

特集 ■ 3D プリンタと VR

医用画像処理におけるバーチャルリアリティシステムとユーザビリティ； OsiriX と CAD/CAM を融合した生体 3D プリンティング



杉本真樹

神戸大学

Sugimoto Maki

1. はじめに

医療における virtual reality (VR) の活用は、CT や MRI などの医用画像機器のデジタル化に伴い、近年急速に進歩した。医用画像処理技術も、患者解剖を 3D 画像に再構築し提示するだけでなく、提示法や操作・活用法に注目が置かれている。手術支援においては、多くの研究成果が報告され、放射線科医や放射線技師のみでなく、臨床医や外科医が自ら VR 再構成を行い、その画像処理プロセス自体を体験することで、診断トレーニングや手技習熟、手術シミュレーションや手術ナビゲーションに活用している。特に手術室では、滅菌環境や物理的な行動制限、さらに時間などの厳しい制限が存在し、安全性と正確性を担保しなければならない。そこで、医療 VR の提示とユーザ体験における特殊性を考慮した、ユーザビリティの高い医用画像処理技術と生体臓器 3D プリンティング技術を報告する。

2. OsiriX によるデジタル医用画像処理

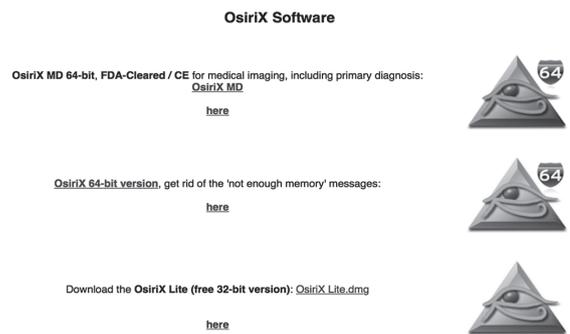
OsiriX (オザイリクス) は、スイスのジュネーブ大学の放射線科医らにより 2003 年に開発された、Mac OS X 専用の医用画像処理と PACS 通信機能を備えた高機能アプリケーションである (www.osirix-viewer.com) (図 1)。開発から 12 年目の 2015 年時点でもなお、新機能やバグ修正などの開発が継続中である。2015 年 3 月現在 OsiriX MD (FDA/CE 承認有償 64-bit 版) および OsiriX (有償 64-bit 版) と OsiriX Lite (無償 32-bit 版) が存在し、OsiriX の WEB サイトから入手可能である (図 1)。 (http://www.osirix-viewer.com/Downloads.html)

2014 年 11 月 25 日に「薬事法等の一部を改正する法律」(平成 25 年法律第 84 号) が施行され、旧薬事法



- Ultrafast performance
- Intuitive interactive user interface
- Exclusive innovative technique for 3D/4D/5D navigation
- Open platform for development of processing tools
- The most widely used DICOM viewer in the world
- More than 50'000 active users, More than 1'000 downloads per day, More than 150'000 hits per day
- Thanks to all OsiriX users who believe in an open, different and free future in imaging.
- Developing Swiss Quality DICOM Viewer since 2003

(a) OsiriX の web ページ



(b) OsiriX のダウンロードページ

図 1 OsiriX(オザイリクス)
(口絵にカラー版掲載)

の一部を改正し、新たにプログラム(ソフトウェア)を医療機器として製造販売の承認等の対象とすることとなり、旧薬事法の名称が「医薬品、医療機器等の品質、有効性及び安全性の確保等に関する法律」(医薬品医療機器法)に改正された。2015 年 3 月時点で OsiriX は、日

本での医療機器としての製造販売につき、医薬品医療機器法による承認を受けていないため、ヒト臨床での初期診断には利用できない。欧米では OsiriX MD が医療機器認承済であり、米国食品医薬品局 (FDA) により画像診断用クラス II 医療機器として認証されている。また欧州医療機器指令 93/42/EEC (CE ラベル) に適合しており、クラス II 製品として認証されている。

OsiriX による医療 VR 画像処理は、3D Volume rendering (ボリュームレンダリング) 機能 (図 3~6) や Surface rendering (サーフェスレンダリング) (図 7, 8) 機能を使用すると、比較的容易に 3D 画像提示が可能である。OsiriX のサーフェスレンダリング機能を活用すれば、CT・MRI などの DICOM ボリュームデータから臓器それぞれの形状データを直感的に抽出でき、STL (Standard Triangulated Language あるいは STereo Lithography) フォーマットに出力できる。これは 3D プリンタでの臓器立体モデル作成に非常に有用であった。こうして得られた各臓器の形状データの STL ファイルを 3D プリンタで造形すれば、これまでのモニタ上での画像診断では得られなかった、立体形状を手を持つ感覚が得られ、しかも臓器の硬さや柔らかさ、表面微細構造などの触感を付加することが可能になった [1-2]。

3. 3D プリンティングに適した医用画像のポリゴン処理

DICOM 画像を単純に 3D 再構成しただけでは、3D プリンタへのデータ入力と立体造形の出力はできない。そこで、OsiriX による臓器抽出から STL ファイル処理までの効率的な実際のワークフローを解説する。

腎臓癌症例に対する腎癌部分切除例の造形法を例に挙げる。まず造影 CT のデータを用意し、2D 画面上で腫瘍部位を ROI (関心領域 resion of interest) として全ス



図 2 腎癌の 2D 画像と ROI (関心領域) の設定 (口絵にカラー版掲載)

イス抽出する (図 2)。OsiriX にはスライス間隔をあけて ROI 設定を行ったあとに、不足するスライス上で連続する平均的な ROI 範囲を自動設定できる。次にボリュームレンダリングを行って全体を 3D 表示する (図 3)。ROI として抽出した腫瘍部分も合わせて表示し、解剖を確認する (図 4)。ここで、このままでは造形に必要な部位も表示されてしまうので、必要な臓器のみを鋏ツールで切りだし、造形に不要な範囲を削除する (図 5)。ボリュームレンダリングしながら任意方向の 3D 表示をすることで、腎臓全体と腫瘍、動静脈などの位置関係が明瞭になり、3D プリンティングにて最終的に造形する臓器立体モデルのイメージが付きやすい。

ここで一旦ボリュームレンダリング画面を閉じ、サーフェスレンダリング処理を行う。サーフェス表示の際に、設定閾値として、描出したい臓器や部位の CT 値に近似した値を入力し、臓器表面や腫瘍、血管などを表示する (図 7)。とくに透明素材や軟性素材など複数の素材で造形したい場合は、それぞれ別の STL ファイルとして出力する必要があるため、サーフェス値の入力を

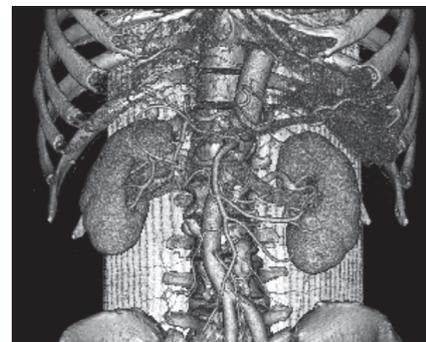


図 3 腎癌の 3D 画像 (ボリュームレンダリング) (正面) このままでは腫瘍が表示されず余計なデータが多い (口絵にカラー版掲載)

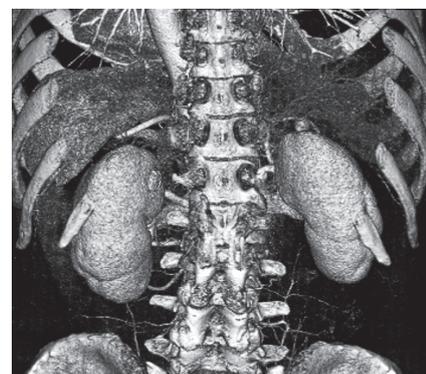


図 4 腎癌の 3D 画像 (ボリュームレンダリング) (背面) ROI として抽出した左腎腫瘍を青色で表示 (口絵にカラー版掲載)



図 5 腎癌の 3D 画像 (ポリウムレンダリング) (背面) 3D 造形に必要な腎臓と腫瘍, 血管のみをトリミング (口絵にカラー版掲載)

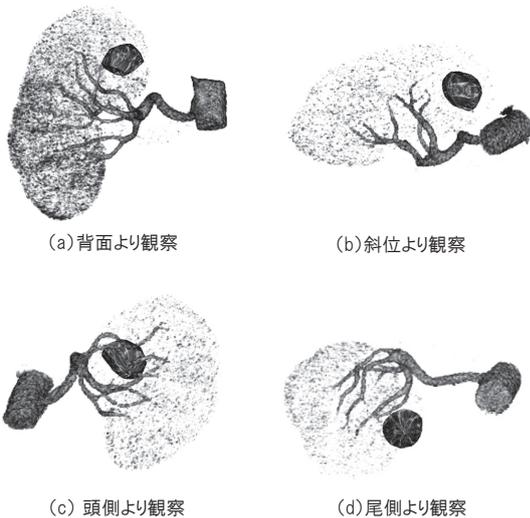


図 6 腎実質と腎癌, 腎動静脈を立体表示 (ポリウムレンダリング) (口絵にカラー版掲載)

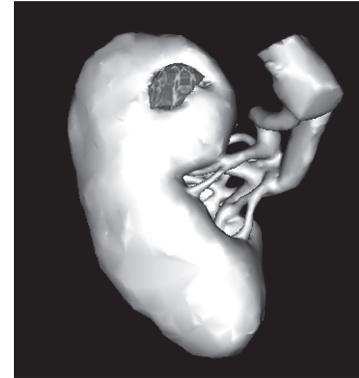


図 7 腎実質と腎癌, 腎動静脈を立体表示 (サーフェスレンダリング) (口絵にカラー版掲載)

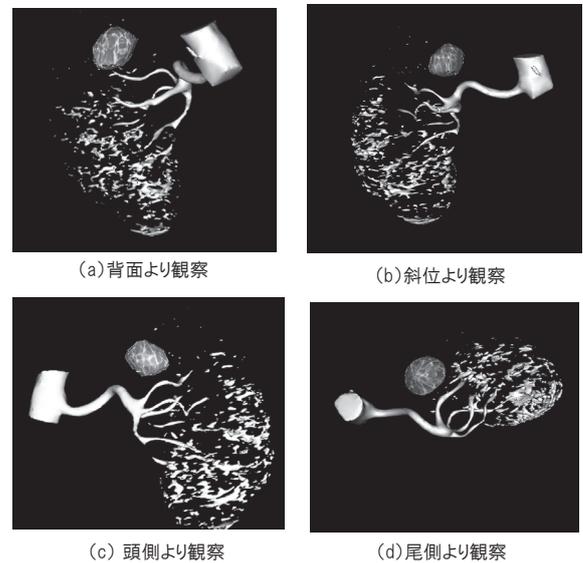
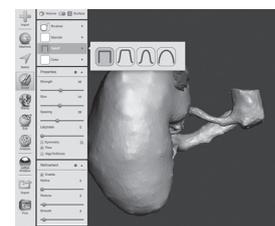


図 8 腎癌と腎動静脈を立体表示 (サーフェスレンダリング) (口絵にカラー版掲載)

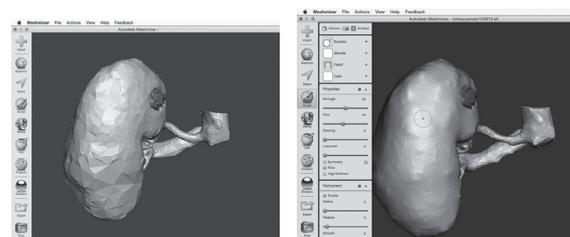
それぞれの CT 値に設定しなければならない. 例えば血管のみを表示したい場合は, 造影効果のある血管の CT 値を入力すれば, 目的の血管のみが表示される (図 8). こうして抽出された部位の STL ファイルを個々に出力することで, 多彩な造形が可能になる.

4. CAD/CAM による STL ファイルのポリゴン加工

臓器立体モデルを実際に手術支援として利用するには, CAD(コンピュータ支援設計 Computer Aided Design) と CAM (コンピュータ支援製造 computer aided manufacturing) の技術を活用し, 医用画像と造形データの補完を行うとよい. そこで表面形状の補正やスムージング, 欠損データの修正など, 臨床医でも容易にできるアプリケーションとして, 非商用無償の Meshmixer(Autodesk 社)を利用した.



(a) 表面スムージングツール



(b) 表面スムージング前 (c) 表面スムージング後

図 9 Meshmixer による腎臓のポリゴン表示 (口絵にカラー版掲載)

例えば実質臓器を内部が透見できる透明素材で造形し、腫瘍や血管を透見できるモデルを作成したい場合、DICOM からサーフェスレンダリングし STL 出力したポリゴンデータをそのまま利用すれば、表面の凹凸がそのまま造形され、立体モデル表面が光の乱反射をおこし、内部が透見しにくい。また造形後の後処理として、透明度を上げるには物理的にかかなりの表面研磨作業が必要になる。そこであらかじめ表面ポリゴンデータの凹凸を減少させるとよい。Meshmixer には直感的な形状編集が容易に行えるツールが豊富にあり、この作業も容易に行え、形状処理後に改めて STL ファイルとして出力するとよい(図 9)。

5. 臓器立体モデルの医療活用と手術支援

医療での 3D プリント技術は、これまで口腔外科、整形外科や耳鼻咽喉科、脳外科などの分野で、骨を対象とした臓器の立体造形が主に活用されてきた。近年は複数素材を同時に造形できるプリンティング技術も開発され、生体の質感を再現した臓器モデルも作成されている[3]。また生体適合素材や生物学的素材なども利用され、再生医療や組織工学を応用した人工臓器などへの開発も進んでいる。

手術支援においては、臓器の質感を再現した軟らかいモデルも広く利用され、手術手技の習熟や術前シミュレーション、術中の画像等手術支援やトレーニングなど、多岐にわたり活用されている。

筆者は、生体の質感を複数素材で再現し臓器立体モデルを造形する技術、Bio-Texture Modeling[®] (生体質感造

形[®])を開発した[5]。CT や MRI から臓器形状の内外構造データをポリゴンとして抽出し、ブーリアン演算により感触等価パラメータで樹脂種別を定義して、多噴射インクジェット式 3D プリンタにて立体造形した。多素材樹脂の混合噴射による超薄一括積層造形により、複数の材料からなるパーツやアセンブリを単一工程で造形し、CT や MRI の複雑な解剖構造と質感を 0.016mm の精度で忠実に再現し、臓器の硬さや柔らかさ、表面微細構造などの触感を再現した[6]。

この精密で質感を再現した臓器立体モデルにおいて、体幹データも同時に造形することで、開腹手術から腹腔鏡やロボット支援手術における手技のプロセスの手順を再現できる新たなシミュレータを開発した(図 10)。この体幹と臓器を組み合わせた手術シミュレーションは、患者個別の解剖や病態に対する理解度を格段に向上しただけでなく、外科手術における切開や縫合などの基本手技と、複雑な手術手順を正確に再現することができ、外科医の手術習熟におけるラーニングカーブの改善に有用であった。さらに実際の手術現場では、このモデルを再度手に取り、臓器立体モデルで腫瘍位置や血管構造などを再確認でき、VR 画像による画像支援をさらに強化するツールとなった(図 11)。

また CAD/CAM の際に、手術時の切除線をデザインし、立体モデルに再現することで、臓器の切除後をそれぞれ別々のパーツに造形でき、切除断端の血管構造や腫瘍との距離が明瞭になった。肝臓癌の肝切除では肝臓 3D モデルをデザインし、切除区域と断端の肝静脈と門脈の露出を 3D レプリカ模型で明確に再現した。これは実際の手術手技シミュレーションに欠かせない技術と言

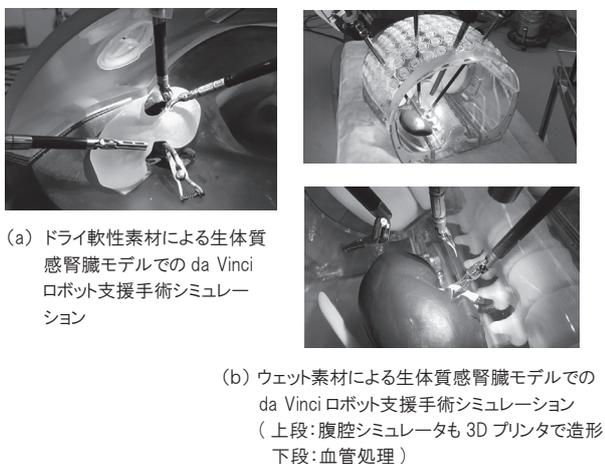


図 10 実物大臓器立体モデルと腹腔シミュレータによるトレーニング (協力:東京腎泌尿器センター大和病院泌尿器科 志賀淑之先生) (口絵にカラー版掲載)



図 11 ロボット支援腎癌部分切除術における実物大臓器立体モデルによる手術支援 (口絵にカラー版掲載)



図 12 生体質感造形による肝切除シミュレーションモデル。
肝切除線で分割造形し、断端に肝静脈、門脈が露出。
内部に血管と癌が透見できる。
(協力: 都立墨東病院外科 青山泰治先生)
(口絵にカラー版掲載)

えた(図 12)。

6. VR と 3D プリンタの医療活用における問題点と展望

患者の医療画像データを STL 変換する際に問題となるのは、どの部分を造形し、臓器や病巣として認識するかを判断できる専門的知識と技術の習得である。少なくとも STL データの作成までを本来の担当医が責任を持ち行う必要があると言える。この技術習得の効率化と人材育成、そして医用画像の VR 化に関する専門的キャリアの確立が急務と考える。また個人情報保護の観点から、DICOM データ、ポリゴンデータとも匿名化し厳重管理が必須であると言える。これらの運用マニュアルや施設内ルール、汎用性の高いガイドラインが早急に整備され、広く医療でのユーザビリティの高い VR と 3D プリンティングが有効活用されることを期待したい。

参考文献

- [1] 杉本真樹: OsiriX 画像処理パーフェクトガイド最新版 (Ver.5, 9/6.0 対応)。エクスナレッジ, 東京, 2015.
- [2] 杉本真樹: 医用画像解析アプリ OsiriX パーフェクトガイド。エクスナレッジ, 東京, 2011.
- [3] 杉本真樹. 生体質感造形 Bio-Texture Modeling による触感等価立体臓器モデリングと臓器保存シミュレーション. Organ Biology 21(2) 23-26, 2014.
- [4] 杉本真樹, 東 健. 3D ホログラムと臓器立体モデルを追従重畳表示した混合現実的拡張触感による空間手術ナビゲーション. 日本コンピュータ外科学会誌 16(3) 268-269, 2014.
- [5] 杉本真樹, 東 健ほか. 特許第 5239037 号: 3 次元造形モデル作製方法および医療・医学・研究・教育用支援ツール
- [6] Bio-Texture Modeling ® (生体質感造形®)
<http://biotexture.com/about/btm.html>

【略歴】

杉本真樹 (SUGIMOTO Maki)

神戸大学大学院医学研究科 消化器内科

特命講師 医学博士

1996 年, 帝京大学医学部卒業. 1996 年, 帝京大学外科, 1998 年, 国立病院東京医療センター外科, 2000 年, 帝京大学大学院外科, 2004 年, 帝京大学ちば総合医療センター外科を経て, 2008 年, 米国退役軍人局 Palo Alto 病院客員フェローとなり, 2009 年より現職. 日本外科学会認定登録医, 日本消化器内視鏡学会専門医, 日本内視鏡外科学会技術認定取得者・医工連携推進委員, 日本コンピュータ外科学会評議員. 帝京大学医学部医療情報システム研究センター客員教授, 千葉大学フロンティア医工学センター特別研究准教授, 群馬大学大学院医学系研究科機能形態学客員准教授. 専門は消化器外科, 医用画像処理, 医療機器開発.