

口腔インプラント治療におけるロボット手術の現状と未来

近藤尚知, 小山田勇太郎

Current status and future of robotic surgery in implant therapy

Hisatomo Kondo, DDS, PhD and Yutaro Oyamada, DDS, PhD

抄 録

口腔インプラント治療における画像診断の重要性は疑う余地もなく、2000年代初頭には情報工学（IT）が導入され、画像診断を立体画像で行うようになった。そして、単なる画像診断にとどまらず、その立体画像上で手術シミュレーションを行い、同時に補綴装置の設計も行うことも可能となっている。さらには、シミュレーションしたインプラントの埋入ポジションを口腔内に再現するためのサージカルガイドの作製をCAD/CAMシステムで行うようになり、手術当日に補綴装置装着まで行う即時修復のシステムも確立されている。さらには、サージカルガイドを使用しないでドリルと顎骨の位置関係をモニター上に投影することのできるダイナミックナビゲーションも開発され、インプラント治療のIT化はより深化するところとなった。そして、新たなステージとして、ロボット手術の開発が進められている。現状では、ロボット手術の臨床応用という段階ではないが、PCのスペックの向上とソフトウェア開発次第で、急速な発展も期待できる分野である。

キーワード

口腔インプラント治療, CAD/CAM, サージカルガイド, ダイナミックナビゲーション, ロボット手術

ABSTRACT

In the field of implant dentistry, it is no doubt that diagnostic imaging is important, and information technology (IT) has been already introduced to constitute three dimensional(3D) images of joe bones at the beginning of 21 century. In addition, introduction and development of IT enabled us to perform the simulation of not only implant surgery but also crown placement on the exclusive software. Moreover, the simulated position of implants can be reproduced in the patient mouth using surgical guide made by CAD/CAM. Consequently, application of those techniques established the immediate restoration termed as One Day Treatment. Recently, Dynamic navigation system was also developed, in which simulation of implant surgery was performed, images of drills and joes are superimposed, and ideal drill position was shown on PC monitor as the real time navigation. Thus, application of IT to implant therapy has been spreading and robot surgery has been developed as the next generation therapy. So far, limited data has been reported and clinical use is not available. However, drastic change and paradigm shift might be occurred, depending on the innovation of the specialized software, in this field.

Key words:

Implant dentistry, CAD/CAM, Surgical guide, Dynamic navigation, Robotic surgery

I. はじめに

近年、デジタル技術の発展は新たなステージを迎え、今までの常識をはるかに超えた思考と手法が創造されつつある。すでに一般に普及しつつあるものとして、IoT: Internet of Things によるさまざまなモノやヒトの情報共有ならびに連携、クラウドを介したビッグデータの集積と蓄積、人工知能 (AI: Artificial Intelligence) による情報管理や業務支援などが挙げられる。これらは、人的コストの削減や業務の簡略化、効率化が見込めるためさまざまな分野へ応用されている。無人店舗と電子マネーによる人や貨幣を介さない購買、自動車の自動運転の実用化などはその一端であり、以前には未来の技術の代表とされていたものがいつの間にか日常に溶け込んでいる。このような技術の進歩にともない、今後われわれの生活を支える技術の枢軸を担うものとして、ロボット技術の発展が挙げられる。

昨今、ロボット技術は運送、建築、教育、軍事などさまざまな分野へ適応拡大されており、医療分野への応用もそのひとつである。医療分野へのロボットの応用では、手術用ロボットとして IMTIUTIVE 社のダビンチサージカルシステムが有名である¹⁾。術野に人間の手が存在しないロボットアームだけによる手術の光景は当時話題となった。そして、昨年(2019)年にはダビンチに使用されていた技術の大半の特許が切れたことにより、今後は各社さまざまな手術用ロボットの開発を展開してくることが予想される。こうした手術用ロボット技術は現在では歯科医療の分野にも応用され始めている。

歯科治療の特徴は、術野が狭いこと、通常の状態自体が緻密であるため求められる治療の精度が非常に高いこと、患者にとっては常に開口を強いられストレスが大きいことなどがあげられる。歯科領域における現在の技術革新は、マイクロスコープ等による視認性の向上、CT による組織立体構造の可視化、CAD/CAM による補綴装置製作ワークフローの簡略化など、多方面に展開され、前述の課題解決に大きく貢献した。しかしながら、歯または骨の切削、軟組織の切開・縫合等、実際に患者と直接接する処置は、術者の眼と手指そのもので行っているのが現状である。すなわち、医科領域における内視鏡検査や内視鏡手術、ロボット手術のような治療技術は、歯科領域においては発展途上の段階にある。

本シンポジウムでは、口腔インプラント治療へのロ

ボット手術の臨床応用について、既知の技術であるインプラントガイドシステムから歯科手術用ロボットの開発・実用化に至るまでの過程と臨床応用の現状について考察する。

II. サージカルガイド

埋入手術シミュレーションソフトとサージカルガイド(またはサージカルテンプレート)の併用によるインプラント埋入手術は、現在最も普及しているインプラント埋入手術支援システムである。CT(またはCBCT)の撮影によって得られるDICOM形式の画像データをPC上のソフトウェアに読み込ませ、顎骨のサーフェイスレンダリング像(立体画像)とCTの画像を同時に表示させながらインプラントの埋入手術シミュレーションを行うことは可能である。以前は、インプラントの埋入位置を検討する際には、石膏模型上で歯冠や顎堤のワックスアップ(診断用ワックスアップ)をし、それをもとに製作した診断用テンプレートを装着した状態でのCBCT撮影が必須であったが、現在は口腔内スキャナにより得られた画像データやCADソフトウェア上で設計した歯冠のデータを直接シミュレーションソフトウェアへ入力し、CTのDICOMデータから得られたサーフェイスレンダリング像との重ね合わせを行うことでシミュレーションが可能となっている。手術用シミュレーション後は埋入位置の再現のためにサージカルガイドの製作を行う。以前はメーカーの技工センターに外注してサージカルガイドを製作する方法が一般的であったが、近年のCADソフトウェアや3Dプリンタの普及に伴い、多くの場合ライセンスの追加購入が必要ではあるが、個人の歯科技工所や歯科医院での製作も可能となっている。

インプラント埋入手術時にサージカルガイドを使用することで手術時間の短縮と患者の術後不快感の軽減が可能である²⁾。症例の条件次第でもあるが、フラップレス手術の適用によって、外科的侵襲の軽減や術後回復に寄与できるものと考えられる。また術前に、最終上部構造の形態を考慮した埋入手術計画(補綴主導型インプラント治療)が可能であることから審美性に配慮した治療も可能である。

しかしながら、サージカルガイドによるインプラント埋入手術の是非は製作されたサージカルガイドの精度に依存するため、各診療ステップで注意が必要である。すなわち埋入手術の精度に影響を与える主な過程は以下の3つと考えられる。1つ目はPC上でのシ

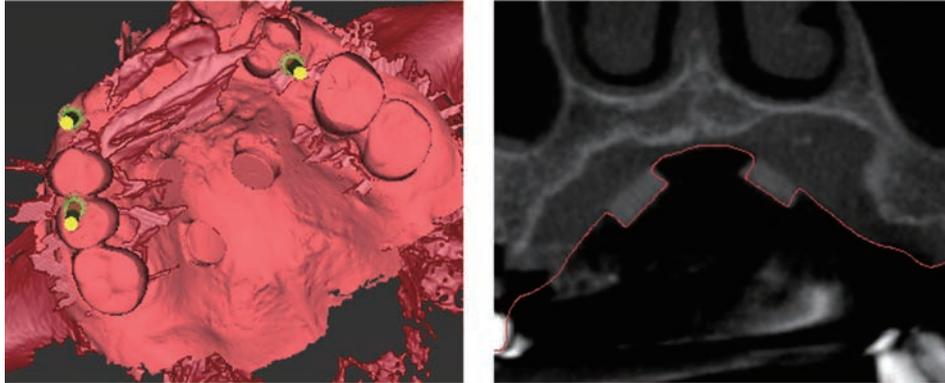


図1 サーフェイスレンダリング像とSTLの重ね合わせ

適切な造形性材料の選択と正確なCBCT撮影，そしてシミュレーションソフトウェア上での正確な重ね合わせが必要である。

シミュレーションに用いる立体画像の構築についてである。CBCTのDICOMファイルをサーフェイスレンダリングして3Dモデルを構築しながら、歯冠のデータとの重ね合わせを行うが、口腔内に金属が存在すると画像のハレーションが生じて、正確な画像の重ね合わせが困難となる。そのため、診断用テンプレート（診断用ステント）の使用や口腔内への造影性をもつマーカーの設置など、適切な追加処置を施したうえで、正確に画像を重ね合わせることが重要である（図1）。2つ目はサージカルガイドの製作時である。CADソフトウェア上での設計、3Dプリンタの性能やサージカルガイド用光硬化樹脂材料の性質、サージカルガイドへのスリーブの取り付け作業の精度により、サージカルガイドそのものの精度が影響を受ける。3つ目はサージカルガイドの装着時である。製作されたサージカルガイドが口腔内に正しく位置づけられなければ、精度の高い手術を行うことはできない。部分欠損の顎堤の場合には、サージカルガイドは歯に支持を求められるため、歯自体の動揺がなければ、精度の高い埋入手術が可能である。一方、無歯顎の場合においては、サージカルガイドはアンカーピンによって顎堤に固定されるが、粘膜により支持されるため、有歯顎よりも位置のずれが生じやすく、最大で歯冠側で2.19 mm、根尖側で2.19 mm、角度で4.67°の誤差が生じることも報告されている³⁾。さらに、歯による支持、骨支持、粘膜支持別に調べたレビューによればそれぞれ歯冠側で0.84 mm、1.07 mm、1.43 mm、根尖側で1.15 mm、1.64 mm、1.87 mmの誤差が生じるとされている⁴⁾。

その他の問題点として、サージカルガイドを装着するという性質上、クリアランスが不足し、特に臼歯部においてはその適用自体が困難となることがある。さらにサージカルガイドを装着することで術野の視認性

は特に臼歯部で著しく低下し、顎骨の切削時の注水が不十分になることで火傷の懸念も生じるなどの問題もある⁵⁾。

サージカルガイド・システムは、口腔内スキャナや3Dプリンタ、ミリングマシンなどと併用することによって、即時埋入、即時荷重など幅広い症例へ対応可能になるなど、その精度や汎用性は向上している。また同時に、一部が院内完結型のシステムへ移行しつつある。しかしながら、前述した課題がすべて解消されているわけではないことを常に念頭においておく必要がある。

III. ダイナミックナビゲーション

サージカルガイドを静的（Static）システムと呼称するのに対して、ドリルと顎骨の位置関係をリアルタイムでモニタリングし、動的（Dynamic）システムと定義されるのがダイナミックナビゲーションである。ダイナミックナビゲーションにおいてもPC上でインプラントの埋入位置をシミュレーションするが、その後サージカルガイドを製作することなくシミュレーションを反映したインプラントの埋入手術が可能である。ダイナミックナビゲーションのシステムとしては、Nobel Biocare社のX-GuideTMやClaroNav社のNavidentが知られている。本項ではNavidentを例に挙げて記載する。

ダイナミックナビゲーションではまず、CBCT撮影時に専用のステントを製作する必要があったが、現在は不要となっている。撮影後のDICOM形式のデータを専用のPCへ入力しサーフェイスレンダリングの画像とCBCT画像を確認しながらシミュレーションを行い、インプラントの埋入位置を決定する。埋入位

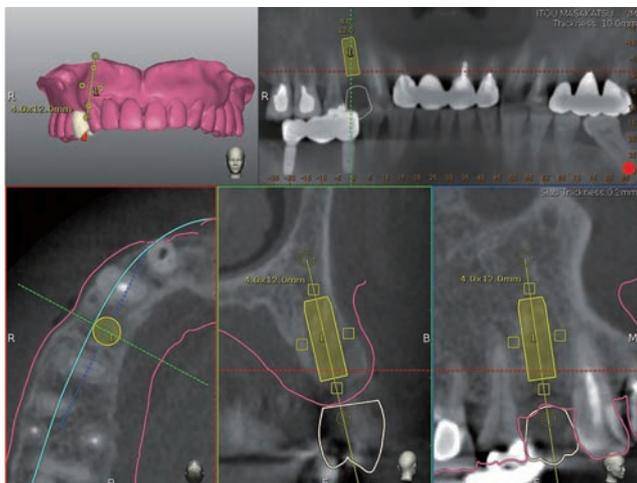


図2 ダイナミックナビゲーション (NaviDent) による埋入手術シミュレーション

ワックスアップを行った模型や口腔内スキャナの STL との重ね合わせが可能である。

置の参考とするために口腔内スキャナより得られた画像や模型用スキャナなどの他のサーフェスデータと重ね合わせを行うことも可能である (図2)。この際に実際の口腔内と重ね合わせる部位の選択を行う。

シミュレーション後に手術前の準備として、口腔内を専用の器具によって、シミュレーション時に重ね合わせの基準とした部位を接触することで、実際の口腔内とシミュレーションの重ね合わせを行う。また、上顎であればヘッドトラッカーを頭部へ下顎であればジョウタグを残存歯に装着し、そしてハンドピースにも専用のタグを装着する。Navident のカメラボックスがこのタグを認識することによって、事前にシミュレーションしたインプラントの埋入位置と手術時のドリル先端の位置との重ね合わせ (トラッキング) が行われる。これにより術前にシミュレーションした理想的な埋入位置とドリルの方向と位置が一致するかを、モニター上で確認しながら埋入窩の形成を行う (図3)。

ダイナミックナビゲーションではサージカルガイドの製作が必要でない、つまり前述したサージカルガイドに依存するエラー要因が排除されている。また、サージカルガイドの装着がないことから術野の視認性は良好であり、顎骨への注水も通常の手術同様に可能である。さらに、クリアランスによる影響もないことから前歯部から大白歯部へかけての適用が可能である。このように、精度の高いシミュレーションを行ったものの開口量が小さく、大白歯欠損部にサージカルガイドが使用できなかったというような、サージカル



図3 ダイナミックナビゲーションによる手術風景

カメラボックスによりハンドピースとヘッドトラッカーのタグを認識する。

ガイドの欠点を見事にクリアできている。実験的研究が多く臨床研究の数は少ないものの、ダイナミックナビゲーションとフリーハンドを比較した多施設前向き臨床研究ではシミュレーションとの誤差は、それぞれ歯冠側で 1.16 mm, 1.78 mm, 根尖側で 0.78 mm, 1.10 mm, 角度で 2.97°, 6.50°であったとされており、ダイナミックナビゲーションによるインプラント埋入手術の研究では良好な結果が示されている⁶⁻¹⁰⁾。

しかしながら、ダイナミックナビゲーションの応用にも問題点が存在している。タグと患者位置、ハンドピースの空間座標認識に誤差が生じた場合はドリリングとインプラント体の埋入に悪影響を生じてしまう⁷⁾。特に上顎に應用するヘッドトラッカーは皮膚つまり軟組織上に装着されることから、微妙な誤差や患者の動揺によるずれが生じる可能性がある。そのため、致命的なエラーの回避のためにも、手術時には各ステップでの確認が重要とされている⁸⁾。また、PCの画面を見ながらハンドピースの方向を修正しながら手術を行うという特性上、手術前までに操作の十分な習熟が必要である。Blockらは本手法には実践的なワークフローと妥当な学習曲線の設定が必要であると報告している⁶⁾。さらに、手技的な問題点としては視覚的な補助があるものの、フリーハンドに近い状態であり、サージカルガイドのスリーブのようなドリルの支えとなる構造がないため、不良な骨質や抜歯窩、骨の裂開が生じた場合に手ぶれが生じる可能性が高く術者の経験や技量による差が出てしまう可能性が高い。加えて、ダイナミックナビゲーションの導入コストが

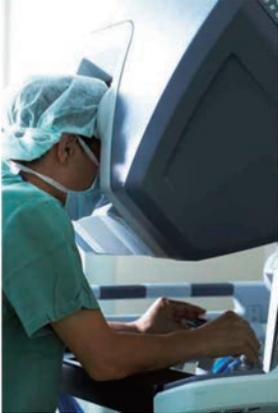


図4 ロボット手術（ダビンチサージカルシステム）による手術風景と手術場の様子
術者はモニター上の3D画像を見ながらコントローラーによる操作を行う。コントローラーからの指示を受けて患者の術野でロボットアームによる精細な手術操作が行われる。



図5 インプラント治療におけるロボット手術システム
Yomiの全体像（文献27より）

高いことから、ダイナミックナビゲーションに関連する研究はin Vitro試験が多く、臨床研究はまだ少ないという現状もあり、さらなるエビデンスの蓄積が望まれている¹¹⁾。

ダイナミックナビゲーションシステムは未だ改善点はあるものの、既存技術から大きく進歩した革新的技術である。エビデンスの不足は否めないものの、短期間でその性能は大きく向上されており、さらなる臨床応用が期待される。

IV. 医療用ロボット手術

ロボット手術の研究は古く、1980年代から報告がある。最初のロボットによる手術は1985年、米国カリフォルニア州ロングビーチのメモリアルメディカルセンターで、産業用ロボットアーム（Unimation PUMA 200）による定位的脳生検術である¹²⁾。その後、冒頭でも述べたが、医療用ロボットとして本格的に患者手術に導入されたのはIMTIUTIVE社のダビンチサージカルシステムである。ロボット技術への医療現場への応用については、現在抱えている医療の問題の多くの解決策となりうる可能性がある。

アメリカ人の85歳までに受ける手術件数について調査した研究によれば、平均9件の何らかの外科処置を受ける可能性があることが報告されている¹³⁾。また、わが国においても厚生労働省の調査によれば、日本人の平均寿命までに癌に罹患する可能性は2人に1人とされている¹⁴⁾。世界的に高齢化が進行していることから、今後も1人あたりの手術件数や入院医療費は増加する可能性が高い。

外科手術は術者の技量に大きく依存する。外科技術が高いグループと低いグループを比較した研究では、外科技術の低いグループでは術後合併症は約2.5倍以上、死亡率で5倍以上になることが報告されている¹⁵⁾。また大腸癌の開腹手術においては術後の合併症が約35%生じることが報告されており¹⁶⁾、複雑な手術になる程、術者の技術への依存度が極めて高くなることが窺える。そのため医療の均質化という意味ではこれは大きな問題である。

さらに外科医そのものの数の減少も問題視されている。日本の外科医師数の減少について調査した論文によれば、1994年から2006年までに医師数全体は19.3%増加しているが、一般外科医師は12.7%減少している¹⁷⁾。外科医師の養成にかかる期間を考えると人材確保は極めて深刻な問題である。

こうした多くの問題を解決する手段の一つとしてロボット手術が期待されている。

ダビンチサージカルシステムは本機自体が手術を行うものではない。医師に高解像度の3D画像、拡大された視野、ロボットおよびコンピューター補助の下、細径化された内視鏡と関節機能を有する鉗子、剪刀、メス、鑷子等、専用にデザインされた器具を用いることで、精緻な切開、剥離操作や再建操作、縫合が可能になる（図4、5）。ただし、重要な感覚である触覚が欠如しているため、鉗子操作による臓器や血管の損傷には注意をする必要がある¹⁸⁾。ロボット手術は日本国内では「ロボット支援下内視鏡手術」が保険収載されている。当初は前立腺癌、腎癌のみの適応であったが、新たに2018年に12件、2020年に7件が保険適応となり適応領域は拡大している¹⁹⁾。しかしながら、歯

科口腔領域への応用は日本ではまだ認められていない。

ロボット技術は、手術精度の向上、周囲組織への侵襲の減少、術者の運動制御の向上など術者側に多くの利点があることはもとより、切除する組織の量や周囲組織の損傷を小さくできることから、患者の術後回復にも大きく寄与することができる²⁰⁾。子宮頸癌における従来の外科手術とロボット手術の比較を行ったシステマティックレビューでは、入院期間の短縮と、合併症の発生や出血量、輸血量が少なかったと報告されている²¹⁾。

また、ロボット手術においては手術を行うユニットに回線が繋がれば、必ずしも近くにいらなくて良い。つまり、遠隔手術が行えることも利点の1つである。2001年にはニューヨークとストラズブル間で手術支援ロボット ZEUS[®]を用いた胆嚢摘出術が行われ成功している²²⁾。20年が経過した現代では5Gによる通信環境の整備が整うことで、より精度の高い手術を実現できる可能性がある。ロボット手術は外科医の数が減少している現状では遠隔手術として医療の過疎化を防ぐ一助となるかもしれない。

課題として主にあげられるのはコストと臨床的効果の両立である。ダビンチサージカルシステムの初期の導入費と年間の維持費は高額であることから、少数の大病院を除いて多くの病院での導入は困難とされている²³⁾。日本円で1台の価格は約2億5,000万円で、年間維持費が約2,000万円かかる。米国の中咽頭癌と舌癌に対するダビンチサージカルシステムによるロボット手術と従来の外科手術について比較した研究では、入院日数や創部の感染や後出血などの術後合併症、気管切開や胃瘻造設の減少と併せて、治療費や手術コストの減少など臨床面だけでなく費用対効果の面でも利点が報告されている²³⁾。そのため、ロボット手術の応用は医療費の削減や貴重な外科医という人的資源の効率的な運用に有効である。しかしながら、すべての手術において同様の効果が得られるということは報告されていない。日本においても同様にコスト面で問題視されており、特に日本の保険制度下では先に述べたロボット支援下内視鏡手術は従来の内視鏡手術と同様の保険点数である¹⁹⁾。導入費と年間維持費を考慮すると、ロボット加算のような診療報酬が必要であるが、現状の医療保険財政を鑑みると必ずしも容易ではなく、今後の臨床研究で優位性を示す必要がある。

手術手技の教育に関して、日本内視鏡学会では指針を策定し、以下のような内容を推奨している。術者および助手は、製造販売会社の定めるトレーニングコー



図6 モニターの様子 (筆者撮影)

事前にシミュレーションされたインプラントの埋入位置と手術時のハンドピースの埋入窩を形成する位置と方向、深度の重ね合わせ(トラッキング)が行われる。専用のノートパソコンでシミュレーションを行い、術中はモニターに映像を写し出すことで術者を補助する。

スを受講し、ロボット支援下内視鏡手術の Certificate を取得すること。また、トレーニングプログラムの Certificate 取得後30日以内に初症例を迎えることを、そしてその期間をすぎた場合には再度トレーニングプログラムの受講を推奨している²⁴⁾。また、日本泌尿器内視鏡学会でもロボット支援手術のガイドラインを策定し、機器使用に関する教育について細かく定義している²⁵⁾。上記に倣えば、歯科領域におけるロボット手術が応用される場合も、同様に学会主導の下でのガイドラインと教育プログラムの策定が必須であると考えらる。

今後は、技術革新によるロボットの高性能化によって、手術精度の向上や手術時間の短縮、各社の競合に伴う初期導入費および年間維持費の減少等の相対的な費用対効果の向上、そして治療適応拡大が期待される。

V. 歯科へのロボット手術の応用

歯科領域でのロボット手術に関する報告は少なく、現状では、治療用の患者モデルのロボット、あるいは基礎実験レベルでのロボットに関する研究にとどまっている。実際に歯科治療に応用された唯一のロボットとして、Neosis社のインプラント埋入用ロボットである Yomi が知られている。Yomi は2017年にFDAの認可を受けて以来、2020年現在で1,800本以上のインプラント埋入手術に適用されている²⁶⁾。

Yomiのシステムにおいては、まず専用のスキャン



図7 マネキンを用いたデモンストレーション（筆者撮影）

トラッキング用のマーカー（矢印部分）は手術部位以外に装着される。モニター上に表示されたインプラントと3Dモデルを参考に術者によってハンドピースの移動と設定を行う。

サージカルガイド	ダイナミックナビゲーション	ロボット手術
事前にPC上で症例のシミュレーションが可能。		
<ul style="list-style-type: none"> 術者の技術を部分的に補填可能 臼歯部においては視認性に難がある。 臼歯部においては開口量の制限を受ける。 第2大臼歯部においては使用困難 十分な注水が困難 	<ul style="list-style-type: none"> 術者の技術を補填するものではない。 十分な視認性が得られる。 十分な注水が可能である。 開口量の制限を受けない。 前歯、臼歯ともに開口量に影響なく埋入可能 	<ul style="list-style-type: none"> 術者の技術を部分的に補填可能 十分な視認性が得られる。 十分な注水が可能である。 開口量の制限を受けない。 前歯、臼歯ともに開口量に影響なく埋入可能 骨質、抜歯高、骨の裂開による影響を受けない。 組織に接触した際の感覚が得にくい。

図8 各インプラント埋入ナビゲーションシステムの特徴

マーカーを装着してCBCT撮影を行う。その後、従来のシミュレーションシステムと同様にDICOMから得られたCBCT像とサーフェイスレンダリングの画像、および口腔内スキャナやCADソフトウェア上で設計された欠損部の歯冠などのSTLをインポートしてインプラントの埋入シミュレーションを行う。そして、手術前に口腔内にマーカーを装着し、位置関係の調整を行い、シミュレーションと口腔内の状態をトラッキングさせる（図6）。Yomiは手術のすべての術式を自動化しているわけではないため、浸潤麻酔、フラップレス手術でない場合の切開や剥離、および術後の縫合は術者が従来通りの方法で行う必要がある。さらにハンドピースについても埋入位置への移動は術者によって行う必要がある。しかしながら、その移動については専用のGPS機能による補助によってシミュレーションを行った位置までの誘導が可能とされている（図7）。

Yomiの秀でた特徴のひとつとして、音声補助やモニターによる視覚的な補助の他にハプティクス（触覚

技術）を応用することで、ドリルの位置、方向、深度を術者にフィードバックしながら手術を行うことが可能となる点が挙げられる²⁷⁾。ハプティクスはギリシア語の“触る”を意味する動詞が語源であり、身近なものにはスマートフォンなどのタッチパネルやゲームのコントローラーの振動機能などがある。ハンドピースを適切な位置に設定した後、術者による動作はフットペダルを踏むことだけである。フットペダルを踏むことでインプラントは事前にシミュレーションされた埋入深度まで形成され、埋入窩の拡大後はインプラント体の埋入まで行うことが可能である。操作中はハンドピースに触れていることでハプティクスによる術野の触覚的なサポートが行われる。前述の通りに触覚をフィードバックする機構はダビンチサージカルシステムには応用されておらず、ロボットが手術を行っていても術者の手元に触覚を感じられるというのは非常に優位な点の一つと言える。このロボット手術に関する文献はまだ少ないが、抜歯即時埋入に適用した症例報告がある。この文献によると術前シミュレーショ

ンと実際の手術後の比較から、歯冠側で 0.9 mm、根尖側で 0.85 mm、角度として 5.3° の誤差があったとされている²⁸⁾。ロボットによるインプラント埋入手術において、埋入窩の形成とインプラント体の埋入は人間の手によらない、完全なロボット技術によるものである。そのため、前述のダイナミックナビゲーションの問題点である不良な骨質や抜歯窩、骨の裂開が生じた場合の手ぶれがなく、形成や埋入の軸が一定に保たれることは利点の一つである。さらにサージカルガイドでドリルの支持を行うわけではないので、術野は明瞭であり注水についても問題がない (図 8)。

問題点としては、やはり医療用ロボット共通に言えることであるが、コスト面に見合うだけの臨床的効果が得られるかということである。現在のロボット技術は埋入窩の形成とインプラント体の埋入という限られた手技にだけ使用されている。それに対して、インプラント治療の成功、もしくは失敗は多因子によるものであることは周知の事実である。例えば、インプラント周囲炎などの生物学的偶発症は癌、糖尿病、認知性障害など全身的な影響とインプラント周囲の清掃性に影響を受け²⁹⁾、機械的偶発症はフレームワークのデザインや材料の選択に関係があることが分かっている³⁰⁾。そのため、現状限られた範囲の手技にロボットを応用することによってインプラントの長期的成功への寄与と、またその費用対効果については明らかではなく、今後さらなる臨床研究が必要である。

ロボットによって患者の口腔内にインプラント埋入手術が行なわれる時代になった。しかしながら、手術に至る診断、術前のシミュレーション、術式選択や切開、剥離等の基本的術式は依然として人間が行うものである。そのため、現状では、歯科医師は適切な診断、術式選択を行うための外科、補綴に関わる知識、技術の習熟が今後も必須であることは変わらない。

VI. 今後の展望

今後は、各システムともに AI やヴァーチャルリアリティによる術前、術中の補助アイテムが導入されてくることが予想される。そのため、われわれは新しい技術を学び、触れる機会を常に多く持つておく必要がある。海外では簡単な CAD ソフトウェアを使用した教育を学部生や大学院生に行なっており、日本は諸外国に比較してデジタル技術の浸透が遅れていると感じられる。次世代を担う臨床医や研究者の育成のためには、日本においても学部教育の中で低学年時よりデジタル技術に関する講義や実習を本格的に進めるべき段

階にあると思われる。

特定の国、病院、人物による格差のある医療というのは本来であれば望ましいとはいえず、万人に平等に享受されるべきものである。しかしながら、人の手を介する物である以上、環境や技術的差異が生まれやすいという現状は否定できない。デジタル技術への依存を忌避する意見もあるが、ロボット技術等の最先端技術を上手く活用し、術者の技術レベルによる差異が少なく、より安定した治療システムを確立することが、国民ならびに人類の幸福につながるものと考えられる。

利益相反

本論文の内容に関して、著者に開示すべき利益相反関係にある企業などはない。

文 献

- 1) 武中 篤. ロボット支援手術の利点と問題点. 日本内分泌・甲状腺外科学会雑誌 2014 ; 31 (2) : 83-86.
- 2) Ochi M, Kanazawa M, Sato D, Kasugai S, Hirano S, Minakuchi S. Factors affecting accuracy of implant placement with mucosa-supported stereolithographic surgical guides in edentulous mandibles. *Comput Biol Med* 2013; 43: 1653-1660.
- 3) Seo C, Juodzbalys G. Accuracy of guided surgery via stereolithographic mucosa-supported surgical guide in implant surgery for edentulous patient: a systematic review. *J Oral Maxillofac Res* 2018; 9: e1. Published 2018 Mar 31. doi:10.5037/jomr.2018.9101
- 4) Tahmaseb A, Wismeijer D, Coucke W, Derksen W. Computer technology applications in surgical implant dentistry: a systematic review. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2014; 29 Suppl: 25-42.
- 5) Frösch L, Mukaddam K, Filippi A, Zitzmann NU, Kühl S. Comparison of heat generation between guided and conventional implant surgery for single and sequential drilling protocols-An in vitro study. *Clin Oral Implants Res* 2019; 30: 121-130.
- 6) Block MS, Emery RW, Cullum DR, Sheikh A. Implant placement is more accurate using dynamic navigation. *J Oral Maxillofac Surg* 2017; 75: 1377-1386.
- 7) Brief J, Edinger D, Hassfeld S, Eggers G. Accuracy of image-guided implantology. *Clin Oral Implants Res* 2005; 16: 495-501.
- 8) Somogyi-Ganss E, Holmes HI, Jokstad A. Accuracy of a novel prototype dynamic computer-assisted surgery system. *Clin Oral Implants Res* 2015; 26: 882-890.
- 9) Hoffmann J, Westendorff C, Gomez-Roman G, Reinert S. Accuracy of navigation-guided socket drilling before implant installation compared to the conventional free-hand method in a synthetic edentulous lower jaw model. *Clin Oral Implants Res* 2005; 16: 609-614.
- 10) Kramer FJ, Baethge C, Swennen G, Rosahl S. Navigated vs. conventional implant insertion for maxillary

- single tooth replacement. *Clin Oral Implants Res* 2005; 16: 60-68.
- 11) Gargallo-Albiol J, Barootchi S, Salomó-Coll O, Wang HL. Advantages and disadvantages of implant navigation surgery. A systematic review. *Ann Anat* 2019; 225: 1-10.
 - 12) Kwoh YS, Hou J, Jonckheere EA, Hayati S. A robot with improved absolute positioning accuracy for CT guided stereotactic brain surgery. *IEEE Trans Biomed Eng* 1988; 35: 153-160.
 - 13) Peter HU Lee, Atul A Gawande. The number of surgical procedures in an American lifetime in 3 states. *Journal of the American College of Surgeons* 2008; 207: 75.
 - 14) 国立がん研究センターがん情報サービス「がん登録・統計」(全国がん登録)
 - 15) Birkmeyer JD, Finks JF, O'Reilly A et al. Surgical skill and complication rates after bariatric surgery. *N Engl J Med* 2013; 369: 1434-1442.
 - 16) Chen ST, Wu MC, Hsu TC et al. Comparison of outcome and cost among open, laparoscopic, and robotic surgical treatments for rectal cancer: A propensity score matched analysis of nationwide inpatient sample data. *J Surg Oncol* 2018; 117: 497-505.
 - 17) Mizuno Y, Narimatsu H, Kodama Y, Matsumura T, Kami M. Mid-career changes in the occupation or specialty among general surgeons, from youth to middle age, have accelerated the shortage of general surgeons in Japan. *Surg Today* 2014; 44: 601-606.
 - 18) 神波大己. ロボット手術におけるトラブルシューティング. *Japanese Journal of Endourology* 2016; 29(1): 24-27.
 - 19) 令和元年度第3回診療報酬調査専門組織・医療技術評価分科会 議事次第
 - 20) Kayhan FT, Kaya KH, Altintas A, Sayin I. Transoral robotic supraglottic partial laryngectomy. *J Craniofac Surg* 2014; 25: 1422-1426.
 - 21) Liu Z, Li X, Tian S, Zhu T, Yao Y, Tao Y. Superiority of robotic surgery for cervical cancer in comparison with traditional approaches: A systematic review and meta-analysis. *Int J Surg* 2017; 40: 145-154.
 - 22) Marescaux J, Leroy J, Gagner M et al. Transatlantic robot-assisted telesurgery [published correction appears in *Nature* 2001 Dec 13; 414(6865):710]. *Nature* 2001; 413(6854): 379-380.
 - 23) Chung TK, Rosenthal EL, Magnuson JS, Carroll WR. Transoral robotic surgery for oropharyngeal and tongue cancer in the United States. *Laryngoscope* 2015; 125: 140-145.
 - 24) ロボット支援下内視鏡手術導入に関する指針(改定)
 - 25) 日本泌尿器内視鏡学会. 泌尿器科領域におけるロボット支援手術を行うに当たってのガイドライン.
 - 26) MassDevice. Neocis seeks 510(k) nod for Yomi edentulous splint for robotic dental surgery. <<https://www.massdevice.com/neocis-seeks-510k-nod-for-yomi-edentulous-splint-for-robotic-dental-surgery/>>; 2020 [accessed 27. 05. 20]
 - 27) Babita Y, Nazish B, Sejal ST, Rohit T, Vishakha P, Reshma R. MASTERING DENTAL IMPLANT PLACEMENT: A REVIEW. *J Int Dent Medical Res* 2017; 3: 220-227.
 - 28) Rawal S, Tillery DE Jr, Brewer P. Robotic-assisted prosthetically driven planning and immediate placement of a dental implant. *Compend Contin Educ Dent* 2020; 41: 26-31.
 - 29) Heitz-Mayfield LJ, Aaboe M, Araujo M et al. Group 4 ITI Consensus Report: Risks and biologic complications associated with implant dentistry. *Clin Oral Implants Res* 2018; 29: 351-358.
 - 30) Pjetursson BE, Thoma D, Jung R, Zwahlen M, Zembic A. A systematic review of the survival and complication rates of implant-supported fixed dental prostheses (FDPs) after a mean observation period of at least 5 years. *Clin Oral Implants Res* 2012; 23: 22-38.
-
- 著者連絡先：近藤 尚知
〒020-8505 岩手県盛岡市内丸19-1
Tel: 019-651-5111
Fax: 019-652-3820
E-mail: hisakondo@gmail.com