

医用画像情報の可触化による生体質感造形 Bio-Texture Modeling と BIOTEXTURE Wet Model の開発

神戸大学大学院医学研究科消化器内科

杉本 真樹

Maki SUGIMOTO



1. はじめに

人工臓器は、臓器を機能的に代替するものとして、非生体適合性材料や生体適合性材料、生物学的材料などを素材として、機械技術や組織工学に基づいて設計される。人工臓器はその材料や製作過程と同様に、形状と機能性もデザインする上で非常に重要である。多くの人工臓器は生体内への埋め込みや装着を前提としており、生体への影響を考慮した最適な設計が不可欠である。そこで、近年、このデザインにおいて、医用画像情報を利用した3Dプリンティング技術が注目され、すでに一部が実用化された。医用画像情報としてDICOM (digital imaging and communications in medicine) データを利用し、コンピュータ支援設計 (computer aided design : CAD) やコンピュータ支援製造 (computer aided manufacturing : CAM) によって立体形状を再現することで、最適な人工臓器がデザインされている。

この計測、設計、加工という製造プロセスは、臓器などの生体構造を分析し、そこから製造方法や動作原理、設計図などを調査し造形する、いわゆる生体のリバースエンジニアリングである。これは従来の人工的に製作した工業製品やソフトウェア製品と異なり、医用画像情報をその設計図として利用することで、各種臓器の解剖構造や周辺環境を忠実に再現できるため、生体に対して合理的に機能する可能性が高い。

そこで筆者らは、産学医工連携により、医用画像情報に基づいて臓器の立体構造を解析し、3DプリンティングとCAD/CAM技術を融合させて生体の質感を再現する造形技

術、生体質感造形 Bio-Texture Modeling を開発した。さらに、細胞内液の組織含有量を調整した新規素材を開発し、成形技術による生体の構造と質感を精密に再現した人工臓器モデル、BIOTEXTURE Wet Model を開発し (特許第52039037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)、2012年3月特許出願、2013年4月特許取得に至った^{1)~4)}。

2. 生体質感造形技術によるBIOTEXTURE Wet Modelの開発

生体構造の3次元データ解析においては、CTスキャンによるポリウムデータが、解像度や撮像時間などから最も利用しやすく、MRI (核磁気共鳴画像法) の画像や超音波画像なども利用されている。これらの医用画像は汎用性の高いDICOMデータとして利用され、近年は放射線科医や技師に限らず外科医などの臨床医でも一般的に利用されている。DICOM画像ビューワも各メーカーから各種市販され、通常の臨床業務でも広く利用されている。

筆者は2003年より、市販のMac OSにて動作するオープンソース医用画像ビューワOsiriX (オザイリクス) (図1) を利用している^{5)~9)}。臓器それぞれの形状データを直感的に抽出するため、3D volume rendering (ポリウムレンダリング) (図2) や surface rendering (サーフェスレンダリング) (図3) などの画像処理を行う。OsiriXは、無償版と有償版が存在しているが、どちらでもこれらの処理により3D臓器形状をポリゴンとしてSTL (standard triangulated language) フォーマットに出力できる (図4)。

医用画像からSTLなどの臓器形状データが作成できれば、3Dプリンタでの出力が可能である。データの加工はCAD/CAMソフトウェアでも容易であり、内部構造や外郭のデザイン、シェル化、力学的構造解析、エラー検出など

■ 著者連絡先

神戸大学大学院医学研究科消化器内科
(〒650-0017 兵庫県神戸市中央区楠町7-5-1)
E-mail. sgmt@med.kobe-u.ac.jp



図1 オープンソース医用画像ビューワ OsiriX(オザイクス)



図2 OsiriXによる3D volume rendering(ポリュームレンダリング)

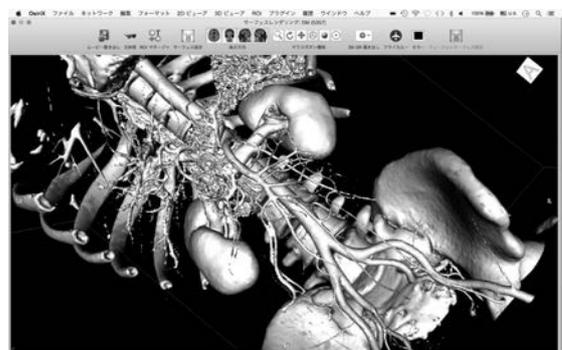


図3 OsiriXによるsurface rendering(サーフェスレンダリング)

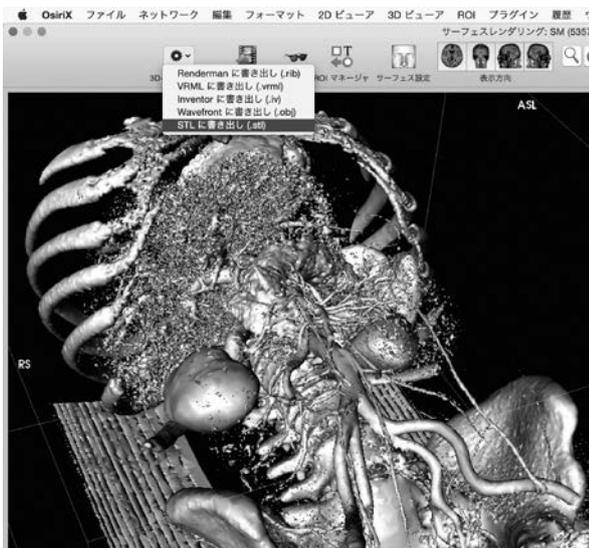


図4 OsiriXによる3D臓器ポリゴンのSTL出力

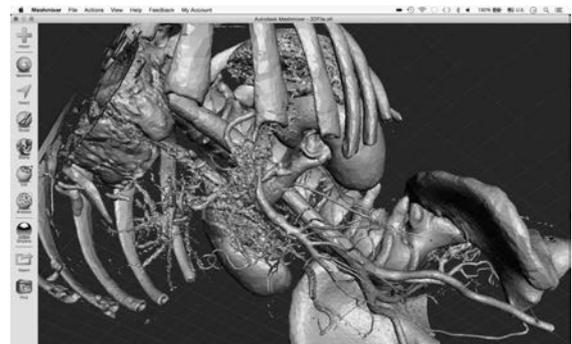


図5 CADソフトウェアによる臓器立体モデル作製

によって、精密な臓器立体モデル作製が可能である(図5)。

医用画像は従来、3Dデータによるバーチャルリアリティのモニタ表示と閲覧によって得られる情報に限界があり、正確な空間的認識を得るには限界があった。一方、3Dプリンタによる臓器立体モデルは、透明を含めた多色多素材が使用可能になり、複雑な解剖構造を直感的に理解しやすくなった(図6)。

CTやMRIから臓器形状の内外部構造データをポリゴン

抽出し、各構造物の立体データをブーリアン演算し、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造形し、複雑な解剖構造と質感を0.016 mm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。



図6 3Dプリンタによる多色多素材臓器立体モデル(肝臓)



図7 BIOTEXTURE Wet Modelによるロボット支援手術シミュレーション(肝切除術)

3. BIOTEXTURE Wet Modelによる手術シミュレーション

臓器立体モデルは、立体的診断に用いる場合は硬化素材での造形が有用であるが、手術などの侵襲的手技を習熟するには、臓器の形状に加え、硬さや柔らかさ、表面微細構造などの触感を付加する必要がある。そこでこれまで軟素材による臓器モデルを造形し、手術シミュレーションや習熟に活用してきた^{10)~16)}。この経験から、特に生体臓器の湿潤環境を再現することが重要と考えた。しかしこれを克服するには3Dプリンタ単独での造形には素材の多様性に限界があった。そこで、まず細胞内液の組織含有量を調整した新規素材を開発した。これを用いて生体構造をシェル化し、成形技術を融合したハイブリッド造形法によって、質感を精密に再現したWetな人工臓器モデル、BIOTEXTURE Wet Modelを開発した。

BIOTEXTURE Wet Modelは、臓器と柔らかさ、水分含有量がほぼ実物臓器と同様に設計でき、変形や歪みなどの外的刺激に対する反応も実際の臓器に近似している。また水分が含まれているため、表面に光の反射がみられ、光沢感の変化によってモデルの質感が本物そっくりと感ずることができる。肉眼的のみでなく、内視鏡画像上でも実物臓器とほぼ同じ質感に表現される。

手術手技に必須である電気メスやエナジーデバイスによる切開、凝固などの反応も、実際の臓器からの出血や、表面の凝固や焦げ付きまでもそっくりに再現され、手術トレーニングでは、血管損傷時の出血が再現され、偶発症や有害事象の早期発見に有用であった。つまり、手技のトレーニングに使用する際に、その危機感までも習得できるので

ある。従来までの医療用実体シミュレータは、出血を再現するために管状物に赤い液体を絶えず還流して血管と血流を再現したモデルが使用されてきたが、一度この擬似血管を損傷し出血してしまうと、液体(擬似血液)が流出し続け、トレーニングの妨げになることがあった。BIOTEXTURE Wet Modelは、擬似血管に壁構造と半固形血液素材を充填させることで、エナジーデバイス使用による血管損傷時の疑似出血があっても、数秒後には半固形血液素材が凝固し凝固止血反応まで再現される。これにより止血操作や縫合結紮などのトレーニングにも有用なモデルであり、実臨床に近い快適なサージカルトレーニングモデルとなった。

また繊維状の架橋構造を含有する新たな立体造形素材を開発し、縫合結紮時にちぎれることなく、縛りこむ強度や、組織同士を寄せ合わせる感覚までも再現できた。メスや鉗子、針など手術機器がこのモデルに接触する際の組織抵抗も、水分を含ませることで非常に生体に近い感触となり、あらゆる手術操作を再現できる実体シミュレータといえる(図7)。

4. 3Dプリンティングによる臓器立体モデルの展望

3Dプリンティングによる臓器立体モデルは、造形プロセスや素材などに多様性がみられ、医用画像情報の可視化から可触化へと進化してきている。手術支援から教育支援、科学研究やデータ解析まで幅広く活用が進み、すでに3Dプリンティング技術による生物由来材料や生体適合素材、スキャフォールドとの組み合わせなど技術革新がめざましい。実際に生体内への埋め込み型人工臓器開発や、移植医療、そして再生医療などの分野で、臨床応用される時が近

いかかもしれない。本来は人工の設計図が存在しない人体だからこそ、医用画像情報と遺伝子情報、生理的・生化学的動態データなどをもとに、改めて設計図を描いてゆく、生命のリバースエンジニアリングの進歩に期待がかかっている。

利益相反の開示

杉本 真樹：有限会社ニュートングラフィックス（顧問職）、株式会社ファソテック（産学共同研究）

文 献

- 1) 杉本 真樹, 東 健, 渡辺 欣一, 他：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
- 2) Bio-Texture Modeling® (生体質感造形®) Available from: <http://biotexture.com>
- 3) 杉本 真樹：医用画像と3Dプリンティングによる可視化可触化技術：生体質感造形(Bio-Texture Modeling). *INNERVISION* **29**: 52-4, 2014
- 4) 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 Biol* **21**: 23-6, 2014
- 5) 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
- 6) Sugimoto M, Yasuda H, Koda K, et al: Image overlay navigation by markerless surface registration in gastrointestinal, hepatobiliary and pancreatic surgery. *J Hepatobiliary Pancreat Sci* **17**: 629-36, 2010
- 7) Rosset A, Spadola L, Ratib O: OsiriX: an open-source software for navigating in multidimensional DICOM images. *J Digit Imaging* **17**: 205-16, 2004
- 8) Rosset C, Rosset A, Ratib O: General consumer communication tools for improved image management and communication in medicine. *J Digit Imaging* **18**: 270-9, 2005
- 9) Rosset A, Spadola L, Pyscher L, et al: Informatics in radiology (infoRAD): navigating the fifth dimension: innovative interface for multidimensional multimodality image navigation. *Radiographics* **26**: 299-308, 2006
- 10) 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. *日コンピュータ外会誌* **16**: 268-9, 2014
- 11) 杉本 真樹：OsiriXとiPadによる3D画像手術支援および3Dプリンターによる生体質感臓器立体モデル手術支援：シミュレーション, ナビゲーション, トレーニング. *関節外科* **33**: 208-11, 2014
- 12) 杉本 真樹, 志賀 淑之, 東 健：手術支援ロボット da Vinci TileProマルチコンソールナビゲーションと実体シミュレーション — OsiriXタッチパネルナビと生体質感臓器立体モデル. *臨泌* **67**: 353-61, 2013
- 13) 杉本 真樹：3Dプリンターによる実物大臓器立体モデルを用いた次世代手術ナビゲーション：生体質感造形Bio-Texture Modeling. *Surg Fronti* **20**: 458-46, 2013
- 14) 杉本 真樹, 東 健：生体質感造形Bio-Texture Modeling™とOsiriXを用いた臓器立体モデルによる手術ナビゲーションと触力覚手術シミュレーション. *消外* **35**: 101-8, 2012
- 15) 杉本 真樹, 東 健：3D画像ナビゲーションと臓器立体モデルによる手術支援・シミュレーション. *臨外* **67**: 1022-30, 2012
- 16) 杉本 真樹, 東 健：生体質感造形による立体複製臓器と光学的電磁力的センシングを統合した実時間的手術支援システムの開発. *日コンピュータ外会誌* **13**: 266-7, 2011