

3Dプリンタを用いた臓器造形とその応用に関する一考察

森 健策[†] 小田 昌宏^{††} 林 雄一郎[†]二村 幸孝[†] 中村 嘉彦[†] 北坂 孝幸^{†††}[†] 名古屋大学情報連携統括本部 〒464-8601 名古屋市千種区不老町^{††} 名古屋大学大学院情報科学研究科 〒464-8603 名古屋市千種区不老町^{†††} 愛知工業大学情報科学部 〒470-0392 愛知県豊田市八草町八千草 1247

E-mail: †kensaku@is.nagoya-u.ac.jp

あらまし 本稿では、医療分野、特に「医用画像」分野における3Dプリンタを用いた臓器モデル作成法について組織的に整理する。近年、デジタルデータから物体を造形可能な3Dプリンタが注目を集めている。しかしながら、3Dプリンタにより臓器モデルを作成する方法を解説した論文は少ない。そこで、本稿では、医用画像から3Dプリンタによって臓器モデルを造形する過程について説明する。また、種々の3Dプリンタの方式を概説するとともに、各プリンタの適用分野について整理する。3Dプリンタによる臓器モデル表現には様々な表現法がある。そこで、形状露出法、内部構造造形法、形状モールド法、メタアノテーション造形法といった3Dプリンタによる臓器モデル表現法について解説するとともに、その造形例を紹介する。

キーワード 3Dプリンタ、臓器モデル、セグメンテーション、立体造形

Study on organ model fabrication by 3D printer and its application

Kensaku MORI[†], Masahiro ODA^{††}, Yuichiro HAYASHI[†],Yukitaka NIMURA[†], Yoshihiko NAKAMURA[†], and Takayuki KITASAKA^{†††}[†] Information and Communications Headquarters, Nagoya University Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8601 Japan^{††} Graduate School of Information Science, Nagoya University Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603 Japan^{†††} 1247 Yachigusa, Yakusa cho, Toyota, Aichi, 470-0392 Japan

E-mail: †kensaku@is.nagoya-u.ac.jp

Abstract This paper describes a method for fabricating organ models by a 3D printer in the medical field, especially in medical imaging field. Nowadays 3D printing techniques, which can generate physical objects from digital data, are attracting a lot of attentions as world-changing devices. However few paper explains fabrication methods of organ models by 3D printer based on medical imaging processing. This paper explains the process for fabricating organ models. This paper introduces several fabrication mechanism of 3D printers and introduces application area of each fabrication process in the medical imaging field. Since there are several ways for expressing organ shapes by 3D printer, this paper shows four organ shape expression methods, (a) shape exposure method, (b) internal structure fabrication method, (c) shape mold method, and (d) meta-information annotation fabrication method.

Key words 3D printer, organ model, segmentation, model fabrication

1. はじめに

「ものづくり」の形を大きく変えるデバイスとして3Dプリンタが脚光を浴びている[1]。3Dプリンタ自体は決して新しい

技術ではないが、近年の急速な低価格化と3Dプリンタが生み出す「もの」への期待から世間の注目を集めることになっている。市中における3Dプリント出力ショップの登場、一般家電量販店における低価格3Dプリンタの販売、世界的インターネッ

ト通信販売会社における 3D プリンタの取り扱いなど、3D プリンタユーザが確実に増えてきているといえる。

医療分野においても、3D プリンタが注目を集めるようになった。これまでの医用画像の可視化手法としては、ボリュームレンダリング法などが利用されてきたが、3D プリンタにより造形された臓器モデルも医用画像の一種の可視化手法としてとらえることができる。なお、ここでは、「可視化」と記しているが「可物化」と記するのが適切かもしれない。医療分野における 3D プリンタの利活用法は様々な広がりを見せており、インプラント作成、診断支援、手術シミュレーション、手術ナビゲーション、インフォームドコンセント、医学看護学教育など多岐にわたる。3D プリンタを利用して肺結節を可物化し、それを発表ポスター上に貼り付けるなど新しい学術論文プレゼンテーション方法も生まれつつある [2]。

このように 3D プリンタの医療分野における利活用法は急速に広がりつつあるが、3D プリンタによる臓器モデルの造形方法、利用目的に応じた 3D プリンタの選択法、利用目的に応じた 3D プリンタによる臓器モデルの表現手法など、3D プリンタの医療応用方法に関して組織的にまとめた文献は少ないのが現状である。

そこで本稿では、医療分野、特に本研究会の名称である「医用画像」分野における 3D プリンタを用いた臓器モデル作成法について組織的に整理したい。特に、2008 年に 3D プリンタを導入した筆者らの研究室における経験を基に上記について論じたい。

2. 3D プリンタの方式

2.1 3D プリンタの概要

3D プリンタは基本的に物体の断面形状を順次積層することによって物体を造形する装置のことを指す。物体を削ることによって所望とする形状を得る多軸 NC 加工機も広義の意味では 3D プリンタに含まれるが、一般的には 3D プリンタといえば、積層型の造形装置を指すといってもよいであろう。

2.2 3D プリンタの方式

(狭義の意味での) 3D プリンタの方式は、(1) 光造形法、(2) 熱溶解積層法、(3) 粉体造形法、(4) 紫外線硬化樹脂噴射法に大別される。

2.2.1 光造形法

(1) の光造形法は、紫外線硬化樹脂が満たされた樹脂層にガルバノミラーで走査されたレーザー光を照射することで液体樹脂表面を硬化させ、物体の一断面を形成する。その後、造形台を少しだけ下げ、次の断面を形成する。この操作を繰り返すことによって、所望とする物体を造形する。光造形法は、比較的大きな物体の造形からマイクロマシンの造形まで幅広く利用できる技術である。東京大学の生田らは、光造形法を用いて電子顕微鏡でしか観察できないマイクロマシンロボットを製作している [3]。

光造形法に関する研究は、1980 年前後から行われている。この光造形法の発明には、名古屋の研究者が深くかかわっている。詳しい経緯については文献 [4] を参照することをお勧めする。ま

た、公開特許公報 [5] には、その時の発明内容が掲載されている。残念ながら、この特許出願は審査請求がなされていないようである。

2.2.2 熱溶解積層法

溶解されたプラスチック樹脂を物体断面形状に合わせて噴射し、積層断面を順次重ねてゆくことにより物体形状を造形するものである。屋根の庇のように宙に浮いた部分を造形する場合には、サポート材と呼ばれる樹脂を噴射することで該当箇所を支える部材を造形し、その上に該当部位を造形する。造形終了後に、サポート材（支持部材）を溶かすことで物体を完成させる。サポート材には強アルカリ溶液（水酸化ナトリウム水溶液が一般的に用いられる）に溶解するプラスチック材料が用いられる。造形された物体を強アルカリ溶液に浸すことによってサポート材が除去されることになる。また、サポート材溶解を促進するために、保温機能を備えた比較的高出力の超音波洗浄機なども用いられる。

2.2.3 粉体造形法

石膏やプラスチック粉などの粉体を、糊（バインダー）、あるいは、レーザー光による熱によって接着し固めることによって、物体形状を造形する手法である。石膏を利用したプリンタの場合、石膏の粉体が蓄えられた槽から造形台のある槽（造形槽）へ断面一層分の石膏が送られる。その後、物体断面形状に合わせてインクジェットプリンタのヘッドからバインダーが噴射され、一断面が形成される。この動作が終了したら、造形台を下げ、粉体が蓄えられた槽から造形槽へ再度断面一層分の石膏が送られる。そして、バインダーをヘッドから噴射することで次の断面の形状を造形する。この作業を繰り返すことで物体を造形する。造形終了後には、粉体に埋もれた造形物体を造形槽から取り出すことになる。粉体造形において庇のような部分を造形する場合、固められていない粉体がサポート材の役割を果たすため、前述の熱溶解積層法や次に示す紫外線硬化樹脂噴射法のように特別なサポート材を必要としない。そのため、比較的成本パフォーマンスのよいプリンタともいえる。

石膏を利用した粉体造形による 3D プリンタの場合、多色化、あるいは、フルカラー化も容易である。多色化を実現するためには、断面形成時にバインダーを噴射する前後にカラーインクを噴射する方法、あらかじめ着色された複数色のバインダーを利用する方法などがある。マスコミでも取り上げられる「フィギュア」製作の 3D プリンタでは、フルカラー造形が可能な粉体造形法を利用した 3D プリンタが利用されている。

2.2.4 紫外線硬化樹脂噴射法

紫外線を照射すると硬化する液体状の紫外線硬化樹脂を物体断面形状に合わせてインクジェットヘッドから噴射し、一断面の造形が終了したならば造形台を一段下げ、次の断面形状の造形を行う手法である。造形時には、UV ランプにより紫外線を照射し硬化させる処理が同時並行的に行われる。紫外線硬化樹脂噴射法を利用した 3D プリンタにおいてヘッドが明るく光っているのは、紫外線光を利用した光重合による硬化促進のためである。熱溶解積層法と同様に、庇のような空中に浮いているような部分を造形する場合に、後処理によって除去可能な紫外

線硬化樹脂（サポート材）を噴射する。物体となる部分は、完全に硬化する紫外線硬化樹脂（マテリアル材）が利用され、この材料は後処理において除去されることはない。造形終了後には、高圧水ジェットによるサポート材除去、水に浸すことによるサポート材除去などが行われる。

紫外線硬化樹脂噴射法では、(半)透明のマテリアル材を利用できることが多く、内部構造などを再現した物体造形も可能である。

3. 3D プリンタによる臓器モデル造形処理

3.1 臓器モデル造形処理概要

医用画像に基づいた 3D プリンタによる臓器モデル造形をする場合には、(1) 対象とする臓器のセグメンテーション、(2) セグメンテーション結果に基づいた臓器形状を表す三角形パッチ生成、(3) 三角形パッチの STL 形式への変換、(4) 3D プリンタによる出力、(5) サポート材除去ならびに表面研磨などの後処理、の過程を経る。

3.2 セグメンテーション

CT 画像や MRI 画像などの医用画像から臓器領域を抽出する処理である。領域拡張法、レベルセット法、グラフカット法 [6] などのセグメンテーション処理を利用して臓器領域を抽出する。単純なしきい値処理によって臓器領域を取り出してもよい。脳、気管支、腹部実質臓器については、いくつかの自動セグメンテーション手法が報告されており [7]~[10]、これらの手法を利用して臓器領域のセグメンテーション処理を行ってもよい。

なお、ボリュームレンダリング手法を利用した臓器形状観察中に、当該臓器を描出するのに使われた伝達関数（たとえば CT 値と不透明度との関係を表す関数。医用画像処理ソフトウェアでは Opacity Curve などとも呼ばれる）と観察 VOI を解析し、当該領域のセグメンテーションを行うことも可能である。もっとも単純な方法としては、不透明度が 0 より大きな画素を臓器領域として抽出すればよい。この場合、コンピュータの画面上で臓器形状が観察できるように伝達関数を調整したのち、ボタンを押すことで臓器領域がセグメンテーションされることになる（図 1）。

3.3 三角形パッチへの変換

3D プリンタにおいて一般的に取扱い可能なデータは、3 次元デジタル画像ではなく幾何学的 Primitive によって構成されたデータである。前述の臓器セグメンテーション結果は、3 次元デジタル画像（濃淡画像ではなく各画像が臓器のラベルを表すラベル画像。一番単純な場合は、臓器領域が 1、背景領域が 0）であるため、幾何学的パッチの集合へと変換することが必要となる。そのために、Marching Cubes 法 [11] を利用して、ラベル画像を三角形パッチの集合へと変換する。

3.4 STL ファイルへの変換

前ステップで得られた三角形パッチの集合を、STL 形式のファイルとして書き出す。STL ファイルは、CAD (Computer Aided Design) の世界で一般的に利用されている形式である。STL ファイル形式では、三角形パッチの法線ベクトル、三角形パッチの頂点座標列が定められたタグとともにアスキー形式で

出力される（ファイルサイズを縮小するためにバイナリ形式も用意されている）。そこで、前述のステップで得られた三角形パッチの法線、頂点座標をファイルへと出力する。なお、この段階で、STL ファイルを一旦 CAD ソフトに読み込み、形状編集を行うことも行われる。

3.5 3D プリンタによる造形

3D プリンタに付属のドライバソフトを利用して、前ステップで作成された STL ファイルをプリンタに送信する。大抵のドライバソフトでは、物体形状のプレビュー、造形台（造形槽）における物体配置、物体サイズの拡大縮小、造形時間見積、材料使用量見積が可能であり、これらの情報を参考にしながら、物体の出力サイズ、出力姿勢（縦向きにする、横向きにするだけでも、出力時間、材料使用量が変化する）などを決定し、3D プリンタへと出力する。

3.6 後処理

3D プリンタによる出力が終了したならば、物体を 3D プリンタから取り出し、サポート材除去などの後処理を行う。粉体造形法の場合には、造形槽の中から物体を取り出す作業が必要となる。サポート材除去は、高圧空気（粉体造形）、高圧水ジェット（紫外線硬化樹脂噴射法）、水（水溶性サポート材を利用した紫外線硬化樹脂噴射法）、強アルカリ溶液（熱溶解積層法）などが利用される。また、透明材質を利用可能な紫外線硬化樹脂噴射法では、その透明感を増すために、サンドペーパーあるいは研磨剤と研磨機を利用した研磨処理、ウレタン透明塗料塗布処理などが行われる。

4. 3D プリンタによる臓器モデル造形法

4.1 臓器モデル造形法概要

3D プリンタによる臓器モデル造形法としては、(a) 臓器形状をそのままの形で造形する方法、(b) 樹脂によって作られた箱の中に臓器モデルを造形する方法、の 2 つが考えられる。ここでは、前者を「形状露出法」(SEM: Shape Exposure Method)、後者を「形状モールド法」(SMM: Shape Mold Method) と呼ぶことにする。さらに、(半)透明樹脂を採用した 3D プリンタの場合、臓器内部の構造を再現することもできる。そこで、この方法を内部構造造形法 (ISF: Internal Structure Fabrication) と呼ぶことにする。また、臓器内部にメタアノテーションデータを再現することも可能であり、これをメタアノテーション造形法 (MAF: Meta-information Annotation Fabrication) と呼ぶ。以下、各形状造形法について概説する。

4.2 形状露出法

臓器形状をそのままの形で造形する手法である。3D プリンタを用いた最も一般的な臓器造形法であるといえる。臓器外形が再現されているため、臓器形状を手にとって確かめたい場合に役立つ表現法である。図 2 に形状露出法で造形した腎臓モデルを示す。

4.3 内部構造造形法

(半)透明材料が利用可能な 3D プリンタを利用する場合には、形状露出法と併用して内部構造造形法が利用可能となる。例えば、葉間胸膜を再現した肺モデルや、内部の血管系などを

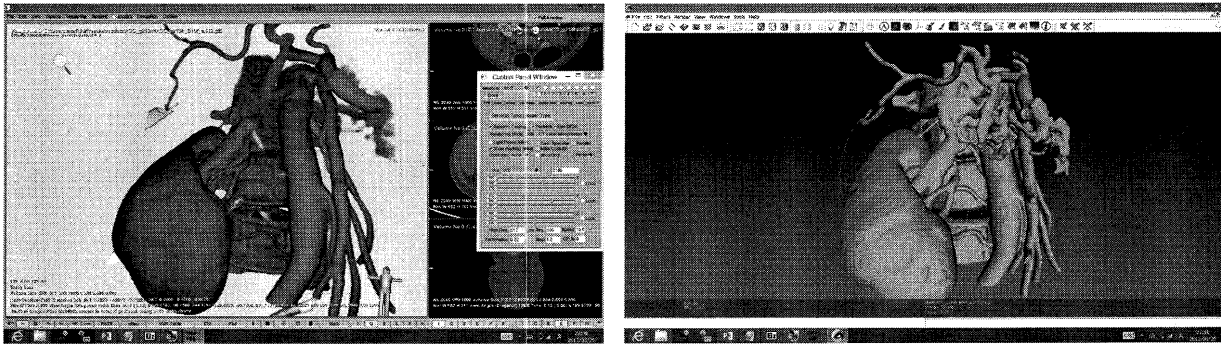


図1 ボリュームレンダリングによる臓器形状観察（左）とその際の不透明度設定を利用して STL ファイルを生成した結果（右）

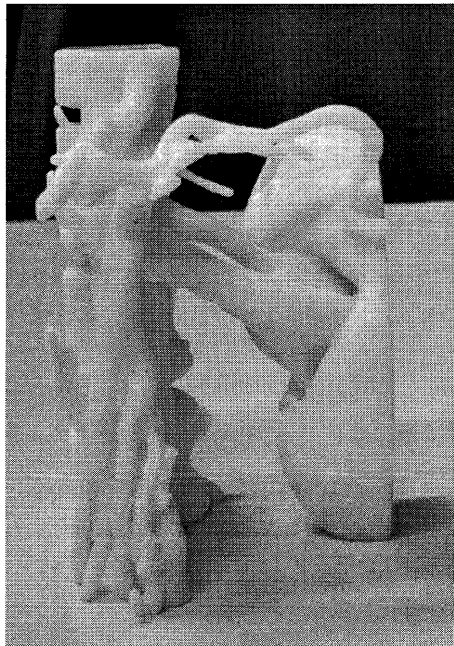


図2 形状露出法により造形した腎臓モデル

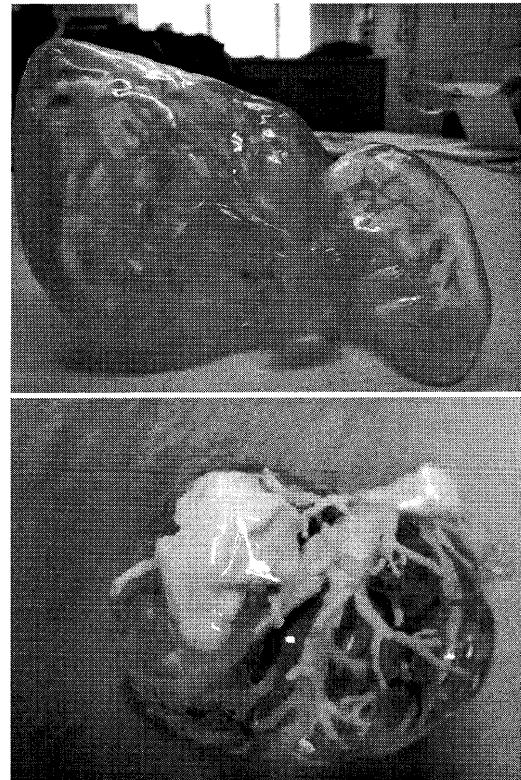


図3 内部構造造形法により造形した肝臓モデル. 肝臓内の静脈・門脈を造形している. 下図では門脈系を着色している.

再現した肝臓モデルを作成することができる。

内部構造造形法では、内部構造の部分（実質臓器内の血管など）を臓器領域とするのではなく、背景領域としてセグメンテーションする。また、内部構造物を3次元デジタル画像の位相幾何学における空洞領域となるようにセグメンテーション結果を加工する。これによって、3Dプリンタによる造形時には、この背景領域にサポート材が残る。サポート材をうまく活用することで臓器内部構造を造形することが可能となる。サポート材を単なるサポート材として利用するのではなく、意図的に表現法の一つとして利用することで、3Dプリンタの表現力をさらに向上させることができる。

なお、空洞領域とするのではなく、ほら穴領域としてセグメンテーションし3Dプリンタで出力したのち超音波洗浄機を利用して長時間サポート材除去を行うと、サポート材が除去された形で内部構造を造形可能となる。その後、ほら穴領域に染料を流し込むと、内部構造を着色可能となる（便宜的に「色付内部構造造形法 (CISF; Colored Internal Structure Fabrication)」と呼ぶことにする）。これは、例えば肝臓内部の脈管系を着色

することで、肝臓手術の実体ナビゲーションを行うことが可能となる。なお、半透明材料を取り扱うことのできる市販3Dプリンタの中には、複数のマテリアル材を利用できるものもあり、内部構造造形を簡単に行うことができる。

内部構造造形法によって造形された肝臓モデル、ならびに、肺モデルを、図3、4に示す。

4.4 形状モールド法

例えば、血管構造を3Dプリンタで造形する場合、形状露出法によって直接的に血管モデルを造形することも可能であるが、細い血管まで構築する場合、破損などが起きやすい（図5）。後処理の過程において細い血管が破損する可能性もある。そこで、内部構造造形法を少し変更し、マテリアル材が充てんされた直方体の中にサポート材を用いて臓器形状を再現するのが形状モールド法である。すなわち、形状露出法において、臓器領域

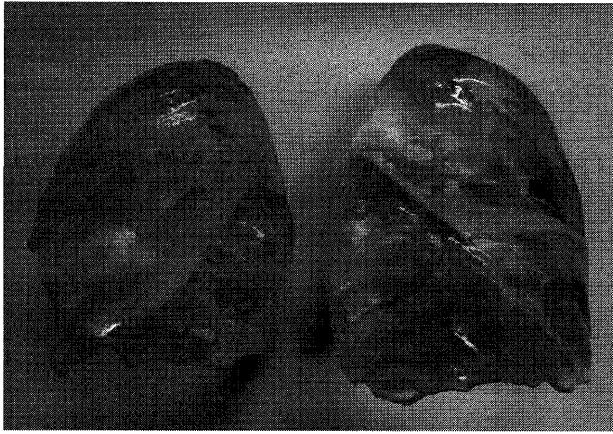


図4 内部構造造形法により造形した肺モデル。葉間胸膜が肺内部に再現されている。

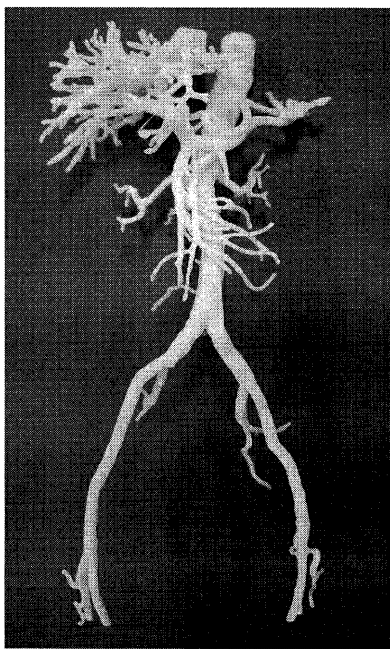


図5 微細血管構造を形状露出法により再現した例

と背景領域を反転し、造形したものが形状モールド法であるともいえる。直方体樹脂の内部に臓器形状が再現されるため、血管の構造を触って確認するといったことはできなくなるが取り扱いが非常に容易となる(図6)。

4.5 メタアノテーション造形法

臓器モデルの造形において、解剖学的名称などの表示(アノテーション)が必要となる場合がある。その場合には、アノテーションの文字データもSTLデータ化し、3Dプリンタでの臓器モデルの造形において文字も同時に造形することにより、臓器モデルの了解性を高めることができる。形状露出法によって文字データを立体物として造形することや、形状モールド法において、文字情報をサポート材によって表示することも可能である。これらの手法をメタアノテーション造形法と呼ぶことにする。図6に、形状モールド法とメタアノテーション造形法を併用した臓器モデルを示す。

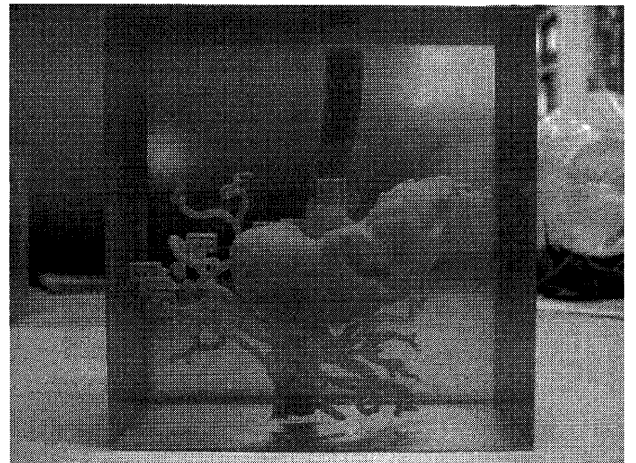


図6 形状モールド法とメタアノテーション造形法による造形結果。腹部動脈の解剖学的名称、リンパ節検出結果のTP/FPの情報も造形している。

5. 医用画像と3Dプリンタ

第2章では、種々の3Dプリンタの造形方式を紹介したが、医用画像応用を考えた場合、それぞれのプリンタに適した分野がある。ここでは、適した分野について医用画像応用(あるいはMICCAI分野での応用)の側面から簡単に整理したい。

5.1 光造形法

光造形法は微細な造形を得意として、高精度な造形精度、あるいは、マイクロ構造などの再現が必要な場合に適する。透明な材質により臓器モデルを造形可能であり、医用画像から取り出された血管領域に基づいたカテーテル挿入練習シミュレータの製作などに向く。なお、装置の価格は、他の方式と比較して高価である。

5.2 熱溶解積層法

熱溶解積層法の方法を利用した3Dプリンタには、比較的安価なものが数多くあり、近年の3Dプリンタブームの中で話題に上る方式である。不透明なプラスチック素材によって臓器モデルが形成できることから、形状露出法によって臓器モデルを造形するのに向いている。また、強アルカリ溶液によってサポート材を除去できるため、細かな分岐パターンを持つ血管モデルを形状露出法によって造形する目的にも向いている。なお、

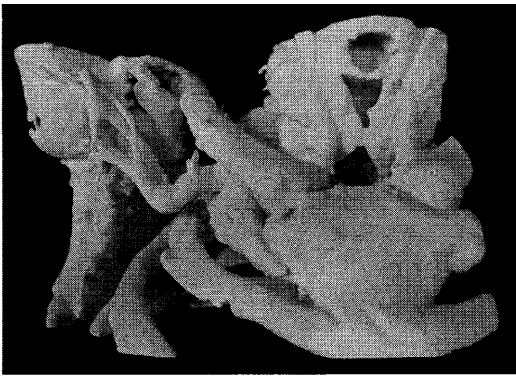


図7 粉体法による造形例

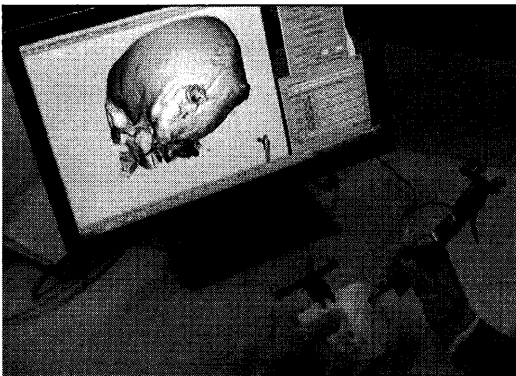


図8 頭蓋モデルを用いたアップデート型ナビゲーションの評価実験

熱溶解積層法のプリンタでは、造形時の庫内温度管理が重要であり、導入時には注意が必要である。

5.3 粉体造形法

粉体造形法は材料として石膏を用いるため、材料費が比較的安く、大型の臓器モデルの造形（等倍での臓器モデル造形）に適している（図7）。また、ドリルなどで容易に切削・切断加工が可能であり、脳神経外科領域、形成外科領域、整形外科領域における骨切削切断シミュレーションに利用することもできる。文献[12]では、3D Systems社のZ Printer 310によって造形された頭蓋モデルを利用し、骨切除に対応したアップデート型ナビゲーションの評価を行っている。その際の様子を図8に示す。

また、フルカラー造形可能な3Dプリンタも市販されており、動脈・静脈を色分けした臓器モデルの作成に利用可能である。

5.4 紫外線硬化樹脂噴射法

紫外線硬化樹脂噴射法では、透明マテリアル材（完全に透明というわけではなく、若干色がついている）の利用が可能であり、臓器内部の脈管を再現した状態での臓器モデルの造形を行うことができる（内部構造造形法）。例えば、肝臓内部の静脈・門脈を再現した肝臓モデルを造形する用途に利用可能である。

さらに、やわらかい樹脂を利用可能な紫外線硬化樹脂噴射法による3Dプリンタも存在し、実質臓器の切除シミュレーションに利用可能である。

6. むすび

本稿では、医療分野、特に「医用画像」分野における3Dプ

リントを用いた臓器モデル作成法について組織的に整理した。医用画像から3Dプリンタによって、臓器モデルを造形する過程について述べた。種々の3Dプリンタの方式を概説するとともに、各プリンタの適用分野について述べた。3Dプリンタによる臓器モデルには様々な表現法があり、形状露出法、内部構造造形法、形状モールド法、メタアノテーション造形法について記すとともに、その造形例・応用例について紹介した。今後、医用画像分野における3Dプリンタの利活用法の開拓とその評価法の開発が望まれる。

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省・日本学術振興会科学研究費補助金(21103001, 21103006, 25242047)、栢森情報科学振興財団研究助成、国立がんセンターがん研究開発費、日本学術振興会二国間交流事業(共同研究)による。

文 献

- [1] クリス・アンダーソン(著)、関美和(訳)、“MAKERS – 21世紀の産業革命が始まる,” NHK出版, 2012.
- [2] K. Sakai, K. Fujimoto, T. Kubo, R. Sakamoto, H. Sekiguchi, K. Togashi, “Which Nodule Does Shake Your Confidence?: 312 Pulmonary Nodules Gallery from a Reading Test by Eleven Radiologists,” RSNA(Radiological Society of North America) 2013 Program in Brief, LL-CHE3094, p.268, 2013.
- [3] 生田幸士, 磯崎賢, 角口健一, 久恵一宏, 嶋田直矢, 池内真志, “光駆動ナノマシンのためのハイブリッド光造形法の開発,” 日本コンピュータ外科学会誌, vol.11, no.3, pp.250–251, 2009.
- [4] 北口秀美, “光造形法の発明,” <http://www.thagiwara.jp/rp/rp-history/kitaguchi.html>
- [5] 日本国公開特許公報 特開昭 56–14478
- [6] Y. Boykov, V. Kolmogorov, “An experimental coparison of min-cut/max-flow algorithms for energy minimization in vision,” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.26, no.9, pp.1124–1137, 2004.
- [7] T. Kitasaka, K. Mori, J. Hasegawa, J. Toriwaki, “A Method for Extraction of Bronchus Regions from 3D Chest X-ray Images by Analyzing Structural Features of the Bronchus,” Forma, vol.17, pp.321–338, 2002.
- [8] A. Shimizu, R. Ohno, T. Ikegami, H. Kobatake, S. Nawano, D. Smutek, “Segmentation of multiple organs in non-contrast 3D abdominal CT images,” International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, vol.2, no.3–4, pp.135–142, 2007.
- [9] C. Chu, M. Oda, T. Kitasaka, K. Misawa, M. Fujiwara, Y. Hayashi, Y. Nimura, D. Rueckert, K. Mori, “Multi-organ Segmentation Based on Spatially-Divided Probabilistic Atlas from 3D Abdominal CT Images,” International Conference on Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention, LNCS, vol.8150, pp.165–172, 2013.
- [10] R. Wolz, C. Chu, K. Misawa, M. Fujiwara, K. Mori, D. Rueckert, “Automated Abdominal Multi-Organ Segmentation With Subject-Specific Atlas Generation,” IEEE Trans Med Imaging, vol.32, no.9, pp.1723–1730, 2013.
- [11] W. E. Lorensen, H. E. Cline, “Marching Cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm,” Proceeding of SIGGRAPH '87, pp.163–169, 1987.
- [12] Y. Hayashi, M. Fujii, Y. Kajita, T. Wakabayashi, K. Mori, “Skull Base Surgery Navigation System Based on Updating Preoperative Images Using Positional Information of Surgical Tools,” The MIDAS Journal -Systems and Architectures for Computer Assisted Interventions 2013, pp.1–7, 2013.