下顎限界運動の運動学的並びに実験的解析

Kinematical and experimental analyses of the mandibular border movement

高山 寿夫

Hisao Takayama

神奈川工科大学機械工学科

Department of Mechanical Engineering, Kanagawa Institute of Technology

ヒトの下顎は人体の中でふたつの関節が関与してひとつの運動を行う唯一の骨体であるとされている。草食動物は臼磨運動様の咀嚼運動を行うのに対し、肉食動物は蝶番運動様の咀嚼運動を行い、ヒトの場合は両者の中間又は両相の咀嚼運動を行う。咀嚼運動経路が咬み合わせの様態を反映して変化する事実は種々報告されている¹⁻⁵⁾が、これらはいずれも上下顎歯牙接触時の咬合異常に、顎口腔神経筋機構のフィードバック機能が反応した結果と考えられる。

本研究は臨床応用を最終目的として、咬み合わせ特に上下顎歯牙の咬頭形状と下顎運動との関連の解明を目的とした。このような目的設定を行った場合には、上述に従って前方及び左右側方の下顎限界運動と咬頭形状との間に生物学的合目的性にもとづく合理的メカニズムが存在するという行動仮説の設定が可能であり、多くの先人達の業績もその妥当性を裏付けているように思われる。

下顎運動の実験的研究にコンピュータを用いた例は多い⁶⁻¹¹⁾が、如何にコンピュータを使って精密なデータが得られても、それを解析する手法を持たなければ複雑な下顎運動の本質を

把握することはできない。その手法として物理学(力学)の分野で運動学とよばれる数学的手法を本格的に導入して下顎運動を理論的に解析し、さらに実測データによる検証と応用解析を行った。結果は次の通りである。

1. 理論的解析^{12), 13), 14)}

運動学における「Euler の定理」にもとずき、下顎の前方及び左右側方限界運動における下記の実用1次近似式を導出した。上顎固定の基準座標系と各下顎限界運動ごとに下顎上に設定した運動座標系の原点を Fig.1に、実用式導出の際に用いた記号の名称と定義を Table 1に、これらの記号の図上定義を Fig.2に示す。

1. 1 下顎上の任意の1点における3次元変位を算出する式を Table 2 に示す。

1. 2 切歯点の経路が各投影面上で各基準面となす角を算出する式を Table 3 に示す。

上記実用式の演算精度を理論的に解析した結果、切歯点の3次元変位の演算誤差は最大0.033 mm、切歯点経路の角度の演算誤差は最大0.8 deg と算出された¹³⁾。

Fig.1 The reference coordinate system and the mandible

- O₀ : Origin of the reference coordinate system
- X : Antero-posterior axis (anterior is positive)
- Y : Right and left axis (right is positive)
- Z : Supero-inferior axis (inferior is positive)
- C : Center of the right condyle (origin of the motion coordinate system for right lateral movement)
- C' : Center of the left condyle (origin of the motion coordinate system for left lateral movement)
- M : Center of the intercondylar axis (origin of the motion coordinate system for protrusive movement)
- I : Incisal point
- α : Angle formed by the y-axis of the motion coordinate system with the Y-axis in the plane X-Y
- γ : Angle formed by the y-axis of the motion coordinate system with the Y-axis in the plane Y-Z
- θ : Angle by which the plane z-x of the motion coordinate system rotates around the y-axis

Table 1 Each component of three-dimensional displacement for the centers of the right and left condyles and the incisal point, each component of three-dimensional rotation of the mandible, facial dimensions, and also directional angles and lengths in the condylar paths and the incisal path

Nomenclatures	Notations
(Protrusive movement)	
Average antero-posterior displacement of the centers of the right and left condyles :	ΔX_{op}
Average supero-inferior displacement of the centers of the right and left condyles :	ΔZ_{op}
Antero-posterior displacement of the incisal point :	ΔX_{ip}
Supero-inferior displacement of the incisal point :	ΔZ_{ip}
(Lateral movement)	
Antero-posterior displacement of the center of the non-working condyle :	ΔX_{o1}
Lateral displacement of the center of the non-working condyle :	ΔY_{o1}
Supero-inferior displacement of the center of the non-working condyle :	ΔZ_{o1}
Antero-posterior displacement of the center of the working condyle :	ΔX_{w1}
Lateral displacement of the center of the working condyle :	ΔY_{w1}
Supero-inferior displacement of the center of the working condyle :	ΔZ_{w1}
Antero-posterior displacement of the incisal point :	ΔX_{i1}
Lateral displacement of the incisal point :	ΔY_{i1}
Supero-inferior displacement of the incisal point :	ΔZ_{i1}
(Rotation of the mandible)	
Horizontal component of lateral rotation around the center of the working condyle :	δ_1
Frontal component of lateral rotation around the center of the working condyle :	γ_1
Angle of hinge rotation around the intercondylar axis during protrusive movement :	Θ_{hp}
Angle of hinge rotation around the intercondylar axis during lateral movement :	Θ_{h1}
(Facial dimension)	
Antero-posterior distance from the intercondylar axis to the incisal point :	A_1
Lateral distance from the origin of the motion coordinate system to the incisal point :	B_1
Supero-inferior distance from the intercondylar axis to the incisal point :	C_1
Intercondylar distance :	L_0
Note) $B_1 = 0$ during protrusive movement, and $B_1 = L_0 / 2$ during lateral movement	

Nomenclatures	Notations	Definitions
(Protrusive movement)		
Sagittal inclination of the protrusive condylar path :	$\Omega_{op} = \tan^{-1} (\Delta Z_{op} / \Delta X_{op})$	
Sagittal inclination of the protrusive incisal path :	$\Omega_{ip} = \tan^{-1} (\Delta Z_{ip} / \Delta X_{ip})$	
Length of the condylar path during protrusive movement :	$\Lambda_{op} = \sqrt{(\Delta X_{op})^2 + (\Delta Z_{op})^2}$	
Sagittal inclination of the lateral condylar path :	$\Omega_{o1} = \tan^{-1} (\Delta Z_{o1} / \Delta X_{o1})$	
Bennett angle of the lateral condylar path :	$B_0 = \tan^{-1} (\Delta Y_{o1} / \Delta X_{o1})$	
Sagittal inclination of the lateral incisal path :	$\Omega_{i1} = \tan^{-1} (\Delta Z_{i1} / \Delta X_{i1})$	
Frontal inclination of the lateral incisal path :	$\Phi_{i1} = \tan^{-1} (\Delta Y_{i1} / \Delta X_{i1})$	
Horizontal inclination of the lateral incisal path :	$\Psi_{i1} = \tan^{-1} (\Delta Y_{i1} / \Delta X_{i1})$	
Length of the non-working condylar path :	$\Lambda_{o1} = \sqrt{(\Delta X_{o1})^2 + (\Delta Y_{o1})^2 + (\Delta Z_{o1})^2}$	

Fig.2 A schematic diagram illustrating each component of three-dimensional displacement for the centers of the right and left condyles and the incisal point, and also directional angles in the condylar paths and the incisal path

a. Condylar paths

C : Center of the working condyle
C' : Center of the non-working condyle

Note) The nomenclatures of notations in the figure are shown in Table 1

b. Incisal path

I : Incisal point

Note) The nomenclatures of notations in the figure are shown in Table 1

Table 2 Kinematic formulae for mandibular movement, derived from Euler's theorem in classical mechanics, to calculate the three-dimensional displacement of a target point on the mandible during protrusive and lateral movements

for protrusive movement :

$$\Delta X = \cos \Omega_{op} \times \Delta_{op} - C \times \Theta_{hp}$$

$$\Delta Z = \sin \Omega_{op} \times \Delta_{op} + A \times \Theta_{hp}$$

for lateral movement :

$$\begin{aligned} \Delta X &= B \times \delta_1 - C \times \Theta_{h1} + \Delta X_{w1} \\ \Delta Y &= (C \times \tan \Omega_{o1} + A + L_o \times \tan B_o) \times \delta_1 \\ &\quad + C \times (\tan \Omega_{o1} \times \Delta X_{w1} - \Delta Z_{w1}) / L_o + \tan B_o \times \Delta X_{w1} \\ \Delta Z &= B \times \tan \Omega_{o1} \times \delta_1 + A \times \Theta_{h1} \\ &\quad + B \times (\tan \Omega_{o1} \times \Delta X_{w1} - \Delta Z_{w1}) / L_o + \Delta Z_{w1} \end{aligned}$$

Note) Notations in the above formulae are defined in Table 1

Table 3 Kinematic formulae relating the condylar path and the incisal path during protrusive and lateral movements

for protrusive movement :

$$\Omega_{1p} = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \Omega_{op} \times \Delta_{op} + A_1 \times \Theta_{hp}}{\cos \Omega_{op} \times \Delta_{op} - C_1 \times \Theta_{hp}} \right)$$

for lateral movement :

$$\begin{aligned} \Omega_{11} &= \tan^{-1} \left(\frac{\frac{1}{2} L_o \times \tan \Omega_{o1} \times \delta_1 + A_1 \times \Theta_{h1} + \frac{1}{2} \tan \Omega_{o1} \times \Delta X_{w1} + \frac{1}{2} \Delta Z_{w1}}{\frac{1}{2} L_o \times \delta_1 - C_1 \times \Theta_{h1} + \Delta X_{w1}} \right) \\ \Phi_{11} &= \tan^{-1} \left(\frac{\frac{1}{2} L_o \times \tan \Omega_{o1} \times \delta_1 + A_1 \times \Theta_{h1} + \frac{1}{2} \tan \Omega_{o1} \times \Delta X_{w1} + \frac{1}{2} \Delta Z_{w1}}{(C_1 \times \tan \Omega_{o1} + A_1 + L_o \times \tan B_o) \times \delta_1 + C_1 \times (\tan \Omega_{o1} \times \Delta X_{w1} - \Delta Z_{w1}) / L_o + \tan B_o \times \Delta X_{w1}} \right) \\ \Psi_{11} &= \tan^{-1} \left(\frac{(C_1 \times \tan \Omega_{op} + A_1 + L_o \times \tan B_o) \times \delta_1 + C_1 \times (\tan \Omega_{o1} \times \Delta X_{w1} - \Delta Z_{w1}) / L_o + \tan B_o \times \Delta X_{w1}}{\frac{1}{2} L_o \times \delta_1 - C_1 \times \Theta_{h1} + \Delta X_{w1}} \right) \end{aligned}$$

Note) Notations in the above formulae are defined in Table 1

2. 実験的解析

上記実用式の演算精度を実験的に解析するため、保母と望月が開発した6自由度計測可能な下顎運動自動電子計測システム¹⁵⁾を用いて被験者10名につき保母が計測したデータ¹³⁾、及び中野が3個のストロボ点光源と3台の特殊カメラを用いて被験者31名につき計測したデータ⁹⁾の2群の実測データをそれぞれ上記実用式に代入し切歯点経路の角度を算出した「理論値」

と、それらの「実測値」の間で相関検定を行い、以下の結果を得た。

2. 1 保母の計測データを用いた場合の相関係数は、顎路長2 mmにおいて 0.995~0.997、残差の不偏分散の平方根(標準誤差に相当)は 1.6~2.3 deg であった¹³⁾。
2. 2 中野の計測データを用いた場合の相関係数は、切歯咬合位において 0.961~0.994、残差の不偏分散の平方根は 1.7~2.4 deg であった¹³⁾。

以上の理論的並びに実験的解析結果を総括して、「運動学に基づきヒトの下顎限界運動の実用1次近似式を導出すると共に、その近似演算精度を理論と実験の両面から解析した結果、導出した実用式の簡潔さと演算精度が臨床応用の目的に合致している」と結論した¹³⁾。

3. 応用解析例

上記実用式並びに実測データを用いて応用解析を行い、下記の結果を得た。

3. 1 作業側顎頭の外側方変位(Bennett運動)と非作業側顎頭の内側方変位(sideshift)は(1次近似の範囲内で)理論的に等しい¹³⁾。実験的に両者の相関検定を行った結果、保母の計測データ¹³⁾及び中野の計測データ⁹⁾においてそれぞれ相関係数は0.97及び0.95、残差の不偏分散の平方根は0.07 mm及び0.11 mmであった¹³⁾。

3. 2 切歯路傾斜角が顎路傾斜角より大なとき、下顎は顎頭間軸の回りに蝶番運動様の回転を行って両者間の角度差を調節する¹⁶⁾が、この回転により臼歯離開を生じ、3者の間に「切歯路傾斜角=顎路傾斜角+臼歯離開に必要な傾斜角増分」という関係がある。この意味で下顎の蝶番回転角をパラメータとして両傾斜角の間に相関があるという考え¹⁷⁾は正しい。蝶番回転角の平均は、保母と高山の計測データ¹³⁾及び中野の計測データ⁹⁾においてそれぞれ前方運動時0.12 deg及び0.25 deg、側方運動時0.41 deg及び0.72 degであった。上記に相当する矢状前方切歯路傾斜角の増分は5 deg前後である。

3. 3 下顎の蝶番回転により生ずる臼歯離開量は、理論的には「(顎頭間軸と臼歯間の前後距離)×(ラジアン表示の蝶番回転角)」で与えられる¹³⁾。しかし第1大臼歯付近の臼歯離開量の平均は、臼歯咬頭が咬頭嵌合位から約2 mm移動したとき、保母と高山のデータ¹³⁾及び西尾のデータ⁹⁾によるとそれぞれ側方運動時の作業側で0.47 mm及び0.47 mm、非作業側で1.00 mm及び0.87 mmであり、作業側は蝶番回転角だけで説明できるが、非作業側では蝶番回転角から算出した推定値より大きい値をとる。この相違は臼歯機能咬

頭頂の彎曲形状に起因すると考えられる¹⁸⁾、¹³⁾。

3. 4 側方切歯路においては理論上、作業側顎頭が矢状面内偏位を行わないとして算出した仮想切歯路(以下「ニュートラルライン」とよぶ)に対する実測切歯路の上下方向及び前後方向への偏位(以下「側方切歯路の不調和量」とよぶ)と、作業側顎路の矢状面内における両方向への偏位がそれぞれ相関することが推定された¹³⁾。Fig.3aはニュートラルライン(破線)及び実測切歯路(実線)のグラフの一例を示す¹³⁾、²⁰⁾。Fig.3bはFig.3aに対応する顎路のグラフを示す。双方のグラフを比較すると両者間に相関が存在していることが観察できる。

以上を確認するため、保母による実測データを用いて側方切歯路の不調和量と作業側顎路の矢状面内偏位との間の相関検定を行った。Table 4にその結果を示す¹³⁾、²⁰⁾。Table 4に示す通り、非作業側顎路長2 mmにおける両者間の相関係数は、上下方向で0.99、前後方向で0.97と算出され、両者間に $p=0.001$ の水準で有意の相関が存在することが確認された。

さらに歯牙接触条件下と非接触条件下における作業側顎路の矢状面内偏位を実験データにより比較検討した。Table 5に非作業側顎路長3 mmにおける両条件下の実測値の平均の比較を示す¹³⁾。Table 5に示されているように平均値で比べると、作業側顎路の矢状面内偏位は歯牙非接触条件下では歯牙接触条件下におけるその2分の1以下に減少することがわかった。

以上により「作業側顎路の矢状面内偏位は側方切歯路の不調和量に起因する」と結論した¹³⁾、²⁰⁾。これは、顎頭が軟組織に支持されているのに対し、前歯は上下顎骨と歯根膜を介し強く連結していることから自然な帰結と云える。

a. Lateral incisal path

b. Working condylar path

Fig.3 Graphs of (1) the values calculated for the lateral incisal path obtained using the analytical equations in Table 2, with the assumption that the sagittal components of the path of the working condyle (ΔX_w , and ΔZ_w) are zero (broken line), and (2) the measured values for the lateral incisal path (solid line), also showing the corresponding values on the path of the working condyle — the measured values are those of Hobo

Table 4 Correlation between the amount of disharmony in lateral incisal path and the sagittal deviation of the path of the working condyle — the measured data are those of Hobo

(Number of subjects : ten)

Direction of Sagittal deviation of the working condylar path	Sampled position along the non-working condylar path	Correlation coefficient		
		Lower limit at $p = 0.001$	Estimate	Upper limit at $p = 0.001$
Supero-inferior	2.0 mm	0.968	0.993	0.999
	3.0 mm	0.963	0.992	0.999
Antero-posterior	2.0 mm	0.866	0.970	0.994
	3.0 mm	0.916	0.982	0.996

Table 5 Sagittal deviation of the working condyle under both conditions with teeth in contact and with teeth not in contact when the non-working condyle has travelled 3mm along the lateral condylar path — the measured data are those of Hobo

(Number of subjects : ten)

Direction of sagittal deviation of the working condylar path	Mean absolute values of sagittal deviations of the working condylar path with teeth in contact (A)	Mean absolute values of sagittal deviations of the working condylar path with teeth not in contact (B)	Ratio (A) / (B)
Supero-inferior	0.86 mm	0.30 mm	2.9
Antero-posterior	0.59 mm	0.27 mm	2.2

以上の基礎研究結果を踏まえ、臨床への応用研究を進めているが、第1段階として小型・軽量のメカニカル・センサとポケット・コンピュータを用い、患者の顎路を測定すると共に咬合器のインサイザル・テーブル調節用データを算出する新システム²¹⁾を開発した。Fig.4 及び5 はそれぞれ新システムのメカニカル・センサ及びポケット・コンピュータを示す。

Fig.4 A plastic mechanical sensor attached in front of the anterior teeth for measuring condylar path and computing anterior guidance

Fig.5 A compact battery-operated computer with microprinter in which a calculation program is stored, which outputs values for adjusting the incisal table calculated from records measured by the mechanical sensor which are input using the keyboard

参 考 文 献

1. 藍 稔：切歯点部における咀嚼運動の解析，補綴誌，6，184~200 (1982)
2. 田中良種：パントグラフサーベイの臨床的応用の一考察，顎咬合誌，1，19~30 (1979)
3. 西尾公一，宮内修平，丸山剛郎：咀嚼運動に関する臨床的研究 —— 咬合様式との関連について ——，補綴誌，30，806~816 (1986)
4. 志賀 博，浜中秀由喜，秋山仁志，小林義典：咀嚼運動の機能的分析 第10報 実験的咬合干渉付与前後における咀嚼運動経路，第26回顎口腔機能研究会一般講演 (1988年 2月)
5. 瑞森崇弘，居相信之，吉田真理，小河弘枝，奥田真夫，宮内修平，丸山剛郎：咀嚼運動の分析に現れる咬合の異常 第2報 咀嚼運動分析項目と咬合の異常との関連，第28回顎口腔機能研究会一般講演 (1988年 9月)
6. Messerman, T. : A means for studying mandibular movements, J Prosthet Dent, 17, 36~43 (1967)
7. 河野正司：下顎の矢状面内運動に対応する顎頭運動の研究 第2報 マルチフラッシュ装置による矢状面運動軸の解析，補綴誌，12，350~380 (1968)
8. Knap, F. J., Richardson, B. L. and Bogstad, J. : Study of mandibular motion in six degrees of freedom, J Dent Res, 49, 289~292 (1970)
9. 中野雅徳：側方滑走運動における顎路と歯牙路に関する研究，補綴誌，19，647~665 (1975)
10. 林 豊彦，多和田孝雄，山崎石治，石岡靖：歯牙接触滑走運動の3次元測定システム，補綴誌，25，641~648 (1981)
11. 坂東永一（研究代表者）：情報量が多く操作の容易な下顎運動測定器の開発(58480383)，昭和80年度科学研究費補助金（一般B）研究成果報告書 (1986)
12. 保母須弥也，高山寿夫：顎路と切歯路の相関性に関する3次元的研究 第1報 運動学的解析，補綴誌，29，204~221 (1985)
13. 高山寿夫：臨床応用を目的としたヒトの下顎運動の運動学的並びに実験的解析に関する研究，東京大学学位審査論文第8203号 (1987年 2月)
14. Takayama, H. and Hobo, S. : The derivation of kinematic formulae for the mandibular movement in man, I J Prosthodont, accepted for publication
15. 保母須弥也，望月貞成：自動電子計測システムによるヒトの下顎運動の研究 第1報 計測システムの開発，補綴誌，26，619~634 (1982)
16. Dawson, P. E. : Evaluation, diagnosis, and treatment of occlusal problems, The C. V. Mosby Co., Saint Luis, 48~79 (1974)
17. 河野正司，塩沢育己，中野雅徳：前方滑走運動の歯牙指導要素としての切歯路の研究，補綴誌，19，426~433 (1975)
18. 保母須弥也，高山寿夫：ディスクレージョン量の予備的計測結果とその解析，第72回日本補綴歯科学会学術大会 (59年10月)，補綴誌，29，238~239 (1985)
19. 高山寿夫，保母須弥也：臼歯離開量と下顎蝶番運動回転角との相関性に関する3次元解析，第23回東北歯科大学学会 (60年 6月)，東北歯科大学学会誌，12，233 (1985)
20. Hobo, S. and Takayama, H. : Effect of canine guidance on working condylar path, I J Prosthodont, 2, 73~79 (1989)
21. Hobo, S. and Takayama, H. : A new system for measuring condylar path and computing anterior guidance, I J Prosthodont, 1, 99~106 (1988)