

令和 5 年 5 月 8 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K10047

研究課題名（和文）生体データに基づく個別筋骨格シミュレーションに関する研究

研究課題名（英文）Research for the musculoskeletal simulation based on biological data

研究代表者

重光 竜二（Shigemitsu, Ryuji）

東北大学・大学病院・助教

研究者番号：00508921

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究に実施したデータプロセッシング手法により、下顎運動における運動ノイズを軽減しつつ、全体としての運動特性を維持することが可能であった。また、関節窩における拘束を適切に表現し、運動力学的に個別別の運動を再現する筋骨格シミュレーションの構築に成功した。本研究にて開発された方法論的手法は、バイオメカニクスが問題の知識に貢献できるプロセスの最初のステップである。開発されたモデルはモーションキャプチャデータから患者固有の特徴を抽出し、関節窩の拘束面を再現性したうえで患者固有のモデルに実装する可能性を示している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では歯科における患者個別医療実現のため、筋骨格モデルという生体性シミュレーションを開発しました。個人の運動をモーションキャプチャ技術を使って取得し、コンピューターシミュレーション上で再現した結果、かなりの精度で一致する結果が見られました。下顎の動きに基づいた将来の比較研究は、顎関節症や歯科疾患における運動に基づいた病態の解明に役に立つ可能性があります。またこのような生体シミュレーションの発展は、シミュレーションベースの新たな診断・評価システムへの道を開く可能性があり、歯科における将来のデジタル化との親和性が非常に期待できます。

研究成果の概要（英文）：The data processing method implemented in this study could maintain the movement characteristics but reducing the data noise in mandibular movement. In addition, we succeeded in constructing a musculoskeletal simulation that appropriately makes the constraint in the TMJ and reproduces the individual movement kinematically. The methodological approach developed in this study is the first step in the process by which biomechanics can contribute to the knowledge of dental problem. The developed model demonstrates the feasibility of extracting patient-specific features from motion capture data, reproducibly implementing the constraining surface of the TMJ into patient-specific models.

研究分野：生体力学

キーワード：筋骨格解析 下顎運動

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

歯科臨床において、顎運動計測は咀嚼・嚥下・発音等、機能運動の際の下顎骨の動きを分析・解析し得る有効な検査法である(1)。顎機能学会編顎口腔評価ガイドライン(2010年度初版、2016年改訂版)においても、顎運動に関連した複数のクリニカルクエスチョン(CQ)に対応するかたちで顎運動検査の有効性に関するエビデンスが示され、同検査法の臨床的な有効性が示されている。臨床的には、タッピング運動時、咀嚼運動時、限界運動時の顎運動計測は、下顎切歯点や下顎頭の運動量、運動範囲、運動経路・運動リズムのパターンや安定性など各種運動学的パラメータを多角的に分析することが可能であるとされている。特に、健常者と顎関節症患者との間では運動学的パラメータの発現・表現に差異が認められ、歯科治療により少なからず改善が認められることが示されている(2)。また近年では、有床義歯咀嚼機能検査が保険収載され、グミゼリー試験等の咀嚼能力測定と顎運動計測を併用することにより、有床義歯の装着による咀嚼機能・顎機能の回復程度を客観的かつ総合的に評価することで、新義歯の調整・指導・管理を実施することが可能である。すなわち、顎運動計測は顎関節症患者のみならず、義歯治療などの歯科補綴治療を必要とする患者における顎口腔機能を評価する検査法のひとつとして広がりを見せている。一方で、臨床的な治療経過における顎運動計測は運動学的変化を捉え、これを分析することは可能であるが、筋骨格系との関連すなわち“運動力学”には未解明な領域でもある。つまり、顎関節症を初めとした歯科疾患における筋電図等を用いた生理学的側面からのアプローチが古くからなされているものの、神経筋機構の運動力学的側面は今後の研究課題である。

2. 研究の目的

筋骨格解析は、生体内で測定することが困難な内力を推定するための有効な計算方法である。運動力学に基づくこの解析手法は筋活動量、筋力をコンポーネントの動きをインプットすることにより逆動力学にシミュレーションする。比較的新しい解析手法である本手法は、産業をはじめとしてスポーツ科学、整形外科学、など人体の運動を対象とした領域での応用が進んでいるものの、歯科学領域での応用はまだ少ない。そこで本研究では、下顎運動のモーションデータを使用して筋骨格モデルを駆動する研究を考案した。つまり、個々の顎運動に基づく動作定義に基づいた、個別別筋骨格シミュレーション: Personalized Musculoskeletal Simulationを開発する。「顎機能・咀嚼機能」は、頭頸部骨に筋付着部を有する多数の咀嚼系筋群の協調運動によって生まれ、発揮される筋力は大きさ・方向・タイミングともに非常に複雑である。また、筋力により発生した機能力を受容する歯列・顎関節における回転・並進運動を定義する拘束条件もしかりである。すなわち、「顎機能・咀嚼機能」を再現する生体シミュレーションの実現には、咀嚼系筋群の協調運動を高いリアリティで再現し骨格・筋肉・腱・靭帯などコンポーネント間の拘束条件を適切に設定することが必要である。この実現のためのステップとして、モーションキャプチャデータから顎関節の骨表面特性を表す患者固有の境界条件をシミュレーションに実装することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 下顎運動データの計測

顎関節症患者の顎運動データを本研究のインプットとして用いた。初診時および治療経過の複数のタイムポイントにて下顎運動を計測し、運動の変化を経時的に取得した。顎関節症の初期治療として運動療法、理学療法、スプリント療法を適応した(3)(図1)。歯科用モーションキャプチャシステム(ARCUS Digma, Kavo Dental Excellence、日本)を用いて、開閉口運動、限界運動(前方ポッセルト、側方ポッセルト)咀嚼運動時の切歯点・左右下顎頭の動きを記録および分析しました(図2)。切歯点と左右の顎頭の動きを記録するために、バイトフォークを下歯列弓に固定し、記録後、マーカの追跡データをエクスポートした。記録は、治療経過中に3度実施された:治療開始前、治療開始3か月後、6か月後。測定されたモーションデータを、低域通過濾波器:ローパスフィルター(LPF)と3次バターワースフィルターでデジタル処理した。最大開口時には特定のノイズの問題が存在し、モーションの特性を維持するためにフィルタパラメータを繰り返しキャリブレーションする必要があった。フィルタリングされた顎運動データは、AnyBody Modeling System 以下 AMS (AnyBody Technology、デンマーク、オールボー)の筋骨格シミュレーションの入力ドライバーとして使用した。



図1 スプリント療法の適応

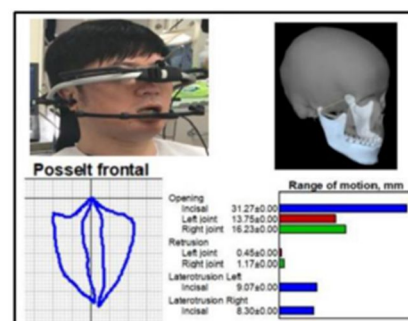


図2 下顎運動の計測

(2) 患者固有の境界条件の設定と運動力学解析

AMS の頭蓋骨と下顎骨のモデルは、リポジトリに格納されている 30 歳の男性の CT スキャンに基づいている (4) (図 3)。頭蓋骨全体と下顎骨は AMS にてセグメント化され、筋肉の付着と視覚化を定義するために使用した。実際の患者の解剖学的構造を表すために、左右の関節窩、つまり顎頭への接触面は、パラメトリック二相性拘束面でモデル化した (図 4)。2 つの平面は、患者固有の原点で交わり、頭骨基準座標系で患者固有の角度 α と β にて表現した。これらのパラメータは、顎頭の関節窩での動きを制限する。この動きはモーションキャプチャシステムによって計測され、モデルは固有のパラメータにリバースエンジニアリングが可能である。つまり、個体

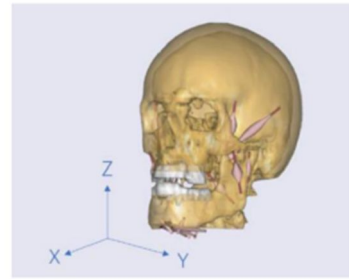


図 3 モデル形状

変更されたさいにも対応可能なシステムである。顎頭は、3 次元すべてで回転し、指定された拘束平面に沿って併進移動が可能である。つまり、両方の顎頭が 5 自由度で移動する。モデルには左右側 16 個の咀嚼筋と 8 個の舌骨上筋つまり全 24 個の顎の筋肉を実装している。各筋肉は、収縮要素、平行弾性要素、および連続弾性要素で構成されるヒル型筋肉

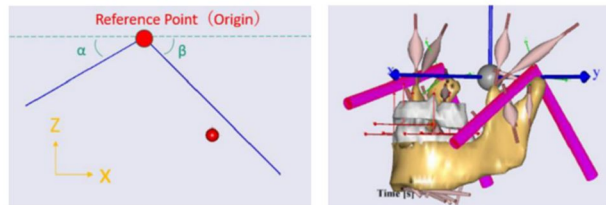


図 4 モデル拘束面

としてモデル化され、腱の剛性寄与は連続弾性要素に含んだ。各種パラメータは Mark. de Zee らによって行われた先行研究から引用し、拘束定義後、動的解析を実施した。

4. 研究成果

(1) 矢状面、水平面、および前頭面における 3 マーカーの軌跡およびフィルタ処理後の切歯点の運動軌跡を示す (図 5)。矢状面では、両側顎頭の動きは、開閉運動中に二相性の挙動を示した。前頭面の切歯点は、補助なしの最大顎開口量は 22 mm であり、開口制限が認められた。つまり、被験者は痛みによって下顎の動きが制限されていた。また、切歯点の動きを観察すると最大開口時に認められた側方方向へのノイズが軽減されつつ、全体としての運動特性が維持されていることがわかる。このような計測ノイズは、本研究にて用いている歯科用モーションキャプチャシステムが超音波計測手法に基づくものであるがゆえの問題点であるが、現存するモーションキャプチャシステムにおける種々のデータプロセッシング時に、このようなフィルタ処理が必要になる場合が多く、その点においても本研究でのフィルタリング処理手法は非常に有用であろう。

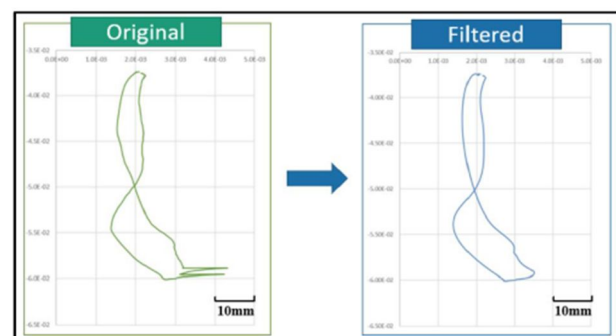
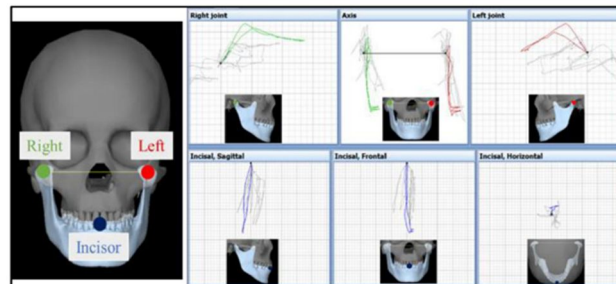


図 5 計測された下顎運動およびフィルタ処理後の軌跡

(2) 被験者の実際の動きと患者固有のモデルの両方の顎の軌跡を示す (図 6)。開閉口時、顎頭の位置のわずかな違いがモデルと被験者の間で観察できましたが、モデルの 2 つの拘束平面間の可動範囲と角度は、入力データと一致し、そこから運動の特徴を結論付けることができた。つまり、モデルでの下顎運動は適切に表現されていることが確認できた。

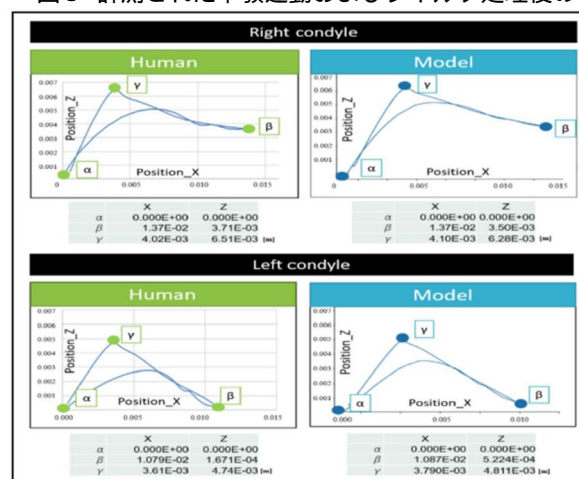


図 6 人間とシミュレーションの下顎運動の比較

(3) 図 7 に、AMS で作成された単純なデモモデルと、本研究で構築された患者固有のモデルにおける顎運動の運動解析の結果を示す。ここからも顎頭の湾曲した動きの特徴は、患者固有のモデルで適切に表現されている。

以上から、本研究においては被験者の下顎運動の拘束を適切に表現し、運動力学的に個別別の運動を再現する筋骨格シミュレーションの構築に成功した。TMD は、さまざまな病態を伴うさまざまな徴候や症状を含む症候群の包括的な診断ラベルであるため、正確な病因は依然として議論の余地がある (5-7)。本研究にて開発された方法論的手法は、バイオメカニクスが問題の知識に貢献できるプロセスの最初のステップである。この研究で採用されている歯科用モーションキャプチャシステムは、は臨床的にも比較的単純でアクセスしやすい手順を有しており、開発されたモデルは、モーションキャプチャデータから患者固有の

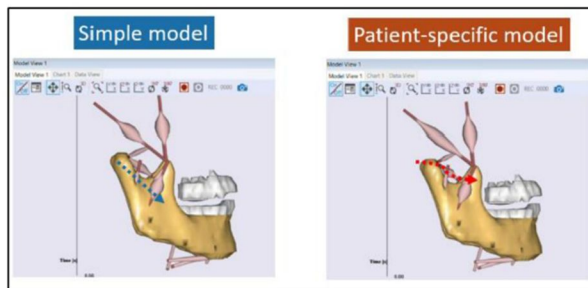


図7 単純モデルと個別別モデルの動きの比較

特徴を抽出し、関節窩の拘束面を再現性し二相性および患者固有のモデルに実装する可能性を示している。これにより、患者の大規模なコホート調査を実施するための筋骨格モデリングの使用が容易になり、歯科におけるデジタルヒューマンモデリングの臨床応用の可能性に繋がります。しかしながら、記録されたデータのノイズは、正確な測定装置を使用した実験手順によって最小限に抑えることができますが、完全に除去することはできません。本研究では、運動分析にデータを使用する前に、反復プロセスで得られた設定下で、測定された顎運動データをフィルタリングする必要があることが判明しました。今後は、モーションキャプチャデータを処理するための自動化された手順が、より大きな臨床規模でモデリング手法を使用するために恐らく必要になることが予想される。

本研究における筋骨格モデルでは、モデル上での顎頭の動きは、モーションキャプチャされた顎運動データと適切に一致していた。顎関節は、ヒンジとスライドのコンビネーション運動を呈する関節であるため、運動モデルの信頼性にとっては、患者固有の正確な表現が重要である。結果から、測定された動きとモデルの動きの間の小さな変位が観察されました。これは、筋骨格モデルにおける解析段階でソフトドライバーを使用して、モーションキャプチャーからの冗長な位置情報を受協した結果であると考えられる。また、本研究で使用された頭蓋骨と下顎骨は、別の患者を表すデモモデルに基づいていたため、問題の患者から測定された顎の動きとテンプレートモデルからの骨の形状との不一致が結果に影響を与える可能性がある。この点において、今後の個別別シミュレーションの手順においては、テンプレートモデルベースの患個別別スケールアップもしくは個別別の形状データの取得が必要となる可能性がある (8)。

また、本研究のモデルは、靭帯の影響をある程度無視しており、実際には、靭帯も下顎運動を規制している。今後の研究では、パラメータの識別手法 (9) を使用して、モーションキャプチャーデータの関連部分に基づいて靭帯の特性を識別し、モデルの患者固有のパラメータ適応を拡張することを試みる予定である。本研究では治療前の顎運動データが治療の進行とともに改善されている様子が確認できた。治療経過に伴う患者の下顎顎の動きに基づいた将来の比較研究は、臨床症状と、筋肉活動量、筋力、顎関節反力などの筋骨格系との相互作用を明らかにする可能性がある。これは、TMD の病態を現象論的かつ生体力学的な観点から解明するのに役立つであろう。さらに、筋骨格シミュレーションは、患者固有の有限要素解析の境界条件も提供がかのうである (10)。このような生体シミュレーションの発展は、シミュレーションベースの診断・評価システム (11) への道を開く可能性があり、歯科における将来の CAD/CAM システムとのリンクも期待できるものと考えられる。

1. 赤川 安, 池邊 一, 佐々木 啓, 志賀 博, 中山 健, 長岡 英, et al. 有床義歯補綴診療のガイドライン(2009改訂版). 日本補綴歯科学会誌. 2009;1(2):i,E205-E83.
2. 荒川 一, 志賀 博, 小林 義, 水内 一, 渡邊 篤, 羽村 章. 有床義歯補綴治療前後における咀嚼運動経路のパターンと安定性. 日本顎口腔機能学会雑誌. 2010;17(1):1-5.
3. Wassell RW, Naru A, Steele J, Nohl F. Applied occlusion. Quintessentials of Dental Practice. 2008.
4. de Zee M, Dalstra M, Cattaneo PM, Rasmussen J, Svensson P, Melsen B. Validation of a musculo-skeletal model of the mandible and its application to mandibular distraction osteogenesis. J Biomech. 2007;40(6):1192-201.
5. Castro MN, Rasmussen J, Bai S, Andersen MS. Validation of subject-specific musculoskeletal models using the anatomical reachable 3-D workspace. Journal of Biomechanics. 2019;90:92-102.
6. Huang G, LeResche L, Critchlow C, Martin M, Drangsholt M. Risk factors for diagnostic subgroups of painful temporomandibular disorders (TMD). Journal of dental research. 2002;81(4):284-8.
7. Watanabe M, Sasaki K, Inai T, Tsuboi A, Jung-in H. A role of occlusion in the etiology of TMD. Dentistry in Japan. 2000;36:62-5.
8. Lund ME, Andersen MS, de Zee M, Rasmussen J. Scaling of musculoskeletal models from static and dynamic trials. International Biomechanics. 2015;2(1):1-11.
9. Andersen MS, Damsgaard M, MacWilliams B, Rasmussen J. A computationally efficient optimisation-based method for parameter identification of kinematically determinate and over-determinate biomechanical systems. Comput Methods Biomech Biomed Engin. 2010;13(2):171-83.
10. Shigemitsu R, Yoda N, Ogawa T, Kawata T, Gunji Y, Yamakawa Y, et al. Biological-data-based finite-element stress analysis of mandibular bone with implant-supported overdenture. Computers in biology and medicine. 2014;54c:44-52.
11. Sasaki K. Examination and diagnosis for masticatory and swallowing function. Nihon Hotetsu Shika Gakkai Zasshi. 2002;46(4):463-74.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 重光竜二, 宮下牧子, 佐々木啓一	4. 巻 49
2. 論文標題 デジタル時代に学ぶ咬合学NEO 顎関節および咬合と補綴治療・装置	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 歯科技工	6. 最初と最後の頁 1236-1245
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 Ryuji SHIGEMITSU, Keiichi SASAKI and John RASMUSSEN	4. 巻 11
2. 論文標題 Musculoskeletal Modeling with Jaw Motion Data from a TMD Patient	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advances in Transdisciplinary Engineering	6. 最初と最後の頁 108-114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3233/ATDE200015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Sato Emika, Shigemitsu Ryuji, Mito Takehiko, Yoda Nobuhiro, Rasmussen John, Sasaki Keiichi	4. 巻 129
2. 論文標題 The effects of bone remodeling on biomechanical behavior in a patient with an implant-supported overdenture	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Computers in Biology and Medicine	6. 最初と最後の頁 104173 ~ 104173
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.combiomed.2020.104173	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 重光竜二, John Rasmussen, 小川 徹, 佐々木啓一
2. 発表標題 顎運動計測に基づく筋骨格シミュレーションの開発
3. 学会等名 第65回日本顎口腔機能学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 庄司憲明, 千葉雅俊, 永井宏和, 佐藤しづ子, 菅原由美子, 小川 徹, 重光竜二, 岩間亮介, 鈴木飛佳理, 工藤葉子, 安田真久, 水田健太郎, 田中恭恵, 山口哲史, 八幡祥生
2. 発表標題 東北大学病院口腔内科・リエゾンセンターにおける初診患者の動向
3. 学会等名 第78回東北大学歯学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 筋骨格解析に基づく下顎運動クラスター分析
2. 発表標題 重光竜二, 佐々木啓一, ジョン・ラスムセン
3. 学会等名 第55回生体医工学学会 東北支部大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
研究分担者	佐藤 智哉 (Sato Tomoya) (10845902)	東北大学・大学病院・助教 (11301)	
研究分担者	田原 大輔 (Tawara Daisuke) (20447907)	龍谷大学・先端理工学部・教授 (34316)	
研究分担者	小川 徹 (Ogawa Toru) (50372321)	東北大学・歯学研究科・准教授 (11301)	

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	佐々木 啓一 (Sasaki Keiichi) (30178644)	東北大学・歯学研究科・教授 (11301)	

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