

総説

第67回総会 シンポジウム9

「日本におけるフルカスタムデバイスの展望（最精度顎再建から咬合再建最適化に向けて）」

口腔外科医を支援する医用画像工学・3次元造形技術

神尾 崇

Medical imaging engineering and 3D printing technology for assisting oral and maxillofacial surgeons

KAMIO Takashi

Abstract: Currently, 3D models and AR/VR/MR technologies are being actively applied in the medical field as an assist in diagnosis and surgical planning, particularly in surgery. The introduction of these technologies is expected to reduce various costs, shorten operation time, and improve the reliability of surgery, thereby contributing to the improvement of overall treatment outcomes. Nowadays, there is a growing interest in the efficient and effective generation and creation of “3D data,” which can be regarded as the blueprint for these 3D technologies.

This report provides an overview of “medical imaging and 3D printing technologies that assist oral and maxillofacial surgeons” based on the author’s past experience in 3D CAD operation and 3D models fabrication, and also reports on “3D data creation and utilization” that surgeons at the forefront of clinical practice should understand.

Key words: 3D model（実物大立体臓器模型）、3D printing technology（3D プリント技術）、computer aided design（コンピュータ支援設計）、custom-made（カスタムメイド）、patient-specific（患者特異的、患者固有の）

1. はじめに

医用画像撮影装置（モダリティ）や周辺機器の進歩と相まって、今日の医用画像処理技術も大きく進歩している。以前は専用のワークステーションでしかできなかった、2次元のスライス画像を3次元的に可視化すること、つまり医用画像の3Dデータ化（3D CADデータ化）は、現在では汎用のGPUを搭載したPCでも容易に実行できるようになった。さらには近年の3次元造形技術（3Dプリント技術）の進歩と汎用化は、これらの画像を3Dモデルとして実体化することもきわめて容易にした。

現在、医療の現場では診断や手術計画立案の一助として、積極的に3Dモデルの活用やAR/VR/MR技術の応用が行われるようになり、その一般化とともに今日ではそれらの設計図とも言える「3Dデータ」を効率的・効果的に作

成することにも大きな関心が寄せられている。

本稿では、筆者のこれまでの3D CADオペレーションおよび3Dモデル造形経験を通じ、「口腔外科医を支援する医用画像工学・3次元造形技術」をテーマとして、臨床最前線にいる口腔外科医も理解してほしい「医用3Dデータの生成と活用術」について報告する。

2. DICOM画像の3Dデータへの変換と 3Dモデル造形

2次元の医用画像を3次元化するためには、AR/VR/MRで用いるのか、あるいは3Dモデルを造形するか、などそれぞれの使用用途に応じたデータを準備しなければならない。そのためには、まずDICOM画像から3Dデータを生成する必要がある¹⁾。これは大別して3つのステップに分けられる（写真1）。3D CADで使用するデータのファイル形式はさまざまな種類があるが²⁾、本稿では3Dプリント技術やCGなどに汎用性が高く、事実上の世界標準の入力ファイルである「STLデータ（拡張子.stl）」を3Dデータ・

日本歯科大学生命歯学部歯科放射線学講座

（主任：河合泰輔教授）

Department of Oral and Maxillofacial Radiology, The Nippon Dental University (Chief: Prof. KAWAI Taisuke)

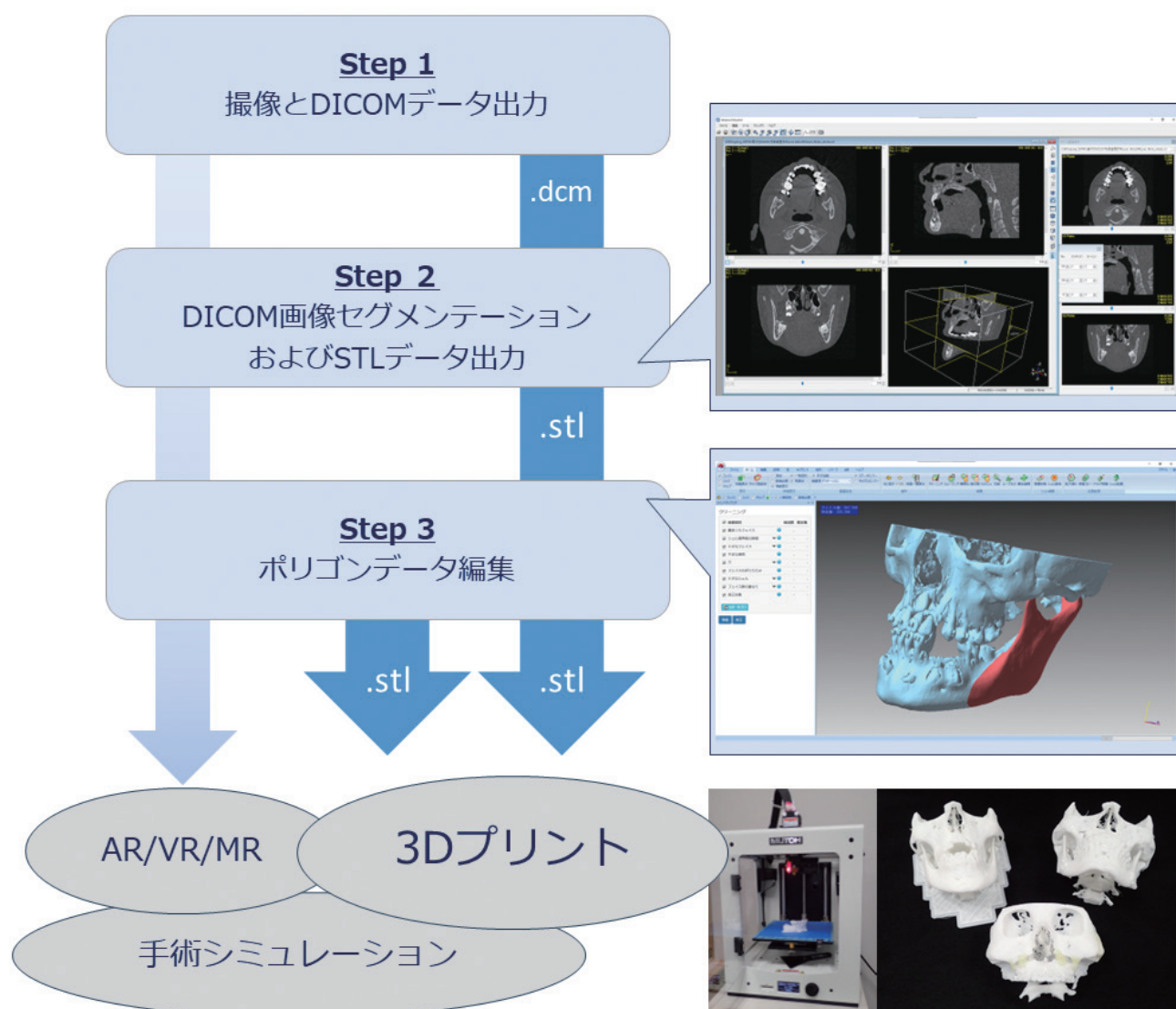


写真1 DICOM 画像から STL データ生成までのワークフロー

Step 1: 撮像した画像を DICOM ファイル (拡張子 .dcm) として記録媒体に出力する。

Step 2: DICOM 画像データを読み込み, 3D サーフェスモデルをレンダリングしたのち, STL データを生成・出力する (拡張子 .stl)。

Step 3: 使用用途に応じた STL データ (ポリゴンデータ) の編集処理を行う。

3D CAD データと同義として扱う。

STL データは大量のポリゴン (小さな多角形データ) を用いて立体的な集合体を表現する, 3D CAD で使用される代表的なファイル形式のデータである。ポリゴン数やサイズが多い・小さいほど精細性は向上するが, 同時にデータ量も増え, 演算処理には時間を要することになる。そのため使用用途・目的に応じて, 必要な範囲での ROI 設定やポリゴン数削減などの 3D CAD 中間ファイルのデータ編集を行う必要がある。表 1 に本邦で入手可能な主なソフトウェアを示す。今日, 有償 (商用) や 無償 (オープンソース) のさまざまなセグメンテーション・STL データ生成ソフトウェアの利用が可能である。筆者は 3D モデル造形を

主たる目的として, DICOM 画像の STL データへの変換・生成において, Step 2 ではアイプランツ・システムズの Volume Extractor 3.0³⁾ を, また Step 3 の関心領域の設定やノイズ削減, スムージング処理などのポリゴンデータ編集 (CAD オペレーション) には UEL の POLYGONALmeister v4⁴⁾ を使用している (写真 2)。

無償のソフトウェアのなかには画像ビューア機能や計測機能に加え, STL データ出力機能をも搭載しているものもある。極論すれば, 筆者の 3D CAD/3D プリント環境はこれらのソフトウェア群でも代替は可能である。そのため経済的な観点から述べれば, これらの無償ソフトウェア群の利用にも一考の価値がある。

表1 主な DICOM セグメンテーション・STL データ生成ソフトウェア (引用文献1を一部改変)

ソフトウェア (*商用ソフトウェア)	開発元
	ウェブサイト
3D Slicer	Surgical Planning Lab, Harvard Medical School, Harvard University, MA, USA http://www.slicer.org
3DView	RMR Systems Ltd., East Anglia, UK http://www.rmrsystems.co.uk/volume_rendering.htm
Image J	National Institutes of Health, Bethesda, MD, USA https://imagej.nih.gov/ij
InVesalius 3	Renato Archer Information Technology Centre, São Paulo, Brazil https://invesalius.github.io
Mimics *	Materialise, Leuven, Belgium https://www.materialise.com/en/medical/mimics-innovation-suite/mimics
The Medical Imaging Interaction Toolkit	German Cancer Research Center, Heidelberg, Germany http://mitk.org
OsiriX Lite	Pixmeo SARL, Geneva, Switzerland http://www.osirix-viewer.com
Seg3D	Scientific Computing and Imaging Institute, Salt Lake City, Utah, USA http://www.sci.utah.edu/cibc-software/seg3d.html
Volume Extractor 3.0 *	i-Plants Systems, Iwate, Japan http://www.i-plants.jp/hp/products/ve3

3. より良い STL データ作成に向けて

いかに高い解像度をもつ高性能のモダリティで撮像したとしても、DICOM ファイルの出力条件が不十分あるいは適切でない場合、生成される STL データや 3D モデルの品質もそれに影響を受ける(写真3)。PACS 参照端末(のモニタ上)で観(診)る画像は、各種モダリティで取得された生データ(raw data)から構築された画像、すなわち“再”構成画像であり、これはデータ量を軽減・低減するための、言わば“間引かれた”画像である。

一般に、CD-R や DVD-R などのメディアを介して撮像依頼者に提供される DICOM ファイルは、これらの画像群が内包されている。施設の考え方によって若干の違いはあるものの、生データの保存はサーバーのストレージに負荷をかけるため、DICOM データとして画像再構成処理が行われた後は1～数週間程度で削除される(保存することも可能)。「より薄いスライスの画像データが必要となった」など、改めて画像の再構成を必要とした際、生データが削除されていれば高精細 3D データの生成は事実上不可能となる。このような事態は防ぐためにも、出力依頼者と撮像担当者・診療放射線技師との間で“3D データ生成のための

出力”に関する取決めをあらかじめ相談・協議しておくことが望ましい。

高精細な骨 3D モデル造形のための 3D データを作成するためには、高周波強調関数による再構成を経た、可及的に狭い再構成間隔・薄いスライス厚の画像を必要とする。撮像目的の1つとして 3D データの利用が予想される場合、撮像後速やかに「(3D データを作るために) 頭頸部硬組織を薄いスライス、なるべく硬いフィルタで“リコン(reconstruction)”を掛けてください」と撮像担当者に伝えておけば、その意図を汲み、適切な再構成画像群を出力してくれるであろう。

4. Computer Assisted Surgery を担う 医用画像工学・3次元造形技術

近年、口腔顎顔面領域の手術においても 3D イメージング、ナビゲーションシステム、ロボット支援手術、AR/VR/MR 技術の応用などのコンピュータ支援外科(Computer Assisted Surgery, CAS)の導入が進む⁵⁾。CAS の導入により手術の正確性と安全性が向上し、手術時間の短縮や出血や合併症のリスクの低減が期待されており、今日ではそれ

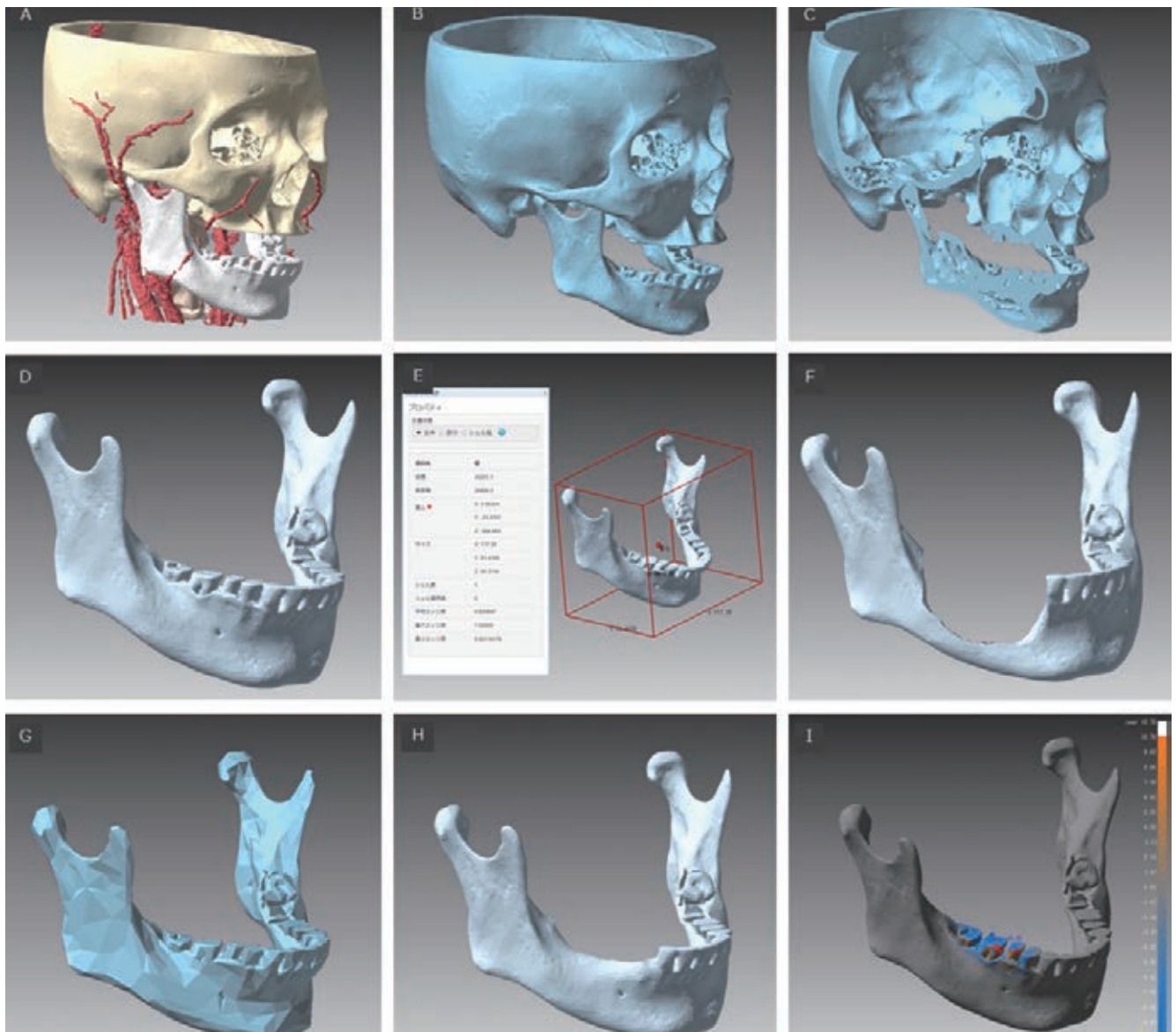


写真2 ポリゴンデータ編集ソフトウェア POLYGONmeister の機能

[] 内は POLYGONmeister の機能名称を示す。

- A: 各要素への分割と色付け [セグメンテーション・シェル塗りつぶし] B: 上下顎骨の抽出 [セグメンテーション]
 C: 任意断面の切断 [切断] D: 下顎骨のみの抽出 [セグメンテーション]
 E: 体積, 表面積, 大きさなどの計測 [評価] F: 任意の範囲の辺縁切除 [フェイス削除]
 G: ポリゴン数の低減 [簡略化] H: 任意の範囲の平坦化 [デフィーチャ]
 I: 2つの3D CADモデル (D, H) の形状比較 [評価—距離分布]

らの有用性に関する報告が増えている⁶⁾。3D CAD技術は3次元画像工学の基盤を成す技術の1つであり、CASの導入においてもその理解は必須となる。いずれも口腔外科臨床・手術を支援する技術であるが、さらなる発展、臨床への展開では、術者も3D CAD技術を習得すること、あるいは口腔顎顔面手術・口腔顎顔面解剖学の知識を有するCADオペレータと協同して進めることが望ましい。

筆者が構築した3D CAD/3Dプリント環境“one-stop 3D

printing lab”⁷⁾は非常にシンプルではあるものの、迅速かつ費用対効果に優れた3Dモデル造形を行うことができることを特長とし、これまでに提供した3Dモデルは多くの臨床の現場で活用されている^{6,8)}。本環境の主体を成す技術は医用画像工学・3次元造形技術である。筆者の経験から言えば、独学かつ僅かなコストであってもこれらの技術の理解と習得は可能である。しかしながらCADを始めるにあたり、実際問題として何から手をつければ良いのが

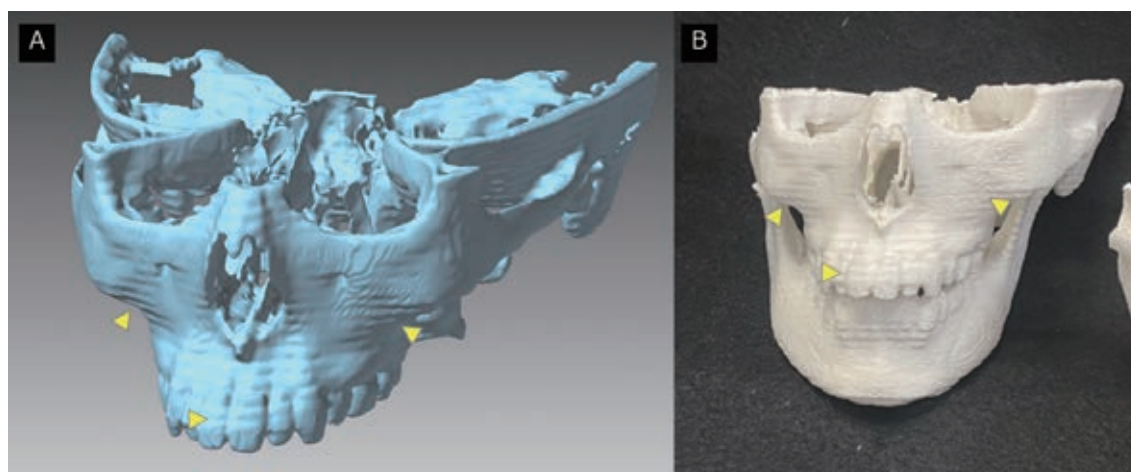


写真3 厚いスライス厚・大きな再構成間隔で生成したDICOM画像データによる3D CADモデルおよび3Dモデル
 A: 3D CADモデル B: 3Dモデル
 体軸方向に発現したステアステップ（階段状）アーチファクトがモデル形状に影響する（矢頭）。

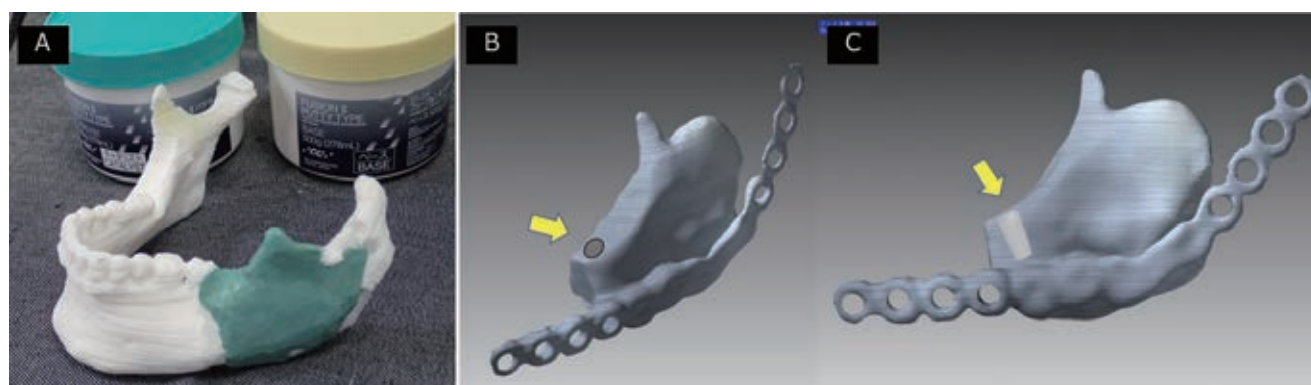


写真4 筆者の提案する顎骨・デンタルインプラント埋入窩一体型顎骨再建プレート
 A: 歯科技工材料を用いた欠損、骨離断部の再現
 B, C: Aの光学スキャンを経て、CADソフトウェアを使用し骨・プレート一体型のCADモデルを作成した。
 骨体部にはデンタルインプラント埋入窩を付与した（矢印）。

分からないかもしれない。そこで最初の一步として、3Dイメージングやシミュレーションに使うのか、あるいは3Dモデルを作りたいのかなど使用用途・目的を明確化したうえで、前項で述べたような無償ソフトウェアの試用から始めるのも良いと考える。

5. 将来展望

口腔顎顔面の手術において、3D CAD/3D プリント技術を利用し腫瘍切除・骨離断後の術後形態を予測・デザインし、PC上あるいは3Dモデルでそれらをシミュレートすることで、治療のゴールをより明確にできる。これは既に欧米の企業によりパッケージ化されているが、これらを術者自らの手で行えるようになれば、経済的・時間的に得られ

るメリットは大きい。

2022年、大阪医科薬科大学の植野高章教授らのグループによって開発された金属3Dプリンタによる積層造形チタン人工骨の販売が開始されるなど、3Dプリント技術にも革新の波が押し寄せている。第67回総会シンポジウムにおいて発表した内容の一部となるが、写真4に筆者が提案する顎骨・デンタルインプラント埋入窩一体型顎骨再建プレートを示す。これはあくまで3D CADソフトウェア上のシミュレーションに過ぎず、かつ稚拙なデザインではあるが、汎用の3D CADソフトウェアでもこの程度のシミュレーションを行うことができることを実証したものである。かつては加工が至極困難とされていたチタンさえも造形する近年の技術革新の動向を鑑みれば、術者が自身の経験を加味した再建人工骨・プレートをデザイン、3Dプ

リントして手術に臨むようになることも決して遠い未来の話ではないと思われる。

医療で活用する 3D CAD/3D プリント技術、言い換えれば医用画像工学・3次元造形技術は専門家あるいは一部の物好きな口腔外科医が扱う技術と認知されているのが現状ではあるが、このような近い未来に向けて、とくに再建手術に携わる口腔外科医にはぜひ CAD 技術の理解と習熟を期待したい。

本論文に関して、開示すべき利益相反状態はない。

文中略称

3D : Three-dimensional, three dimensions; 3次元 (の)

AR : Augmented Reality; 拡張現実

CAD : Computer Aided Design; コンピュータ支援設計

CAS : Computer Assisted Surgery; コンピュータ支援外科 (手術)

CBCT : Cone-beam Computed Tomography; コーンビームコンピュータ断層撮影

CG : Computer Graphics; コンピュータグラフィックス

DICOM : Digital Imaging and Communications in Medicine; 医用画像のフォーマットと、それらを扱う医用画像機器間の通信プロトコルを定義した標準規格

GPU : Graphics Processing Unit; 画像処理装置

MDCT : Multi-detector raw Computed Tomography; 多列検出器コンピュータ断層撮影

MR : Mixed Reality; 複合現実

PACS : Picture Archiving and Communication System; 医療画像管理システム

PC : Personal Computer; コンピュータ

ROI : Region Of interest; 関心領域

STL : Stereolithography; CAD ファイル形式の 1 つ

VR : Virtual Reality; 人工現実, 仮想現実

引用文献

- 1) Kamio T, Suzuki M, et al : DICOM segmentation and STL creation for 3D printing: a process and software package comparison for osseous anatomy. 3D Print Med 6: 17, 2020.
- 2) McHenry K and Bajcsy P : An overview of 3D data content, file formats and viewers. Nat Center Supercomp Appl 1205: 22, 2008.
- 3) Doi A, Suzuki S, et al : Volume Extractor Ver.3.0 -3D Image Processing and 3D Model Re-construction. IEEE J 37: 1037-1043, 2008.
- 4) Tanimoto S : Collaborative research on polygon engineering with RIKEN. Unisys Technol Rev 32: 283-292, 2012.
- 5) 岩井俊憲 : 最先端 technology の口腔外科への応用 口腔顎顔面領域におけるシミュレーションと computer assisted surgery (CAS) ー現状と将来展望ー. 日口外誌 65: 242-248, 2019.
- 6) Narita M, Takaki T, et al : Utilization of desktop 3D printer-fabricated "Cost-Effective" 3D models in orthognathic surgery. Maxillofac Plast Reconstr Surg 42: 24, 2020.
- 7) Kamio T, Hayashi K, et al : Utilizing a low-cost desktop 3D printer to develop a "one-stop 3D printing lab" for oral and maxillofacial surgery and dentistry fields. 3D Print Med 4: 6, 2018.
- 8) Kamio T and Onda T : Fused Deposition Modeling 3D Printing in Oral and Maxillofacial Surgery: Problems and Solutions. Cureus 14: e28906, 2022.