

3Dプリンタの造形技術と医療分野への応用

岩手県立大学 ソフトウェア情報学部／土井章男

本稿では、医療分野で使用される3次元画像から人体モデルへの変換技術、および3Dプリンタを用いた造形技術について概説する。さらに、X線CT装置やMRI装置から得られた医用3次元画像から、大脳、皮質、筋肉、骨の3次元形状モデルを作成し、3Dプリンタで造形した事例を紹介する。

1

はじめに

製造業やデザイン分野において、複雑な表面形状、複数の部品が複雑に組み合わさった機構部品、試作段階の最終的な形状などの確認は、図面やモニター上の表示だけでは不十分な場合がある。これらの確認作業を迅速に行うために、ラピッドプロトタイピング(RP: Rapid Prototyping)と呼ばれる成型技法が従来から広く利用されてきた。図面やモニター上での表示に比べて、実寸大の造形物は、完全な3次元立体表現のため、詳細なチェックが容易になり、製品サイクルの短縮や初期段階での不具合の発見、製品自体の改良にも繋がる。

特に自動車産業では、設計した車のボディに対して、実寸大や縮小したクレイモデル(粘土による造形)による造形が行われてきた。しかしながら、十分な精度を保持しながら作成する必要があるため、膨大な時間と莫大な費用を要していた。このようなクレイモデル製作と比較して、3Dプリンタによる造形は、元の形状モデルを正確に再現可能なため、製品完成までの期間短縮や製作費用の削

減に大きな効果を発揮する。クレイモデルのほかにも設計段階で、各部品を3Dプリンタで作成し、開発チーム間、社内での評価に用いたり、顧客への仕様確認や宣伝にも使用可能である。

主にRP技術は製造業を中心に発展してきたが、診断や治療支援のために医療分野でもRP技術が非常に注目されている。CAD(Computer Aided Design)による部品や製品は、3次元形状情報(点、線、面の幾何情報や連結情報)を正確に保持しているため、3Dプリンタで実物モデルを容易に生成できる。しかしながら、CT(Computed Tomography)やMRI(Magnetic Resonance Imaging)から、表皮、筋肉、内臓、血管、骨などの人体モデルを3Dプリンタで作成する場合、人体の断層画像群(2次元スライス画像)から、ポリゴン(多角形)で構成される3次元形状モデルに変換する必要がある。

また、その断面画像群(2次元スライス画像)は、高さ方向に十分密に計測することが必要である。この場合、この3次元空間内における画素は、ボクセルと呼ばれ、体積をもった立方体として扱われる(図1)。各ボクセルには、表皮、筋肉、内臓、血管、骨などの情報を含んでいるが、これらの情

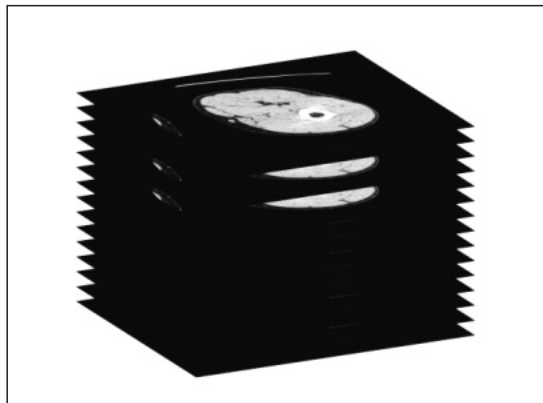


図1 スライス画像

報は、格子空間における輝度値として保持している。この輝度値は濃淡表示にも使用され、この値が大きいほど明るく表示される(図2)。

この輝度値情報を3Dプリンタが扱えるポリゴンデータに変換するために、主に等値面が使用される。各格子点の数値を関数 $F(x, y, z)$ (x, y, z はその格子の位置情報を表す)と想定した場合、等値面は定数 C を用いて、 $F(x, y, z) = C$ で定義され、天気図などで用いられる等高線を3次元に

拡張したものと考えるとわかり易い。

ここでは、等値面の輝度値である定数 C を指定することで、その定数をもつ連続した平面が定義可能となる。等値面の効率的な生成には、マーチングキューブ法¹⁾、4面体分割法^{2, 3)}が用いられる。

マーチングキューブ法や4面体分割法により生成されるポリゴン数は、DICOM画像の解像度を変更することにより、大きく変化する。一般に測定したDICOM画像から等値面生成を行った場合、数百万から数千万のポリゴン数になるため、通常の3Dプリンタで扱うことが困難である。そのため、解像度を下げてポリゴン化を行い、3Dプリンタの造形可能な範囲のポリゴン数で造形することが多い。図3(上)は輝度値の高い領域(皮質骨)から等値面生成した例であり、図3(下)は等値面生成時に元の画像の解像度を下げて、同じ輝度値で等値面生成した例である。元の画像の解像度を2分の1程度に落とすことで、ポリゴン数が約8分の1に減少した滑らかな形状が得られる。解像度を下げることで、等値面のポリゴン数は減少し、表面形状はボケてくる。図3の等値面生成では、マーチングキューブ法を用いている。

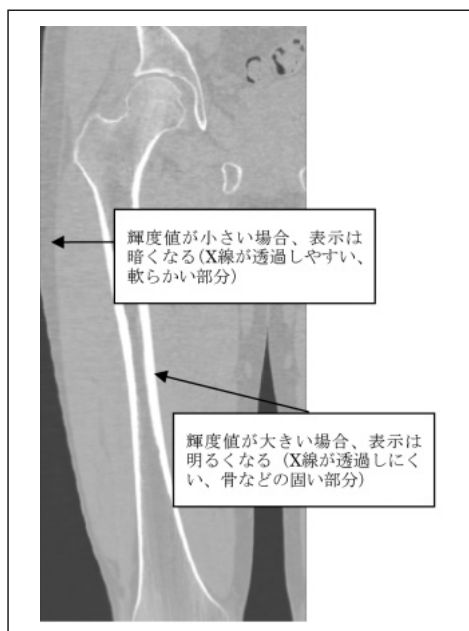


図2 輝度値による画素の明暗

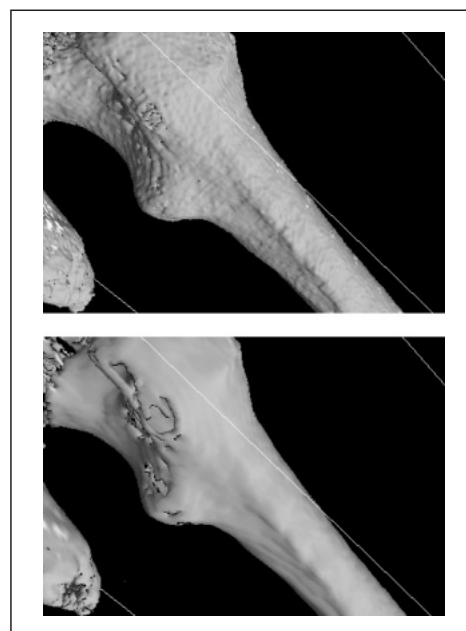


図3 骨領域(輝度値の大きな領域)の抽出と画像解像度との関係

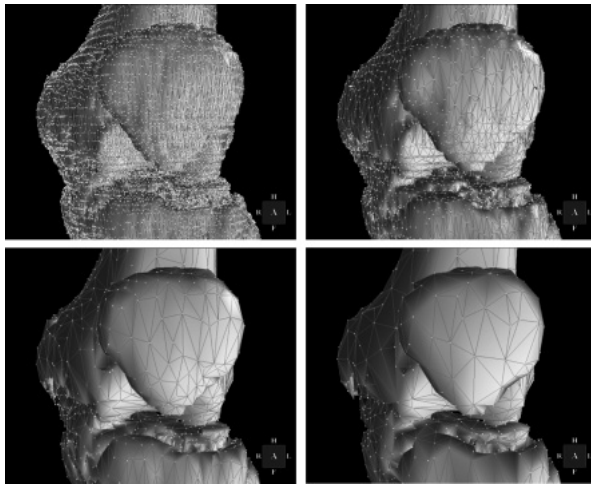


図4 ポリゴンデータの形状特徴を保持しながらのデータ削減
 ポリゴン数：
 左上：400,045 右上：100,212
 左下：64,845 右下：15,212

等値面データのポリゴン数が膨大な場合、形状特徴を保持しながら、3角形データを削減するアプローチも使用される。たとえば、削減する前の形状との平均二乗偏差(RMS:Root Mean Square)を最小にすることで、全体の特徴を崩さずに3角形データを削減するデータ削減方式⁵⁾が利用されている。図4は、等値面のポリゴンデータに対して、その形状特徴を保持しながらのデータ削減した例である。

2

3Dプリンタの積層原理と造形モデルの作成方法

2.1 3Dプリンタの積層原理⁴⁾

3Dプリンタの造形原理は、任意の3次元形状を高さ方向に一定間隔でスライスして得られる2次元輪郭(断面)を、順次、接合することで、3次元形状を復元する。この造形方式は「積層造形法」と呼ばれる。さらに、使用する材料により大別すると、加熱して溶かした樹脂を積層する熱溶解積層方式、光に当たると硬化する樹脂を使用する光造形方式、粉末樹脂を積み重ね焼結させる粉末造形方式などがある。

熱溶解積層方式では、加熱して、溶かした樹脂を微細なノズルから出しながら積層することで、3次元形状を造形する。本方式では、造形と同時にサポート材を作成することで、積層途中の造形物をサポートする。造形終了後、サポート材を手

動で、あるいは、特殊な溶剤を用いて、除去する。一般に複雑な造形物になるほど、サポート材の除去は手間がかかる。使用される樹脂の材料には、ABS樹脂(アクリロニトリル(Acrylonitrile)、ブタジエン(Butadiene)、スチレン(Styrene)共重合合成樹脂の総称)やPLA(ポリ乳酸(poly(lactic acid)))が使用されている。

光造形方式は、光に当たると硬化する特殊な樹脂(たとえば、アクリル系紫外線硬化型樹脂)に紫外線などのレーザーを照射して、造形を行う。光造形方式は、光造形機として、早い段階から製品化されたが、造形部分以外の付属設備が大がかりになるため、現状の3Dプリンタに比較して、高価格である。

粉末造形方式は、粉末樹脂を積み重ね、燃焼または溶融させながら、造形する方式(粉末焼結法)と、樹脂粉末を使用して、ノズルからの接着剤により固めて積層する方式(粉末接着法)があり、樹脂粉末のテーブルを下降させながら、次のスライス面と接合させる。粉末造形方式では、周囲の粉末がサポート材の役割を果たすため、サポート材を必要としない。振るい落とされた粉末は、再度、造形に使用されるため、経済的である。粉末焼結法は、樹脂粉末をレーザーにより溶融焼結させながら造形するため、多種の材料を使うことが可能となっている。

昨今の大きな変革は、低価格な3Dプリンタの登場により、個人レベルで使用可能となってきた



図5 EBW装置 (Arcam社、東北大学金属材料研究所)

点である。特に樹脂を熱で融解させ、積層させる造形方式は、他の造形方式に比較して、装置構成や基本部品が非常に簡単になる。そのため、ユーザ数や販売数増加、造形部品の大量生産、複数の製造メーカ参画による競争激化等により、販売数の増加と低価格化が現状も進んでいる。

金属造形を目的とした3Dプリンタには、樹脂粉末ではなく、金属粉末を真空状態で融解させながら積層造形するEBM (Electric Beam Melting) 装置がある(図5)。その原理は粉末焼結法であり、鋳型を使用せずに正確かつ直接に造形可能である。

EBM装置の構成は、電子ビームガン、チャンバー(造形室)、金属パウダータンク等からなる。電子ビームガンから放射される電子ビームにより、チャンバー内の金属パウダーが、一層ごとに溶解され、各層が積層されて金属部品が造形される。造形に使用する金属粉末は、チタンやコバルトを含んだ合金も可能であり、主に軍事産業や宇宙開発で使用されていたが、今後、一般の製造業でも主流になってくると思われる。

2.2 医用画像における領域抽出

コンピュータ断層撮影(Computed Tomography : CT)、核磁気共鳴画像法(Magnetic Resonance Imaging : MRI)、ポジトロン断層法(Positron Emission Tomography : PET)、光干渉断層計

(Optical Coherence Tomography : OCT)等の計測結果は、皮膚、筋肉、脂肪、腫瘍、血管、骨などの情報を含んだボクセル情報であり、抽出したい領域のみを特定することを画像処理分野ではセグメンテーションと呼ぶ。

一般に抽出したい領域が、他の領域と比較して明確な輝度値の差がある場合は、2値化処理だけで分離が可能である。抽出する領域の輝度値が他の領域の輝度値と類似している場合(表面形状が明確でない場合)より高度な対象領域の抽出作業が必要となる。特に、1)対象とする領域の輝度値が他の領域の輝度値と類似している、2)対象とする領域の輝度値が徐々に変化する、3)使用する3次元画像にノイズや誤差が含まれている場合、一般にセグメンテーションは困難で時間を要する作業となる。セグメンテーション手法には、対話形式、画像処理フィルタ、変形モデル、統計的手法など多くのアプローチ、また、これらの手法を組み合わせた方式などが提案されているが、その詳細は参考文献6、7)を参照していただきたい。

さらに3Dプリンタでは積層方式で造形を行うため、3次元形状モデルのポリゴンデータを任意の水平面で切断した際、その切断線が重複せず、かつ、その方向が同一であることが必要である。医用画像から単純に等値面生成したポリゴンデータでは、上記の必要条件を満たしていない場合が多く、3Dプリンタで造形できないケースが生じる。この問題を解決するためには、前工程でゴミ除去、平滑化処理などを行い、上記の必要条件を満たす矛盾のない(整合性のとれた)ポリゴンデータを生成する必要がある。

2.3 等値面生成と整形作業による3Dプリンタデータの生成

図6は、骨境界の輝度値に近い定数Cを指定して、等値面生成した例である。図6の右端のダイアログには、生成された等値面の固まりを表すグループとそのグループ内部のポリゴン数を表示している。一般に空間に浮かんだノイズは、ポリゴン数が少ないグループに分類され、そのグループを除去することで、ノイズや不必要な部分を取り去ることが可能である。図6は等値面生成後のポ

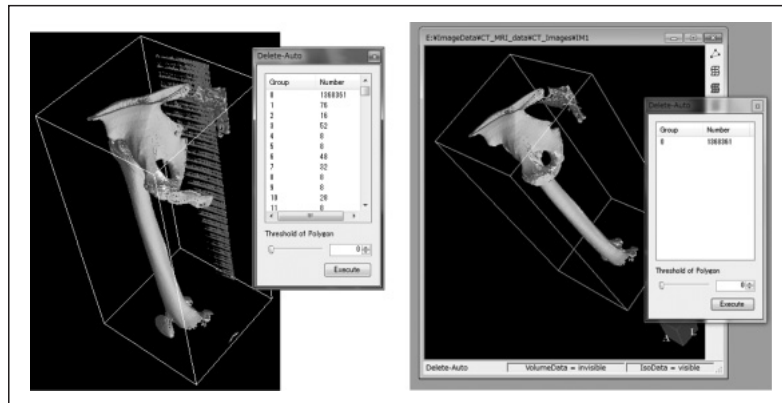


図6 等値面生成後のポリゴンデータとノイズや不必要な部分の除去

リゴンデータとノイズや不必要な部分を除去したポリゴンデータである。Delete-Autoのダイアログは、各グループごとにポリゴン数が表示されており、最終的に一番大きなグループのみを残した例である。

3Dプリンタへの入力となる3次元形状の記述フォーマットは、業界標準であるSTL (STereo Lithography)、VRML (Virtual Reality Modeling Language)、PLY (Stanford Triangle Format) 等が使用されている。特にSTLファイルフォーマットは、単純な3角形集合の記述であり、業界標準として、広く使用されている。STLフォーマットには、ASCII型(文字型)とバイナリー型の2通りのフォーマットが存在している。

3 3Dプリンタによる造形例

今回、使用した3Dプリンタは、積層方式の異なる、Stratsys社、3D Systems社、オープンキューブ社の3Dプリンタである。Stratsys社の3DプリンタであるDimensionシリーズは、熱溶解積層方式を採用している⁸⁾。3D Systems社は2011年にZ Corporation社を買収したが、そのZ Corporation社が製造販売していたZprinter 250、350、450、650は、粉末造形方式を採用している。本装置は、他の方式に比べて造形時間が速いという特徴があり、積み重ねた領域に対する色づけやテクスチャマッピングが可能である⁹⁾。

Stratsys社に買収されたObjet社のConnex、Edenシリーズでは、マルチマテリアル対応(たとえば、2種類の物性の異なる樹脂を同時造形)やシースルーモデルが造形可能である。また、UV硬化性樹脂を吹き付けながら積層するため、非常に精細な造形が可能となっている⁸⁾。

オープンキューブ社は、日本製3DプリンタSCOOVO C170を製造販売している。SCOOVO C170の造形方式は熱溶解積層方式を採用しており、造形素材にはPLAを使用している。

図7は、脳のMRI画像(T2強調画像)から、大脳部分と表皮を個別に作成し、両モデルを重ね合わせ、AStratsys社Dimensionシリーズにより、造形した例である。大脳部分は領域拡張法、表皮部分は2値化処理で抽出している。

図8は、Z450により造形した例である。大脳部分を分かりやすく色分けした造形モデル(左)と、切断面に腫瘍の断面画像(テクスチャ)を貼り付けて造形した事例である。

図9は、領域ごとに使用する材質を変更して、Objet Eden 500により造形した例である。図9(左)では、大脳部分とそれ以外で材質を変更している。図9(右)は、下肢CT画像から筋肉と骨を抽出し、異なった材質でそれぞれ造形している。

図10は、オープンキューブ社のSCOOVO C170による造形例である¹⁰⁾。造形には、約6時間を要した。図7～10の造形モデル作成には、(株)アイプランツ・システムズの3次元画像可視化システムであるVolume Extractor¹¹⁾を使用した。

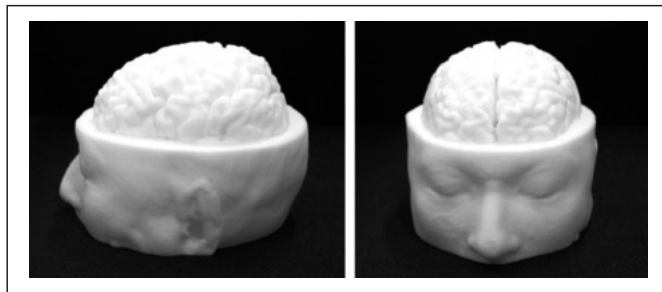


図7 熱溶解積層方式による出力例
—ABS樹脂による造形例

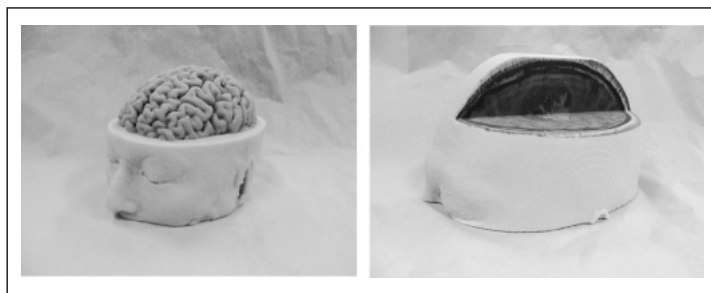


図8 粉末造形方式による出力例
左：大脳部分と表皮部分の色変更
右：断面に腫瘍部分の画像を
テクスチャマッピングを適用

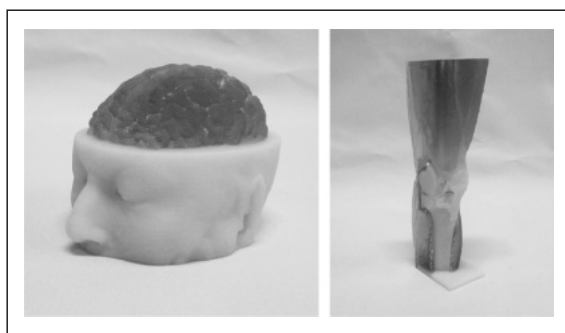


図9 2種類の材質による造形例
左：大脳部分は柔らかいゴム質、それ以外は
硬いプラスチックで造形
右：膝の筋肉部分は柔らかいゴム質、
骨は硬いプラスチックで造形

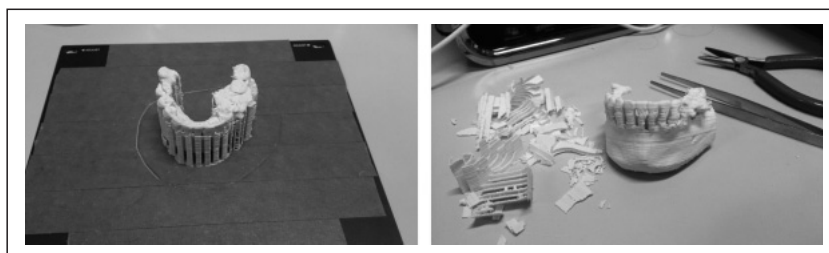


図10 歯の造形モデル
左：サポート除去前
右：サポート除去後

4

おわりに

本稿では、医用画像を対象とした、ラピッドプロトタイプング技術と3Dプリンタによる造形方式について述べた。3Dプリンタの低価格化によ

り、大手企業での利用から個人による利用が可能となり、様々な利用方法が試みられている。実際、造形された実体モデルは、視覚や触覚で確認でき、同時に空間的な位置関係もわかりやすくなる。そのため、診断支援、術前計画支援、手術シミュレーション、医療教育、患者へのインフォームドコン

セントなどの分野で広く活用されるであろう。

小動物用カスタムフィットプレートの精密鋳造にも3Dプリンタの利用が可能である。小動物の骨折には、あらかじめ用意された平板プレートを切断・湾曲させて使用するケースが多いが、手術中に平板プレートを切断・湾曲させる負担は非常に大きい。また、同時に切断・湾曲したプレート使用は、強度や正確な装着の点でも問題がある。そこで、取得した小動物のCT画像を用いて、3Dプリンタを利用してカスタムフィットプレートを鋳造している¹²⁾。

直接、3Dプリンタを臨床応用する例としては、骨折した部位に対して計測したCT画像から、欠損部分を設計するために、3Dプリンタで造形した骨形状を利用する試みがなされている。人体に埋め込む材料にリン酸カルシウムを使用すれば、取り付けられた造形物は最終的には人体内部で骨と同化する¹³⁾。

謝 辞

本研究に使用したCT画像、MRI画像のデータ取得には、岩手医科大学、九州大学医学部、千葉大学医学部、中川歯科クリニック中川孝男氏の協力を得ました。適用事例での造形では、一部、文部科学省科研費基盤C (J110000052)、科学技術振興機構A-STEP (課題番号231Z03262、241FT0315)、文科省地域イノベーションクラスタープログラム事業「[いわて発]高付加価値コバルト合金によるイノベーションクラスターの形成」の研究助成、総務省戦略的情報通信研究開発推進制度 (SCOPE) 地域ICT振興型研究開発「遺跡発掘による出土遺物の計測・整理・デジタルアーカイブの研究開発」の研究助成を得ました。ここに謝意を表します。

■ 参考文献

- 1) W. Lorensen, H. Cline: "Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm". Computer Graphics, Vol.21, No.4, pp.163-170, 1987.
- 2) A. Doi, A. Koide: "An Efficient Method of Triangulating Equi-Valued Surfaces by Using Tetrahedral Cells", IEICE Trans., Vol.74, No.1, pp.214-224, 1991.
- 3) C. Hansen, C. Johnson: "Visualization Handbook", Academic Press, pp. 9-13, 2004.
- 4) 土井章男: "画像再構成と3Dプリンタによるラビッドプロトタイプング". 電子ジャーナル、メディカルイメージングテクノロジー (MIT) 誌, 第30巻, 第5号, pp.303-308, 2012.
- 5) M. Garland, P. S.Heckbert: "Surface Simplification Using Quadric Error Metrics", Proc. SIGGRAPH' 97, pp.209-216, 1997.
- 6) 鳥脇純一郎: "3次元デジタル画像処理". 昭晃堂, ISBN978-4-785690-64-9, 2002.
- 7) 奥富正敏編: "デジタル画像処理". CG-ARTS協会, ISBN978-4-903474-01-4, 2012.
- 8) Stratasys ltd: "3D プリンタ", "http://www.stratasys.co.jp/", 2013.
- 9) 株式会社3Dシステムズ・ジャパン、"製品情報 3Dプリンタ", "http://www.3dsystems.co.jp/", 2013.
- 10) オープンキューブ株式会社、"SCOOVO C170", "http://www.open-cube.co.jp/", 2013.
- 11) アイプランツ・システムズ株式会社、"Volume Extractor", "http://www.i-plants.jp/hp/", 2013.
- 12) A. Doi, H. Takahashi, B. Syuto, M. Katayama, H. Nagashima, M. Okumura: "Tailor-Made Plate Design and Manufacturing System for Treating Bone Fractures in Small Animals", Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, Vol.17, No.4, 2013.
- 13) 鄭 雄一: "新しい人工骨の開発: 形の制御の重要性". 東京大学生命科学シンポジウム, 東京大学, 2012.

☆岩手県立大学ソフトウェア情報学部

TEL.019-694-2550 FAX.019-694-2501

http://advancedvislab.com/