磁気を利用した下顎運動 6 自由度測定装置の試作

— その臨床応用における精度 —

菊池元宏, 能地康和, 赤坂守人

日本大学歯学部小児歯科学教室 (主任: 赤坂 守人教授)

[受付: 平成 6 年 6 月 10 日]

Development of six degree of freedom tracking device of mandibular movement in which magnetism is used

— About the error of measurement value in clinical use —

Motohiro Kikuchi, Yasukazu Noji, Morito Akasaka

NIHON University school of Dentistry, Department of Pediatric Dentistry

(Director: Prof. Morito Akasaka)

[Received: June 10, 1994.]

Key Words: mandibular movement, six degree of freedom, magnetism

Abstract: Authors have been engaged in developing a measuring device which measures the lower jaw movement with 6 free axes by magnetism. In order to examine the clinical performance of the device, the accuracy was evaluated through reproducing measuring conditions and various types of the lower jaw movement on an articulator and the following conclusions were obtained.

1. The maximum error in the distance with this device was 3.3mm in the incisal point when the maximum aperture movement from the centric occlusion was performed by a subject.
2. The maximum error in the angle with this device was 2.13° in sagittal plane when the maximum aperture movement from the centric occlusion was performed by a subject.
3. The prospect that this device can be used for measuring the lower jaw movement with 6 free axes at an actual clinical situation was obtained by this research.

抄録 顎口腔系の形態や機能の研究に 3 次元測定装置が開発・応用され^{1~15)}, これを用いた多くの報告がある. 特に下顎運動の解析には 3 次元的な軌跡の記録が不可欠であり, このような測定を目的とした下顎運動記録装置が用いられてきた. しかし, 小児を被験者とした際, 満足のいく装置は少ない.

著者らは小児にも応用可能である磁気を利用した下顎運動 6 自由度測定装置の開発を行っているが, 本装置の臨床上の性能を検討するため, 咬合器上で実際の測定状態および各種下顎運動を再現し, 精度を求めたところ, 以下のような結論を得た.

1. 本装置による寸法における最大誤差は, 被験者に中心咬合位から最大開口運動をさせた際の切歯点移動量における 3.3mm であった.
2. 本装置による角度における最大誤差は, 被験者に中心咬合位から最大開口運動をさせた際の矢状面に

おける2.13°であった。

3. 本研究により、本装置が実際の臨床の場で下顎運動の6自由度測定に使用できる見通しが得られた。

1. 緒 言

顎口腔系の形態や機能の研究に3次元測定装置が開発・応用され¹⁻¹⁵⁾、これを用いた多くの報告がある。特に下顎運動の解析には3次元軌跡の記録が不可欠であり、このような測定を目的とした下顎運動記録装置が用いられてきた。

現在、一般に広く使用されている下顎運動測定装置は、主として切歯点の2次元ないし3次元運動を測定するものである。しかし下顎は剛体であり、その動きは3次元であることはもとより、各次元に対する回転運動が加わった6自由度を持った運動であり、下顎運動を切歯点の動きのみで評価することは不十分である。

近年、このような測定を目的とした下顎運動6自由度測定装置が開発され^{5,13-15)}、市販されているが、これら装置は大型になりがちであり、センサも大型で重量もあるなどの難点がある。特に小児に应用する場合、生理的な運動を妨げないような軽量かつ小型化した装置が必要である。

磁気はコイルにて簡単に生成および測定ができ、それを使用した空間上の位置を測定する方法も確立している。これを利用すれば下顎の空間上の6自由度を測定できる可能性をもっている。

著者らは、この磁気を持つ性質に着目し、下顎運動の6自由度測定が可能な装置を開発し、実用化を目指している。本装置は磁気による間接測定のためメカニカルな部分がなく、装置の測定部分の小型化、軽量化および単純化を図ることができ、接触抵抗も生じないため生理的な下顎運動の阻害を最小限に抑えるなどの利点を有している。

今回は、本装置の臨床応用を意識し、臨床使用上における本装置の測定精度に関する基礎データを採取したので報告する。

II. 実験方法

1. 測定装置

1) 下顎運動6自由度測定装置の原理について

本装置は従来よりある磁気変換技術を歯科界に応用したものであり、その原理はコイルにてある決った量の磁気を発生し、それを同様にコイルにて測定することにあ

る。

トランスミッタ内は3つの直交コイル（便宜上、Xコイル、Yコイル、Zコイルとする）から構成されており、同様にレシーバも3つの直交コイル（同様にX'コイル、Y'コイル、Z'コイルとする）から構成されている。3つのトランスミッタ内コイルに流れる電流は時分割されており、それをレシーバ内各コイルにて測定する。これらから得られる複数のパラメータを連立させることにより6自由度を測定することが可能となる。

2) 6自由度測定装置の構成

本装置は磁気を発生するトランスミッタ、トランスミッタを頭部に固定するトランスミッタ固定バンド、磁気を測定するレシーバ、レシーバを下顎前歯部に固定するレジン製レシーバ固定治具、レシーバに装着し、レシーバに基準平面や下顎形態を入力するポイント機能を持たせるレジン製ポイントチップ、システムエレクトロニクスユニット（以下ユニット）、ホストコンピュータより構成される。

中核をなすユニットはホストコンピュータとの双方向の連絡が可能で、ホストコンピュータの命令に従い、トランスミッタ・レシーバのコントロールや演算結果の出力等を行う。

ホストコンピュータはNEC PC-9801シリーズ及びその互換機が使用可能であるが、本実験ではSEIKO EPSON社製PC-486 portableを使用している。このホストコンピュータはユニットを制御し、ユニットから得られたデータを加工し、各種演算、グラフィック表示、データ記録・再生等を行う。

3) 精度測定用3次元測定装置について

本編では6自由度測定装置の他に、6自由度測定装置の誤差を測定するために、既報¹⁶⁾で使用したのと同じ直接測定式の自作3次元微動・回転台を応用している。これは各軸に対して1/10mm副尺付目盛が刻まれており、各次元に対して微動ハンドルで動かすことができるものである。

2. 被験者

被験者は重度の齲蝕罹患がなく、金属にて歯冠修復および補綴処置を行っておらず、歯列矯正処置の既往がない、いわゆる正常咬合を有することを条件に選択した。また、年齢層に偏りが見られないよう、乳歯列期の幼児3名、混合歯列期の児童3名、永久歯列期の成人3名、

表1 下顎位別測定値の最大誤差および回帰式の R^2 Table 1 The maximum error of measurement value according to position of the mandible and R^2 of Recurrence formulae

大別	最大誤差				回帰式の R^2	
	最大前方位	最大左側方位	最大右側方位	最大開口位	直線	2次曲線
X軸	0.6 mm	0.7 mm	1.0 mm	2.7 mm	0.9887	0.9892
Y軸	0.7 mm	0.9 mm	1.1 mm	1.7 mm	0.9902	0.9902
Z軸	0.6 mm	0.8 mm	1.0 mm	2.3 mm	0.9977	0.9977
前頭面	0.41°	0.48°	0.46°	1.06°	0.9608	0.9700
矢状面	0.40°	0.58°	0.92°	2.13°	0.9979	0.9980
水平面	0.51°	0.70°	0.66°	1.14°	0.9887	0.9892

合計9名を被験者とした。

3. 測定項目および測定方法

1) チェックバイトの測定

測定項目は、1) 中心咬合位 2) 最大滑走前方位 3) 最大滑走左側方位 4) 最大滑走右側方位 5) 最大開口位の運動時のチェックバイトを測定した。

チェックバイトの測定方法は、まず、被験者に各下顎運動を行わせ、その際に軟化したモデリングコンパウンドを歯面唇側面に圧接し、自然硬化させ、硬化したモデリングコンパウンド内面を一層削除し、チェックバイト採得用各個トレーを作成した。次にこのチェックバイト測定用各個トレー内に軟化したバイトワックスを付着させ、再び各下顎運動を行っている被験者の歯面にそれを圧接し、上下顎の関係を刻印させた。刻印させる範囲は上下顎第一大臼歯が完全萌出している場合は上下顎第一大臼歯頬側面まで、その他の場合は上下顎第二乳臼歯頬側面までとした。最大開口位の記録に関しては、最大開口位記録用トレーを作成した。これは可動式となっており、口腔内で高さを変化させることが可能で、上下顎臼歯部咬合面を同時に刻印できるものである。

2) 上下顎模型のための印象採得

咬合器上でチェックバイトを再現するため、上下顎の印象採得を行い、上下顎歯列模型を作製した。

3) トランスミッタの位置の測定

各被験者にトランスミッタを装備し、目盛付バイトプレートで噛ませ、咬合平面に対するトランスミッタの位置関係を測定した。

4) 6自由度測定装置による下顎位の測定

即時重合レジンを使い、模型上にてレシーバ固定治具を作成し、チェックバイトおよび目盛付バイトプレートにて上下顎および上顎に対するトランスミッタの位置関係を再現した。つづいてレシーバにレジン製ポイントを装着し、基準平面を決定して各下顎位の6自由度を測定した。本編の基準平面は咬合平面とし、切歯点および左右上顎第一大臼歯が完全萌出している際はその中心小窩、完全萌出していない場合は左右上顎第二乳臼歯の中心小窩の計3点によって仮定される平面とした。

なお、磁気による影響を考え、装置の設置場所は、1.5m四方に大型金属製や磁気および電磁波の発生するものがない状態で、ユニットおよびホストコンピュータをレシーバから1.5m離れた状態で行った。

4) 3次元測定装置による下顎位の測定

3)と同様に咬合器上で各下顎位を再現し、それを3次元測定装置によって測定した。測定部位は下顎切歯点および左右下顎第一大臼歯が完全萌出している場合は左右下顎第一大臼歯頬側面小窩を、完全萌出していない場合は第二乳臼歯の近心頬側溝端部を測定した。

4. 誤差の算出

6自由度測定装置による測定値と、3次元測定装置による実測値を比較し、6自由度測定装置のX、Y、Z軸および各軸に対する回転角度の精度ならびに補正値を算出した。

図1 X軸における測定値と実測値の回帰線
Fig. 1 Recurrence line of actual value and measurement value in X axis

図4 前頭面角度における測定値と実測値の回帰線
Fig. 4 Recurrence line of actual angle and measurement angle in Coronal plane

図2 Y軸における測定値と実測値の回帰線
Fig. 2 Recurrence line of actual value and measurement value in Y axis

図5 矢状面角度における測定値と実測値の回帰線
Fig. 5 Recurrence line of actual angle and measurement angle in sagittal plane

図3 Z軸における測定値と実測値の回帰線
Fig. 3 Recurrence line of actual value and measurement value in Z axis

図6 水平面角度における測定値と実測値の回帰線
Fig. 6 Recurrence line of actual angle and measurement angle in horizontal plane

III. 結 果

1. 測定範囲

測定範囲は咬合平面を基準とし、咬合平面を床と平衡とし、中心咬合位時における切歯点を原点とし、上下方向を X 軸（下が+）、向かって左右方向を Y 軸（右が+）、向かって前後方向を Z 軸（手前が+）とした際、測定範囲となる切歯点の可動範囲は、X 軸 0mm～50.3mm、Y 軸 12.5mm～-12.5mm、Z 軸 9.9mm～-34.2mm であった。

2. 測定値の誤差について

測定値の切歯点の誤差の実測値について 6 自由度の要素別・下顎位別に、また回帰線（直線、2 次曲線）により得られた R² の値について 6 自由度の要素別に表 1 に示す。

1) 原点からの距離の誤差

測定値と実測値までの距離における切歯点の最大誤差は最大開口位における 3.3mm（6.7%）であった。

2) 各軸に対する距離の精度

切歯点の X 軸に対する最大誤差は最大開口位における 2.7mm であった。また、測定値の特性と回帰線（直線、2 次曲線）を図 1 に示す。

切歯点の Y 軸に対する最大誤差は最大開口位における 1.7mm であった。また、測定値の特性と回帰線（直線、2 次曲線）を図 2 に示す。

切歯点の Z 軸に対する最大誤差は最大開口位における 2.3mm であった。また、測定値の特性と回帰線（直線、2 次曲線）を図 3 に示す。

3. 各軸に対する角度の誤差

1) 下顎の前頭面に対する回転角度の最大誤差は最大開口位における 1.06° であった。また、測定値の特性と回帰線（直線、2 次曲線）を図 4 に示す。

2) 下顎の矢状面に対する回転角度の最大誤差は最大開口位における 2.13° であった。また、測定値の特性と回帰線（直線、2 次曲線）を図 5 に示す。

3) 下顎の水平面に対する回転角度の最大誤差は最大開口位における 1.14° であった。また、測定値の特性と回帰線（直線、2 次曲線）を図 6 に示す。

4) 回帰線（直線、2 次曲線）により、その測定値の特性は曲線基調を描いた。しかし R² の値によると、Y 軸と Z 軸の値は曲線の度合はほとんどなく、前頭面回転角度はその度合が最も顕著であった。

IV. 考 察

著者らは顎運動の解析には、その 6 自由度測定が必須

であると考え、下顎運動の 6 自由度を測定する装置を臨床の場で見ることとはほとんどない。理由のひとつとしてセンサが大型で生体への装着が困難などの操作上の問題や、本体が大型であり、手軽に持ち運べず、臨床の場に設置しにくいなどの物理的な問題が考えられる。特に小児を対象とした際、センサの装着などの困難さや違和感の問題は実験結果を顕著に左右する。

そこで著者らは小児にも応用可能な下顎運動 6 自由度測定装置の開発研究を行っている¹⁶⁾。この装置の開発に当たっては、その目標を下顎運動の 6 自由度測定が可能であると同時に、移動も可能な小型軽量の装置であり、小児にも応用可能なくらいの簡便な操作性を持つものとしている。

この目標を実現するために、著者らは測定媒体として磁気を使用している。磁気はコイルで発生・測定することができ、トランスミッタ・レシーバの小型・単純化に寄与し、それによりそれら測定部品全てを頭部に固定できるため、装置全体の小型化も図れる。また磁気位相空間内の 6 自由度測定方法も確立化しており、当開発目標に一番合致すると判断した。

また、著者らは磁気を利用した下顎運動 6 自由度測定装置の可能性を追及し、既報において、磁気を利用した下顎運動の 6 自由度測定が可能であることを報告した¹⁶⁾。しかし、この報告による誤差や精度の数値は校正機上の値であり、実際に臨床上で使用した際の精度とは異なっていると思われる。それは、この報告はトランスミッタとレシーバと測定基準平面が常に直交した状態で測定をしているが、実際の臨床使用では基準平面とトランスミッタの位置関係は個人によって異なっていること、測定基準平面と物体の 6 自由度を 1 つのレシーバで測定していること、各軸に対する回転角度の精度は仮想原点上の値のみであり、原点以外で測定を行っていないことがその理由である。

装置の精度とは、その装置による測定値と絶対精度を持つ測定装置による値を比較することにより求められる。今回の場合、絶対精度を持つ測定装置とは、精度低下の要素をなるべく少なくするために、接触式の測定装置を選択した。また、実際の臨床を意識した精度を求めるのなら、その測定値は実際の被験者上で採取される方が望ましい。しかし、実際の被験者による下顎運動の間接的な 6 自由度と直接的な 6 自由度を同時に測定することは困難である。そこで被験者に各種下顎運動を行わせ、そのチェックバイトを記録し、同時に咬合平面に対するトランスミッタの位置関係を測定し、それらにより、実際に被験者を使用した状態を咬合器上で再現し、その下

顎位を磁気を利用した6自由度測定装置と直接測定による3次元測定装置で測定し、それを比較することによって臨床上の精度とすることとした。

本実験の結果を過去の報告と比較する。

著者らの既報¹⁶⁾との比較であるが、測定条件が異なり直接の比較はできないが、精度は悪くなる傾向が見られた。これは既報は基準平面とトランスミッタおよびレシーバの位置関係が常に直交しており、測定条件が良いこと、既報は基準平面を入力する条件が本研究より良いこと、既報は測定範囲が実質的に狭いこと、既報は実験場所が一定であったなどの理由が考えられる。

この誤差を従来報告され、また現在も主に使用されている他の装置と比較してみる。

過去の報告において、6自由度測定装置は坂東らの装置⁵⁾や郡らの装置¹⁵⁾、山崎の装置¹³⁾などがある。特に坂東らの開発したデジタル方式による下顎運動測定装置は世界的に見ても最も高精度の装置の一つであり、下顎位を直接測定するため、その精度は絶対的とも言える。また、郡らの装置は測定媒体に磁気を利用するため、その補正後の精度はセンサより約150mm離れた顎頭部の運動を推定した場合は700 程度であると報告されている¹⁵⁾。また、山崎の装置は測定視野内の80個の格子点における設定値と補正値の3次元距離は、平均60 mmまで低減できたとあり¹³⁾、共に本装置より良い結果であることが報告されている。

著者らの装置は、その性格として精度の追及よりも操作性を追及している。その関連として装置を小型化し、リアルタイムで演算処理を行い、かつリアルタイムでワイヤフレームによる下顎の動きを表示する仕様になっている。このためホストコンピュータの処理能力が限界に達し、ソフトウェア的な複雑な補正を行っていない。この精度の結果には装置の性格の違いが出ているものと思われる。今後、ハードウェアの進歩により処理能力が向上すれば、この点も改善されていくものと思われる。

また、本装置の測定値の特性を示すグラフ(図1～6)より、その特性は曲線基調であることが示されているため、補正法は線形補正よりも多項式補正の方が有効である。特に前頭面回転角度は多項式補正の効果が大きい(表2)。前頭面回転角度はその測定範囲が狭いため、ばらつきが大きくなる傾向があり、補正には細心の注意が必要であると思われる。

以上のことにより、臨床応用可能な下顎運動6自由度測定装置の開発の見通しが得られた。今後は処理能力の向上、補正法の確立、操作性の向上を図りつつ、臨床応用を行う予定である。

V. 結 論

著者らは従来より磁気を利用した下顎運動6自由度測定装置の開発を行っているが、本装置の臨床上の性能を検討するため、咬合器上で実際の測定状態および各種下顎運動を再現し、精度を求めたところ、以下のような結論を得た。

1. 本装置による寸法における最大誤差は、被験者に中心咬合位から最大開口運動をさせた際の切歯点移動量における3.3mmであった。
2. 本装置による角度における最大誤差は、被験者に中心咬合位から最大開口運動をさせた際の矢状面における2.13°であった。
3. 本研究により、本装置が実際の臨床の場で下顎運動の6自由度測定に使用できる見通しが得られた。

文 献

- 1) 佐久間孔毅：マルチフラッシュ装置による有歯顎の前後および開閉運動の研究，口病誌，26:1511-1536，1959.
- 2) 川口豊造：電氣的測定装置による習慣性閉口運動および嚥下運動時の歯牙接触位に関する研究，補綴誌，12:398-423，1968.
- 3) 柴田孝典，中沢勝宏，尾崎佳孝，増田健，子鹿典雄：ビジブル・バイオフィードバック機能を持つ下顎運動解析装置サホンビジトレナーC IIについて，補綴臨床，14:101-116，1981.
- 4) 山下敦：顎運動記録ーマンディブラーキネジオグラフィー，日歯医会誌，33:1170-1180，1981.
- 5) 坂東永一，藤村哲也，鈴木温，池田隆志，近藤一雄，久保吉廣，中野雅徳，長谷川成男，河野正司，真柳昭紘，栗山実，田端恒雄：デジタル方式による下顎運動測定装置，下顎運動機能とEMG論文集昭和58年度：137-143，1984.
- 6) 丸山剛郎，西尾公一：新しい下顎運動記録装置・Sirognathographと同解析コンピュータシステム，歯界展望，63:1535-1546，1984.
- 7) 飯島英世，三輪全三，小野芳明，小野博志，野崎修一：光位置検出器を用いた小児用顎運動測定装置に関する研究，口病誌，53:232-245，1986.
- 8) 高山寿夫，岩田健夫，保母須弥也：自動電子計測装置を用いたヒトの下顎運動の3次元的研究第1報顎路，切歯路および臼歯路における相關検定，顎咬合誌，7:1-29，1986.

- 9) 荒井節男：磁場を利用した下顎運動測定装置の特性，歯学，75:1089-1099，1988.
- 10) 荒井節男：磁場を利用した下顎運動測定装置 (Sirognathograph) の特性その 2：動的特性，歯学，75:1176-1177，1988.
- 11) 桑原俊也：シロナソグラフ・アナライジング・システムー臨床応用の目的とその限界ー，歯科ジャーナル，29:565-574，1989.
- 12) 佐々木真澄：下顎運動データ処理システムの開発，歯科学報，89:201-211，1989.
- 13) 山崎要一：セルスポットを応用した下顎多点運動解析システムの開発と乳歯列期小児の側方滑走運動に関する研究，小児歯科学雑誌，27:395-414，1989.
- 14) 岡田政俊，榎本佳代子，前田芳信，野首孝嗣，奥野善彦：光学系を用いた 6 自由度顎運動測定装置の開発第 1 報測定システムの概要，阪大歯学雑誌，37:480-487，1992.
- 15) 郡元治，坂東永一：磁気位相空間を応用した上顎 6 自由度下顎 6 自由度運動測定器の試作，補綴誌，37:337-349，1993.
- 16) 菊池元宏，赤坂守人：磁気を利用した下顎運動 6 自由度測定装置の開発ー第 1 報その基本的特性についてー，小児歯誌，31:859-869，1993.