fig.10**にはハイテクリサーチセンター整備事業により，本研究所内に建設された視覚・触覚連動VRコックピットの使用状況を示す．この装置は視野全体をカバーできる状況下で高品質な表示画像で立体視ができ，かつforce feedbackを得ながら手術作業を行うことができるようになった．また可動式のス

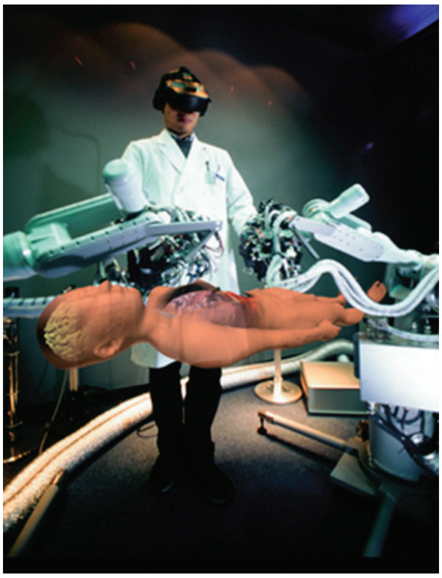

Fig. 9 The developed force feedback device for both hands.

Fig. 10 A view of the VR cockpit. A user who is performing virtual surgery attaches the force feedback devices to his both hands and stands on an elevator. To perform the surgical simulation in the same environment as an actual operation according to the user's viewpoint and the operation, an angle of an elevation of this display can be changed from 0 degree to 45 degrees, and the elevator that equipped force feedback device can be shifted up and down or back and forth.

クリーンとステージを用いることで，開腹手術などにおいて実際の術場と同様の術者の目線と両手の位置をもって作業を実行できるようになった．この視覚・触覚連動VRコックピットはシミュレーションだけでなく，tele-surgeryのためのコックピットとしても使用していく予定である．

Fig.11は，リアルタイムイメージングにより，術者の作業に反応して変形する軟組織モデルを示す[4]．MRIデータセットから構築された肝臓モデルは，押す，つまむ，切開するという作業に反応して変形する．

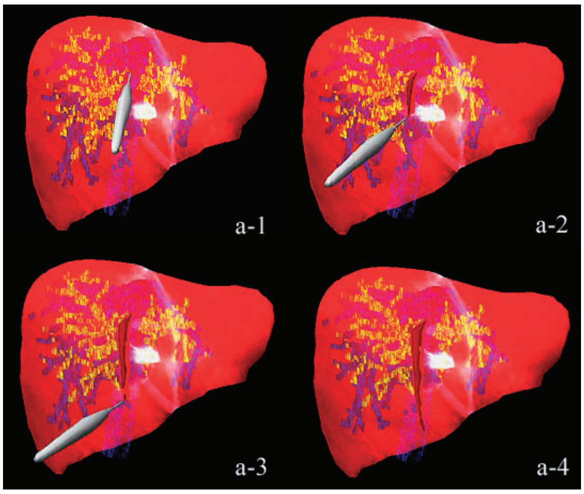

Fig. 11 Real-time elastic organ model made of patient's MRI dataset which is able to respond against surgical manipulations. The deformation of the blood vessel caused by the incision. This image shows the time sequential deformation of the surface and the vessels. A locus of the scalpel is reflected by using the force feedback device.

まとめ

生体の可視化技術は周辺技術の発達とともに，人体の形態と機能にかかわる多様な情報を医学にもたらすことができるようになった．またコンピュータの生成した空間内で人間の五感を使って情報収集，操作指令を出すことのできるインタフェース技術でもあるVR技術は，生体という空間的にも時間軸上でも複雑な対象をより詳しく迅速に把握するための有益な手段であることも明確となってきた．人体を傷つけることなく内部を見ることができる生体の高次元可視化技術は，これからの医学の新しい姿と方向を作り出していくものと考える．

参考文献

1) Rosen, J.M., Soltanian, H., Redett, R.J. and Laub, D.R.: Evolution of Virtual Reality, IEEE Engineering in Medicine and Biology, pp.16-22 (1996).

2) Suzuki, N., Hattori, A. and Takatsu, A.: Medical Virtual Reality System for Surgical Planning and Surgical Support, J. Comput. Aided Surg., 1 (2), pp.54-59 (1995).

3) Suzuki, N., Hattori, A., Suzuki, S., Sumiyama, K., Kobayashi, S., Yamazaki, Y. and Adachi, Y.: Collaborated Surgical Works (Surgical planning) in Virtual Space with Tactile Sensation between Japan and Germany, MMVR2001, J.D.Westwood et al. (Eds.), IOS Press, pp.479-484 (2001).

4) Suzuki, S., Suzuki, N., Hattori, A., Takatsu, A. and Uchiyama, A.: Deformable Organ Model Using the Sphere-Filled Method for Virtual Surgery, Medical Physics 2000; 27: pp.1426.

5) Robb, RA, Hanson, DP and CampJJ: Computer-Aided Surgery Planning and Rehearsal at Mayo Clinic. Computer 1996; 29: pp.39-47.

6) Hoehne, K.H.: Computer Models of the Human Body, Proceedings of the 40th Conference the Japan Society of Medical Electronics and Biological Engineering ;39: pp.62-65 (2001).

（平成14年4月10日受付）