

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：32612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24659880

研究課題名(和文) ロボットアームと感覚機能を有した歯科インプラントナビゲーションシステム

研究課題名(英文) Telerobotic-assisted bone-drilling system using bilateral control

研究代表者

白田 慎 (Shin, Usuda)

慶應義塾大学・医学部・助教

研究者番号：70445287

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：デンタルインプラント手術では、術者が骨切削ドリルを正しい方向に操作する高度な術式を要求される。技術、経験不足は周囲組織の損傷を引き起こすことがある。その結果として、重要血管、神経損傷による出血、麻痺、または生命にかかわるリスクがある。これらの自己防止のために術者支援技術が重要となってくる。この問題を解決すべく私達は、ロボットアームと感覚機能を有した歯科インプラントナビゲーションシステムの開発を試みた。この研究において、触覚システムを応用したドリル自動停止システムが完成した。

研究成果の概要(英文)：In dental implant surgery, surgeons are required advanced techniques and extensive experiences to correctly handle the cutting device. The lack of techniques and experiences may bring on an over cut and damages to the surrounding tissue. As a result, this situation has risks of causing the subsequent complications or life-threatening accidents by heavy bleeding and nerve damage during surgery. The supporting technology for the surgeon is required to prevent these accidents. In order to solve this problem, we developed a haptic drilling robot. In this research, an automatic stop system for the haptic drilling robot will be proposed.

研究分野：歯科口腔外科学

キーワード：ロボットアーム 歯科インプラント ナビゲーションサージェリー

1. 研究開始当初の背景

近年、歯科インプラントが多く施設で行われるようになった一方で、医療過誤も多発しており、インプラント治療に絡む訴訟件数は年々増える一方である。主な医療過誤としては下歯槽神経の損傷、舌側皮質骨への穿孔、上顎洞へのインプラント迷入などである。以前よりわれわれは手術ナビゲーションシステムを使用しこれらの医療過誤を防止、治療計画に基づいた治療を可能とすべく臨床研究を行って来た。

そこでかつてのナビゲーションシステムとは一線を画するシステムを構築すべくロボットアームと感覚機能を有した歯科インプラントナビゲーションシステムの開発を目的に本研究を計画した。

2. 研究の目的

術者の主観や経験に頼らずコンピュータを使用し客観的に、手術の安全性、精度を向上させる目的で登場したのが手術ナビゲーションシステムである。脳神経外科の定位手術より発展した本システムはソフトウェア、ハードウェアの発展により、耳鼻咽喉科、整形外科などの領域で使用されている。

一方、本邦においては口腔外科領域での報告は少なく、上顎嚢胞、上顎癌、口腔インプラント埋入手術において報告されているだけである。歯科口腔外科手術に特化したナビゲーションシステムは非常に限られており必ずしも扱い易いものではない。本システムは、患者の手術領域の座標系と CT や MRI など得られた画像情報の座標系とを適合させ(レジストレーション)、手術中に操作している位置、姿勢および状態を画像上で認識するシステムのことである。

これらのシステムに求められているのはあくまでも正確な位置情報を術者に知らせることであった。しかしながら、本来手術というものは五感を使って行うべきものである。特に、骨の手術を目的とする歯科口腔外科手術(特に歯科インプラント手術)は触覚がとても重要な情報となる。座標軸の位置関係と触覚を併用することで、さらに安全なナビゲーションが可能ではないかと考えたのが本研究の始まりである。

われわれが目的としている歯科口腔外科手術に特化したシステムを構築すべく次に挙げるナビゲーションシステム条件を目標とした。

(1) ロボットアームによるアシストで位置決めを行う。

従来は術者がモニターを見ながら位置決めを行い、ナビゲーションに従いドリリングを行っていたが CT 上の計画に従い、位置、方向をロボットアームが半自動的にアシストしてくれる。画面を見ながらの手術から解放され術野に集中できるナビゲーションシステムは現在存在しない。

(2) 光学式ナビゲーションよりもコンパクトで簡便にレジストレーションができる。

従来の光学式ナビゲーションは可動する下顎骨へのレジストレーションが困難な場合があったり、ナビゲーション中は術者のポジショニングによりナビゲーションが中断されていた。現在われわれが開発中のモーションキャンセラーという技術を用いることにより、可動する下顎骨に対しても、ロボットアームが追従することができる。

(3) ハプティック技術(感覚伝送技術)を用いたドリルにより遠隔操作にてドリルを進めることができる。

位置方向はロボットアームにてアシストされているので、骨の感触に注意しながらドリリングをすることだけに集中でき、骨質や手技による埋入方向、位置の変化が生じない。現在、リアルタイムに感覚を伝送できるシステムは世界においてもわれわれのシステムのみである。

(4) ドリリング時のテレメトリー(遠隔測定)を行うことができる。

従来は術者の感覚のみで骨の状態を推察していたが、骨質やドリリング操作の客観的な評価ができる。今までは結果のみが評価されてきている手術の技術的な裏付けがとれる。

(5) 自動車の衝突防止システムのように危険時にコンピュータ制御によって手術動作の停止ができる。

下歯槽神経や舌側皮質骨の貫通など最悪の事態を回避できることは医療事故を防ぐ上でとても重要である。これには現在われわれが研究を行なっているハプティック技術によって得られたデータを解析し貫通前の危険予測が可能となりうる。

(6) システムを小型化することで手軽に使うことができ小規模診療所でも導入が可能である。

口腔外科小手術で手軽に使用できるナビゲーションシステムでなくては日常診療の事故防止には至らない。低価格で準備が簡便なものを開発することを目標とする。

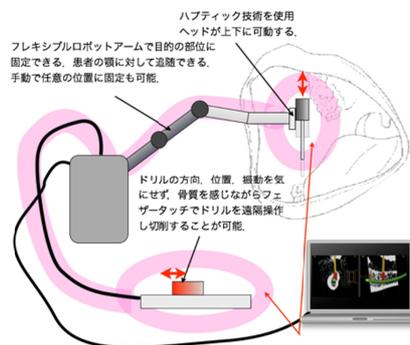


Fig.1 ナビゲーション構想

上記システムの構築を目的とし、感覚のデータ化と遠隔感知を可能にする骨ドリルの開発、評価、骨質分類の評価を行った。

3. 研究の方法

開発したドリリングシステムは、加速度を用いたバイラテラル制御による遠隔操作システムのハプティック技術によるものである。ドリルの回転に回転モータ、ロータリエンコーダを、切削方向の遠隔操作にバイラテラル制御を実装したリニアモータ、リニアエンコーダを用いて構成している(Fig2, 3)。

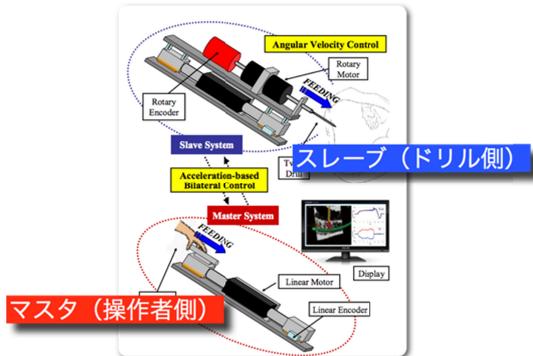


Fig.2 システム構成

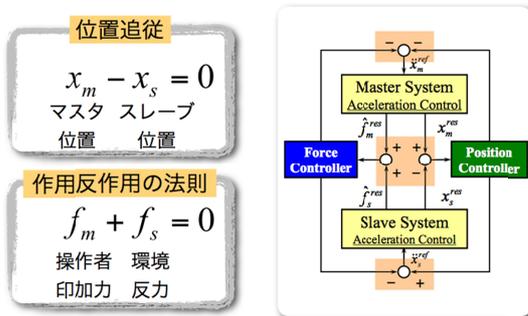


Fig.3 バイラテラル制御

本システムを用いて、インプラント埋入手術を想定したドリル回転数 900rpm にて、ファイバーボードを穿通する実験により、ドリル部(スレーブと呼称)での感覚が、遠隔の操作部(マスタと呼称)に感覚に正確に反映するかを測定した。さらに、豚下顎骨を穿通する実験を行い、ドリルの進んだ程度によって、骨質がどのように変化するかを測定した。ドリルを装填したスレーブで骨の切削力計測を行い、スレーブとは遠隔地にあるマスタで切削力の再現と記録、視覚的提示を行った。

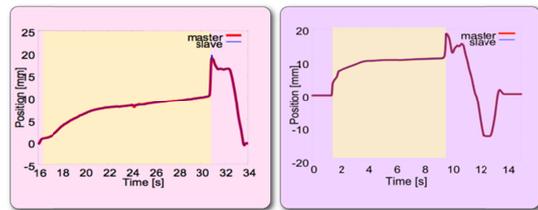
同様のドリルを使用し Misch の D1-D4 の分類で定義されている 4 種類の材料を用いて切削に対する数値化を行い検討した。インプラント埋入手術を想定したドリル回転数 900rpm にて、D1-D4 に属する 4 種類の材料(カエデ材, スプルー材, パルサ材, 発泡スチロール材)を切削する実験により、スレーブでの感覚が、マスタの感覚に正確に反映するかを測定した。実験ではドリルを装填し

たスレーブで骨の切削力計測を行い、遠隔地にあるマスタで切削力の再現と記録、視覚的提示を行った。

4. 研究成果

、ともに、マスタ・スレーブ間の位置追従と仮想的な作用反作用(Fig.4, 5)が実現され、操作者はマスタ側のリニアモータで仮想再現された切削力、とくに骨貫通時の急激な力変化を遠隔で鮮明に知覚できた。マスタ側での力応答の時間-周波数解析では、切削振動のスペクトルが 30Hz で観察され、切削力が緻密に再現されたことを確認した(Fig.6)。

マスタ (操作者側) 赤 スレーブ (ドリル側) 青

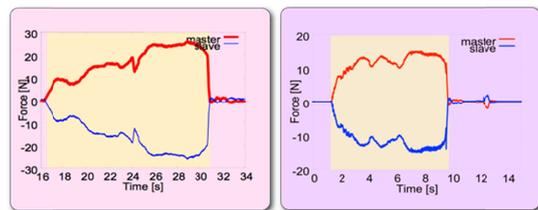


ファイバーボード

豚の下顎骨

Fig.4 位置応答

マスタ (操作者側) 赤 スレーブ (ドリル側) 青



ファイバーボード

豚の下顎骨

Fig.5 力応答

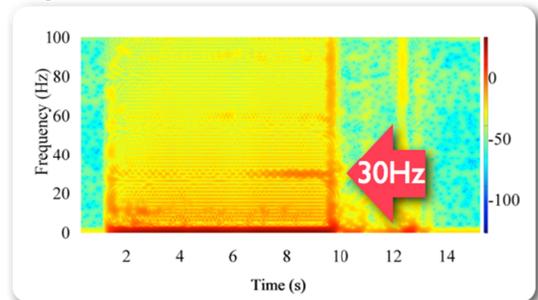


Fig.6 マスタ側 力応答の時間-周波数解析

についてはマスタ・スレーブ間の位置追従と仮想的な作用反作用が実現され、操作者はマスタ側のリニアモータで再現された切削力の材料による違いを鮮明に知覚できた。マスタとスレーブの力応答のグラフを Fig.7 に示す。縦軸はマスタの操作力およびスレーブへの反作用力を、横軸は切削深さを表す。なお、発泡スチロールの切削力はほぼ 0 であったため、グラフからは除外した。

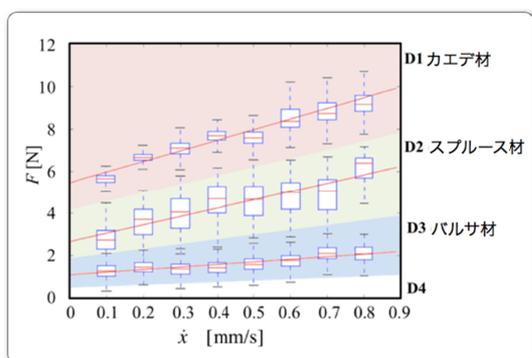


Fig.7 等速度実験結果

バイラテラル制御を実装したロボットドリル切削システムを開発し、その有用性を確認した。皮質骨から海綿骨、また皮質骨を貫通する変化を捉えることができ、さらには海面骨内でも単純な D1-4 分類では捉えられない複雑な骨質の変化を記録できた。これにより D1-D4 分類を数値化にて判別できる可能性が示唆された。そして、それが予後に反映できるような新たな骨質分類を提案ができることが示唆された。

今回の実験により感覚機能を有するドリル開発が可能となった。今後はナビゲーションシステムに対する感覚機能の応用を目的とし、新たなナビゲーションシステムの構築を目指していく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- (1) Usuda S, Truppe M, Kaneko T, Ogawa K, Asoda S, Hatazawa C, Usuda S, Yamada Y, Ewers R, Nakagawa T, Kawana H.: 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*, 査読有り, In Press, available online 17 September 2013. DOI: 10.1016
- (2) 兪 浩洋, 笠原佑介, 河奈裕正, 臼田 慎, 大西公平: ロボット切削システムのための骨密度分類法. *電気学会論文誌 D(産業応用部門誌)*, 査読有り, 133(3): 1-7, 2013.03 DOI:10.1541

〔学会発表〕(計 4 件)

- (1) Shin Usuda, Kohei Ohnishi, Koyo Yu, Taneaki Nakagawa, Hiromasa Kawana: Automatic Stop System for Avoiding Over Cut in Implant Surgery Using Haptic Drilling Robot. AAOMS 2014 Annual Meeting, Honolulu (USA) 2014.9.11 (Poster)

- (2) 臼田 慎, 大西公平, 兪浩洋, 中川種昭, 河奈裕正: ハプティック技術を応用した口腔インプラント教育用デバイスの開発. 第 58 回(社)日本口腔外科学会総会, 福岡国際会議場(福岡県・福岡市), 2013.10.11 (ポスター)
- (3) 臼田 慎, 兪浩洋, 大西公平, 中島悠, 中川種昭, 河奈裕正: 感覚のデータ化と遠隔感知が可能な骨ドリルを用いた骨質分類の評価. 第 16 回日本顎顔面インプラント学会, 福岡国際会議場(福岡県・福岡市), 2012.12.1 (口頭)
- (4) 兪浩洋, 大西公平, 河奈裕正, 臼田 慎: ロボットドリル切削システムを用いた CT 値推定法. 第 21 回日本コンピュータ外科学会大会, あわぎんホール(徳島県・徳島市), 2012.11.2 (ポスター)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)
取得状況(計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

臼田 慎 (USUDA, Shin)
慶應義塾大学・医学部・助教
研究者番号: 70445287

(2) 研究分担者

河奈 裕正 (KAWANA, Hiromasa)
慶應義塾大学・医学部・准教授
研究者番号: 50224803

大西 公平 (OHNISHI, Kohei)
慶應義塾大学・理工学部・教授
研究者番号: 80137984

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

兪 浩洋 (YU, Koyo)