原著論文

顔面皮膚上点の運動観測による下顎運動の推定

七田 俊晴 下平 修 佐藤 裕二 金 修鐸

Prediction of Mandibular Movement by Observation of Facial Skin Markers

Shichita Toshiharu, Shimodaira Osamu, Sato Yuuji and Kim SooTaek

歯科補綴学的意義

下顎の中心咬合位付近の運動は、診断や治療効果の判定の指標となるため、その観察にはさまざまな方法が考案されてきた。しかし、多くはセンサーの装着により自然な機能運動の記録が困難である。そこで、下顎運動を顔面皮膚上点の観察から推定できれば臨床上有用と考えた。顔面皮膚上点の観察結果を重回帰分析することにより、下顎切歯点の15 mmまでの垂直的変位量を3.7%以内の精度で推定する手法を開発した。

抄 録

目的：下顎運動の観察は、さまざまな方法が考案されてきたが、多くは被験者へのセンサーの装着により生理的運動を阻害するなどの問題がある。そこで、皮膚上標点の動態解析から下顎運動を推定することを目的として、重回帰分析を用いて下顎切歯点と顔面皮膚上点の相関を検討した。

方法：健康有歯顎者8名の顔面皮膚上9部位および下顎歯列につけたフレーム上の3部位に光反射性標点を貼付した。中心咬合位と最大開口位の反復を6方向からビデオカメラで記録し、顔面皮膚上点と切歯点の運動を立体構築した。切歯点での運動（開口、上下方向、前後方向）を推定するために、9個の顔面皮膚上点の三次元的移動量（X、Y、Z成分）計27個を説明変数として重回帰分析を行った。実測値と重回帰式から得られた推定値との差の平均（精度）を設定した区間（0-5 mm, 0-10 mm, 0-15 mm, 5-10 mm, 10-15 mm）ごとに比較検討した。

結果：開口量と上下方向の移動量の精度は、それぞれ9個の変数を用いて0-15 mmの範囲において0.76 mm（3.7%）と0.69 mm（4.9%）の精度で推定することができた。しかし、前後方向の移動量の推定精度は、10個の変数を用いて0.40 mm（9.7%）と開口量や上下方向の移動量の精度と比べて大きくなった。

結論：下顎切歯点の15 mmまでの開口量および上下方向の運動を、顔面皮膚上点から推定できることが示唆された。

和文キーワード

三次元、多変量解析、下顎運動、中心咬合位、皮膚上標点

昭和大学歯学部高齢者歯科学教室（主任：佐藤裕二教授）

Department of Geriatric Dentistry, Showa University School of Dentistry (Chief : Prof. Sato Yuuji)

受付：2004年6月18日/受理：2004年9月8日

Received on June 18, 2004/Accepted on September 8, 2004

I. 緒 言

歯列のみならず顎関節および咀嚼筋などの各要素によって機能的に決定される下顎運動の終末位は重要であり、特に中心咬合位付近の運動は、顎口腔系の形態や機能の異常を最も鋭敏に反映するため、診断や治療効果の判定の指標となる。従来から下顎運動の観察には、マグネットを下顎切歯に取り付けてセンサーで読み取るマンディブラキネジオグラフ (MKG)¹⁾ やシロナソグラフ²⁾、センサーをロッドで歯列に装着するナソヘキサグラフシステム³⁾ や高速 VTR システム⁴⁾ などの多様な方法が考案されてきた。しかし、これらの方法はセンサーやアンテナの装着で生理的運動が阻害されるため、自然な機能運動の記録が困難である。また、切歯点に鉛球を設置し X 線を用いて運動を観察する方法⁵⁾ も行われたが、被験者の被爆を考慮すると臨床応用が不可能である。さらに無歯顎者では、義歯の動揺により正確な下顎の運動が記録できるか疑問である。そこで、われわれは下顎運動を顔面皮膚上点から推定できれば、臨床上有用であると考えた。

これまでに Jemt ら⁶⁻⁸⁾、Häggman ら⁹⁾ は、有歯顎者の下顎切歯とオトガイ皮膚上に発光ダイオード (LED) を用いた標点を設け、咀嚼運動中の両者の比較を行っているが、オトガイ点以外の皮膚上標点との比較や下顎運動の推定にはいたっていない。一方、当教室では多点の運動解析が可能なモーションキャプチャー・システム^{10,11)} を用いて、健常有歯顎者の咀嚼と調音時における口腔・顔面運動経路の三次元解析を報告してきた。

本研究では、このモーションキャプチャー・システムを用いて、顔面皮膚上点の運動から下顎運動の推定を行うために、開口運動時における下顎切歯点と顔面皮膚上点の動態解析結果を重回帰分析し、それらを比較検討した。

II. 研究方法

1. 被験者

被験者は、顎口腔機能に異常が認められない、インフォームドコンセントが得られている健常有歯顎者 8 名 (年齢 24~28 : 平均 25.5 歳、男性 4 名・女性 4

図 1 Markers and marker frame

a) A subject wearing a spectacle frame and a mandibular marker frame. The markers are attached directly to the facial skin

b) Positioning of markers on facial skin

R/LG : Gonion, R/LM 6 : Submandible below lower first molar, R/LM 3 : Submandible below lower canine, Me 1 : Menton (anterior), Me 2 : Menton (center), Me 3 : Menton (posterior)

c) A mandibular frame marker with markers arranged spatially

標点およびマーカースフレーム

a) 眼鏡フレームと下顎マーカースフレームを装着した被験者。顔面皮膚上標点は直接皮膚上に貼付してある

b) 顔面皮膚上の標点の設定位置

R/LG : 左右顎角, R/LM 6 : 左右第一大臼歯の下方の顎下部, R/LM 3 : 左右犬歯の下方の顎下部, Me 1 : オトガイ (前方部), Me 2 : オトガイ (中央部), Me 3 : オトガイ (後方部)

c) 標点を立体的に配置した下顎マーカース

名) を用いた。

2. 標点およびマーカースフレーム

標点は、澤田ら¹²⁾の方法に従い、プラスチック球 (直径 4.0 mm) の表面に反射テープ (スコッチライトハイゲインシート, 3 M) を貼付して作製した (重量 : 0.1 g)。この標点はコールドスポット (150 W ハロゲン光源 : ICL-NSX, 日本ピー・アイ) で照明すると円形の光点として記録できる (図 1 a)。これを皮膚上標点として、顔面皮膚上の計測部位に皮膚にも使用可能な粘着材 (XERTS 41, ペンテック) で貼付した。

皮膚上標点は、オトガイ正中部のオトガイ点 (以下, Me 1), オトガイ下面前方で触診できる骨の前縁 (以下, Me 2), その正中後方の 10 mm (以下, Me 3), また左右顎角 (以下, LG/RG), 左右第一大臼歯と左右犬歯部の垂直下方の下顎下縁皮膚上 (以

図2 A motion capture and analysis system
#1~6: High-speed video cameras (V-133)
モーション・キャプチャーと解析システム
#1~6: ハイスピードビデオカメラ (V-133)

下, LM 6/RM 6), (以下, LM 3/RM 3) の計 9 部位である (図 1 b)。

皮膚上標点以外に, 下顎骨の位置座標を記録するためチタンワイヤーのフレーム上に 3 個の標点を立体的に配置した下顎マーカーフレーム (図 1 c) を被験者の下顎歯列に瞬間接着剤 (アロンアルファ, 東亜合成) にて装着した。また, 頭蓋側に基準平面の設定および頭部の変位補正を行うため, 標点を 4 個固定した眼鏡状の上顎マーカーフレームを装着した (図 1 a)。

3. 記録方法

1) 計測空間の設定

被験者の撮影に先立ち, 計測空間の座標系を規定するため, 12 個の標点を立体的に配列したキャリブレーションチャートを撮影領域に設置し, コールドスポットの照明下, サンプリングレート 60 Hz で 6 台の高速 VTR (V-133, nac) にて記録した。得られたビデオ画像を Datastation (VICON 370, Oxford Metrics) によりデジタル化し, Workstation (VICON 370, Oxford Metrics) 上でキャリブレーションチャートの標点の三次元座標と各カメラで記録した二次元座標を対照することにより, 計測空間の座標系を設定した。座標系は, 座位の被験者正面に対し左右方向 (X), 前後方向 (Y), 上下方向 (Z) とした。

2) 被験者の記録

被験者には, 計測空間内で頭部を固定せず座位をとらせ, コールドスポットの照明下, サンプリングレート 60 Hz で 6 台の高速 VTR にて 6 方向から記録した (図 2)。運動開始の合図とともに, 中心咬合位

図3 A pointer for indication of virtual point (L1)
仮想点 (L1) 指示用ポインター

と最大開口位の反復を自由に行うよう指示した。20 回を目安に運動を行わせ, そのなかで安定している 10 回をデータとして採用した。

本システムでは, 皮膚上標点のような直接記録できる標点のほかに, 下顎骨と同期して移動する任意の点 (以下, 仮想点) の運動を観測することができる。これは, 2 個の標点を 50 mm 間隔で設置したポインター^{13,14)}で静止時の仮想点の座標をあらかじめ記録し, Workstation 上で下顎マーカーとの相対的位置を座標変換することにより行える。この機能を用い, ポインターで静止時の下顎中切歯近心隅角を指示して切歯点 (以下, L1) として記録し (図 3), 9 部位の顔面皮膚上点の運動と合成した。これにより, 開口運動に同期した顔面皮膚上点と L1 の座標を記録できる。

4. 解析対象について

1) 開口量の規定

本研究では, 中心咬合位からの L1 の移動距離をもって開口量とし, 開口量 15 mm までを解析対象とした。

2) L1 の座標成分について

重回帰分析の目的変数として L1 の三次元的移動距離すなわち開口量のほかに, L1 の移動距離の前後成分 (以下, Y 成分) と上下成分 (以下, Z 成分) を用いた。

5. 解析方法

1) 目的変数を開口量とした場合

目的変数を L1 での開口量, 説明変数を 9 部位の顔面皮膚上点の各成分の移動量 (左右 X, 前後 Y, 上下 Z 成分) 計 27 個とした。

変数減少法を用いて, 単相関が 0.1 より小さいものの, 互いの偏相関の値が 0.9 より大きく, 目的変数との相関が小さいものを削除して説明変数を 10 程度に絞り込み, 顔面皮膚上点から L1 の運動を推定する重回帰式を求めた。この操作を開口量 5, 10, 15 mm までの範囲でそれぞれ行い, 3 つの重回帰式を得た。すなわち, 開口量 5 mm まで (以下, 5 mm 式), 開口量 10 mm まで (以下, 10 mm 式), 開口量 15 mm まで (以下, 15 mm 式) である。

得られた 3 つの重回帰式の実測値と推定値の差を検定するため, 各式に皮膚上点の計測値 (実測値) を代入した。設定した区間 (0-5, 0-10, 0-15, 5-10, 10-15 mm) ごとに算出した開口量の実測値と推定値との差の絶対値の平均 (平均偏差) を求めた。

2) 目的変数を L1 の Y 成分, Z 成分とした場合

目的変数を L1 の Y 成分, Z 成分, 説明変数を 9 部位の顔面皮膚上点の各成分の移動量 (左右 X, 前後 Y, 上下 Z 成分) 計 27 個とし, 同様に 3 つの重回帰式を得た。すなわち, 開口量 5 mm まで (以下, Y-5 mm 式, Z-5 mm 式), 開口量 10 mm まで (以下, Y-10 mm 式, Z-10 mm 式), 開口量 15 mm まで (以下, Y-15 mm 式, Z-15 mm 式) である。

また, おおのこの式の実測値と推定値の差を検定するために皮膚上点の計測値を代入し, 設定した区間

(0-5, 0-10, 0-15, 5-10, 10-15 mm) ごとに算出した平均偏差を比較検討した。

III. 結 果

1. 目的変数を L1 での開口量とした場合

目的変数を L1 での開口量とした場合, L1 での開口量 5 mm までの 5 mm 式, 開口量 10 mm までの 10 mm 式, 開口量 15 mm までの 15 mm 式の 3 つの重回帰式の係数を表 1 に示す。またこれらについての実測値と推定値の分布図 (散布図) を図 4 に示す。5 mm 式, 10 mm 式の散布図については開口量の増大とともに回帰式の直線から離れて広がっている。

5 mm 式の相関係数 $R=0.895$, 10 mm 式は $R=0.964$, 15 mm 式では $R=0.986$ であった。3 式ともに L1 での実測値と推定値の間に有意な相関 ($p<0.01$) が認められた。

2. 開口量の実測値と推定値との平均偏差について

図 5 は, 目的変数を L1 での開口量とした場合の 3 つの重回帰式による実測値と推定値の差の絶対値の平均 (平均偏差) を開口量 (0-5, 0-10, 0-15 5-10, 10-15 mm) ごとに示す。

5 mm 式の 0-5 mm の区間では平均偏差が 0.36 mm (5.1%) と最も小さいが, 開口量が増大するとともに平均偏差が大きくなり, 10-15 mm の区間では 4.17 mm (21.8%) であった。開口量 10 mm までの平均偏差は 0.49 mm (4.9%) と少なく, 10 mm 以上の 5-10 mm の区間では平均偏差は 1.78 mm (10.6%)

表 1 The coefficient of multiple regressions for mouth opening as a dependent variable in three opening ranges

E : Explanatory variable, P : Partial regression coefficient, C : Correlation coefficient

開口量を目的変数とし, 開口量の区間ごとに解析した 3 つの重回帰式の係数

E : 説明変数, P : 偏回帰係数, C : 単相関関係

5 mm			10 mm			15 mm		
E	P	C	E	P	C	E	P	C
LG : X	-0.197	-0.100	LM 3 : X	0.699	0.156	LM 3 : X	0.413	0.103
RG : X	0.128	-0.144	LM 6 : X	-0.860	0.119	LM 6 : X	-0.710	-0.129
LG : Y	-0.278	-0.145	RG : X	-0.142	-0.142	RG : X	0.642	-0.178
LM 6 : Y	-0.435	-0.145	RM 6 : X	0.428	-0.178	LG : Y	-0.345	-0.164
RM 6 : Y	0.707	-0.205	LM 6 : Y	-0.324	-0.164	LM 3 : Y	0.691	-0.183
LM 6 : Z	0.299	-0.171	Me 1 : Y	-0.329	-0.146	LG : Z	0.512	-0.183
Me 3 : Z	-0.142	-0.248	RG : Y	0.355	-0.255	LM 3 : Z	-0.142	-0.830
RG : Z	0.225	0.104	LG : Z	0.387	0.236	LM 6 : Z	0.532	0.619
RM 3 : Z	-0.096	-0.418	LM 6 : Z	-0.348	-0.470	RG : Z	-0.856	-0.125
RM 6 : Z	-0.986	-0.334	RM 3 : Z	-0.993	-0.591			
Constant	-60.461		Constant	-118.699		Constant	-114.72

図 4 Comparison of the actual value and the predicted value of the degree of mouth opening

a) The formula of 5 mm

Black plot : The value used for the formula of 5 mm

White plot : The value not used for the formula of 5 mm

* : Level of significant ($p < 0.01$), R (correlation coefficient) : 0.895

b) The formula of 10 mm

Black plot : The value used for the formula of 10 mm

White plot : The value not used for the formula of 10 mm

* : Level of significant ($p < 0.01$), R (correlation coefficient) : 0.964

c) The formula of 15 mm

* : Level of significant ($p < 0.01$), R (correlation coefficient) : 0.986

各式における実測値と推定値の比較 (散布図)

a) 5 mm 式を求める際に用いた黒色のプロット, 白色のプロットは用いなかった値

b) 10 mm 式を求める際に用いた黒色のプロット, 白色のプロットは用いなかった値

c) 15 mm 式における実測値と推定値の比較

図 5 Average deviation the difference between the actual value and the predicted value of the degree of mouth opening at three formulas

目的変数が開口量の 3 式による解析区間ごとの実測値と推定値との平均偏差

と大きかった。

15 mm 式で開口量を推定した際には, 0-5 mm の区間では 5 mm 式, 10 mm 式の 0-5 mm の区間に比べて, 平均偏差が最も大きく 0.53 mm (9.6%) であったが, 開口量が増加してもその差の増大は認められな

図 6 The actual values and predicted values in time course of one cycle of jaw
開口量の時系列による変化 (下顎運動の 1 サイクル)

かった。15 mm 式での 0-15 mm の区間では 5 mm 式, 10 mm 式のどの区間と比較しても最も平均偏差が少ない, 0.76 mm (3.7%) だった。

3. 重回帰式を用いた開閉口運動の再現性について

図 6 はそれぞれの重回帰式へ 60 Hz でサンプリングされた顔面皮膚上点の座標を代入し, L1 での開口量の実測値と推定値を重ね合わせて, 時系列で表した

表 2 The coefficient of multiple regressions for the anterior-posterior direction of order (Y ingredient) as a dependent variable in three opening ranges

E : Explanatory variable, P : Partial regression coefficient, C : Correlation coefficient

前後方向の移動量 (Y 成分) を目的変数とし, 開口量の区間ごとに解析した 3 つの重回帰式の係数

E : 説明変数, P : 偏回帰係数, C : 単相関関係

Y-5 mm			Y-10 mm			Y-15 mm		
E	P	C	E	P	C	E	P	C
LM 6 : X	-0.219	0.007	LM 3 : X	0.283	0.023	LG : X	0.188	-0.114
Me 3 : X	0.220	0.017	LM 6 : X	-0.327	0.034	Me 2 : X	-0.586	0.020
LG : Y	-0.056	-0.077	RG : X	0.240	0.014	RG : X	0.541	0.116
LM 3 : Y	0.254	-0.039	RM 3 : X	-0.117	-0.020	LG : Y	-0.069	-0.016
Me 3 : Y	-0.168	-0.048	LG : Y	-0.212	-0.028	Me 3 : Y	0.246	-0.053
RM 6 : Y	0.176	-0.050	Me 2 : Y	0.318	-0.039	LG : Z	0.213	0.027
LM 6 : Z	0.342	-0.093	LG : Z	0.300	0.050	LM 3 : Z	-0.424	-0.678
Me 3 : Z	-0.072	0.178	LM 3 : Z	-0.292	-0.498	LM 6 : Z	0.406	-0.506
RM 6 : Z	-0.578	0.194	RG : Z	-0.367	-0.047	Me 2 : Z	0.081	-0.603
Constant	-27.540		Constant	-46.390		RM 6 : Z	-0.405	-0.562
						Constant	-25.994

図 7 Average deviation the difference between the actual value and the predicted value of the degree of movement in the anterior-posterior direction (Y ingredient) at three formulas
目的変数が前後方向 (Y 方向) の移動量の 3 式による解析区間ごとの実測値と推定値との平均偏差

図 8 Average deviation between the actual value and the predicted value of the degree of movement in the vertical direction (Z ingredient) at three formulas
目的変数が上下方向 (Z 方向) の移動量の 3 式による解析区間ごとの実測値と推定値との平均偏差

1 例であり, 開閉口 1 ストロークでの三次元的移動量の軌跡を示す. 5 mm 式のグラフでは開口量 5 mm まで, 10 mm 式のグラフでは開口量 10 mm までは実測値とほぼ一致したが, それ以上の開口量では実測値と解離した. 点線で示す L1 での開口量 15 mm までは 15 mm 式による軌跡が実測値に最も近似していた.

4. 目的変数を L1 の Y 成分, Z 成分とした場合について

1) Y 成分について

L1 の Y 成分を目的変数として, 求めたそれぞれの重回帰式 (Y-5 mm 式 Y-10 mm 式 Y-15 mm 式) の係数を表 2 に示す. また L1 での開口量ごとの

平均偏差を図 7 に示す. Y-5 mm 式の 0-5 mm 区間では平均偏差が小さいが, 開口量の増加に伴いその差が大きくなり, 10-15 mm 区間では平均偏差が 2.5 mm (49.2%) と他の区間と比較しても大きな値になった. Y-15 mm 式では, 開口量の増加による変化は少なく, その差が最も大きい 10-15 mm 区間でも 0.86 mm (16.9%) であった.

2) Z 成分について

L1 の Z 成分を目的変数とした重回帰式 (Z-5 mm 式 Z-10 mm 式 Z-15 mm 式) の係数を表 3 に示す. また L1 での開口量ごとの平均偏差を図 8 に表す. Z-5 mm 式の 0-5 mm 区間では平均偏差が小さく, 開口量の増加に伴いその差が大きくなり, 10-15 mm 区間では平均偏差は 2.8 mm (19.8%) とほかの

表 3 The coefficient of multiple regressions for the vertical direction of order (Z ingredient) as a dependent variable in three opening ranges

E : Explanatory variable, P : Partial regression coefficient, C : Correlation coefficient

上下方向の移動量 (Z 成分) を目的変数とし、開口量の区間ごとで解析した 3 つの重回帰式の係数

E : 説明変数, P : 偏回帰係数, C : 単相関係数

Z-5 mm			Z-10 mm			Z-15 mm		
E	P	C	E	P	C	E	P	C
LG : X	0.497	0.035	LG : X	0.129	-0.088	LG : X	0.497	0.035
LM 3 : X	-1.153	-0.027	LM 3 : X	-0.663	-0.087	LM 3 : X	-1.154	-0.027
LM 6 : X	1.107	0.037	LM 6 : X	0.642	-0.009	LM 6 : X	1.107	0.037
RG : X	-0.275	-0.084	RG : X	-0.462	0.150	RG : X	-0.275	-0.084
LG : Y	0.311	0.045	LG : Y	0.256	0.001	LG : Y	0.311	0.045
Me 3 : Y	-0.316	0.140	RG : Y	0.290	0.148	Me 3 : Y	-0.316	0.140
LM 3 : Z	0.271	0.733	RM 6 : Y	-0.389	0.107	LM 3 : Z	0.271	0.733
Me 2 : Z	0.414	0.646	Me 3 : Z	0.079	0.263	Me 2 : Z	0.414	0.646
RG : Z	0.625	0.052	RG : Z	0.302	0.015	RG : Z	0.625	0.052
			RM 3 : Z	0.561	0.325			
Constant	139.744		Constant	108.507		Constant	139.744	

2 式に比較すると大きな値になった。Z-15 mm 式での、0-15 mm 区間は開口量の増加に伴い平均偏差が増すことはなく 0.69 mm (4.9%) であった。

IV. 考 察

1. 方法について

1) 被験者について

今回、被験者の年齢は、平均 25.5 歳 (24~28 歳) と比較的若い被験者が対象であった。高齢者においては皮膚のたるみなどが考えられるので、今回の結果をもとに加齢の影響の検討が必要であろう。男性 4 名・女性 4 名の間では性差は認められなかった。

被験者個々の顎形状による影響は検討していないが、本法では、3.7% の誤差で切歯点での運動を推定できることが示唆されたことより、影響は少ないと考えられる。

2) 標点およびマーカーフレームについて

標点をこの部位にしたのは、無歯顎者を想定した場合、唇側前庭の底部より上方では床による影響が大きく、さらに骨吸収が大きな症例ではオトガイ上方の皮膚が変位する。そこで、今回は口唇、頬の運動の影響がより少ないと思われる下顎下面に標点を設けた。

下顎骨の位置座標を記録するための下顎マーカーも軽量 (1.3 g) で、個人の歯列、口唇形態を考慮し、上下口唇の接触がスムーズに行えるように模型上で作製し下顎歯列に装着した。

3) 記録方法について

本計測システムは、捉えた標点の反射光の中心を高

速度 VTR に記録して立体構築するものである。それゆえ従来行われてきたセンサー装着法と比較して、非接触で自然な動作を阻害しないために被験者への負担が少なく咀嚼、発音などの機能時の運動解析に有用と思われる。本研究で用いたシステムの精度は、先行研究^{13,14)}で示すように、150×150×150 mm の範囲内で標点を任意の移動方向、移動量で移動した場合、標点で 0.11~1.15%, 15 mm の移動量に対して 0.02~0.17 mm, 仮想点では 0.35~1.25%, 15 mm の移動量に対して 0.05~0.19 mm という結果が示されている。今回求めた L1 での誤差 (平均偏差) と先行研究による本システムの精度を直接比較することは、皮膚上点の移動距離による重回帰分析により求めた移動距離と、実際の標点の移動距離と VICON 上での移動距離を比較した先行研究とを直接比較するのは難しい。また、磁気を利用した上下顎 6 自由度測定装置にて 15 mm までの運動を再現した際に、発生する誤差は 0.15 mm とのデータがある¹⁵⁾。これに比較すれば今回 15 mm の運動に対する 0.76 mm の誤差は大きい。測定用レーザーの患者への負担を考えれば、非接触での軟組織上に設けた顔面皮膚上点の座標の移動距離から求めた重回帰式により、求めた値での誤差 (平均偏差) としては小さい値であり、意味がある。

4) 解析対象について

(1) 開口量の規定について

本研究では、解析対象の開口量を 15 mm までに設定したが、これは志賀らによる正常者での咀嚼時下顎運動経路における開口量は 14.55 mm であるとの報告¹⁶⁾に基づいている。実際には、これ以上の開口量に

においても本法は適用可能と思われるが、開口量の増加に伴い皮膚、筋などの軟組織の動きが大きくなり、誤差は増大すると考えられる。また、目的変数をL1での成分とした場合の移動距離の左右成分（以下、X成分）の解析を行わなかったのは、健常者の開閉口運動時では左右への変位が少ないからである。

(2) 解析対象動作について

本研究では開閉口運動の、開口時についてのみ解析を行った。これは咀嚼の終期に相当する閉口運動時では、より狭い範囲をL1が高速で運動する¹⁷⁾ので、記録が困難なため測定誤差が大きくなる可能性がある。サンプリング周波数を上げることで誤差を小さくすることができるが、エラーも多くなる。しかし、図6に示すように閉口時においても十分な精度が実際には得られていた。

さらに日常での臨床応用を目的としているために、リズムによる規制や、定型的な動作ではなく、自由な動きを記録した。これにより被験者の自然な下顎運動の解析が可能である。

5) 解析方法について

今回は、重回帰分析の説明変数を絞り込むために、変数減少法を用いた。はじめに全ての説明変数を用いて重回帰式を算出し、そのなかで判別に有効でない説明変数を除去した。有効でない変数とは目的変数との単相関が低いものである。判別精度の低下が一定限度以内となるまで、この操作を繰り返した。また目的変数との単相関の値だけでなく、説明変数間でも運動量や方向が類似し、偏相関の強いものは除外した。左右対称である部位（L/RG, L/RM3, L/RM6）は、互いに偏相関が強いので、その値が0.9以上となるものは目的変数との単相関が低いほうを除外した。これは、多重共線性（Multicollinearity）¹⁸⁾の原因となるためである。したがって、説明変数間に強い相関があるものや、一次従属的な関係にあるものは、以後の解析が不可能であり、たとえ解析が可能であってもその信頼性は低い。

実際に選択された説明変数を比較すると、L1での開口量を目的変数とした重回帰式では、上下方向（Z成分）の説明変数が多数選択されている。これは、開口運動における移動量の三次元的成分ではZ成分の占める割合が大きいことに起因すると思われる。また開口量の15 mm式では、左右顎角部のZ成分

（LG:Z, RG:Z）と左右対称の部位が選択されている。本来、多重共線性の原因となる左右対称部位の同時選択は避けるべきだが、移動方向の違いから相殺される動きとなる場合は、例外的に対称である両者を選択しても差し支えないと考えられる。

2. 結果について

1) L1での開口量ごとの重回帰式について

5 mm式では0-5 mmと重回帰式の算出に用いた区間が狭い。そのために5 mm式では、0-5 mm区間までの誤差は小さいが、それ以上の開口量では誤差は大きくなる。相関係数の値は、10 mm式、15 mm式と比較して5 mm式が小さく、このことは開口量の増加とともに誤差が増大していく原因と思われる。

10 mm式でも、やはり重回帰式の算出に用いた開口量10 mmまでの誤差は少ないが、10 mm以上の区間では15 mm式と比較して誤差は大きい。これも10 mm式と15 mm式では、相関係数の値が15 mm式の値のほうがよいことが影響していると思われる。

15 mm式での0-5 mm区間では、5 mm式、10 mm式と比較して誤差が大きいものの、開口量の増加で誤差が増大することではなく、誤差は一定している。以上のことから下顎切歯点の15 mmまでの開口運動の推定には、15 mm式が最も適していると考えられる。

2) Y成分とZ成分の移動量について

L1での前後成分（Y成分）の移動距離について、開口量15 mmに対するL1のY成分の移動量は、5.1 mmと少ない。そのために開口量やZ成分の移動量に比較して、絶対的な誤差の量は少ない。しかし誤差の値が最も少ないY-15 mm式の0-15 mm区間でも、誤差は0.86 mm (16.9%)という値を示した。このことより前後成分（Y成分）の移動距離については、本システムでの精度は必ずしも十分でない可能性がある。

L1での上下成分（Z成分）の移動量について、開口量15 mmに対する移動量は14.1 mmであり、切歯点での上下方向の移動量は前後方向よりも大きい。Z-15 mm式では、0-5 mmの区間でZ-5 mm式と比較してその誤差は大きいものの、その後の開口量では誤差は小さく0-15 mmの区間では0.40 mmだった。開口量15 mmに対するZ成分の移動量14.1 mmに対する割合は2.8%と、開口量での15 mm式よりも

誤差が少なかった。これはL1での開口量（三次元的移動量）に比較してZ成分の移動量が少ないことが影響していると推定できる。

3. 今後の臨床応用について

本システムを用いることで、顔面皮膚上点から多変量解析を行い、下顎切歯点（L1）での15 mmまでの開口量および上下方向の運動を推定し、センサーをロッドで歯列に装着することが困難な無歯顎者の動態解析が可能になると思われる。しかし、歯列や下顎頭などの微細な運動の観察には、センサーやアンテナの装着で生理的運動が阻害されるものの、直接剛体の運動を表現できる従来法が適していると考えられる。したがって、目的に応じて使い分けることが必要であろう。

V. 結 論

モーションキャプチャー・システムを使用して、顔面皮膚上標点の運動観測から下顎運動を推定する方法の確立を目的として、L1（切歯点）の中心咬合位付近の開口運動について重回帰分析を用いた運動解析を行い、以下の結果が得られた。

L1での開口量15 mmまでの範囲では、顔面皮膚上標点から求めた重回帰式により、L1の運動を推定することが可能であった（ $p < 0.01$ ）。

その誤差（平均偏差）は、開口量については0.76 mm（3.7%）、上下方向では0.69 mm（4.9%）と小さかったが、前後方向で0.40 mm（9.7%）とやや大きかった。

以上のことから顔面皮膚上標点の観測から、下顎切歯点での開口量と上下方向の運動解析が可能であることが示唆された。

文 献

- 1) 大貫昌理, 細井紀雄. 下顎運動測定装置による高齢全部床義歯患者の顎機能診査. 老年歯学 9: 73-83, 1994.
- 2) 宮内修平, 丸山剛郎. シロナソグラフによる咀嚼運動の診査. 顎関節症の診断と治療/補綴臨床別冊 138-149, 東京: 医歯薬出版, 1985.
- 3) 山本智史, 山口泰彦, 小松孝雪ほか. 健常有歯顎者における下顎限界運動の再現性 限界運動範囲の前後幅と左右幅について. 顎機能誌 8: 31-40, 2001.

- 4) 飯島裕之, 山縣健佑, 北川 昇ほか. 無歯顎者の咀嚼時の口腔・顔面運動経路の三次元解析. 補綴誌 41: 61-70, 1997.
- 5) 岩崎裕一. X線映画法による顎関節症の機能的診断に関する研究. 歯放 22: 51-81, 1982.
- 6) Jemt T, Karlsson S, Hedegård B. The mandibular movement of young adults, recorded by intraorally placed light-emitting diodes. J Prosthet Dent 42: 669, 1979.
- 7) Jemt T, Hedegård B. The relative movements of the chin and the mandible during chewing. J Oral Rehabil 9: 253-258, 1982.
- 8) Jemt T, Karlsson S. Computer-analysed movements in three dimensions recorded by light-emitting diodes. J Oral Rehabil 9: 317-326, 1982.
- 9) Häggman B, Eriksson PO, Nordh E et al. Evaluation of skin versus teeth-attached markers in wireless optoelectronic recordings of chewing movements in man. J Oral Rehabil 25: 527-534, 1998.
- 10) 山縣徹哉, 山縣健佑, 河野勇治. モーション・キャプチャーによる調音運動の三次元解析: 健常有歯顎者について. 補綴誌 43: 54-66, 1999.
- 11) 鶴田 潤, 田中義浩, 吉田恵一ほか. モーションキャプチャーVICON 512による運動測定の検討. 顎機能誌 8: 45-48, 2001.
- 12) 澤田 久, 山縣健佑, 張 仁彦ほか. 無歯顎者の発音時の口腔運動経路の3次元解析. 昭歯誌 16: 125-151, 1996.
- 13) 河野勇治, 山縣健佑, 下平 修ほか. 顔面および下顎骨上仮想点の運動経路の解析—システムの精度と臨床応用例—. 補綴誌 43: 1056-1066, 1999.
- 14) 関谷俊治, 山縣健佑, 河野勇治ほか. 顔面皮膚上標点とそれに対応する下顎骨上仮想点の運動の比較—下顎安静位について—. 補綴誌 44: 786-795, 2000.
- 15) 能地康和, 山口武人, 菅居 香. 磁気を応用した上下顎6自由度測定装置の再現性の検討. 小児歯誌 34: 174-181, 1996.
- 16) 志賀 博, 浜中秀由喜, 小林義典. 咀嚼運動の機能的分析 正常者における咀嚼運動経路. 顎機能 7: 1-4, 1989.
- 17) 佐藤泰彦, 志賀 博, 小林義典. 咀嚼運動の機能的分析 下顎切歯点の運動速度の定量的評価. 補綴誌 44: 138-146, 2000.
- 18) 新村秀一, 三宅章彦. 重回帰分析と判別分析のモデル決定(1) 19変数をもつC.P.D.データの多重共線性の解消. 医療情報学 3: 107-123, 1983.

著者連絡先: 七田 俊晴

〒145-8515 東京都大田区北千束 2-1-1

TEL: 03-3787-1151 (内線 236)

FAX: 03-3787-3971

E-mail: shichita@senzoku.showa-u.ac.jp

Prediction of Mandibular Movement by Observation of Facial Skin Markers

Shichita Toshiharu, Shimodaira Osamu, Sato Yuuji and Kim SooTaek

Department of Geriatric Dentistry, Showa University School of Dentistry
(Chief : Prof. Sato Yuuji)

J Jpn Prosthodont Soc 48 : 741-750, 2004

ABSTRACT

Purpose : Various methods have been used for observation of mandibular movement. However, many methods disturb physiological movement as the subject must wear a sensor. Therefore, to predict mandibular movement from the motion of facial skin, the correlation between the movements of mandibular incisor-tooth point and facial skin markers was evaluated by multiple regression analysis.

Methods : Nine retro-reflective markers were placed on the lower facial skin of 8 dentulous subjects and three markers on the wire frame attached to the mandibular tooth, respectively. Movement of markers was repeatedly recorded by 6 video cameras from centric occlusion to maximal opening position. Data was analyzed and the movements were constructed in 3 D. In order to predict movement (opening, vertical, anterior-posterior) at an incisor-tooth point, multiple regression analysis was performed by making the 27 amounts of 3 D movements (X, Y, Z components) of nine facial skin markers as explanatory variables. The difference between the actual value and the predicted value by multiple regressions was calculated, and compared in the 5 ranges of analysis (0-5 mm, 0-10 mm, 0-15 mm, 5-10 mm, 10-15 mm).

Results : The movements of mouth opening and vertical direction could be predicted with the accuracy of 0.76 mm (3.7%) and 0.69 mm (4.9%) in the range of 0-15 mm with nine variables, respectively. However, the accuracy of movements in the anterior-posterior direction was 0.40 mm (9.7%) with ten variables. The ratio was larger than these in the movements of mouth opening and vertical direction.

Conclusions : It was suggested that movement of mandibular incisor-tooth point in mouth opening and vertical direction to 15 mm could be predicted from the facial skin markers.

Key words

three dimensions, multi-variable analysis, mandibular movement, centric occlusion, facial skin marker