

令和 4 年 5 月 25 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K10168

研究課題名（和文）Software-Defined Dentistryに向けた歯科治療ロボット開発

研究課題名（英文）Development of a robotic dental treatment system for software-defined dentistry

研究代表者

菊地 聖史（KIKUCHI, Masafumi）

鹿児島大学・医歯学域歯学系・教授

研究者番号：50250791

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：歯科へのCAD/CAM技術の導入により、歯科技工領域を中心としてデジタル化が急速に進んでいる。一方、歯の形成（切削）は、依然としてハンドピースによる手作業で行っている。本研究は、歯の切削を自動で行う歯科治療ロボットの開発を目的とした。従来の研究を踏まえ、小型化した口腔内切削装置による歯科治療ロボットの試作と評価を行った。その結果、改良すべき点はあるものの、ロボット技術による形成自動化の可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の試作歯科治療ロボットは、装置の大きさやデータの互換性などの点で問題があった。本研究では、口腔内に装着する装置を小型化するとともに、一般的なNCコードに対応させることを目指した。その結果、改良すべき点はあるものの、software-defined dentistry（ソフトウェアによって定義された歯科治療）のハードウェア・プラットフォームとしての歯科治療ロボット開発の可能性が示唆された。

研究成果の概要（英文）：The introduction of CAD/CAM technology into dentistry has led to rapid computerization, mainly in the field of dental laboratory work. However, tooth preparation is still performed manually using a dental handpiece. The purpose of this study was to automate tooth preparation by developing a robotic dental treatment system. A prototype system with downsized intraoral machining device based on previous research was made and tested. Although there are still improvements to be made, the possibility of automating tooth preparation through robot technology was suggested.

研究分野：歯科生体材料学、歯科理工学

キーワード：医療用ロボット 歯科用CAD/CAMシステム 歯牙切削 CNC

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

歯科への CAD/CAM 技術の導入により、歯科技工領域を中心としてデジタル化が急速に進んでいる。一方、歯の形成(切削)は、依然としてハンドピースによる手作業で行っている。現在の歯科用 CAD/CAM システムの性能を突き詰めていくと、最後は形成の良否の問題に帰結すると考えられることから、研究代表者は、形成のデジタル化(自動化)にいち早く取り組み、機械が得意とする部分について歯科医師を支援するという考えに基づいた独自の歯科治療ロボットの開発を進めてきた。しかし、従来の試作歯科治療ロボットは、その主要構成要素である切削装置が大きく重かった。そのため、切削装置の大部分を口腔外に配置せざるを得ず、その支持方法や患者の歯列に対する位置決め方法、患者の動きへの追従性、操作性、可搬性などの点で問題があった。また、データ形式が独自だったため、他のシステムとの互換性の点でも問題があった。

2. 研究の目的

本研究は、これまでの研究成果を踏まえ、臨床応用の実現性がより高いと考えられる新たな歯科治療ロボットの開発を目的とした。具体的には、従来の切削装置の機能を「口腔内切削装置」と「工具位置決め機構駆動装置」に分離し、両者を「動力伝達装置」でつなぐことで口腔内に装着する装置の小型軽量化を図るとともに、制御用プログラムを刷新することで汎用 NC コードによって制御可能な歯科治療ロボットの試作と評価を行い、問題点を明らかにし、解決策を検討することを旨とした。

3. 研究の方法

- (1) 口腔内切削装置の設計と試作：本研究の歯科治療ロボットの中核を担う、工具の回転機構と 3 次元的な位置決め機構を内蔵した口腔内切削装置の設計と試作を行った。
- (2) 歯科治療ロボットの設計と試作：口腔内切削装置以外の要素、すなわち、工具位置決め機構駆動装置、フレキシブルシャフトを用いた動力伝達装置、口腔内切削装置を印象用トレーに装着するためのアダプター、圧縮空気と冷却水の制御装置、インターフェース装置などについても設計と試作を行った。また、制御用プログラムも試作し、ロボットを構築した。
- (3) 試作歯科治療ロボットの評価と改良：試作したロボットの評価を行い、有効性や実用化に向けた問題点も明らかにするとともに、装置やプログラムの改良による問題解決を目指した。

4. 研究成果

(1) 口腔内切削装置の設計と試作

まず、特許第 6715518 号「口腔内加工装置及び口腔内治療システム」に基づいて装置の仕様策定と基本設計を行った。可動範囲は、大白歯 1 歯が形成できる範囲とした。次に、装置の具体的な構造や寸法、材質などを検討し、3D CAD ソフトウェアを用いて詳細設計を行った。さらに、高精細の光造形方式 3D プリンターを用いて樹脂で部品を製作し、それらを組み立てて原寸大模型を製作し、構造や寸法の検討を行った。

原寸大模型について、実動するように樹脂部品の金属部品への置き換えを図った。工具の回転機構には、市販エアタービンハンドピースのローター部品を流用した。試作装置では、2 組のウォームギヤとウォームホイールを用いているが、ウォームギヤについては、金属製かつ軸径が 1.5 mm で唯一入手できたものを用いた。また、ウォームホイールについては、平歯車 2 枚を放電加工で製作し、それらを重ねることで代用した。ウォームギヤへの適合は、2 枚の平歯車の位相関係で調整した。製作の難易度が高い一部の部品については、樹脂のままとなった。工具位置決め機構の r 軸と z 軸の送りねじにバックラッシュが認められたことから、ダブルナットとスプリングによる与圧機構を追加して改善を図った。

(2) 歯科治療ロボットの設計と試作

口腔内切削装置以外の要素についても設計・試作し、歯科治療ロボットを構築した(図 1)。試作装置は、口腔内切削装置に内蔵された工具位置決め機構(従動側)と口腔外の駆動装置(駆動側)が分離されているので、両者の相対角度が変わったときに駆動側の回転とは別の意図しない回転が従動側に伝達されてしまうという問題がある。そこで、同期用のフレキシブルシャフトを設けることでこの問題の解決を図った。すなわち、患者の動きによって口腔内切削装置がフレキシブルシャフト周りに回転しても、駆動装置も同じ方向に同じ角度だけ回転することで両者の相対角度が変わらないようにした。

試作装置では、フレキシブルシャフトとして超弾性 Ni-Ti 合金ワイヤーを用いた。フレキシブルシャフトは、等速性を有し、遊びによるバックラッシュがないが、負荷トルクによるねじれの問題がある。フレキシブルシャフトを短くしたり太くしたりすれば、ねじれは減るが、柔軟性が損なわれる。試作装置では、長さを約 0.3 m とし、太さを同期用が $\phi 2$ mm、軸駆動用が $\phi 1.5$ mm、 z 軸と r 軸駆動用が $\phi 1$ mm とした。なお、口腔内切削装置側の減速比を大きくすることができれば、ねじれを減らしたり、細くして柔軟性を高めたりすることが可能と考えられる。

患者が動いた場合や工具位置決め機構が動作した場合に、駆動装置の3個のステッピングモーターの出力軸と口腔内切削装置の入力軸との距離が変わるが、当初はフレキシブルシャフトの柔軟性で吸収する予定だった。しかし、前述の長さとおさの場合、吸収しきれないことが分かった。そこで、モーターの配置とフレキシブルシャフトの取り回しを変更し、さらにフレキシブルシャフトとモーターを接続する軸継手に可変長機構を設けることにより問題の解決を図った。

口腔内切削装置を印象材と印象用トレーを用いて歯列に固定するため、既成トレーの柄の部分に装着するアダプターを試作した(図2)。同アダプターは、2つの部品からなり、一方には複数のネジ穴を、他方には長穴を設け、形成する部位に応じて口腔内切削装置の装着位置を近遠心方向と頬舌方向の両方について調整できるようにした。

使用したステッピングモーターが開ループ制御のため、最初に原点設定が必要である。そこで、精密位置決めスイッチを使用した原点設定用装置を試作した(図3)。その他の装置としては、ステッピングモーターのドライバー、圧縮空気と冷却水の制御装置、回転速度計、ハンドコントローラー、非常停止ボタン、制御用コンピューターとインターフェース装置などが挙げられる。

制御用プログラムは、LinuxCNC2.7をベースとし、NC座標系(xyz直交座標系)と口腔内切削装置座標系(rz円筒座標系)を相互変換するための処理や切削負荷に応じて工具の送り速度を自動制御するための処理、ハンドコントローラーによって工具の位置を手動制御するための処理などを追加した。

(3) 試作歯科治療ロボットの評価と改良

試作ロボットの動作確認を行ったところ、原点設定が行われることと、一般的なNCプログラムで使用されているGコード(準備機能)とx, y, z座標値を入力することで口腔内切削装置のr, zの各軸が動作し、工具の位置を制御できることを確認した。また、Mコード(補助機能)を入力することでエアタービンと冷却水のオンオフをそれぞれ制御できることも確認した。

装置の試運転によって判明した問題点として、口腔内切削装置の一部の部品について樹脂製から金属製へ置き換えることができなかったことから、工具位置決め機構の十分な剛性が得られなかったことが挙げられる。また、工具の回転機構に市販のローター部品を流用し、それが収まるヘッド部分とノズルを含む給排気系を新規に設計したが、無負荷時回転速度がオリジナルの80%程度しか得られなかった。そこで、ローターだけでなく、ヘッド部分も市販のハンドピースを切断して使用することを検討したが、同型のハンドピースが製造中止となってしまったことから、研究期間内の改良を断念した。さらに、給水系について、口腔内切削装置の小型化を優先して内装式としたが、配管の接続部分での水密性と組立性・分解性の両立が難しかったため、研究期間内に切削試験を実施するに至らなかった。

本研究の成果として、装置に改良すべき点は残されているものの、“software-defined dentistry”(ソフトウェアによって定義された歯科治療)のハードウェア・プラットフォームとしての歯科治療ロボットを開発できる可能性が示唆された。今後の研究の展開として、装置の設計を見直すことで問題の解消を図ることが考えられる。

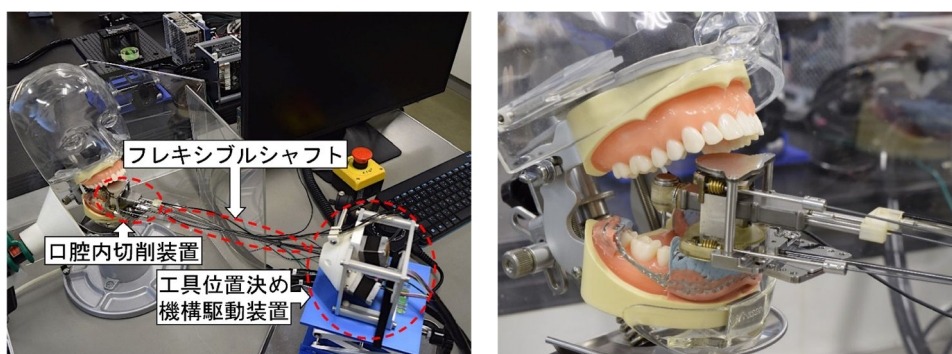


図1 試作歯科治療ロボットの全体像(左)と口腔内切削装置(右)

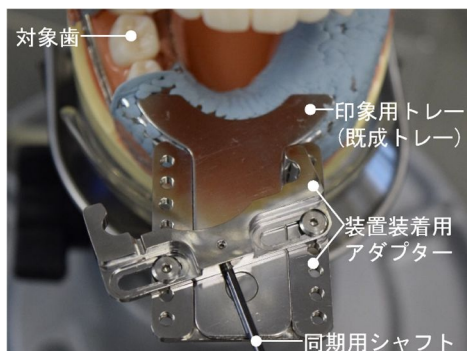


図2 装置装着用アダプター

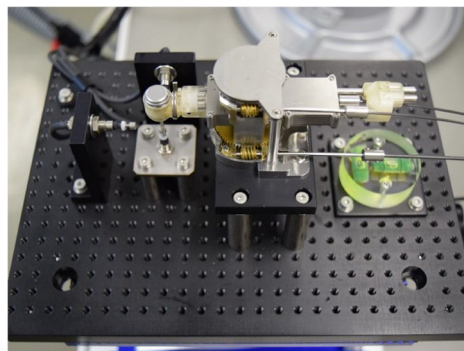


図3 原点設定用装置

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 菊地聖史
2. 発表標題 Software-Defined Dentistryに向けた歯科治療ロボットの開発
3. 学会等名 第78回日本歯科理工学会学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>・菊地聖史、ソフトウェア・デファインド歯科に向けた歯科治療ロボットの開発、微細加工工業会主催 第4回先端加工技術セミナー2019（招待講演）、2019年10月11日、鹿児島市</p> <p>・歯科治療ロボットの開発～フルデジタル化を通じて目指す歯科治療技術の集積と精度向上～、鹿大ジャーナル、No.216、14-15、2021 https://www.kagoshima-u.ac.jp/about/210319_kadai_janal216_koho.pdf</p> <p>・研究期間前に出願したが本研究と密接な関係があり、研究期間中に取得した産業財産権 名称：口腔内加工装置及び口腔内治療システム、発明者：菊地聖史、権利者：国立大学法人鹿児島大学、種類、番号：特許、第6715518号、出願年：2016年、取得年：2020年、国内・外国の別：国内</p>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	河野 博史 (KONO Hiroshi) (20507165)	鹿児島大学・医歯学域歯学系・講師 (17701)	
研究分担者	近藤 英二 (KONDO Eiji) (10183352)	鹿児島大学・理工学域工学系・教授 (17701)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	熊澤 典良 (KUMAZAWA Noriyoshi) (60284907)	鹿児島大学・理工学域工学系・准教授 (17701)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 協 力 者	南 弘之 (MINAMI Hiroyuki)		
研究 協 力 者	西谷 佳浩 (NISHITANI Yoshihiro)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関