

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：32613

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K11339

研究課題名(和文) 歯科矯正治療支援を目指した歯の移動予測データ同化システムの構築

研究課題名(英文) A data assimilation-based prediction system on tooth movement for supporting orthodontic treatment

研究代表者

須賀 一博 (Suga, Kazuhiro)

工学院大学・工学部・准教授

研究者番号：30408992

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：安全で効果的な歯科矯正治療を実現するために、力学的根拠に基づく歯の移動予測手法を開発した。まず、歯の移動を予測するための簡易力学モデルを提案した。簡易力学モデルと逆解析手法を組み合わせて、矯正力が作用する歯の移動を予測する手法を提案した。さらに、歯科矯正ワイヤーが歯に作用させる矯正力を定量的に評価する有限要素モデルを提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

健康的な歯並びの維持・実現が、心身の健康に繋がる。健康的な歯並びを維持・実現する歯科矯正治療は、これまで医師の経験に基づいて治療方針が決定されてきた。そのため、計画通りに治療が進まない、重大な障害が発生する事例も報告されている。本研究成果は、力学的根拠に基づいて歯の移動過程を予測を実現することで、安全かつ効果的な歯科矯正治療の実現に貢献するものである。さらには、人類の心身の健康に貢献するものである。

研究成果の概要(英文)：This research developed a mechanics based a tooth movement prediction system to realize safe and effective orthodontic treatment. Firstly, a simple mechanical model was developed to predict tooth movement. Combining the simple mechanical model with an inverse analysis, we proposed a method to predict tooth movement under orthodontic forces. Furthermore, a finite element model was proposed to evaluate the orthodontic force quantitatively by the orthodontic wire.

研究分野：計算科学

キーワード：Orthodontics Inverse problem Finite element method NiTi wire Data assimilation

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 健康的な歯並びを維持・実現することが、心身の健康に繋がることが科学的に証明されてきている。健康的な歯並びを維持・実現する歯科矯正治療は、これまで医師の経験に基づいて治療方針が決定されてきた。一方、患者ごとに状況が異なるため、計画通りに治療が進まない、重大な障害が発生する事例も報告されている。そこで、安全かつ効率的な矯正治療を実現する支援方法の確立が望まれている。特に、力学的根拠に基づいて歯の移動過程を予測することが望まれている。

(2) 有限要素法に基づく詳細な数値モデルを用いて、歯の移動を予測しようとする研究が報告されている。しかし、複雑な歯の移動メカニズム、患者ごとの異なる材料定数、矯正力の実効値などに高い不確実性が存在する。そのため、力学シミュレーションだけで歯の移動を定量的かつ長期間に渡って予測することは極めて困難である。さらに、有限要素法を用いる場合、歯の形状モデル作成やシミュレーション実行に多大な時間を要する。したがって、詳細数値モデル、形状モデルを用いた歯の移動予測手法は、個別治療への応用には適さない。

(3) 歯列の3次元形状は光学スキャナを使って簡単かつ精度良く計測できる。さらに、複数枚の画像から3次元形状を再構成するアルゴリズムが開発されている。今後は個人でも手軽に精度良く歯列の3次元形状が計測できる。一方、不確実性を含んだシミュレーション結果と限られた計測データを融合することで、信頼性の高いシミュレーションを実現しようとする「データ同化」に関する研究が積極的に進められている。簡単に撮影できる歯列の3次元形状計測データと、不確実性を含む力学シミュレーション結果のデータ同化によって、歯の移動を精度良く予測できる可能性がある。

2. 研究の目的

安全・効果的な個別歯科矯正治療の実現を目指した歯の移動予測システムの開発を目的とする。本研究の独自性として、個別治療での臨床利用とデータ同化を見据えて敢えて簡略数値モデルを提案する点、歯科矯正医と共同で臨床応用を実現しようとする点、簡略数値モデルと光学計測から信頼性の高い歯の移動予測システムを構築しようとする点が挙げられる。研究の創造性として、予測システムの利用によって新人矯正医の教育や新治療の検討を容易にする点、予測を可能にすることで疾病の予防や治療技術の開発に貢献する点、革新的な予防法や診断法を確立されることで健康長寿社会の実現に貢献する点が挙げられる。

3. 研究の方法

(1) ワイヤの矯正力予測

矯正ワイヤの設置条件が矯正力に及ぼす影響を定量的に予測する。矯正力評価は有限要素法を用いて行う。有限要素法による評価結果と矯正力計測システムによる計測結果を比較して妥当性を検証する。矯正力測定システムは、模擬歯を並べて作った歯列に矯正ワイヤを設置した際に、歯に作用する矯正力をセンサーで計測する。模擬2歯モデルを用いて有効性検証を行う。有限要素法の解析モデルの開発と矯正力評価を申請者が行う。矯正ワイヤ設置は歯科矯正医師、矯正力計測は計測システム開発者の協力を得て実施する。

(2) 歯の移動予測

矯正力による歯の移動方向を予測する簡略数値モデルを提案する。歯は、非常に薄い歯根膜と呼ばれる膜を介して顎の骨に繋がっている。歯根膜の変形が変形初期の歯の移動方向を決定する。そこで、歯根膜の力学挙動を「ばね」としてモデル化する。歯根膜厚さと変位量の比で、歯根膜のひずみを計算する。ひずみにヤング率を掛けることで、歯根膜に働く力を得る。

歯と歯根膜の剛性の違いから、歯は剛体と仮定する。したがって、歯の姿勢変化は、並進移動と回転移動の6変数で表現できる。力とモーメントの釣合いから歯の姿勢変化を表現する6変数を同定する最適化問題を解くことで、歯の姿勢を決定する。提案モデルには、複雑かつ薄い歯根膜の形状モデル化が不要、有限要素法に比べ計算負荷が低い等の利点がある。

有効性検証のため簡略数値モデルによる予測結果と模擬実験の結果を比較する。歯科矯正医が教育や訓練に用いる模擬歯モデルを用いて矯正力による歯の移動実験を行う。まず、既知の矯正力を作用させた実験を行う。次に、矯正ワイヤを設置した実験を行う。(1)により評価した矯正力から簡略数値モデルによる移動予測を行う。移動実験は歯科矯正医の協力を得て実施する。

(3) 定量的予測を実現するためのデータ同化アルゴリズムの開発

歯の移動予測システムは、【欠点】歯の移動量を定量的に予測することが困難である。数値モデル、初期条件、材料定数を正確に決められないことが原因である。一方、光学スキャナを使っ

て骨に埋まっていない歯の歯冠部の3次元形状は簡単かつ精度良く計測できる。しかし、歯冠部の形状データから、【欠点】歯根膜の力学状態推定、歯の移動方向予測は不可能である。

データ同化により【欠点】を克服する。矯正治療中に撮影できる歯列歯冠部の3次元形状データを観測量、移動方向予測システムを観測方程式とする。まず、観測方程式で予測される歯の変位と観測される変位の違いから、実際の材料定数と矯正力を同定する。次に、同定された材料定数と矯正力を用いて、観測方程式によるシミュレーションを行うことで定量的な移動量を決定する。

数値実験による理論検証を行う。模擬歯モデルによる実験および臨床データを用いた有効性検証を行う。

4. 研究成果

(1) ワイヤの矯正力予測

矯正ワイヤがブラケットに作用させる矯正力を定量的に評価するための有限要素モデルを開発した。材料モデル、要素分割、境界条件を検討した。開発した有限要素モデルによる矯正力の予測結果を実験と比較した。矯正モーメントを制御に用いられるV字の曲げ有するVバンドワイヤを対象とした。ワイヤの初期形状を図1に示す。図中の θ がバンド角と表す。ブラケットの配置を図2に示す。ブラケット中心間の距離を10mmに固定し、右ブラケットに対する左ブラケットの傾斜角 α を変化させた。

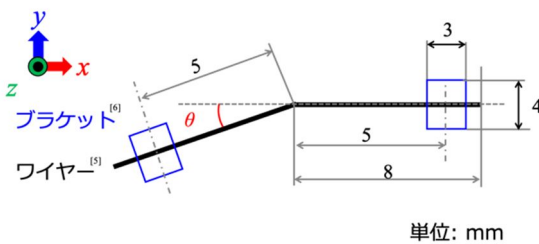


Fig.1 ワイヤのバンド角 θ

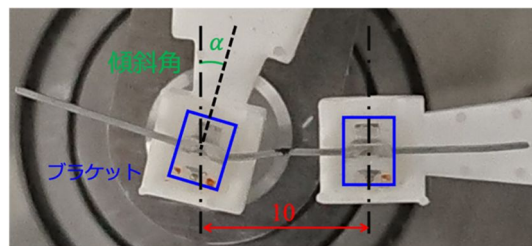


Fig.2 ブラケット配置

バンド角 $\theta=30^\circ$ として、スロット間角度 α を -30° から 0° まで変化させて矯正力を比較した。力のy方向成分 F_y とモーメントのz方向成分 M_z の比較結果を図3, 4に示す。解析による予測結果と実験による計測結果がよく一致していることがわかる。

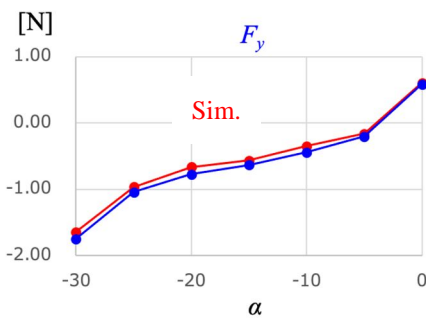


Fig.3 力のy方向成分の比較

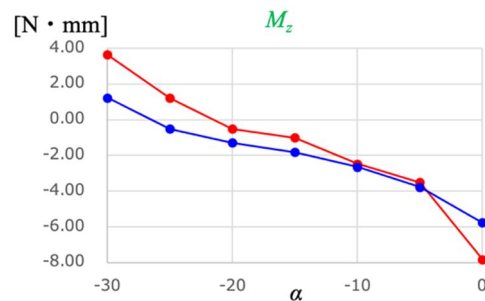


Fig.4 モーメントのz方向成分の比較

(2) 歯の移動予測

逆解析手法を用いた簡便な初期動揺予測手法を提案した。しかし、逆解析に用いる目的関数の非線形性から、精度の高い予測ができない場合があった。そこで、歯の初期動揺予測逆問題における予測精度を向上させることを目的とする。まず、目的関数に含まれる、力と力のモーメントの感度差を調整するためのスケーリング係数を導入した。次に、目的関数の多峰性を克服して最適解を得るために、差分進化法による最適化を行った。

数値実験により予測精度を評価したグラフを図5に示す。歯の移動量を、 x, y, z の並進成分と各軸まわりの回転量 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ で比較している。提案する工夫により予測精度が向上することがわかる。

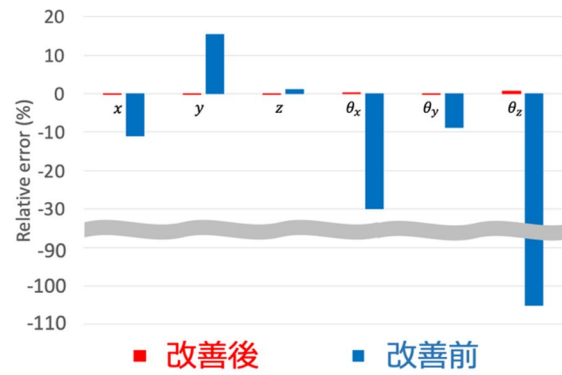


Fig.5 歯の移動予測精度

(3) 定量的予測を実現するためのデータ同化アルゴリズムの開発

コロナ禍のために共同研究機関において光学印象による計測が困難であったため、本研究内容を実施することが叶わなかった。一方で、(1)、(2)の研究を当初予定より進めることができた。また、本研究の成果を臨床応用するためにCTから歯の3Dモデルを自動生成するための研究を進めることができた。(1)、(2)の成果を応用し、(3)の実現に向けた研究を進めていく。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 須賀一博	4. 巻 40
2. 論文標題 数値解析の仕組みと解析のポイント	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本歯科理工学会誌	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 宇尾基弘, 頼威任, 簡野瑞誠, 小野卓史, 竹村裕, 須賀一博, 曾我公平	4. 巻 40
2. 論文標題 小型力覚センサーを用いた矯正カシミュレーション	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本歯科理工学会誌	6. 最初と最後の頁 29-32
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計24件（うち招待講演 1件／うち国際学会 13件）

1. 発表者名 Kazuhiro Suga
2. 発表標題 A Computational Support Platform to Orthodontic Treatment for Oral Health
3. 学会等名 Mechanical Engineering Symposium 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuhiro Suga
2. 発表標題 A Computational Design of Orthodontic V-Bend Wire System based on Force and Moment during Tooth Movement
3. 学会等名 Mechanical Engineering Multiconference 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuhiro Suga, Akira Shinohara
2. 発表標題 Tooth Segmentations from CBCT based on Image Processing with Tooth Smoothness and based on Deep Learning
3. 学会等名 ISAT 18, The 18th International Symposium on Advanced Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hikaru Kobayashi, Kazuhiro Suga
2. 発表標題 A Numerical Study on Intravascular Pressure Estimation with Convolutional Neural Network
3. 学会等名 ISAT 18, The 18th International Symposium on Advanced Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yutaro Iso, Kazuhiro Suga
2. 発表標題 Root shape prediction from crown shape using machine learning (Poster)
3. 学会等名 ISAT 18, The 18th International Symposium on Advanced Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuhiro Suga
2. 発表標題 Support of Orthodontic Treatment by Computational Mechanics
3. 学会等名 APCOM 2019, The Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kunio Shimoda, Satoki Tsuichihara, Hiroshi Takemura, Kohei Soga, Kazuhiro Suga, Wei-Jen Lai, Sunmin Kim, Zusei Kanno, and Motohiro Uo
2. 発表標題 Orthodontic Force and Moment Sensing Device: Influence of Deflection of Wire and Tooth's Orientation
3. 学会等名 2019 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (IEEE SMC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuhiro Suga
2. 発表標題 Development of Supporting System for Safety and Efficient Orthodontic Treatment
3. 学会等名 The 17th International Symposium on Advanced Technology (ISAT-17) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuhiro Suga
2. 発表標題 Computational Methods for Supporting Patient-Specific Treatment on Orthodontics
3. 学会等名 WCCM 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐々木北都, 須賀一博
2. 発表標題 深層学習を用いたCBCT像からの歯領域自動抽出
3. 学会等名 日本機械学会 関東学生会第57回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 永吉祐介, 須賀一博
2. 発表標題 歯の初期動揺予測逆問題における解探索手法の検討
3. 学会等名 日本機械学会 関東学生会第57回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川尻圭佑, 須賀一博
2. 発表標題 携帯撮影機器を用いた口腔内3次元形状計測のための撮影条件の検討
3. 学会等名 日本機械学会 関東学生会第57回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 須賀一博
2. 発表標題 素人こそ医工連携
3. 学会等名 第10回バイオメディカルインターフェースワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 須賀一博
2. 発表標題 データ同化を見据えた簡便な歯の初期動揺予測手法
3. 学会等名 日本機械学会 第31回計算力学講演会 (CMD2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 須賀一博
2. 発表標題 深層学習を用いたCT像からの歯の三次元形状再構成手法の検討
3. 学会等名 日本機械学会 第31回計算力学講演会 (CMD2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 須賀一博
2. 発表標題 歯科矯正治療支援のための効率的な歯の初期動揺予測モデルの有効性評価
3. 学会等名 第23回計算工学講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 須賀一博, 西濱悠
2. 発表標題 歯の動揺に伴い超弾性矯正ワイヤーが歯に及ぼす回転モーメントの経時変化
3. 学会等名 第23回計算工学講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 須賀一博, 桂彰吾
2. 発表標題 歯の初期動揺予測逆問題における予測精度向上
3. 学会等名 第26回計算工学講演会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 須賀一博, 大里竜介
2. 発表標題 自己教師あり学習によるCBCT像のノイズ低減効果の評価と学習効率化
3. 学会等名 第26回計算工学講演会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 須賀一博, 田中辰弥, 近藤真阿久, 竹村裕
2. 発表標題 Vバンドワイヤーによる歯科矯正力予測シミュレーションの妥当性評価
3. 学会等名 第27回計算工学講演会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 Yutaro Iso, Kazuhiro Suga
2. 発表標題 Verification of Dentition Shape Extraction Method
3. 学会等名 The 20th International Symposium on Advanced Technology (ISAT-20) (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 Mark Kondo, Kohei Soga, Kazuhiro Suga, Naoki Mikami, Wei-Jen Lai, Sunmin Kim, Ikuo Yonemitsu, Zusei Kanno, Motohiro Uo and Hiroshi Takemura
2. 発表標題 Quantitative Evaluation by Orthodontic Moment Measurement Device -Comparative study of the two types of wire during orthodontic treatment-
3. 学会等名 6th International Conference on Intelligent Informatics and BioMedical Sciences(ICIBMS 2021) (国際学会)
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 Kazuhiro Suga
2. 発表標題 Our Applications of Numerical Simulation and Machine Learning to Orthodontic Treatment
3. 学会等名 Virtual Conference on Computational and Experimental Mechanics (VCCEM '21) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 Yutaro Iso, Kazuhiro Suga
2. 発表標題 Reconstruction of Intraoral 3D Shape Using Machine Learning
3. 学会等名 Virtual Conference on Computational and Experimental Mechanics (VCCEM '21) (国際学会)
4. 発表年 2020年～2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 歯の位置の分析装置、歯の領域抽出モデル生成方法、歯の位置の分析方法、プログラム、および記録媒体	発明者 小林 匡治, 石田 雄之, 須賀 一博 他3名	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、085115	取得年 2019年	国内・外国の別 国内

〔その他〕

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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------