

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 1 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21300187

研究課題名（和文） 咬合治療支援を可能とする高精度顎運動解析システム

研究課題名（英文） Development of a high accuracy analytical system for medical treatment of malfunction of mandibular movement

研究代表者

伊能 教夫（INOUE NORIO）

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：70126308

研究成果の概要（和文）：

ヒトの顎運動は回転と並進が混在した複雑な動きであり、顎運動機能の診断には正確かつ的確な運動の把握が必要とされる。本研究は顎運動障害の診断支援と咀嚼機能の評価が可能な情報提示システムの開発を行った。計測システムの性能向上の検討により、測定誤差 0.1mm の運動測定精度を実現し、従来は困難だった咀嚼中の上下歯の接触や干渉状態の把握が可能になった。また、定量的な評価が困難であった咀嚼運動を基本運動モードの合成として考えることにより、顎運動を統一的に考えることができ、定量的な評価が行えることを示した。

研究成果の概要（英文）：

The human mandible produces variety of movements because the mandibular joints are able to move to both rotational and translational directions. To make a proper diagnosis of the malfunction of occlusion, it needs to observe exact mandibular movements. This study aims to develop a 3-D mandibular display system that provides useful biomechanical information for medical diagnosis of the malfunction of occlusion.

1. The display system was successfully to decrease the measurement error within 0.1 mm optimizing allocation of video cameras and selecting a proper frame rate of the cameras.
2. We developed a method to produce a precise mandibular model for each patient by use of the CT data of gypsum mold of teeth. Contact states and detection of interference between up and down teeth were demonstrated.
3. It was clarified that masticatory muscles cooperatively worked in mastication by analyzing time change of muscular lengths of masticatory muscles.
4. We proposed a method to synthesize chewing motion from three basic motion modes. The method provides a unified estimation for malfunction of mandibular movement.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	8,100,000	2,430,000	10,530,000
2010年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2011年度	1,900,000	570,000	2,470,000
年度			
年度			
総計	14,500,000	4350,000	18,850,000

研究分野：人間医工学

科研費の分科・細目：医用システム

キーワード：顎運動、運動機能、咬合状態、咀嚼、運動分析、干渉検出

### 1. 研究開始当初の背景

日本の顎関節症の有病率は男性 9.9%、女性 17.3%と極めて高い。この診断・治療には、顎関節部の動きが重要な情報となる。現状の診断方法は下顎切歯部の運動軌跡から顎関節部の異常を推定しており、ベテランの医師でも難しい。このため、適切な診断・治療に役立つ診断システムが求められている。筆者らは早くからこの問題に取り組み、世界で最初に対象者毎の顎骨形状を反映させた顎運動を動画像として表示可能な三次元顎運動表示システムを開発している。また、これに関する特許申請を 3 件行っている。本研究はこれまでの筆者らの研究を踏まえ、さらに顎運動機能障害に有用な高性能診断システムを開発するとともに、疾病の診断・治療に役立つ生体情報を抽出する手法を提供することを目的とする。

### 2. 研究の目的

本研究は、歯科医療に貢献する高精度顎運動解析システムを開発することを目的とする。この高精度顎運動解析システムは、顎関節症の診断に有用な顎運動の動態観察だけでなく、咀嚼時における歯列の動的な噛み合わせ状態も解析可能な診断支援機能を備えるものである。これによって顎関節症の診断・治療だけでなく、歯科矯正時の咬合状態の診断・治療にも有用なシステムとなる。顎関節症の診断・治療とあわせて、歯科医療への貢献は極めて大きいと考える。

この顎運動表示システムを発展させて歯科矯正の診断・治療に有用な情報となる咬合状態も本研究では視野に入れる。歯科矯正は老若男女を問わず浸透しており、日常的に行われている治療であるが、歯並びを整えるという審美的側面が強調され、本来の治療目的である咀嚼機能の向上については忘れられがちである。しかし、歯列が矯正されれば必然的に咀嚼機能が向上するというわけではないので、咬合状態を考えながら治療を行う必要がある。さらに最終的な歯列配置だけでなく矯正時の治療期間中も適切な噛み合わせが実現されることが本来の治療である。このような歯科矯正はベテランの医師でも難しく高度な知識と経験が必要とされる。本研究では、工学的技術を活用することにより歯科矯正治療を強力に支援する解析システムの開発を目指す。本研究では次の課題に挑戦した。

- ・精密な歯列部を含む顎骨形状のモデル化
- ・上下歯列の接触および干渉状態の評価

### ・咀嚼運動の統一的な解釈と評価

### 3. 研究の方法

筆者らの顎運動システムは、図 1 に示す手順で実現される。

手順 1：標識点の付いたフェイスボウを上下歯列に取り付けて X 線 CT 撮影を行う。

手順 2：フェイスボウを付けた状態で 2 台の CCD カメラで上下顎骨の動きを測定する。

手順 3：CT 装置により撮影されたスライス画像から上下顎骨のサーフェスモデルを作成する。

手順 4：標識点から得られる顎運動データに従ってサーフェスモデル三次元表示する。

以上の手順によって、患者別の顎運動を立体動画像として表示可能にしている。表示システムでは、任意の方向から顎運動の様子を観察可能であり、同時に顎骨の任意箇所の速度分布、運動軌跡も表示可能である。さらに、時間履歴も詳しく調べることが可能になっている（図 2）。

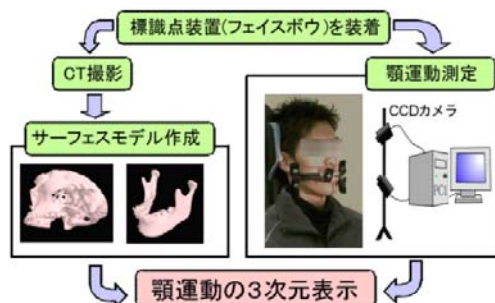


図 1 三次元顎運動表示の手順

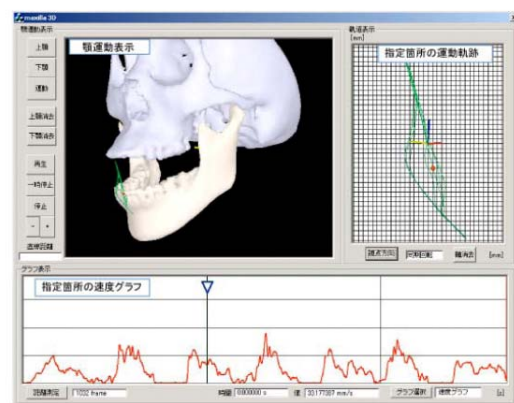


図 2 顎運動表示システム

### 3.1 顎運動システムの高精度化

これまで筆者らが開発した顎運動標示システムでは、顎関節部分の運動は精度よく観察可能な段階に達しているが、歯列部については歯冠形状が忠実にモデル化されていなかった。その理由は CT スライス画像から歯列先端部の画像抽出が難しいためである。さらに歯部に金属冠があると強いアーチファクトが発生するので、画像抽出はさらに困難になる。また、正確に抽出できても歯科用 X 線 CT の解像度が 0.35mm 程度であるため、歯冠形状を忠実にモデル化することができない。咬合状態まで議論するには 0.1mm 以下の形状精度が必要である。

上述の問題を解決するために本研究では、矯正治療の際に必ず作成する歯列石膏模型を活用する。すなわち歯列部を石膏模型に基づいて正確にモデル化し顎骨モデルと統合する手法で以下のように行う。

手順 1：歯形石膏模型を工業用 X 線 CT 装置で高精度（1024x1024 ピクセル）に撮影する。

手順 2：撮影したスライス画像から歯列部を抽出し、ボクセルモデルを作成する。

手順 3：歯科用 X 線 CT データから作成した顎骨モデルと歯列ボクセルモデルを統合する。

手順 4：統合した上下顎骨のサーフェスモデルを作成する。

なお、手順 3 は本研究の要となる部分であり、以下のようなステップで実施する。

ステップ 1：計算機上で石膏模型の歯列部分を平面でカットしたときのスライス画像を出力する。

ステップ 2：患者の X 線 CT 画像と石膏模型のスライス画像の歯列部の一致の度合いを計算する。

ステップ 3：誤差が最小となる切断平面の方向を変えながら最急降下法で探索する。その際、被験者が撮影する時と同じ噛み合い状態で石膏モデルを CT 撮影し、上下歯列の 2 つの切断面画像を同時に評価することで高精度の統合が実現可能となる。

また、精密な歯列同士の干渉検出は、図 3 に示すように形状節点に注目し、ベクトルの内積計算により求めた。

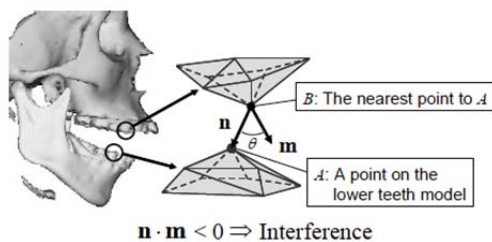


図 3 歯列の干渉検出

### 3.2 咀嚼の健全性評価のための運動分析

顎運動測定装置で測定された運動から咀嚼機能を評価することができれば、診断・治療に有用な情報となる。顎運動は、顎関節部が回転と並進が可能のために非常に複雑な運動を呈する。また、咀嚼運動は多数の咀嚼筋が協調的に運動して動作するためにこれまで議論するのが困難であった。そこで、本研究では、顎運動システムによって得られたデータから筋肉群の活動を推定することを行った。

図 4 に示すように各咀嚼筋の始点と終点の位置を指定することにより、顎運動システムから筋肉長変化が算出できる。これらの時系列的なデータを分析することにより各種の顎運動時に筋肉群の協調動作を調べることが可能になった。

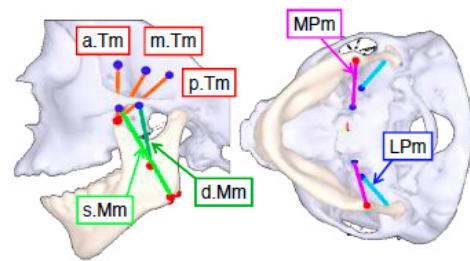


図 4 筋肉長変化の設定

また、咀嚼筋肉群で生成された顎運動の分析も行った。咀嚼時の顎運動は食物の性状や大きさに応じて臨機応変に調整されていると考えられるが、これまでに運動分析方法がなかった。本研究では、運動モードという概念を導入し、咀嚼運動を複数の運動モードで表すことを試みた。

導入した運動モードは以下の 3 つである。

運動モード 1：開口運動

左右の下顎頭を中心とした Pitch 回転運動（図 5 参照）である。顎が周期運動を行う場合、回転角  $\theta_p$  は最大角度  $a_p$  と周期関数  $f_p$  を用いて式(1)で表現できる。

$$\theta_p = a_p f_p(t) \quad (1)$$

運動モード 2：前方移動運動

回転を伴わない  $x$  方向への運動であり、前方移動量  $x_f$  は、最大変  $a_x$  と周期関数  $f_x(t)$  を用いて式(2)で表される。

$$x_f = a_x f_x(t) \quad (2)$$

運動モード 3：側方回転運動

一方の下顎頭を中心とした Yaw 回転運動であり、回転量  $\theta_y$  は最大回転角度  $a_y$  と周期関数  $f_y(t)$  を用いて式(3)で表現する。

$$\theta_y = a_y f_y(t) \quad (3)$$

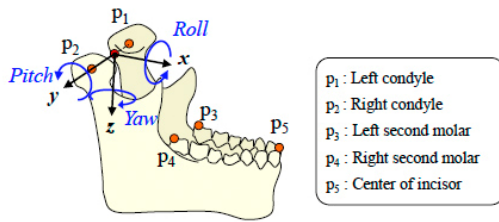


図5 座標軸、回転軸の設定

#### 4. 研究成果

上記の二つの研究手法を実施して以下の研究成果を得た。

##### 4.1 顎運動測定システムの高性能化

モーションキャプチャの測定精度向上のためカメラ配置の最適化と顎運動測定に適したカメラフレームレートの選定を行うことにより、測定誤差 0.1mm の運動測定精度を実現した。

##### 4.2 上下歯の接触や干渉状態の把握

石膏歯型のCTデータを利用して精密な歯列形状を有する顎骨モデルを作成する手法を開発し、従来は困難だった咀嚼中の上下歯の接触や干渉状態の把握が可能になることを示した(図6)。

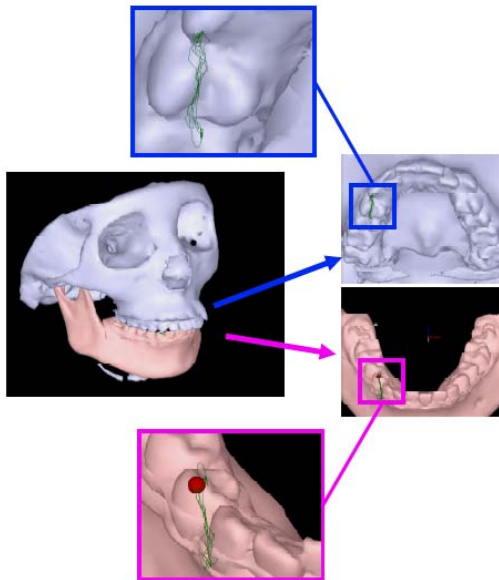
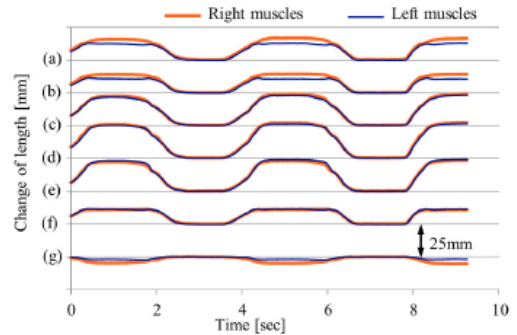


図6 歯列表面の運動軌跡の追跡

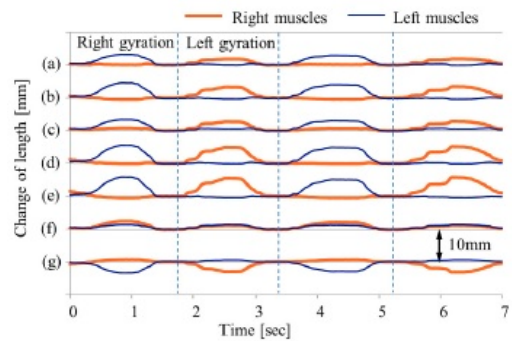
##### 4.3 咀嚼筋の筋肉長変化の観察

咀嚼筋の筋肉長変化を時系列的に比較観

察することにより、咀嚼筋群が協調的に動作する様子を明らかにした。図7は最大開口運動と側方限界運動の時系列変化を示しており、咀嚼筋群が協調的に動作していること、下顎運動が異なると咀嚼筋の収縮様式にも明確な差が出ていることがわかる。



(a) 最大開口運動



(b) 側方運動

図7 筋肉長変化

##### 4.2 基本モードによる顎運動生成

これまで定量的に評価するのが困難であった複雑な咀嚼運動を基本運動モードの合成として考えることにより、顎運動を統一的に考えることができ、定量的な評価が行えることを示した。

図8(a)は、ガムを連続して噛んだ場合の顎運動で計測された切歯部の動き(左側)と咀嚼筋群の筋肉長変化を示している。数字(1),(2),(3)は1回毎の開閉運動に対応しており、咀嚼筋の協調の仕方も開閉運動毎に異なっていることがわかる。

一方、図8(b)は本研究で提案する基本運動モードの合成で表した結果である。基本運動モードだけで複雑な顎運動を的確に表現していることがわかる。

この合成手法を発展させれば、顎運動機能を的確に評価する指標が提案できると考えている。今後、運動機能回復の訓練に役立つことに挑戦したい。

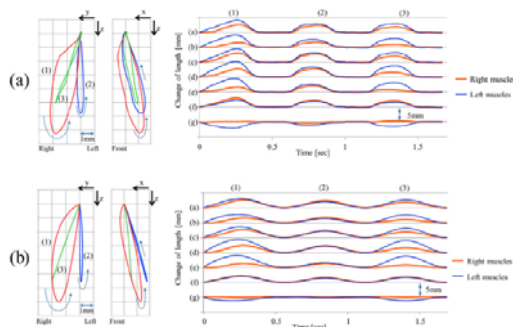


図8 咀嚼運動と運動モードによる合成

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

Kiwamu SAITOU, Norio INOU, Hitoshi KIMURA, Taisei FUJIKAWA, Naoki OGAWA and Koutarou MAKI: Synthesis of Mandibular Movements from Basic Motion Modes Considering Dynamic Profile of Masticatory Muscles, Journal of Biomechanical Science and Engineering, 査読有, Vol.7, No.22,2012,pp.223-236

伊能教夫: X線CT画像に基づく個別モデリング, バイオメカニクス学会誌, 査読無, Vol.36 No.1, 2012, pp.9-12

齊藤極, 伊能教夫, 木村仁, 小関道彦, 藤川泰成, 浅間雄介, 小川尚己, 榎宏太郎: 個別別顎運動表示システムを用いた咀嚼筋群の動態観察, 査読有, 顎顔面バイオメカニクス学会誌, Vol.16, No.1, 2010, pp.1-6

[学会発表](計6件)

齊藤極, 伊能教夫, 木村仁, 藤川泰成, 榎宏太郎: 基本運動モードによる下顎運動表現と咀嚼筋の活動状態の関係, 査読無, 第24回バイオエンジニアリング講演会, 2012年1月8日, 大阪大学豊中キャンパス

齊藤極, 伊能教夫, 木村仁, 藤川泰成, 榎宏太郎: 個別別顎運動表示システムによる上下歯列の干渉状態の観察手法の開発, 査読無, 顎顔面バイオメカニクス学会大会, 2011年11月13日, 千里ライフサイエンスセンター(大阪・豊中市)

伊能教夫: 下顎骨の患者別モデルによる力学シミュレーション, 第37回臨床バイオメカニクス学会抄録集, 査読無, pp.55, 2010年11月1日, 国立京都国際会館(京都)

Kiwamu Saitou, Hitoshi Kimura, Norio Inou, Michihiko Koseki, Taisei Fujikawa, Asama Yuusuke, Naoki Ogawa, Koutarou Maki: DEVELOPMENT OF 3-D MOTION DISPLAY SYSTEM TO ASSIST DIAGNOSTIC TREATMENT OF OCCLUSAL DISORDER, 査読有, The First IFToMM Asian Conference on Mechanism and Machine Science, 2010年10月23日, 250098, Taiwan Taipei  
齊藤極, 木村仁, 伊能教夫, 小関道彦, 榎宏太郎, 藤川泰成, 浅間雄介, 小川尚己: 個別別顎運動表示システムを用いた上下歯列の干渉状態の観察, 査読無, 18回顎顔面バイオメカニクス学会大会抄録集, 2010年9月19日, 札幌市産業振興センター(北海道・札幌市)  
齊藤極, 木村仁, 伊能教夫, 小関道彦, 藤川泰成, 浅間雄介, 小川尚己, 榎宏太郎: 個別別顎運動表示システムを用いた咀嚼筋の動態観察, 査読無, 第17回顎顔面バイオメカニクス学会大会抄録集, 2009年10月4日, 株式会社ヨシダ中部支店研修センター(愛知・名古屋市)

伊能研究室ホームページ

<http://www.mech.titech.ac.jp/~inouhp/>

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

伊能 教夫 (INOUE NORIO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授  
 研究者番号: 70126308

(2)研究分担者

小関 道彦 (KOSEKI MICHHIKO)

信州大学・繊維学部・准教授  
 研究者番号: 50334503

榎 宏太郎 (MAKI KOUTAROU)

昭和大学・歯学部・教授  
 研究者番号: 80219295