

三次元顎運動表示システムを用いた個体別顎運動の観察

Observation of Individual Mandibular Motion using the Three-dimensional Display System of Mandibular Movement

小関 道彦^{*1}, 中村 基司^{*2}, 小川 尚己^{*3}, 木村 仁^{*1}, 伊能 教夫^{*1}, 槇 宏太郎^{*2}

Michihiko KOSEKI, Motoji NAKAMURA, Naoki OGAWA,
Hitoshi KIMURA, Norio INOU and Koutaro MAKI

Abstract: This study deals with the display system that visualizes patient-specific human mandibular movements. The system provides not only three-dimensional visual information of individual mandibular movements but also quantitative information of positions, velocities or accelerations at arbitral points of the mandible. This paper firstly reports two improvements of our previous system for application to clinical fields. One is a new design of the motion capturing device with optical markers. The device is enough compact and light for observation of mastication of foods. The other is a user friendly interface of the display system which provides synchronized presentation of mandibular motion animation and the quantitative information. The system is applied to two subjects. One of the subjects has symptoms of temporomandibular disorders (TMD). We measure voluntary border movements and mastications of several substances, and observe quite different mandibular movements in the subjects. The system has an enough potential ability to be an intelligible diagnostic system of TMD for both medical doctors and patients. It will be useful for informed consent for medical treatments of TMD.

Keywords: Mandibular movement, Temporomandibular disorders, X-ray computed tomography, Patient-specific modeling.

1. 緒言

顎関節症は開口時の疼痛や開口制限を特徴とする症候群の総称であり、その原因が筋緊張や関節円板の転位、顎骨や軟骨の変形、心理的要因など広汎多岐に渡るため適切な診断が求められており、顎骨の三次元運動を正しく把握することが重要となっている。一方、インフォームドコンセントが重視される現代では、患者が自らの病状を把握し治療方法を確認することが望まれるため、回転と滑走の複合した顎関節の複雑な運動を医師と患者が対話的に閲覧可能なシステムの実現が求められている。これまでに、ヒトの顎運動を三次元計測するデバイスはいくつか提案されており、すでに製品化されているものも存在する。それらの運動計測手法は、以下の3種類に大別することができる。

- A. 歯列にリンク機構を取り付けてメカニカルに計測する方法¹⁾
- B. 歯列に貼り付けた磁石の運動を磁気センサによって計測する方法²⁾
- C. 歯列に貼り付けた LED の運動を複数のカメラによって計測する方法^{3,4)}

このうち、Aに挙げたメカニカルな計測方法は、歯列に装着する測定器の機構部が重いため、患者の負担が大きいという問題がある。また、Bに挙げた磁気センサによる計測方法は、非接触計測のため運動を妨げないという長所があるが、三次元的な顎運動を正確に測定することが困難であるという問題がある。Cに挙げたLEDを用いた光学式顎運動計測装置は、歯列に装着する装置が軽く、顎運動に対する障害も比較的小さい。しかし、従来装置では計測により得られる運動データを顎骨の形状情報と連係することが難しいため、関節頭など顎骨の任意の位置の正確な運動を測定することが困難である。

筆者らは、顎関節症を診断するために顎運動を把握するシステムには、形態データと運動データの総合的な情報提示が最も重要であると考えている。そこで、X線CT画像から得られる形態データと運動計測によって得られる運動データを連

原稿受付日:2007年12月20日, 受理日:2008年x月x日

^{*1} 東京工業大学大学院理工学研究科.

Graduate School of Science and Engineering,
Tokyo Institute of Technology.

^{*2} 東京工業大学工学部

[現:株式会社ベネッセコーポレーション].

School of Engineering, Tokyo Institute of Technology.

^{*3} 昭和大学歯学部.

School of Dentistry, Showa University.

係して表示するシステムの開発を行っており^{5,6)}、X線CT画像に基づく上下顎骨の個別モデルを利用する方法の有用性を前報⁷⁾で述べた。

筆者らと同様のシステムとして、重田らによる四次元下顎運動解析システムがある^{8,9)}。しかしこれらの報告では、提案するシステムの汎用性や機能について議論されておらず、標識点装置の歯列への装着方法や得られる運動データの分析方法など臨床活用のためにはさらに詳細な検討が必要であると考えられる。

本稿ではまず、筆者らが提案する手法を臨床で活用可能とするため、歯列に装着する標識点装置および表示システムのインターフェースを改良したことを述べる。そして、システムを健常者および顎関節症を有する被験者に適用し、最大開閉口運動および食物の咀嚼運動について運動計測を行ったことを報告する。

2. 臨床活用のための顎運動表示システム

筆者らが提案する顎運動表示システムは、X線CT画像に基づいて骨体の個別モデルを生成する手法^{10,11)}と、CCDカメラを用いた運動計測手法から構成される。このシステムによる顎運動表示は以下の手順で実現される(図1参照)。

- Step 1. 患者の上下歯列に3点ずつの標識点を装着する。
- Step 2. 標識点を装着した状態でCT撮影を行い、上下顎骨の三次元モデルを構築する。
- Step 3. 上下歯列につけた標識点の運動を2台のCCDカメラを用いて計測する。
- Step 4. CCDカメラ画像から標識点位置を抽出し、DLT法を用いて標識点の三次元座標を算出する。
- Step 5. 標識点の運動データと顎骨の三次元モデルを対応づけることによりPC上で顎骨の運動表示を行う。

これらの各Stepでの処理の詳細は、前報⁷⁾で報告した。ここでは、Step 1において歯列に装着する標識点装置に汎用性を与える改良を行ったこと、およびStep 5において医師や患者に情報提示する表示システムの改良を行ったことについて述べる。

2.1 標識点装置の改良

前報⁷⁾において筆者らは、標識点装置としてヒトの顎顔面形状にあわせたフェイスボウを提案している。そして、このフェイスボウを用いることにより、顎関節の運動を高い精度で計測可能で

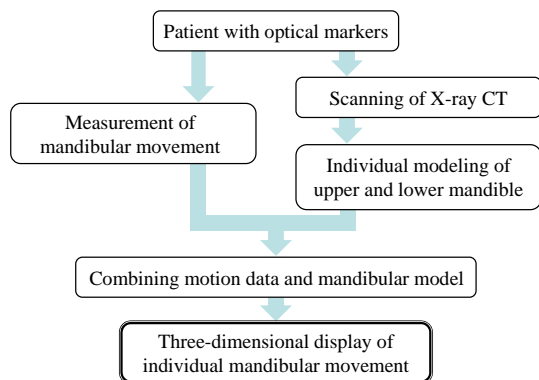


Fig. 1 Diagram of 3D display system.

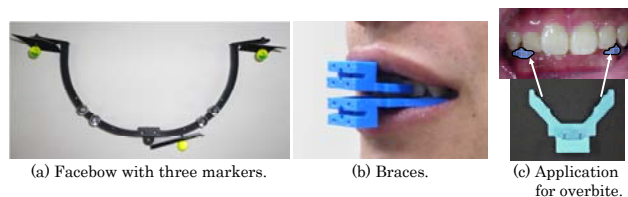


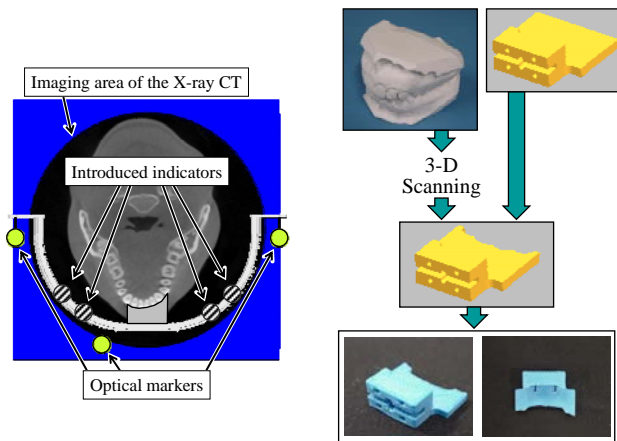
Fig. 2 Facebow for mandibular motion capture.

あることを確認した。しかし、前報⁷⁾で述べたフェイスボウは被験者の顔面および歯列の形状に合わせて作成していたため、他の被験者に適用するためには新たに全体を製作する必要があった。

そこで、標識点を取り付けるアーム部と歯列に接着する固定部で構成されるフェイスボウを製作した(図2参照)。フェイスボウに金属材料を用いると、X線CT画像にメタルアーチファクトと呼ばれる放射状のノイズが生じてしまうため、このフェイスボウは全てをプラスチック(ABSおよびアクリル)によって製作している。固定部を含めた質量は約15グラムと軽量であるため、装着時にも顎運動に対する負担が少なく、食物の咀嚼状態についても観察することが可能となっている。

図2(a)に示すアーム部には運動計測用の標識点が3個取り付けられている。本研究では、ブラックライトを照射することによって発光する直径10mmのアクリル製の球体を標識点として用いている。そして、臨床での活用が進んでいる歯顎顔面用コーンビームX線CT装置の撮影範囲が一般のCT装置に比べ小さいことを考慮し、CT撮影の際に標識点が撮影範囲から外れても運動データと画像データとの対応付けが可能となるよう図3(a)に示すように位置決め用の特徴点を設けた。

図2(b)に示す固定部は、個々の患者の歯列にフィットするように個別に設計製作する。すなわち、図3(b)に示すように歯列の石膏模型から歯列



(a) The new facebow with indicators. (b) Modeling process of the brace.
Fig. 3 Design of the facebow and fabrication of the brace.

形状を三次元計測し、これを CAD データに変換して固定部を製作する。この製作手法により、固定部のデザインを臼歯に装着する形状に変更することで図 2(c)に示すように過蓋咬合の被験者にも容易に対応可能となった。

2.2 表示インターフェースの改良

顎運動の三次元表示を行うソフトウェアについては、歯科医師とのディスカッションにより臨床で必要となる機能を整理した上で、歯科医師にも扱いやすいユーザインターフェースを構築した。図 4 にシステムの概観を示す。本ソフトウェアには、アニメーション表示部、軌跡表示部、およびグラフ表示部の 3 つのデータ表示部が設けられている。このインターフェースの最大の特徴は、簡便なマウス操作によって各表示部に示される情報を同期して操作者に提示することを実現していることである。

アニメーション表示部には、上下顎骨の個別別モデルが三次元表示されており、ここで患者の顎運動をアニメーション表示する。マウス操作による視点変更機能を有しているため、容易に顎運動を任意の方向から観察することが可能である。また、顎骨モデルの任意箇所をマウスで指定することにより、その部位の軌跡を三次元表示する機能を設けた。

軌跡表示部は、アニメーション表示部で表示された軌跡を詳細に調査するために設けた。指定箇所の軌跡だけを任意方向から観察することが可能なため、複雑な運動を正確に把握することが可能である。なお、運動軌跡は画像毎に得られる三次元座標をスプライン補間して算出している。

グラフ表示部には、指定箇所の速度または加速度のグラフが表示される。ここでは経過時刻を三角形で示すインジケータによって表現しており、

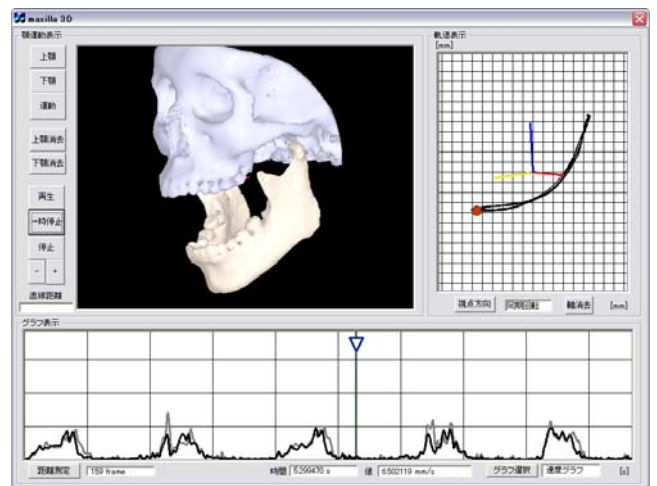


Fig. 4 Snapshot of the display system.

これはアニメーション表示と同期して移動する。また、このインジケータはマウス操作によって任意位置に移動することができるため、指定時刻の開口状態を容易に観察することが可能となっている。

3. ヒト顎運動への適用

本システムを 2 名の被験者（成人男性ボランティア）に適用した。被験者 A は、顎関節症は認められないが過蓋咬合の歯列を有している。被験者 B は顎関節症を有しており、症状については歯科医師によって以下の所見が得られている。

- 分類 関節円板障害（日本顎関節学会による分類では III 型と呼ばれる）
- 左側 復位を伴わない関節円板転位（関節円板が常に下顎頭から外れている状態）
- 右側 復位を伴う関節円板転位（関節円板が下顎頭から外れたり、再び下顎頭上に戻ったりする状態）

各被験者に対し、歯列形状にあわせてフェイスボウの固定部を製作し、フェイスボウを装着した状態で CT 撮影を行った。CT 撮影には歯顎顔面用コーンビーム X 線 CT 装置 (CB MercuRay: (株)日立メディコ) を用いた。得られた CT 画像をもとに構築した 2 名の被験者の上下顎骨モデルを図 5 に示す。今回の顎運動測定では、最大開閉口運動などの基本的な顎運動に加え、食物の咀嚼状態の測定を行った。以下にそれぞれの結果を述べる。

3.1 最大開閉口運動

最大開閉口運動について、2 名の被験者の顎運動をアニメーション表示で観察すると、顎関節症の被験者では明らかに下顎が不連続に動いている様子が認められた。この状態について定量的に

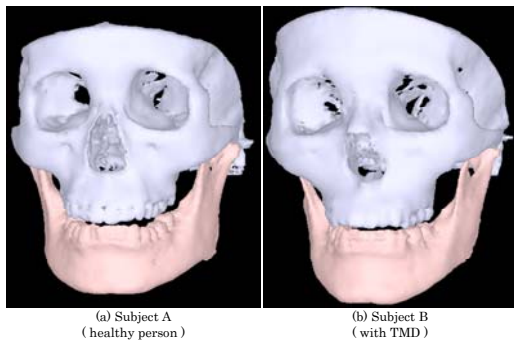


Fig. 5 Patient-specific models of upper and lower jaw bones.

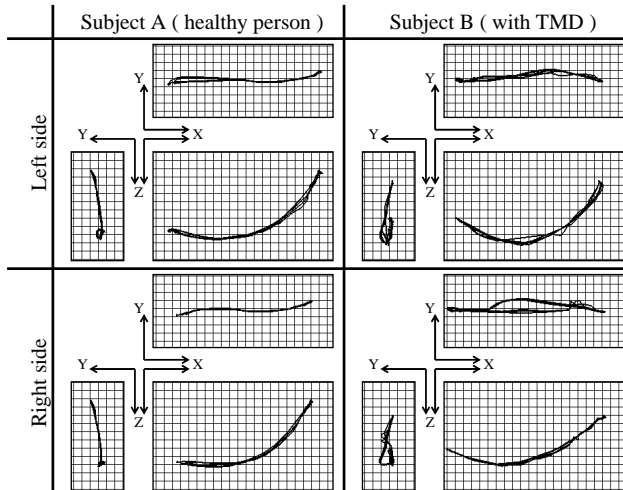


Fig. 6 Trajectories of condyles.

調査するため、それぞれの被験者について左右の下顎頭の運動軌跡を図 6 に示す。図中の XYZ はモデルの座標系を示しており、被験者の体軸に対して X 軸は前後方向、Y 軸は左右方向、Z 軸は上下方向である。

両者とも左右の軌跡が異なっており、これは関節部の形状差を反映していると考えられる。下顎頭の運動軌跡は、顎関節症を有する被験者 B の方が若干乱れており、特に TopView (XY 平面) や FrontView (YZ 平面) においてその乱れは顕著である。さらに、下顎頭以外の箇所についても顎関節症の有無によって軌跡に大きな差が生じていた。下顎頭、下顎角および切歯部の 3 箇所について、運動軌跡を三次元表示したものを図 7 に示す。

次に、下顎頭の運動について軌跡に沿って算出した速度プロフィールを図 8 に示す。被験者 A では、図 8(a) に示すように左右の下顎頭ともにほぼ同じ速度プロフィールを示しており、最大速度も 50mm/s 程度である。これに対して被験者 B では口を閉じる際に、図 8(b) のように左右で時間差を伴って速度の急激な変化が生じており、最大速度は 150mm/s を超える場合も観察された。

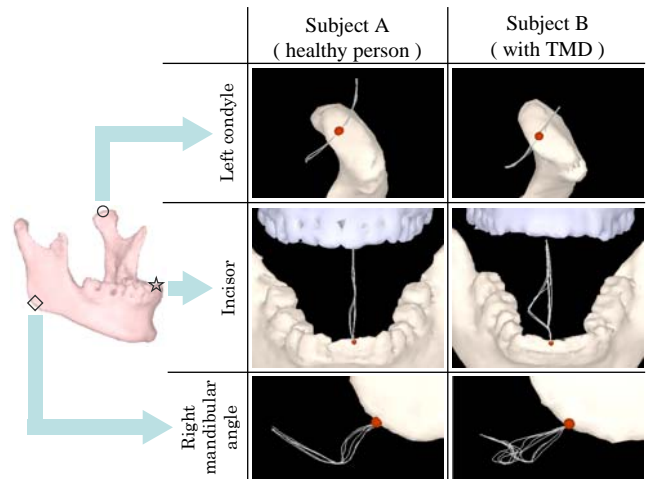


Fig. 7 Trajectories of several portions.

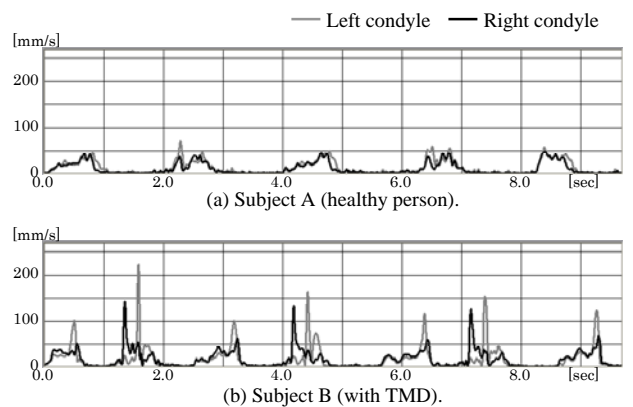


Fig. 8 Velocity records of left and right condyles.

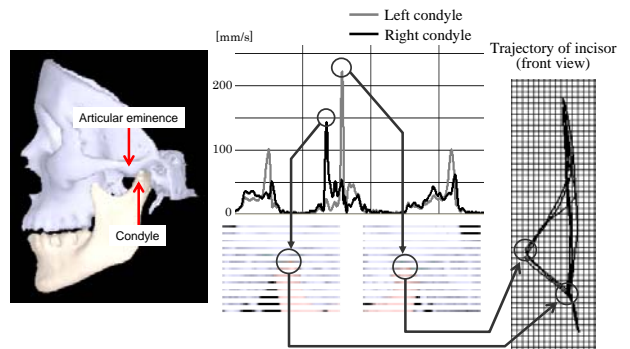


Fig. 9 Comprehensive investigation of mandibular movement of the TMD patient.

そこで、被験者 B の運動について本システムが有するアニメーション表示と速度表示や運動軌跡表示の同期機能を用いて分析を行った。図 9 に左右下顎頭の色がそれぞれ最大になる時刻における下顎頭位置および切歯の軌跡位置を示す。下顎頭が最大速度となるのは、左右ともに上顎の関節結節を下顎頭が乗り越える際に生じている。この被験者の場合、閉口時に右下顎頭が関節結節を先行して乗り越えるが、その時には左下顎頭は関節手前で停止している。その後、遅れた左下顎

頭が反動によって急激な速度変化とともに関節結節を乗り越え、正常な位置へ顎位が戻る。このような時間的経緯を伴う運動であるため、閉口動作の途中に左下顎頭を回転中心とする運動が発生し、顎位は右方へ大きく変位する状態になっていることが分かった。

歯科医師による診察と今回得られたデータから考察すると、関節円板が常に転位した状態の左下顎頭は関節結節において円滑な運動が妨げられていると予想され、この開口位で関節円板が復位するように治療すれば症状が改善すると予想される。以上のことより、本システムは歯科医師の診察を裏付ける情報が得られるだけでなく、その情報を明快に提示し、顎関節症の診断や治療の一助となる可能性がある。また、得られる定量的なデータから顎関節症の度合いを位置付けることも可能であると考えられる。

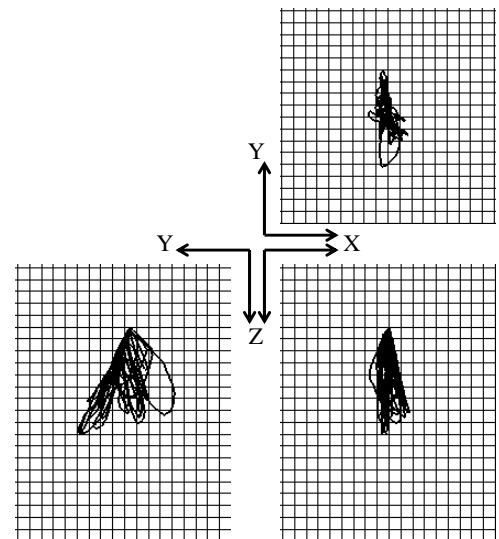
3.1 食物の咀嚼運動

次に、食物の咀嚼状態の観察を行った。これまでに LED を用いて顎運動を測定する装置³⁾を用いて食物の咀嚼運動を観察した報告がなされている¹²⁾。しかし、この装置では運動情報を顎骨の形状情報と組み合わせて分析することが困難である。より正確に咀嚼運動を観察するためには、本システムが用いているフェイスボウのように軽量でケーブルなど運動を阻害するものを接続しないものが適している。

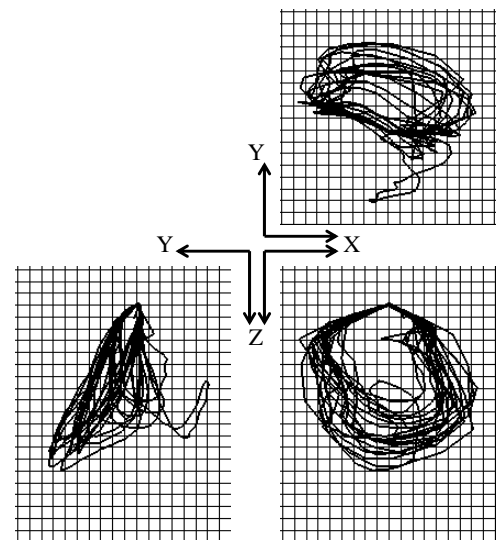
今回の実験では咀嚼物としてガム・パン・ピーナッツを用意し、被験者にはできるだけ平常と同じような咀嚼となるように留意してもらった。健康な被験者 A が各咀嚼物を右側で咀嚼した場合について、切歯の軌跡を図 10 に、左右の下顎頭の色履歴を図 11 に示す。

まず切歯の軌跡に着目すると、軌跡の大きさは咀嚼物の大きさに依存している。すなわちガムは小さく、パンは大きな軌跡を描いている。ここで、パンを咀嚼する場合には SideView (XZ 平面) において円を描いており、咀嚼物を擦り潰すための動作をしていることが分かる。ピーナッツの場合には咀嚼物は小さいにも関わらず、比較的大きな軌跡を描いている。さらに、ピーナッツが咀嚼によって粉砕される際に運動方向が突然変化し、徐々に軌跡が小さくなる様子もわかる。

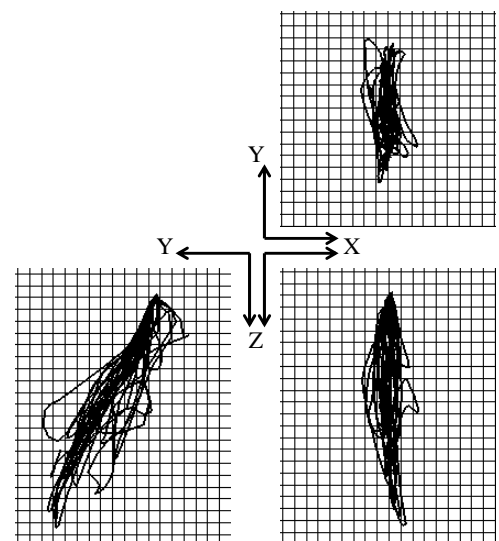
次に速度履歴に着目すると、いずれの咀嚼物についても左下顎頭において右側よりも高い速度を示した。また、ガムとパンではそれぞれの軌跡が大きく異なることに起因して速度にも大きな差が生じていた。



(a) Case of a chewing-gum.

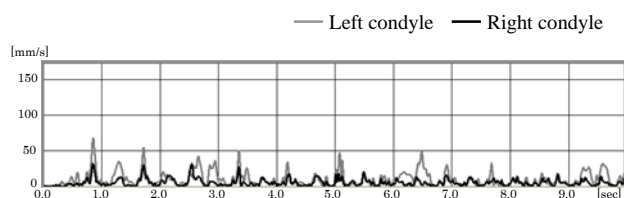


(b) Case of a bread.

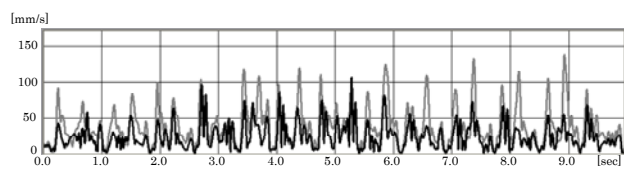


(c) Case of a peanut.

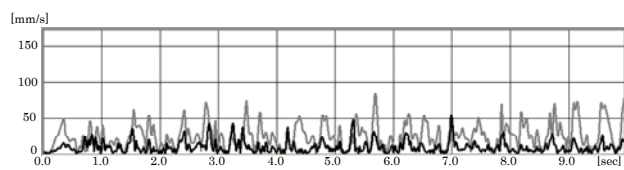
Fig. 10 Trajectory of the lower incisor in mastications of three substances.



(a) Mastication of a chewing-gum.



(b) Mastication of a bread.



(c) Mastication of a peanut.

Fig. 11 Velocity records of left and right condyles in mastications.

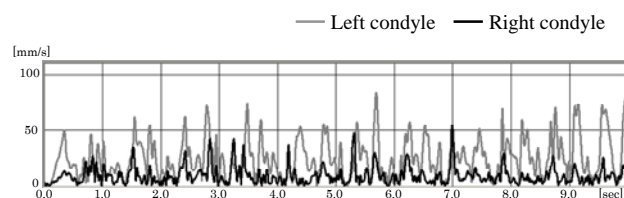
顎関節症を有する被験者 B にも同様の実験を行った。両者がピーナッツを噛んでいる際の速度プロフィールを図 12 で比較する。健常な被験者 A の場合には図 12(a)に示すように、ピーナッツを左側で噛んだ場合には右側の下顎頭の速度が大きく、逆に右側で噛んだ場合には左側の下顎頭速度が大きい傾向が見られた。

これに対し図 12(b)に示すように顎関節症を有する被験者 B の場合には、左側で噛んだ場合には右側の下顎頭の速度が大きくなることは被験者 A の場合と同様であるが、右側で噛んだ場合には左右の下顎頭速度には有意な差が見られない。これは先に述べた通り、この被験者の左側の関節円板が常に転位した状態であるため、左下顎頭が滑らかに運動できないためであると考えられる。

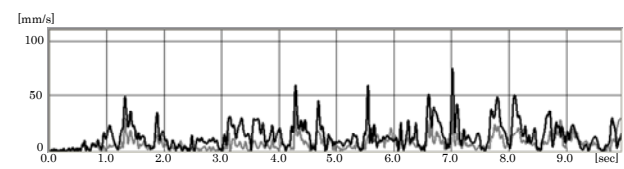
実際の食物の咀嚼時における顎運動の研究例は少なく、本システムはこの観点からの研究にも有力なツールになると考えられる。

4. 結言

本稿では、筆者らが提案している顎運動表示システムを臨床活用することを視野に入れ、装置の装着方法および顎運動の表示方法について改良を行った。まず装置の装着については、被験者の歯列に装着する標識点装置をアーム部と固定部に分割して製作することにより、被験者の歯列を

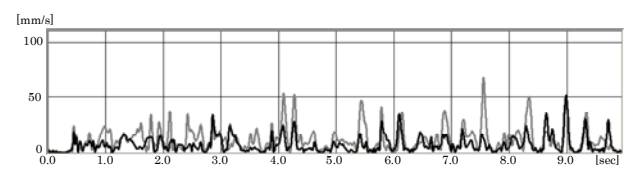


(a-1) Mastication at right side.

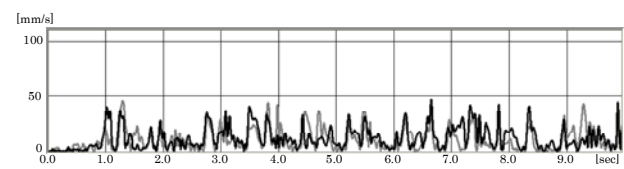


(a-2) Mastication at left side.

(a) Subject A (healthy person).



(b-1) Mastication at right side.



(b-2) Mastication at left side.

(b) Subject B (with TMD).

Fig. 12 Velocity records of left and right condyles in mastication of a peanut.

再現した固定部を容易に製作可能とした。また表示システムについては、アニメーション表示により医師にも患者にもわかりやすく顎運動を示すだけでなく、任意点の運動軌跡や速度・加速度履歴から定量的な分析を容易なインターフェースで実現した。

そして、本システムを健常者および顎関節症を有する被験者に適用し、得られるデータの分析から、本システムは顎関節症診断の一助となる可能性が示唆された。すなわち、本システムを用いることにより任意点の運動軌跡や移動速度の変化を被験者の顎骨形態とあわせて分析することが可能なため、顎関節症の診断やスプリント製作時の顎位の確認に有効であると考えられる。また、本システムが提示する顎骨形態や歯列形態、任意点の移動軌跡、移動速度などの情報は、顎関節症だけでなく矯正治療計画の立案や治療結果の評価に有用であると考えられる。

謝辞

本研究の一部は、独立行政法人科学技術振興機構 平成 17 年度シーズ育成試験および、文部科学省 科学研究費補助金若手研究 (B) (課題番号 19700416) によって行われた。ここに記して感謝の意を表したい。

参考文献

- (1) 藤村哲也・坂東永一: デジタル方式顎運動測定器の開発; 日本補綴歯科学会雑誌, Vol.35, No.4, (1991), pp.830-842.
- (2) Jankelson B., Swain C. W., Crane P. F. and Radke J. C.: Kinesiometric Instrumentation: A New Technology; *Journal of the American Dental Association*, Vol.90, (1975), pp.834-840.
- (3) 常盤肇・桑原洋助: 顎機能の臨床的診査 - ナソヘキサグラフを用いて - ; 日本補綴歯科学会雑誌, Vol.42, No.6, (1998), pp.902-912.
- (4) 河野正司: 6 自由度顎運動測定装置 TRIMET を使って; 日本補綴歯科学会雑誌, Vol.42, No.6, (1998), pp.913-920.
- (5) Inou N., Kurami T., Maki K. and Ujihashi S.: Three-dimensional Display System of Mandibular Movement Using X-ray CT Data; *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering*, (1997), p.613.
- (6) 伊能教夫・中村光宏・榎宏太郎・宇治橋貞幸: 個体別顎運動表示システムの開発; 顎顔面バイオメカニクス学会誌, Vol.3, No.2, (1997), pp.28-34.
- (7) 小関道彦・新妻晃・伊能教夫・榎宏太郎: 三次元顎運動表示システムの精度向上; 顎顔面バイオメカニクス学会誌, Vol.10, No.1, (2004), pp.16-23.
- (8) 重田優子・鈴木直樹・大竹義人・服部麻木・小林馨・小川匠・福島俊士: 光学的位置計測とリアルタイムイメージングを用いた四次元下顎運動解析システムの開発; 日本コンピュータ外科学会誌, Vol.4, No.2, (2002), pp.61-66.
- (9) 大竹義人・鈴木直樹・服部麻木・重田優子・小川匠・福島俊士・小林馨・内山明彦: 四次元頭部骨格モデルを用いたリアルタイム顎運動解析システム; 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.88-D-II, No.7, (2005), pp.1216-1226.
- (10) 伊能教夫・鈴木知・榎宏太郎・宇治橋貞幸: X 線 CT データに基づく骨体の自動モデリング手法 (デラウニー分割を利用した有限要素モデルの生成); 日本機械学会論文集 C 編, Vol.68, No.669, (2002), pp.1481-1486.
- (11) 小関道彦・上西雅也・伊能教夫・榎宏太郎: X 線 CT 画像に基づく骨体の個体別モデリング手法に関する研究 (骨形態を考慮した要素分割手法の提案); 日本機械学会論文集 C 編, Vol.72, No.717, (2006), pp.1470-1477.
- (12) Komiyama O., Asano T., Suzuki H., Kawara M., Wada M., Kobayashi K. and Ohtake S., Mandibular Condyle Movement during Mastication of Foods, *Journal of Oral Rehabilitation*, Vol.30, (2003), pp.592-600.