

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：13101
 研究種目：基盤研究(C) (一般)
 研究期間：2019～2021
 課題番号：19K12752
 研究課題名(和文) コーンビームCTによる三次元歯軸，歯列，顎運動を融合した口腔機能評価システム開発

 研究課題名(英文) Development of oral function evaluation system integrating three-dimensional tooth axis, alignment and jaw movement using by cone-beam CT

 研究代表者
 坂本 信 (Sakamoto, Makoto)

 新潟大学・医歯学系・教授

 研究者番号：80215657
 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)：本研究は，臨床歯科で使用されるコーンビームCT画像を利用して，上下顎骨の解剖学的特徴点から三次元口腔内座標系を構築し，歯全体の三次元形状から自動計算的に三次元歯軸および歯列を求める．さらに提案した座標系を基盤として，数本の歯の空間運動から得られる簡便かつ精度の高い顎運動測定解析システムを確立し，これらを融合することにより，臨床診断応用が可能となる国内外で例をみない三次元口腔構造・機能評価システムを開発することで，社会に貢献することが目的である．この研究は，歯科矯正学や歯科放射線学はもとより，臨床歯学(歯科補綴学，口腔外科学，咬合学等)に広く利用される有意義な臨床歯科手法となり得るものである．

研究成果の学術的意義や社会的意義

CBCTによる歯軸の臨床応用を考える際には，上下顎骨の解剖学的特徴点から口腔空間内に座標原点を定めることによる口腔内ワールド座標系を導入することが極めて重要である．我々は，口腔内ワールド座標構築法を提案し，国内および米国特許を研究期間内に取得した(国内特許：特許7068713号，米国特許：US11,090,014 B2)．これより，口腔内における歯の三次元形状から求めた重心による歯列や歯軸の三次元絶対位置評価が可能となった．また，本研究では新たな顎運動測定解析システムを提案し，特許申請を進めており，これらは，歯列の特徴評価，歯科矯正時の歯の移動，咬合診断等に用いることができる．

研究成果の概要(英文)：In this study, a three-dimensional intraoral coordinate system was constructed from the anatomical feature points of the upper and lower jawbones using cone-beam CT images used in clinical dentistry, and the third-order was automatically calculated from the three-dimensional shape of the entire tooth. Find the original tooth axis and dentition. Furthermore, based on the proposed coordinate system, we have established a simple and highly accurate jaw motion measurement and analysis system that can be obtained from the spatial motion of several teeth, and by fusing these, clinical diagnostic applications will be possible in Japan and overseas. The purpose is to contribute to society by developing an unprecedented three-dimensional oral structure / function evaluation system. This research can be a meaningful clinical dental technique widely used in other clinical dentistry (dental prosthesis, extraoral science, occlusal science, etc.) as well as orthodontics and dental radiology.

研究分野：生体医工学，バイオメカニクス

キーワード：歯科 歯列 歯軸 CBCT バイオメカニクス 三次元口腔内座標 顎運動

1. 研究開始当初の背景

歯の長軸を示す歯軸は基本的な歯の形態的基準軸であるが、従来の決定方法は、図 1 の教科書的に示されるように「歯頸部付近に重点を置き、歯の中央部を縦に通る直線を歯軸とする」という概念的な定義であり、歯科医師の目視で手動によって定められてきた。また、歯科矯正治療等の臨床では、二次元 X 線画像を用いた歯軸が多く用いられているのが現状である。

一方、従来の歯列(歯列弓、歯並び)の求め方は、初めに被検者の口腔内模型をキャストイングにより作成し、その後三次元測定機のプローブにて歯の歯冠表面の特徴点を接触して測定する方法やノギスで測定する手法等が一般的である。しかし、これらの方法では歯列を横断面内において二次元的に表現しており、この平面外に位置する歯軸の情報は含むことはできない。さらに、この種の測定法では検者間誤差が生じやすく、上下顎歯の位置関係を正確に知ることはできないという欠点がある。

さらに、顎関節運動解析については、顔表面に大型かつ複雑な運動測定装置を装着して運動測定しているのが現状である。また、顎運動において極めて重要な口腔内座標の設定法が、皮膚上から推測しているために正確な三次元顎運動を得ることは極めて困難である。

2. 研究の目的

上記の当該学術的背景および問題点を踏まえて、本研究では歯のコーンビーム CT (CBCT) 画像から三次元歯形状を構築し、その形状から主成分分析法を用いて計算的に三次元自動歯軸を定める手法を示す。本研究で得られた歯軸の臨床応用を考える際には、上下顎骨の解剖学的特徴点から口腔空間内に座標原点を定めることによって口腔内に基準となる座標系、すなわち、口腔内ワールド座標系を導入することが極めて重要であり、口腔内ワールド座標構築法を新たに提案し、国内外の特許を取得する。本手法により、口腔内における歯の三次元形状から求めた重心による歯列や歯軸の三次元絶対位置評価を可能とする。また、本研究では上記の口腔内ワールド座標系を利用して新たな顎運動測定解析システムを製作し、特許の取得を目指す。

3. 研究の方法

本研究では主に以下の(1)~(4)の4つの具体的な課題について行った。

(1) 正常咬合者である成人 8 名の上下顎骨を撮影した CBCT 画像を用い、上下顎骨にある 3 点の解剖学的特徴点から口腔内に三次元ワールド座標系を構築し、全ての歯の三次元モデルを作成した。各歯モデルに対し主成分分析法から得られる長軸方向の成分から歯軸を求めるとともに、形状重心 (COG) を計算的に求めた。空間内の COG と歯軸をワールド座標系の 3 平面に投影して歯列と歯軸を表現した。本研究の対象は正常咬合者であることから、歯列を回帰する関数は歯列の対称性を考慮して、横断面と冠状面は COG からの歯列を偶関数の n 次多項式 ($n=2, 4, 6, 8$) で回帰した。また、矢状面の歯列は対称性を有しないために、一般の多項式の回帰曲線 ($n=2\sim 4$) の適用を行った。

(2) 本課題では、成人 10 名の上下顎骨を撮影した CBCT 画像から骨モデルを三次元再構成し、解剖学的特徴箇所である下顎両側オトガイ孔 2 点および上顎切歯管 1 点を利用して口腔内に三次元ワールド座標系を構築し、全ての歯の三次元モデルを作成した。各歯の COG と主成分分析法で計算した歯軸 (PC-A) を求め、空間内の COG と PC-A を横断面、冠状面および矢状面上に投影して、各平面内での PC-A 角度と COG による歯列を示した。

(3) 本課題では、正常咬合者 13 名の上下顎骨を撮影した CBCT 画像の三次元骨モデルの 3 点の特徴点から口腔内に三次元ワールド座標系を設定し、横断面、冠状面および矢状面を定めた。そして、歯形状より主成分分析法によって三次元歯軸を求めた。歯軸を 3 平面上に投影して、各平面内での上下顎全歯の対向する同名歯種の歯軸のなす角度である交角度を求めた。さらに、異なる歯種間の交角度の関係について示した。

(4) 本課題は、口腔内ワールド座標系を利用して新たな顎運動測定解析システムを開発し、基礎データを集めるとともに、特許の取得を目指すものである。

4. 研究成果

(1) 図 1 に研究対象者の典型例 2 名 ((a) #3, (b) #6) の上顎歯の COG および PC-A を X-Y 平面 (横断面) に投影し、投影後における COG 座標値を n 次多項式 ($n=2, 4, 6, 8$) に回帰した歯列曲線と PC-A を示した。ここで、PC-A は歯根側から歯冠側の方向を正方向として示した。同様に、下顎歯の結果を図 2 に示した。図 3 は同じく典型例 2 名の X-Z 平面 (冠状面) での上下顎歯列回帰曲線、COG および歯軸を示したものである。図 4 に、X-Y, X-Z 平面の回帰曲線の点群から Y-Z 平面 (矢状面) 内に合成した曲線 (図中の赤い曲線) と 3 次回帰曲線と COG、歯軸をそれぞれ示した。なお、Y-Z 平面の上下顎歯列回帰曲線は、左右の歯列で異なる数式で表した。3 平面の回帰関数と COG との適合度を定量的に示すために、研究対象者 8 名の上下顎歯の各回帰曲線と COG との残差平方和 RSS によって、回帰曲線を定めた。

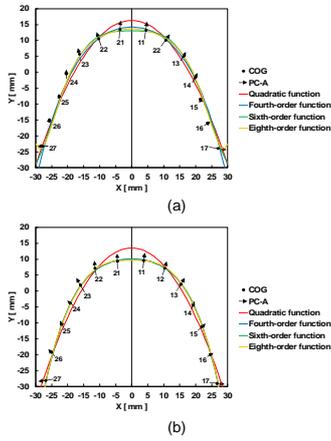


図1 X-Y平面(横断面)内における上顎歯のCOG, PC-Aおよび歯列回帰曲線の典型例。(a) #3。(b) #6。

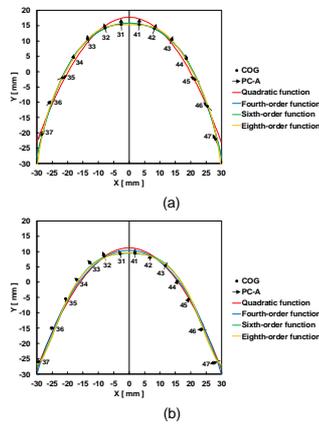


図2 X-Y平面(横断面)内における下顎歯のCOG, PC-Aおよび歯列回帰曲線の典型例。(a) #3。(b) #6。

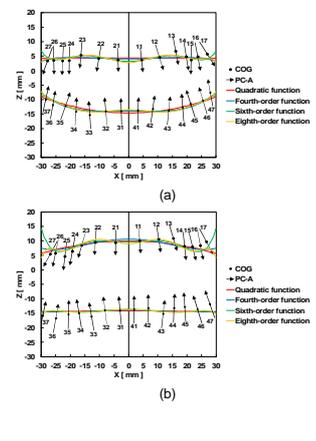


図3 X-Z平面(冠状面)内におけるCOG, PC-Aおよび歯列回帰曲線の典型例。(a) #3。(b) #6。

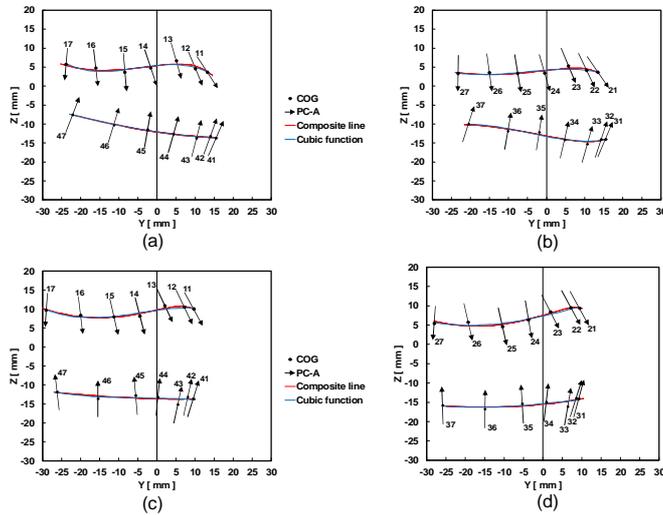


図4 Y-Z平面(矢状面)内におけるCOG, PC-Aおよび歯列回帰曲線の典型例。(a) #3右側。(b) #3左側。(c) #6右側。(d) #6左側。

図1および図2のX-Y平面(横断面)にける歯列回帰曲線の結果から,2次曲線では,各歯のCOGと曲線との差が大きいが,4次以上の曲線では,ほぼX-Y平面内の歯列を表現できていることが確認できる。6次曲線では,原点位置で変曲点を持ち,曲線が窪んだ形状になる例もみられたことから4次偶多項式が歯列の回帰曲線として適切であると考えた。また,4次と6次曲線のRSSに大きな相違はみられないことから,4次偶多項式で上下歯列を表現して十分であることがわかる。図3のX-Z平面(冠状面)での上下顎歯列回帰曲線の結果とRSS値から,回帰曲線の次数を上げることで,COGとのフィッティングが良好になることは明らかである一方で,項数が多くなると数式は煩雑となる。また,6次と8次偶関数では回帰曲線に大きな特徴の違いやRSSの違いもみられず,5個の変曲点を有する6次偶多項式で,上下顎歯列を十分に表現できている。図4に示したY-Z平面(矢状面)における歯列回帰曲線の結果とRSSの結果から,左右の歯列で異なる数式で表した3次多項式で十分に歯列の特徴を表していることが示唆された。

(2) 図5は,歯の重心COG位置と歯軸PC-A角度との関係について,対象者10名で平均して表示したもので,X-Y平面およびX-Z平面では縦軸 α_{XY} および α_{XZ} と横軸Xとの関係を表現する回帰曲線を偶関数の2,4,6,8次多項式で表した結果を図中に示した。Y-Z平面では左右頬側で分け, α_{YZ} とY軸との関係について示してあり,左右の歯列で異なる2~4次の多項式で回帰した場合を示した。

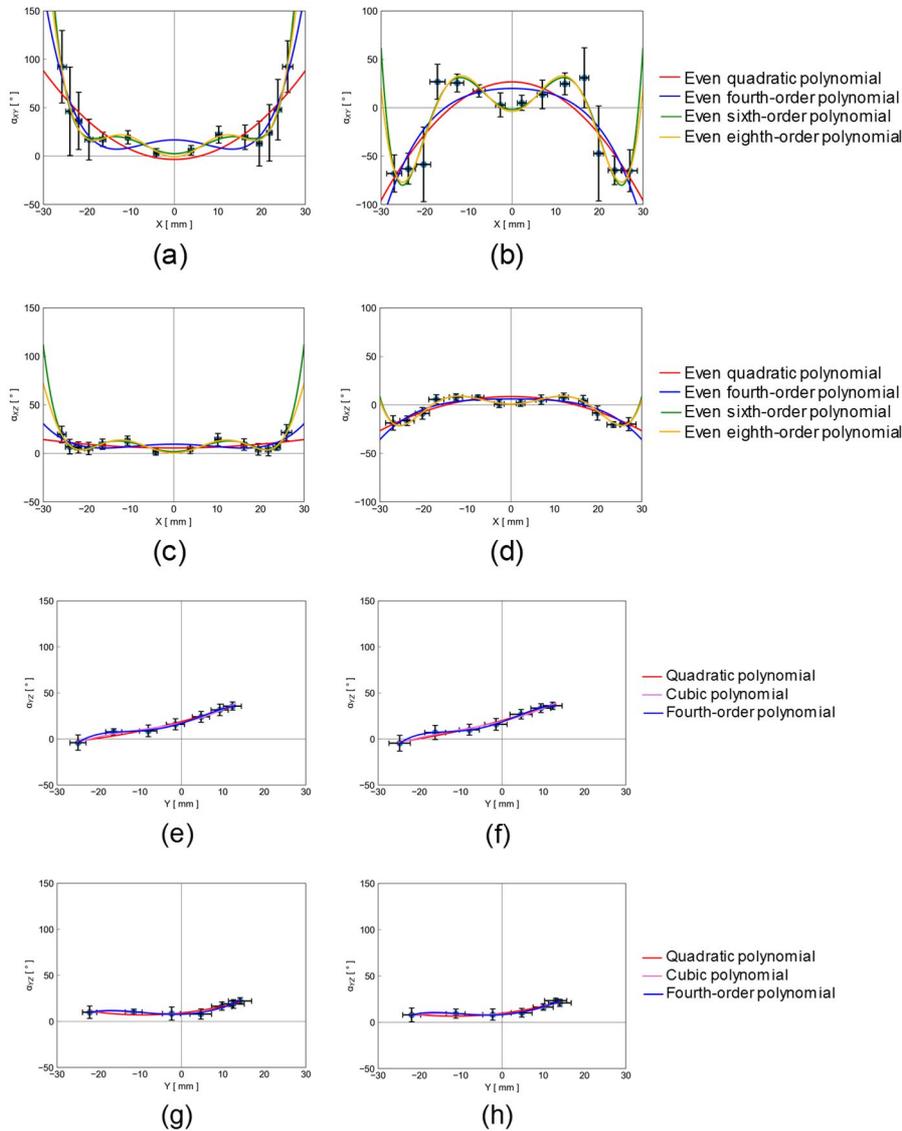


図5 対象者 10 名の 3 平面における歯の平均 COG 位置と平均 PC-A 角度との関係と回帰式 . (a)X-Y 平面における上顎歯 . (b) X-Y 平面における下顎歯 . (c)X-Z 平面における上顎歯 . (d)X -Z 平面における下顎歯 . (e)Y-Z 平面における上顎右側歯 . (f) Y-Z 平面における上顎左側歯 . (g) Y-Z 平面における下顎右側歯 . (h) Y-Z 平面における下顎左側歯 .

対象者 10 名の 3 平面における歯の平均位置と平均歯軸角度との関係を表した図 5 より、本結果から得られた α_{XZ} と α_{YZ} の上下顎歯角度の傾向は、Dempster ら¹⁾の 11 死体の頭蓋骨を用いて歯根から歯冠までを考慮して歯軸方向を求めた先駆的研究の α_{XZ} および α_{YZ} の傾向と完全に一致している . Dempster ら¹⁾は複数根を有する臼歯では歯根ごとにその方向を表しているが、主成分分析の計算を用いた三次元歯軸 PC-A でも彼らの研究結果と同様であることから、PC-A が臨床に使用できることが示されたと考えている . 一方、 α_{XY} の値を本手法以外で求めることは困難であると予想されることから、 α_{XY} を定量的に求められることが、本解析法の利点の一つである . さらには、図 5 の平均した COG 位置と角度の関係と回帰した曲線と各歯の点との残差平方和 RSS より、 α_{XY} および α_{XZ} に関する上下顎の変数 x との回帰曲線は、変曲点が 5 個の縦軸に関して対称の 6 次偶多項式 (表 1) で表して十分である . また、左右側歯で分けて表現した変数 y による α_{YZ} の回帰曲線は、3 次多項式 (表 1) で表してよいことがわかる . 回帰曲線は次数を増すほど曲線と各点との適合が良好になることは明らかであるが、その反面、項数が多くなると数式は煩雑となることから、本解析では、できる限り次数が少ない多項式を選択し、6 次偶多項式および 3 次多項式が適切と考えた . 図 5 は、歯列と歯軸の両因子を含んだ結果であり、図の解釈には検討すべき点が残されているが、歯全体のアライメントを示す表現法の一つと考えている .

表 1 3 平面における COG と PC-A 角度との回帰曲線 . (a) α_{XY} および α_{XZ} に関する上下顎の変数 x による 6 次偶多項式 . (b) α_{YZ} に関する上下顎の変数 y による 3 次多項式 .

(a)

Even sixth-order polynomial		$\alpha_{XY}, \alpha_{XZ} = ax^6 + bx^4 + cx^2 + d$			
	a	b	c	d	
Maxillary α_{XY}	1.22×10^{-6}	-9.58×10^{-4}	2.31×10^1	2.49	
Mandibular α_{XY}	1.91×10^{-6}	-2.21×10^{-3}	5.07×10^1	-1.87	
Maxillary α_{XZ}	6.56×10^{-7}	-6.24×10^{-4}	1.52×10^1	1.79	
Mandibular α_{XZ}	4.60×10^{-7}	-5.44×10^{-4}	1.25×10^1	0.86	

(b)

Cubic polynomial		$\alpha_{YZ} = ey^3 + fy^2 + gy + h$			
	e	f	g	h	
Right: Maxillary α_{YZ}	1.10×10^{-3}	3.36×10^{-2}	9.94×10^1	17.54	
Left: Maxillary α_{YZ}	7.27×10^{-4}	2.44×10^{-2}	1.09×10^0	19.15	
Right: Mandibular α_{YZ}	1.57×10^{-3}	4.31×10^{-2}	1.07×10^1	8.10	
Left: Mandibular α_{YZ}	1.31×10^{-3}	3.76×10^{-2}	2.32×10^{-1}	8.78	

(3) 本課題結果では三次元空間内での歯軸が求められているが、三次元的に歯軸を理解することは困難である。そこで、三次元歯軸を 3 平面に投影して表現した。図 6 に示すように、歯軸を口腔内座標系の X-Y 平面（横断面）、X-Z 平面（冠状面）および Y-Z 平面（矢状面）にそれぞれ投影し、各平面内で対向する上下顎の同歯種間の歯軸がなす角度である交角度を求めた。投影した X-Y 平面では、舌側口蓋側になす交角度を θ_{XY} 、X-Z 平面では頬側になす交角度を θ_{XZ} 、Y-Z 平面においては口蓋側の交角度を θ_{YZ} と各々定義した。そして、正中面に対して左右の歯種の交角度の平均値と標準偏差を求めた。

図 6 は、研究対象者 13 名における上下顎歯の対向する同名歯種間の歯軸 PC-A 交角度の平均と標準偏差を(a) θ_{XY} : 横断面 (X-Y 平面), (b) θ_{XZ} : 冠状面 (X-Z 平面), (c) θ_{YZ} : 矢状面 (Y-Z 平面) について、それぞれ示したものである。ここで、図の横軸は歯種を表す FDI 歯式の 2 桁目の番号で表示した。各 3 平面内において上下顎歯間の交角度は、正中面に対してほぼ左右対称であることがわかる。

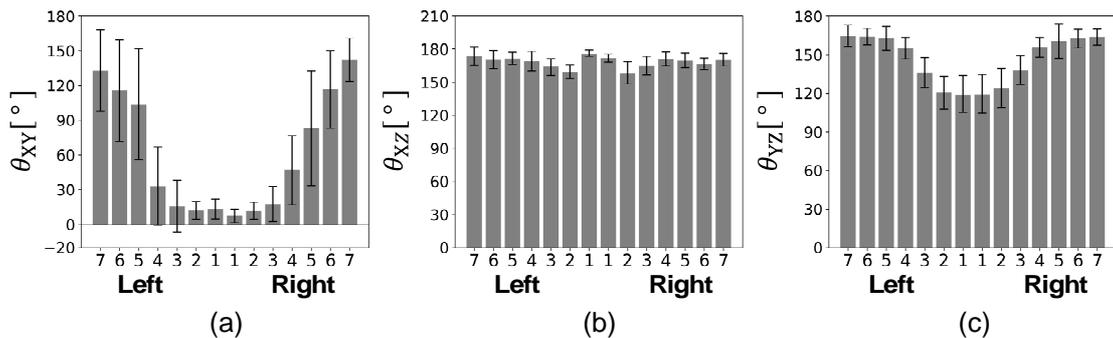


図 6 対象者 10 名の 3 平面における歯の平均 COG 位置と平均 PC-A 角度との関係と回帰式 . (a)X-Y 平面における上顎歯 . (b) X-Y 平面における下顎歯 . (c)X-Z 平面における上顎歯 .

(4) 上顎歯 4 本と下顎歯 4 本を対象とした直径約 6 μm のアルミナ球を利用した赤外線反射マーカー球がマウスピースの先端に取り付け、CBCT 撮像を実行して口腔内座標系を構築し、各マーカーの 3 次元位置を求める。そして、顎運動に伴うマーカー運動を赤外線モーションキャプチャカメラで追従する 3 次元顎運動システムを開発し、解析を行い国内・海外特許申請を進めている。

参考文献

1) Dempster WT, Adams WJ et al.: Arrangement in the jaws of the roots of the teeth. J Am Dent Assoc 67: 779-797, 1963.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 坂上勇太, 坂本信, 森清友亮, 亀田剛, 小林公一, 坂井幸子, 遠藤英昭, 田邊裕治	4. 巻 41
2. 論文標題 正常咬合者における三次元歯列曲線と歯軸の数学的解析	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 臨床バイオメカニクス	6. 最初と最後の頁 385 - 392
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 有
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 Kotaro Miura, Makoto Sakamoto, Yuji Tanabe	4. 巻 231
2. 論文標題 Analytical solution of axisymmetric indentation of multi-layer coating on elastic substrate body	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Acta Mechanica	6. 最初と最後の頁 4077-4093
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00707-020-02752-1	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 -
1. 著者名 Sachiko Hayashi-Sakai, Taichi Kobayashi, Makoto Sakamoto, Takafumi Hayashi, Yusuke Morise, Yutaka Nikkuni, Masaki Takamura, Jun Sakai, Junko Shimomura-Kuroki, Makiko Ike, Hideyoshi Nishiyama	4. 巻 31
2. 論文標題 Quantitative evaluation of elasticity of lower orbicularis oris muscle during the lip closing measurement using sonographic elastography	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Bio-medical materials and engineering	6. 最初と最後の頁 361-371
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3233/BME-201101	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 -
1. 著者名 Kotaro Miura, Chihiro Oyama, Makoto Sakamoto, Yuji Tanabe	4. 巻 102
2. 論文標題 Indentation method accounting for thickness effect of viscoelastic layer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/zamm.202000272	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 -

1. 著者名 坂上勇太,坂本信,森清友亮,亀田剛,小林公一,坂井幸子,遠藤英昭,田邊裕治	4. 巻 42
2. 論文標題 コーンビームCTによる三次元歯軸の解析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 臨床バイオメカニクス	6. 最初と最後の頁 79-85
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 有
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7件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 坂本信
2. 発表標題 歯軸・歯列を求める3D画像診断
3. 学会等名 次世代医療システム産業化フォーラム (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坂上勇太,坂本信,森清友亮,亀田剛,小林公一,坂井幸子,遠藤英昭,田邊裕治
2. 発表標題 三次元歯軸角度の測定
3. 学会等名 第47回日本臨床バイオメカニクス学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坂本信, 坂上勇太, 森清友亮, 小林公一, 亀田剛, 田邊裕治
2. 発表標題 CBCT画像を用いた三次元歯軸の解析
3. 学会等名 日本実験力学会産業応用分科会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石井義人, 坂上勇太, 坂本信, 亀田剛, 森清友亮, 小林公一, 遠藤英昭, 田邊裕治
2. 発表標題 CBCT画像による三次元歯軸
3. 学会等名 日本実験力学学会バイオメカニクス分科会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坂上勇太, 坂本信, 森清友亮, 亀田剛, 小林公一, 坂井幸子, 遠藤英昭, 田邊裕治
2. 発表標題 正常咬合者における三次元歯列曲線と歯軸の数学的解析
3. 学会等名 日本臨床バイオメカニクス学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sakagami Y, Sakamoto M, Morise M, kameda Y, Kobayashi K, Tanabe Y
2. 発表標題 Proposing a novel, three-dimensional definition of dental arch using cone-beam computed tomographic image
3. 学会等名 International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂上勇太, 坂本信, 森清友亮, 小林公, 亀田剛, 田邊 裕治
2. 発表標題 CBCT画像を用いた3次元歯列弓の定義
3. 学会等名 日本機械学会M&M2019材料力学カンファレンス
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 松井, 剛一, 照井, 直人, 岡本, 覚, 横山, 隆, 田邊, 裕治, 坂本, 信, 千葉, 美麗, 小林, 公一	4. 発行年 2020年
2. 出版社 コロナ社	5. 総ページ数 240
3. 書名 人体の力学 : 基礎から学ぶバイオメカニクス	

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計2件

産業財産権の名称 歯科用の画像処理装置、歯科用の撮影システム、歯科用の画像処理方法及びプログラム	発明者 坂本信, 小林公一, 森清友亮, 坂上勇 太, 亀田剛	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、7068713	取得年 2022年	国内・外国の別 国内
産業財産権の名称 Dental image processing device, dental imaging system, dental image processing method, and program	発明者 坂本信, 小林公一, 森清友亮, 坂上勇 太, 亀田剛	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、US11,090,014 B2	取得年 2021年	国内・外国の別 外国

〔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	亀田 剛 (Kameda Takashi) (30277610)	日本歯科大学・新潟生命歯学部・講師 (32667)	
研究分担者	田邊 裕治 (Tanabe Yuji) (60143020)	新潟大学・自然科学系・フェロー (13101)	
研究分担者	小林 公一 (Kobayashi Koichi) (70296317)	新潟大学・医歯学系・教授 (13101)	

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