

特集 ■ 人・社会のモデル化の最前線

人体解剖構造のバーチャル化—計算解剖学とその応用—



森 健策

Mori Kensaku

名古屋大学

1. はじめに

医療の分野における CT や MRI 装置など医用イメージング装置と医用画像処理技術の発展は、臨床の場を大きく変えようとしている。大腸ポリープなどの検査では、従来、大腸内視鏡によって内視鏡を大腸内部に挿入し光学的に観察してきた。最近では、CT によって被験者の 3 次元腹部 CT 画像を撮影し、それを基に大腸内壁面の様子を観察する「仮想大腸内視鏡検査」が広く実施されようとしている [1]。また、腹部領域における腹腔鏡手術では、手術前に撮影される CT 画像を利用して腹部領域における臓器、動脈・静脈などの関係を 3 次元画像上で確認し、手術時には内視鏡と CT 画像から生成される 3 次元画像を連動させる手術ナビゲーションが行われるようになってきている。

医用イメージング装置の進展は、診断・治療の場面において、新しい検査法・手技をもたらし、医療分野におけるブレークスルーのきっかけともなっている。ここで重要なのは、医用イメージング装置で撮影される画像を基にして、人体解剖構造を詳細に観察できるようになったことである。架空、もしくは、想像に基づいて人体内部の形態がコンピュータ上に構築されているのではなく、生きている人体の解剖構造情報をコンピュータ上にバーチャル化することが可能となった。そして、そのバーチャル化された人体構造を基に、種々の診断・治療応用がなされている。さらに最近では、立体造形機（3 次元プリンタ）を利用することで、形状のみという制約はあるものの、生きている人体の解剖構造を立体物として再現可能となった。コンピュータ上にバーチャル化された人体解剖情報、すなわち「計算解剖情報」の処理技術は、医療技術の革新的発展の一翼を担う技術となりつつある。そして、内視鏡カメラなどで撮影される患者情報との融合や 3 次元プリンタといった「バーチャル化された

人体をリアル化」するデバイスの登場により、「実」と「仮想」の融合は新たな展開を迎えようとしている。

本稿では、「人体解剖構造のバーチャル化」と題し、新しい学術領域として現在研究が進められている「計算解剖学」[2] とその応用について紹介したい。

2. 人体解剖のバーチャル化と計算解剖学

2.1 人体解剖のバーチャル化におけるレベル

医用イメージング装置によって得られる 3 次元濃淡画像は、3 次元空間中の各点における人体解剖構造（筋肉、脂肪、骨など）を物理的量（X 線減弱係数や水素原子密度）として表現したものである。いわば、「信号レベル」において人体解剖構造をバーチャル化したものと言える。この「信号レベル」での人体解剖構造のバーチャル化でも、例えば、後述のセグメンテーション処理が一切不要なボリュームレンダリング処理を利用した仮想化内視鏡システムなどを利用することにより、人体解剖構造情報を画面上に表示することができ、例えば、管腔臓器内部のフライスルーなどが可能となる。しかしながら、ここで表示される人体解剖構造情報は、物理量に基づいた信号レベルの情報から得られるものであり、明示的に臓器形状を表現したものではない。

一方、医用イメージング装置で得られた画像から、真に人体解剖構造情報を取り出すのであれば、医用画像上において臓器領域を同定し、領域間の接続関係などの構造解析を行った後、それぞれの領域に対して解剖学的名称をアノテーションする、といった医用画像認識・理解過程が必須となる。このような過程を経て得られる人体解剖構造情報は、先の信号レベルでの人体構造のバーチャル化より一段上の階層に属するものと考えられ、「メタレベル」での人体解剖構造のバーチャル化と言える。

2.2 計算解剖学

「計算解剖学」とは、コンピュータが人体解剖構造を数理的に記述できる手法を確立し、それを基に CT 画像などのイメージング装置から得られる画像をコンピュータが完全に理解できる手法を実現するとともに、診断支援、治療支援、医学教育支援などへと応用する手法を含む新しい学術分野である [2]。そこで、文部科学省科学研究費補助金新学術領域「医用画像に基づく計算解剖学の創成と診断・治療支援の高度化」(略称「計算解剖学」)が立ち上がり、現在研究が進められている。この計算解剖学は、「医用画像完全理解」を核として研究が進められており、先述の「メタレベル」での人体解剖構造のバーチャル化を狙っている。

3. 腹部領域における「メタ解剖構造」認識理解

ここでは、先述の計算解剖の例として、腹部領域における「メタ解剖構造」認識理解について述べる。

3.1 腹部臓器領域の自動認識

「メタレベル」での人体解剖構造のバーチャル化を行うには、先述のように 3 次元 CT 画像などから臓器領域を自動的に抽出する手法の実現が必要となる。腹部 CT 像から複数臓器を自動抽出するには、種々の手法が提案されているが、最近ではアトラスを利用した手法が開発されている。医用画像処理分野におけるアトラスとは、元となる画像(原画像)と臓器ラベル情報(臓器領域を手入力などによってトレースしたもの)をペアとして格納したものであり、このアトラスを基にして CT 像などから臓器領域のセグメンテーションをすることになる。

文献 [3] に示す手法では、100 例以上の腹部臓器アトラスを基にして、複数の腹部臓器(肝臓、膵臓、脾臓、腎臓)を同時にセグメンテーションする手法を提案している。この手法では、あらかじめ与えられる腹部臓器アトラスデータベースから、セグメンテーションの対象となる画像に特化したアトラスを生成することで、腹部 CT 画像からの複数臓器セグメンテーション処理を実現している。

3.2 解剖学的名称の自動認識理解

臓器領域情報とともに、臓器領域に対する解剖学的名称は、メタレベルでの人体解剖学的構造認識理解において重要かつ不可欠な情報である。特に、動脈や静脈などの血管、気管支のような管腔臓器の場合には、血管網をなす枝、あるいは、気管支枝のそれぞれについては解剖学的名称を認識する必要がある。そこで、機械学習に基

づき腹部動脈のそれぞれの枝に対して解剖学的名称を自動的に対応付ける手法が提案されている [4]。

さらに、自動対応付けされた血管名を効果的に提示する手法も報告されている。腹腔鏡手術の術前診断において、腹部領域血管の走行方向を観察する場合、血管分岐部付近を拡大して観察することが多い。この場合、血管の分岐パターンの様子などを子細に観察することができるようになるが、表示される血管がそれぞれ何であるかがわからなくなる場合がある。文献 [5] で示される方法では、ボリュームレンダリングによって表示されている血管の表面上に直接的に血管名を表示する手法を提案している。血管名ラベルが常に視点方向を向くよう、動的に血管ラベル位置を制御し、認識性の向上を図っている(図 1)。

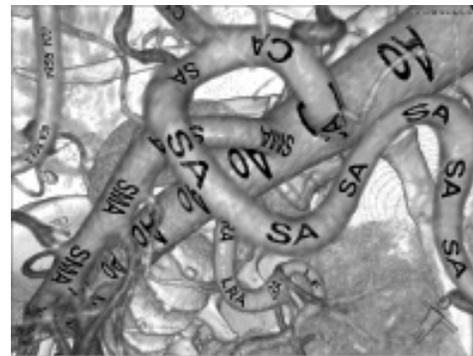


図 1 自動認識された血管名の表示例
*口絵にカラー版掲載

4. バーチャル化された人体解剖構造の利用

4.1 腹腔鏡手術前診断における人体解剖構造利用

3 で示した人体解剖構造認識結果(「メタレベル」での解剖構造情報)を利用した腹腔鏡手術前診断を紹介する。早期胃がんを対象とした腹腔鏡手術では、あらかじめ血管の走行方向や分岐構造、腹部実質臓器との関係を十分に把握することが重要となる。そこで、腹部臓器のセグメンテーション結果を基に、仮想的な腹腔鏡画像を生成することが行われる。図 2 にその一例を示す。臓器セグメンテーション処理では、細かな人体解剖構造を抽出できないことがあるため(メタ解剖構造情報の記述が不足)、入力画像に基づいたボリュームレンダリング(信号レベルでの描画)を組み合わせている(信号レベルとメタ解剖構造レベルの融合)。このような画像は腹腔鏡を模した入力デバイスによって視点位置・視線方向の制御が可能である。また、仮想的な鉗子も重ねて表示でき、目的とする部位に鉗子が到達できるか否かをシミュレーションすることも可能となる。

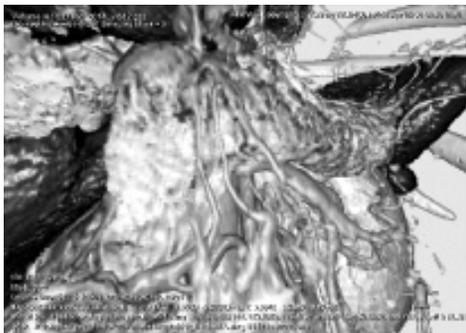


図2 臓器領域セグメンテーション結果を利用した仮想腹腔鏡画像の例
*口絵にカラー版掲載

4.2 腹腔鏡手術における人体解剖利用

腹腔鏡手術を行っている段階においてもバーチャル化された人体解剖構造情報が利用される。例えば、内視鏡の動きに応じて先述の仮想化腹腔鏡画像の視点位置・視線方向を変更することによって、実際の内視鏡位置に応じた仮想的な腹腔鏡画像を生成する（腹腔鏡手術ナビゲーション）。光学式位置センサや磁気式位置センサによって内視鏡の動きを追跡することで、仮想化腹腔鏡の視点位置・視線方向を決定する。図3に仮想化腹腔鏡を利用した手術ナビゲーションの例を示す。右側のモニターには腹腔鏡によって撮影されている映像、左側のモニターには腹腔鏡の映像に連動した仮想化腹腔鏡像が表示されている。ちょうど患者自身のリアルな映像と患者のバーチャル化された映像が連動していると言える。



図3 腹腔鏡手術ナビゲーションの例

4.3 大腸ポリープ診断におけるバーチャル化された人体解剖構造利用

大腸ポリープの新しい診断手法としてCT画像を利用した、「CTコロノグラフィー」と呼ばれる手法が広がりつつある。この手法は、リアルな世界で人体解剖構造(ここでは大腸内腔の表面形状)を観察するのではなく、バー

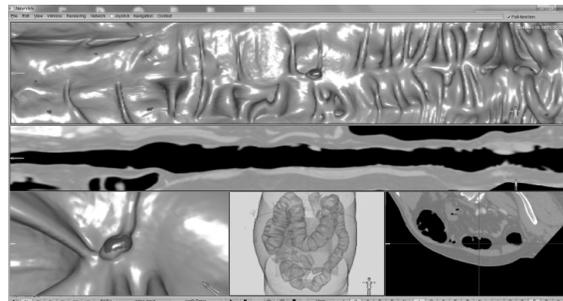


図4 大腸ポリープ診断支援システムの例
*口絵にカラー版掲載

チャル化された世界で大腸内腔領域を観察し、大腸ポリープなどを発見するものである。大腸ポリープは突起状の特異な形を示すため、曲率やヘッセ行列などを用いて自動的に検出する手法も提案されている。また、仮想的に大腸を直線状に伸ばし長手方向に切断した仮想展開像を表示することも行われている。仮想展開像を用いた観察では、左右に画像をスクロールする動作のみで大腸内壁面を効率的に観察することが可能となる。図4にこのような機能を備えたシステムの画面例を示す。

CTコロノグラフィーは、バーチャル化された患者に対する診断であるが、大腸ポリープと疑われる領域が発見された場合には、実際の内視鏡(大腸鏡)を挿入し検査することになる。そこで、CTコロノグラフィーに用いられたCT画像を地図として利用し、実際の大腸鏡をCT画像で見つかった大腸ポリープと疑われる部位まで誘導する大腸鏡ナビゲーションシステムの開発も試みられている[6](図5)。

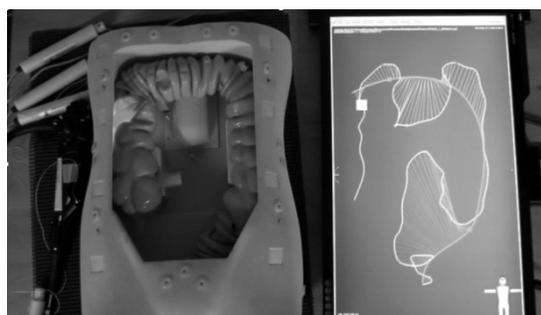


図5 大腸鏡ナビゲーションシステムの例

4.4 “Realized Virtuality (RV)”バーチャル化された人体解剖構造のリアル化

これまででは、人体解剖構造のバーチャル化について述べてきたが、一方、バーチャル化された人体解剖構造を

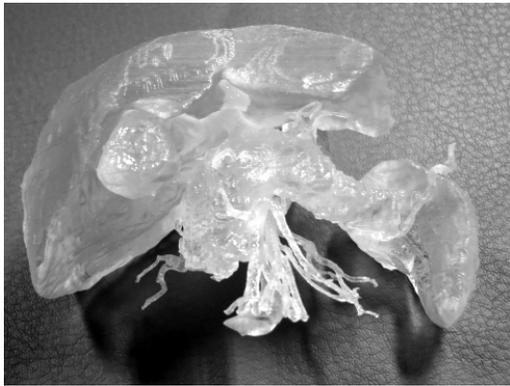


図 6

3D プリントによるバーチャル化された人体解剖構造情報の再リアル化 (RV)

リアルな世界で再構築することも現実的なものになりつつある。ここでは、これを”Realized Virtuality (RV)”と呼ぶ。3次元プリンタを利用することにより、コンピュータ上でバーチャル化された人体解剖構造を造形することができるようになる。

3次元プリンタによる人体解剖構造の造形方法であるが、まず、3で述べたようなセグメンテーション処理によって、臓器領域情報をラベル画像として得る。次に Marching Cubes 法により臓器領域形状を表す三角パッチの集合を得たのち、STL (Stereolithography) フォーマットとしてファイルに出力する。得られたファイルを3次元プリンタにより出力することで、人体解剖構造を再構築することができる。

得られた人体解剖構造立体プリント結果は、そのまま診断や治療計画のための観察に利用可能である。これまで画面上で視点位置・視線方向変更操作を数多く行って観察していた臓器の形態を、立体物として出力することによってより、臓器表面形状(凹凸)の手触り感も含めて非常に直感的に把握することができるようになる。また、立体造形された人体解剖構造に対して手術の操作を加えることによって、手術のリハーサルなども実現できる。さらには、多様性に富む実際の人体解剖構造に基づいた立体造形を利用した手術トレーニング、手術ナビゲーションシステムなど新しい医療機器の利用トレーニングなどにも応用できる。今後の数多くの応用分野が開拓されるものと思われる。

5. むすび

本稿では、新しい学術領域として現在研究が進められている「計算解剖学」を中心に、バーチャル化された人体解剖構造情報がどのように臨床の場において活用され

ているかについて述べた。また、リアルに基づきバーチャル化された人体解剖構造が3次元プリンタによってリアルな世界で再度構築され、利用されている事例を紹介した。これまでVRの世界は主として知覚・触覚を接点としてリアルとバーチャルの融合を行っていたが、今後は「もの」を中心としたリアルとバーチャルの融合が医療応用も含め幅広く行われると予測する。

参考文献

- [1] AH Dachman: Interpretation of CT Colonographic Images: Should We Rely on Nonradiologists?, Radiology, Vol. 264, No. 3, pp. 624-626 (2012)
- [2] <http://www.comp-anatomy.org>
- [3] R. Wolz, C. Chengwen, K. Misawa, et al.: Automated abdominal multi-organ segmentation with subject-specific atlas generation, IEEE Trans. of Medical Imaging, DOI 10.1109/TMI.2013.2265805 (in press)
- [4] K. Mori, H.H. Bui, T. Matsuzaki, et al.: Automated anatomical labeling of abdominal arteries extracted from CT images based on machine learning, Int. J. of Computer Assisted Radiology and Surgery, vol. 7, Sup.1, pp.S46-S47 (2012)
- [5] Z. Jiang, Y. Nimura, Y. Hayashi, et al.: Anatomical annotation on vascular structure in volume rendered images, Computerized Medical Imaging and Graphics, DOI 10.1016/j.compmedimag.2013.03.001 (in press)
- [6] M. Oda, B. Acar, K. Furukawa, et al.: Colonoscope tracking method based on line registration using CT images and electromagnetic sensors, Int. J. of Computer Assisted Radiology and Surgery, vol. 8, Sup.1, pp. S349-S351 (2013)

【略歴】

森 健策 (MORI Kensaku)

名古屋大学 情報連携統括本部 教授

1992年名古屋大学工学部卒業、1996年名古屋大学工学研究科情報工学専攻博士課程終了。1997年名古屋大学工学研究科助手、2000年名古屋大学難処理人工物研究センター助教授、2009年より現職。専門は医用画像工学。