総説 第43・44回教育研修会（2015年口腔四学会合同研修会）
「口腔外科の周術期管理を考える」

コンピュータ支援外科と歯科用コーンビームCT

勝又明敏

Computer assisted surgery and dental cone-beam CT

KATSUMATA Akitoshi

Abstract: Computer assisted surgery (CAS) starts from surgical simulation. Then it progressed to surgical navigation system. The major technical components of CAS were registration, tracking, segmentation, and modeling. The volumetric CT image data plays important role in the whole process of CAS. CAS utilized various surgeries including maxillofacial region. While in the field of dentistry, the typical use of CAS was dental implant. There were several unique simulation/navigation systems that specialized to dental implant. The advent of arm-type cone beam CT (CBCT) has paved the way for the general dentists to use CAS. However in compare with medical surgery, CAS based on dental CBCT has several disadvantages. These were in the reproducibility of CT number and standardization of image data.

Key words: computer assisted surgery (コンピュータ支援外科), simulation (シミュレーション), navigation (ナビゲーション), dental cone-beam CT (歯科用コーンビームCT)

1. はじめに

1972年に英国のEMI社がビートルズの収益を基に実用化した最初のCT装置は、脳の断面の観察専用の装置であった¹⁾。やがて、全身が撮影可能な装置が開発されたが、その目的は、あくまで病変や解剖構造の観察（オブザーベーション）であった。しかし今日、画像データ応用技術の進歩とともにCT撮影の目的自体が変化しつつある。画像を基にコンピュータ上で各種疾患に対する模擬手術や腫瘍への放射線照射などの治療計画を行うシミュレーション、画像をガイドとして手術の範囲を指示したり形態修復を支援したりするナビゲーションシステムがそれにあたる。これらはさらに、画像データを基にロボット手術などの治療を行う施術（オペレーション）段階に進みつつある²⁾。このようなシミュレーション/ナビゲーション/オペレーションの技術は、コンピュータ支援外科（Computer assisted surgery）と総称される。

歯科では、インプラント治療の増加と歯科用コーンビームCT（以後、CBCTと呼ぶ）の普及により、画像データに

基づくコンピュータ支援外科は、歯科医にとって身近なものとなった。本稿では、歯科および医科の臨床で用いられるコンピュータ支援技術について概説するとともに、展望と課題について考察する。

2. コンピュータ支援外科の技術要素 （レジストレーション、トラッキング、 セグメンテーション、モデリング）

コンピュータ支援外科は、放射線、機械、ロボット、情報処理、光学などさまざまな領域の複合技術である。シミュレーションとナビゲーションには数多くの方法や術式が考案されて実用化されているものの、機能や性能を標準化する段階には達していない。ただし、いくつかの技術要素は各種システムで共通して用いられており、今後も重要な役割をもち続けられると思われる。レジストレーション、トラッキング、セグメンテーション、モデリングがそれに相当する。

レジストレーションは手術時の患者の生体、3次元画像および手術器具やインプラントを3次元的に位置合わせする技術である。レジストレーションの概念を図1に示す。位置や方向を識別する目標物（マーカー/テンプレート/ステント）を生体に装着してCTやMRIを撮影してコン

朝日大学歯学部歯科放射線学分野
（主任：勝又明敏教授）
Department of Oral Radiology, Asahi University School of Dentistry (Chief: Prof. KATSUMATA Akitoshi)

図1 レジストレーション

身体にマーカーを設置した状態でCT撮影。同じマーカーの位置を手術室のセンサで検出して3DCT画像と合成。

図2 トラッキング

手術中は、手術器具やインプラントに装着したマーカーの位置を追跡して、レジストレーションされた3DCT画像と重畳表示。

コンピュータ上で処理し、手術も同じ目標で位置合わせをしながら行う。どのようなマーカーを身体の中のどの部分に取り付けてCTやMRIを撮影するのか、マーカーのアーチファクトが画像を傷害しないかを充分考慮する必要がある。マーカーは、実際に手術を行う患者身体や手術器具に設置しなければならないが、狭い口腔内からアプローチすることの多い顎顔面領域では、マーカーが手術手技を妨げないかについて、とくにチェックが必要である。手術中、器具に装着したマーカー位置を光学センサや磁気センサで検知して追尾し、コンピュータ上で合成する過程はトラッキングと呼ばれる。コンピュータ支援外科の精度を調べた報告があるが、これらは実際レジストレーションとトラッキングの精度を調べていることに相当する。報告されたシステムの精度はとても良好で、手術器具やインプラント先端の位置に関して、コンピュータ上と実体の間の誤差は、ほぼ長さで1～2mm、角度で1～3度の範囲とされている^{3～7)}。ナビゲーションシステムのトラッキング可能なフィールド(術野)の大きさは20～40cm立方である。この空間を、2,000×2,000×2,000から4,000×4,000×4,000の空間座標で把握してトラッキングを行う。トラッキングの概念を図2に示す。フィールド内の分解能は最大で0.1mmであり、これは歯科用CBCTで小さい領域を撮影した時のボクセル(画素)サイズに匹敵する大変精密なものである。なお、最もシンプルなレジストレーション手法は、体表の解剖学

的指標(ランドマーク)や歯の外形を基に、術者が画像の部位や角度を調節して位置を合わせるものである。

次にセグメンテーションは、CTやMRI画像データ上で骨硬組織、筋肉、内臓などを識別/分離してデータ化する技術である。識別/分離には臓器(解剖構造、病巣)の位置、形態、および画像濃度が手掛かりとなる。図3にはセグメンテーションの概念を示す。CTの場合、CT値の精度が高ければ周囲軟組織から骨硬組織を分離することは比較的容易である。筋肉や内臓をセグメンテーションする場合もCT値が基になるが、周囲との境界がどこかを判別することが難しい。そのため、計算解剖学として画像工学的な視点から生体臓器組織の特徴を調べ、データ化してセグメンテーションなどに活用しようとしてされている^{8～10)}。この領域の進歩によりセグメンテーションの自動化が進み精度が向上するものと期待される。

最後にモデリングは、CTやMRIの3次元画像データを基に手術シミュレーションに用いる生体の骨硬組織、臓器、病変などを立体的に再現する作業である^{11,12)}。ナビゲーションで用いる手術ガイドやレジストレーション用テンプレート造形する作業も同様である¹³⁾。顎顔面領域で用いられる骨硬組織のモデリングには、連続したCTスライス画像の集合であるボリューム画像データからサーフェスレンダリング3次元画像を再構築することから始まる。このサーフェスレンダリング画像から、造型システムで使用

図3 セグメンテーション

画像処理技術を用い、CT画像上で位置、形態、および画像濃度を手掛かりに臓器を識別 / 分離する。
(Zhou, et al.: Medical Imaging and Information Sciences, vol.33, no.3, in press, 2016. より許可を得て転載)

(1) CT 断面画像

(2) サーフェスレンダリング
3D 画像 (3) STL ポリゴン
造形データ

(4) 下顎骨 3D モデル

図4 モデリングの過程

スライス CT 画像の集まり (ボリュームデータ) からサーフェスレンダリング 3D 画像、造形装置で用いる STL ポリゴンデータを経てモデルが作製される。

する STL 形式のデータが生成される。STL データは三角形のポリゴンの集合体として物体を表現するもので、その細かさは設定されたポリゴン数、すなわち、造形予定の物体を何個のポリゴンで表現するかにより決まる。造形された構造が型崩れを起こささないように支柱を追加したり、生体上に固定したり、手術のガイドとして使うための特別な形状に加工する作業は、この STL 造形データ上で行われる。図 4 には CT 画像からのモデリングの過程を示す。コンピュータデータから立体のオブジェクトを造型することは 3D プリンタの普及により一般的となったが、医療シミュレーション / ナビゲーションへの応用では、精度や用いる材料の安全性確保も重要となる。モデリングの精度に関しては、基となる 3 次元画像データの精度のみでなく、造形するモデルの大きさと形状、造形装置が積層タイプか他の方法によるのか、材料は樹脂か石膏かワックスかなどさまざまな要素に影響される。また、モデル作成後に経時的形状変化を生じることもあり、手術ガイドやレジストレーション用テンプレートなどに応用する場合は注意が必要である。

3. コンピュータ支援外科の臨床

2000 年以降、海外メーカーを中心としてマーカーを用いてレジストレーションを行う強力なナビゲーションシス

テムが開発 / 実用化され、さまざまな領域の手術に応用されている。整形外科においては膝関節、股関節、および上下肢の手術に用いられている¹⁴⁻¹⁹⁾。骨硬組織を対象とする整形外科領域のナビゲーションには、画像として CT を利用したものが多い^{14, 16, 17, 20)}。一方、CT などの画像をガイドとして用いずに生体の骨から直接計測した位置情報のみをナビゲーションに用いるシステムも考案されている¹⁵⁾。また、ガントリー移動型あるいは O-arm と呼ばれる、手術中に撮影装置を目的部位に移動させて撮影可能な CT システムも登場し、コンピュータ支援手術への応用が進みつつある²⁰⁾。耳、副鼻腔、顔面、および顎骨の手術でも、マーカーによるレジストレーションと CT 画像を用いたナビゲーションが利用されている^{3, 21-24)}。この領域の手術では、体表にマーカーを設置する方法に加えて、歯科の技術で歯列咬合面に装着した固定器具で口腔外のマーカーを保持する方法も報告されている。肝臓などに対する腹腔鏡手術および脳外科領域でのコンピュータ支援では、対象臓器が軟組織となるため、CT を利用するものの他に、組織コントラストの高い MRI をガイドとして用いることも提案されている^{10, 25-27)}。さらに、手術中に位置マーカーを取り付けた超音波装置でリアルタイム画像を取得し、術前に撮影された MRI などの画像に重ねて表示しながら穿刺針をガイドする、画像を二重に利用したナビゲーション技術まで提案されている²⁸⁾。

図5 インプラント埋入シミュレーションソフトウェア

4. 歯科インプラントのコンピュータ支援外科

歯科では、1990年代に登場したインプラント埋入手術シミュレーションのソフトウェアがコンピュータ支援外科の出発点であったと考える。このシミュレーションシステムは、多断面再構築 (MPR) およびボリュームレンダリング法で3次元表示した顎骨 CT 画像の上に仮想オブジェクトとしてのインプラント体を配置して、インプラント体の埋入本数、位置、方向、長さなどの治療計画を立案することが主要な目的であった²⁹⁾。インプラント埋入シミュレーションソフトウェア画面表示の1例を図5に示す。歯科用CBCTの普及する以前でもあり、シミュレーションには専ら全身用CTの画像が用いられた。また、後述するCT画像データの標準化も進んでおらず、大きな5インチMOディスクに保存した医科用データをソフトウェア業者に郵送し、シミュレーションソフト専用のデータにコンバートしてCD-ROM等で送り返してもらう、現在では考えられない複雑なプロセスを経てシミュレーションを行っていた。

2000年代となり、全身用CTの画像データが標準規格であるDICOM (Digital Imaging and COmmunication in Medicine) に統一されると、業者によるデータコンバートは必要なくなった。しかし、幾種類かのインプラントシミュレーションソフトにおいて、歯科用CBCTのデータはシミュレーションに適していないとされていた。歯科用CBCT画像がシミュレーションに不適とされた理由として、歯科用CBCTでは画像データのDICOM化が遅れていたこと³⁰⁾、および画像の濃度を表すCT値として水を基準 (ゼロ) としたハンスフィールド値が採用されておらず、ソフトウェア

により自動的に3次元画像を作成して表示することが困難であったことなどが考えられる^{2, 31)}。

シミュレーションで計画したインプラント埋入を実際に患者の口腔内で再現するためにはナビゲーション機能が必要となる^{32, 33)}。しかし、体表面に設置するマーカーによるレジストレーションをインプラント埋入に応用することは容易ではない。とくに下顎は、開閉口運動をするためマーカーの設置が一層複雑になる。また、光学センサを備えた高価なナビゲーションシステムを一般的な歯科診療施設で導入することは困難である。そこで、歯科専用のシミュレーション/ナビゲーションシステムでは、シミュレーションの3次元CT画像を基に歯列上に装着する手術ガイド (テンプレート) を設計し、これをモデリングで造形して口腔内に装着するガイドとしてインプラント埋入のナビゲーションを行う方式を採用している^{4~6, 34, 35)}。歯科インプラントのナビゲーションには、こちらの手術ガイドを用いたものが多用されており、埋入精度や施術された患者の満足度が高いとする報告がある^{6, 34)}。しかし、シミュレーション/ナビゲーションの応用によりインプラント生残率のような総合的な治療成績が向上するかは未確認である^{7, 35, 36)}。

5. 歯科用CBCTとコンピュータ支援外科

歯科用CBCTは、解像度の高い画像が得られること、および被曝線量が小さいことが重要な利点である。しかし、解像度の高さも被曝線量の小ささも、直径5~10cm程度の小さい領域を撮影するからこそ可能なことであり、歯科用CBCTであっても、顔全体を含む広い領域 (FOV, Field

of View) を撮影すると、被曝や解像度は全身用 CT と変わらなくなる²⁾。

シミュレーション / ナビゲーションに用いる場合、歯科用 CBCT は CT 値が不正確なことに特に注意が必要である。全身用 CT 装置は水を 0 (ゼロ) とするハンスフィールド値 (HU, Hounsfield Unit) を基準に画像を表示し、定期的に水を撮影するメンテナンスを行って精度を維持している。これに対して歯科用 CBCT では、FOV が顔全体と比較して小さいこと、管電圧が低くビームハードニング (線質硬化) の影響を受けやすいこと、円錐型の X 線束を用いるため被写体からの散乱線の発生が多くなること、および被写体と検出器間の距離が小さく散乱線の影響を受けやすいなど、CT 値を正確に求めるのが難しい構造になっている。

小さな FOV を撮影した時、CT の原理上、回転スキャンを通じて一定であるべき検出器に達する X 線の総量が、撮影領域の外に位置する頸椎や反対側の顎骨の影響で不均一になる³¹⁾。これは、歯科用 CBCT の CT 値を不正確とする根本原因でもある。また、全身用 CT のような CT 値 (HU) の精度維持を目的とした定期メンテナンスも行われない。CT 値の精度を上げるためには、常に顔全体の広い範囲を撮影し、X 線の照射線量や照射時間を増やすことが考えられるが、被曝が大きくなるうえに撮影装置のコストも上昇し、歯科用 CBCT としての利点が損なわれることになる^{31, 37)}。現状の外科手術用ナビゲーションシステムは全身用 CT を基準に開発されたものがほとんどであり、レジストレーション、セグメンテーション、モデリングの機能や精度は CT 値が正確であることを前提に調整されている。歯科用 CBCT 画像をナビゲーションシステムで応用する場合には、上記の特性を十分に考慮する必要がある。この問題に対する歯科用 CBCT 装置側の方略としては、X 線検出器の感度性能を飛躍的に向上させ、X 線量を増やすのと同じ効果を目指す方向性がある。

医科の大規模施設では、画像処理やシステム調節を担当する診療放射線技師や医療技術者が勤務している場合が多い。しかし、歯科単独の診療施設では、シミュレーション / ナビゲーションに係わるすべての作業を歯科医師が単独で行わなければならない。CT 画像データは撮影装置や画像データベースシステム (PACS, Picture Archiving and Communication System) から DICOM 形式で出力されてナビゲーションシステムで利用される^{38, 39)}。DICOM は、単なるファイル形式の名前ではなく、患者 (patient) をルートとした階層構造をもっている。1 回の CT 撮影から画像処理条件の異なった複数の画像シリーズが作られて保存されることも珍しくない。ナビゲーションシステムで利用する画像データも、適切なシリーズの選択を誤ると、画像の

情報を十分に活用できない事態も起こるので注意が必要である。いずれにせよ、歯科におけるナビゲーションシステムの有効かつ安全な利用の鍵は、歯科医師がデジタル情報を取り扱う能力 (IT 技術) の向上にあると考える。

謝辞

本稿は 2015 年口腔四学会合同研修会において講演した内容を中心にまとめたものです。稿を終えるに当たり、掲載の機会を与えていただいた日本口腔外科学会雑誌編集査読委員長をはじめ会員諸氏に感謝いたします。また、ご協力頂きました有地榮一郎教授をはじめ愛知学院大学歯科放射線講座の皆様、藤田広志教授をはじめ岐阜大学医学部知能イメージ分野の皆様、朝日大学病院放射線室の皆様および朝日大学歯科放射線分野の諸氏に感謝いたします。

本論文に関して、開示すべき利益相反状態はない。

引用文献

- 1) Hounsfield GN : Nobel lecture, 8 December 1979. Computed medical imaging. J Radiol 61: 459-468, 1980.
- 2) 勝又明敏 : 歯科 CT の過去, 現在, 未来. 日口外誌. 58: 706-717, 2012.
- 3) 松本 希 : コンピュータ支援外科における最近の進歩ーナビゲーション手術を耳科領域に応用するための技術ー. 日耳鼻 117: 10-14, 2014.
- 4) Rungcharassaeng K, Caruso JM, et al : Accuracy of computer-guided surgery: A comparison of operator experience. J Prosthet Dent 114: 407-413, 2015.
- 5) Moon SY, Lee KR, et al : Clinical problems of computer-guided implant surgery. Maxillofac Plast Reconstr Surg 38: 1-6, 2016.
- 6) Maloney K, Bastidas J, et al : Cone beam computed tomography and SimPlant materialize dental software versus direct measurement of the width and height of the posterior mandible: an anatomic study. J Oral Maxillofac Surg 69: 1923-1929, 2011.
- 7) Tahmaseb A, Wismeijer D, et al : Computer technology applications in surgical implant dentistry: a systematic review. Int J Oral Maxillofac Implants 29: 25-42, 2014.
- 8) 神谷直希, 周 向榮, 他 : X 線 CT 画像における体幹部の展開と解剖学的構造の自動認識への応用 (解剖学的情報処理). 電子情報通信学会技術研究報告. MI 医用画像 105: 51-56, 2005.
- 9) 藤田広志, 原 武史, 他 : 計算解剖モデルの構築. Medical Imaging Technology 29: 116-122, 2011.
- 10) 富川盛雅, 橋爪 誠 : 計算解剖モデルに基づくナビゲーション手術の最前線. Med Imag Tech 31: 311-316, 2013.
- 11) Naitoh M, Kubota Y, et al : Dimensional accuracy of a binder jet model produced from computerized tomography data for dental implants. J Oral Implantol 32: 273-276, 2006.

- 12) 笠村健一朗, 岡田光明, 他: CT 画像データによる粉末固着法三次元実体模型の臨床応用. 日口腔インプラント誌 18: 315-323, 2005.
- 13) 大野秀則, 杉山久幸: ナビゲーション手術における, CT/MRI 画像に基づく 3 次元精密医療モデル (レジストレーション用プレート) の有用性. 耳展 51: 398-401, 2008.
- 14) Jawhar A, Hutter K, et al : Are joint line changes after primary navigated total knee arthroplasty predictable? J Orthop Sci 20: 93-100, 2015.
- 15) 土岐俊一, 三上 浩, 他: Image-Free Knee Navigation System の軸設定と動態解析における問題点と対策. 日関病誌 34: 59-65, 2015.
- 16) 徳永邦彦, 堂前洋一郎, 他: CT based ナビゲーションを用いた寛骨臼移動術の短期臨床成績. 関節外科 34: 26-37, 2015.
- 17) 井上貴之, 阿部信寛, 他: ナビゲーションシステムによる膝動態解析の誤差要因解析. 臨床バイオメカニクス 35: 233-238, 2014.
- 18) Yokoyama Y, Abe N, et al : A new navigation system for minimally invasive total knee arthroplasty. Acta Med Okayama 67: 351-358, 2013.
- 19) Kim TK, Chang CB, et al : Execution accuracy of bone resection and implant fixation in computer assisted minimally invasive total knee arthroplasty. Knee 17: 23-28, 2010.
- 20) 金城養典, 日高典昭, 他: 上肢骨折治療に対する術中三次元 CT ナビゲーションの応用. 骨折 36: 800-803, 2014.
- 21) 平田晶子, 上野佐知, 他: ナビゲーションシステムの顔面硬組織手術への応用と評価. 形成外科 57: 417-425, 2014.
- 22) Usuda S, Truppeb M, et al : Auricular malformation treated by placement of an osseointegrated implant-supported epithesis using telenavigation and model simulation: A case report. Journal of Oral and Maxillofacial Surgery, Medicine, and Pathology 27: 49-55, 2015.
- 23) 藤井 仁, 鈴木慎太郎, 他: ナビゲーションガイドにより除去できた顔面深部異物の 1 例. 日口外誌 60: 54-58, 2014.
- 24) Ohba S, Yoshimura H, et al : Application of a real-time three-dimensional navigation system to various oral and maxillofacial surgical procedures. Odontology 103: 360-366, 2015.
- 25) Takiguchi S, Fujiwara Y, et al : Laparoscopic intraoperative navigation surgery for gastric cancer using real-time rendered 3D CT images. Surg Today 45: 618-624, 2015.
- 26) Hallet J, Gayet B, et al : 2nd International Consensus Conference on Laparoscopic Liver Resection Group. Systematic review of the use of pre-operative simulation and navigation for hepatectomy: current status and future perspectives. J Hepatobiliary Pancreat Sci 22: 353-362, 2015.
- 27) Saito T, Muragaki Y, et al : Functional plasticity of language confirmed with intraoperative electrical stimulations and updated neuronavigation: case report of low-grade glioma of the left inferior frontal gyrus. Neurol Med Chir (Tokyo) 54: 587-592, 2014.
- 28) 辻 邦彦: ナビゲーション, 穿刺トラッキングの進歩. The Liver Cancer Journal 6: 42-47, 2014.
- 29) Seipel S, Wagner IV, et al : Oral implant treatment planning in a virtual reality environment. Comput Methods Programs Biomed 57: 95-103, 1998.
- 30) Weitz J, Deppe H, et al : Accuracy of templates for navigated implantation made by rapid prototyping with DICOM datasets of cone beam computer tomography (CBCT). Clin Oral Investig 15: 1001-1006, 2011.
- 31) Katsumata A, Hirukawa A, et al : Relationship between density variability and imaging volume size in cone-beam computerized tomographic scanning of the maxillofacial region: an in vitro study. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 107: 420-425, 2009.
- 32) 松原秀樹, 仲西康裕, 他: 画像誘導システム (IGI) を用いた口腔インプラント手術. 北医療大誌 26: 9-15, 2007.
- 33) 原 俊浩, 高峰弘二, 他: サージカルナビゲーションシステムへのコーンビーム CT の臨床応用. 日口腔インプラント誌 20: 659-663, 2007.
- 34) Youk SY, Lee JH, et al : A survey of the satisfaction of patients who have undergone implant surgery with and without employing a computer-guided implant surgical template. J Adv Prosthodont 6: 395-405, 2014.
- 35) Moraschini V, Velloso G, et al : Implant survival rates, marginal bone level changes, and complications in full-mouth rehabilitation with flapless computer-guided surgery: a systematic review and meta-analysis. Int J Oral Maxillofac Surg 44: 892-901, 2015.
- 36) Jung RE, Schneider D, et al : Computer technology applications in surgical implant dentistry: a systematic review. Int J Oral Maxillofac Implants 24 Suppl: 92-109, 2009.
- 37) 勝又明敏, 内藤宗孝, 他: CBCT の活用に関するプロジェクト研究 歯科用コーンビーム CT (CBCT) 評価の標準化項目の提案. 日歯医学会誌 35: 84-88, 2015.
- 38) 勝又明敏: 歯科用 CBCT 画像情報の標準化. 歯科放射線 55: 22-25, 2015.
- 39) Bidgood WD Jr and Horii SC : Modular extension of the ACR-NEMA DICOM standard to support new diagnostic imaging modalities and services. J Digit Imaging 9: 67-77, 1996.