

# 计算机辅助口腔下颌运动的显示与处理系统

武仲科<sup>1</sup> 冯海兰<sup>2</sup> 戴国忠<sup>1</sup> 侯振刚<sup>2</sup> 李平<sup>2</sup>

(1. 中国科学院软件研究所, 北京 100080; 2. 北京医科大学口腔医学院修复科, 北京 100081)

**摘要** 叙述了一个计算机辅助口腔下颌运动的显示与处理系统。此系统包括用下颌运动轨迹描记仪获取口腔下颌运动轨迹的数据及对其进行校正、分离等处理和通过轨迹放大、移动、测量等显示手段辅助医生诊断和研究。并且在此系统中建立了口腔下颌骨的三维模型, 可以形象再现口腔下颌运动过程。此系统既辅助医生的临床诊断, 又可以用于口腔下颌运动的教学和科研工作。

**关键词** 下颌运动, 几何变换, 计算机图形学

## 1 引言

随着计算机和图形学技术的发展, 将计算机技术应用到医学领域已经成为一个具有巨大应用前景的发展方向。近年在口腔医学领域出现的各种计算机辅助三维六自由度下颌运动轨迹描记仪<sup>[1-4]</sup>, 使人们对下颌运动的研究向纵深发展。然而, 这些仪器共同的问题是: 由于它们已经商品化, 所以最初设计的显示分析功能并不能完全满足使用者对某项具体研究的需要; 同时, 这类仪器均以三个坐标平面显示下颌运动轨迹, 而不能进行三维空间运动显示。本文介绍了自行设计的下颌运动轨迹分析处理系统。用计算机图形学技术将从 MT-1602 下颌运动轨迹描记仪(德国 Hansen 公司)获得的下颌运动轨迹的数据进行加工处理, 从而方便医师使用, 能够更加详细、准确地诊断疾病对下颌运动的影响。此系统分为数据的测量, 数据的校正, 分离, 数据的显示以及下颌骨的造型和下颌骨的刚体运动的计算等。本文将叙述这一系统的模型、各种算法及其应用情况。

## 2 数据的获取过程

应用 MT-1602 下颌运动轨迹描记仪记录受试

者的下颌运动情况。该仪器由超声波电转换器、超声波发射器、超声波接收器和计算机组成。用超声波发射器作为信号源, 通过夹板固定于下颌牙列, 与固定于颅面部的超声波接收器布置成阵, 接收超声波信号。并通过多普勒效应原理计算出信号源的空间位移和移动速度。由于信号源和传感器重量轻(21克), 且不影响受试者的咬合接触关系, 因此可在接近生理状态下测试下颌运动数据。通过计算机运算, 可从信号源与下颌任何一点的空间位置关系的变化得出该点的运动轨迹。这使得无接触地测量髁状突运动轨迹成为可能。该仪器通常显示下颌切点和左、右侧髁突点在额状面、矢状面和水平面上的运动轨迹。仪器在相当于颞下颌关节区域的记录精度<sup>[3]</sup>达 0.1mm 噪声水平, 直线重复精度在 0.3mm 以内。

## 3 数据处理

### 3.1 初始校正

根据实验要求, 初始的 2 个髁突点应处于 YZ 平面上的平行于 Y 轴的一条水平线直线上。但是, 由于测量时测量仪器的安放及受试者面部的对称性等诸因素的影响, 往往导致所测量的 2 个髁突点不在水平线上, 所以, 需要校正。下面给出校正方法(见图 1)。

• 本文得到国家自然科学基金重点项目支持(No. 69433020)

收稿日期: 1998-01-23; 收到修改稿日期: 1998-04-21

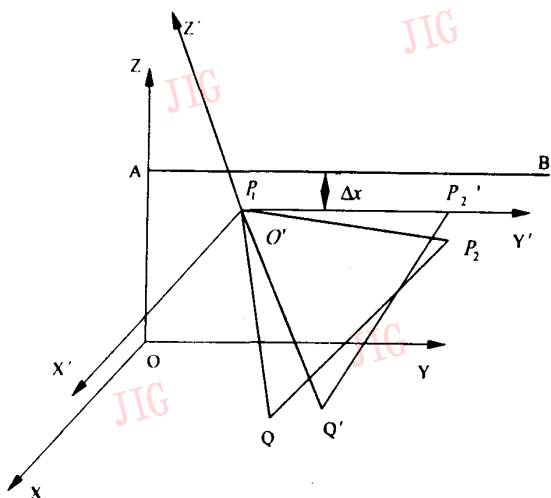


图1 刚体变换转换成2个直角右手坐标系间的变换

这里,我们用  $4 \times 4$  矩阵表示三维刚体运动,即当新、旧坐标分别为  $P' = (x', y', z', 1)^T$  和  $P = (x, y, z, 1)^T$  时,  $M$  为  $4 \times 4$  矩阵,是其变换矩阵,则  $P' = MP$ 。

校正分成2个步骤:

(1)利用旋转变换将2个髁突点校正到水平线上。

见图1,  $P_1, P_2$  为2个髁突点,不在水平线上。  $Q$  为切点。首先,过  $P_1$  做一条水平线  $P_1Y'$ , 做  $\overrightarrow{P_1P_2}$  方向矢量和  $\overrightarrow{P_1Y'}$  的方向矢量的叉积得到方向矢量  $\overrightarrow{P_1Z'}$ , 做  $\overrightarrow{P_1Y'}$  与  $\overrightarrow{P_1Z'}$  的叉积得到  $\overrightarrow{P_1X'}$ 。以  $P_1$  为原点,以  $\overrightarrow{P_1X'}, \overrightarrow{P_1Y'}$  和  $\overrightarrow{P_1Z'}$  为  $X$  轴,  $Y$  轴和  $Z$  轴建立坐标系  $O'X'Y'Z'$ 。在此坐标系内,求出  $\overrightarrow{P_1P_2}$  与  $\overrightarrow{O'Y'}$  的夹角  $\alpha$ , 则,在此坐标系内,将数据点绕  $Z$  轴旋转  $\alpha$  角。此时,  $P_2$  变成  $P_2', Q$  变成  $Q'$ 。此旋转矩阵为  $M$ 。

$$M = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & 0 & 0 \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

设  $\overrightarrow{OO'} = [dx, dy, dz]$ ,  $\overrightarrow{OX'}$  的单位方向矢量  $\omega_1 = [a_1, a_2, a_3]$ ,  $\overrightarrow{OY'}$  的单位方向矢量  $\omega_2 = [b_1, b_2, b_3]$ ,  $\overrightarrow{OZ'}$  的单位方向矢量  $\omega_3 = [c_1, c_2, c_3]$ , 则2个坐标系之间的变换矩阵为  $T \times N$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ dx & dy & dz & 1 \end{bmatrix}, N = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & 0 \\ a_2 & b_2 & c_2 & 0 \\ a_3 & b_3 & c_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -dx & -dy & -dz & 1 \end{bmatrix}, N^T \text{ 为 } T \text{ 的转置}$$

则此变换在  $OXYZ$  坐标系下的变换矩阵为  $T^{-1} \times N^T \times M \times N \times T$ 。实际上这是在  $OXYZ$  坐标系下,绕以直线  $O'Z'$  为轴的一个旋转变换。

(2)利用平移变换将2个髁突点校正到  $YZ$  平面上。

计算  $P_1$  到  $YZ$  平面的偏移  $\Delta x$ ,对数据点做平移  $[\Delta x, 0, 0]$ 。

经过(1),(2)两步的校正,得到的数据点保证2个髁突点的初始位置处于水平,且在  $YZ$  平面上。

### 3.2 分离

由于仪器给出的数据是下颌运动的一组数据,一般包括多个运动周期。为了方便医生观察和诊断,需要将其分解为单个运动周期。但由于所测量的点是一组散乱点,很难找出其精确的运动周期。本系统采用了一种模糊方法,解决这一问题。具体方法如下:

(1)找极大点和极小点,从而决定各个运动周期。

**定义1** 分离方向:运动轨迹中,通常在某一方向上变化比较大,一般我们沿此方向对轨迹进行周期分离效果比较好。此方向称分离方向。为了计算方便,通常取某一坐标轴方向为分离方向。

**定义2** 上升点:运动轨迹中的一个数据点  $P_i$ , 如果其前面的5个点  $\{P_{i-5}, P_{i-4}, P_{i-3}, P_{i-2}, P_{i-1}\}$  中有3个以上的点在分离方向上大于前一个点,即不等式  $P_{i-5} < P_{i-4}, P_{i-4} < P_{i-3}, P_{i-3} < P_{i-2}, P_{i-2} < P_{i-1}, P_{i-1} < P_i$  有3个以上成立。其后面的5个点中有3个以上的点在分离方向上大于前一个点,则称数据点  $P_i$  为上升点。

**定义3** 下降点:运动轨迹中的一个数据点  $P_i$ , 如果其前面的5个点  $\{P_{i-5}, P_{i-4}, P_{i-3}, P_{i-2}, P_{i-1}\}$  中有3个以上的点在分离方向上小于前一个点,即不等式  $P_{i-4} < P_{i-5}, P_{i-3} < P_{i-4}, P_{i-2} < P_{i-3}, P_{i-1} < P_{i-2}, P_i < P_{i-1}$  有3个以上成立。其后面的5个点中有3个以上的点在分离方向上小于前一个点,则称数据点  $P_i$  为下降点。

**定义4** 极大点:运动轨迹中的一个数据点  $P_i$ , 如果其前面的5个点中有3个以上的点在分离方向上大于前一个点,即不等式,  $P_{i-5} < P_{i-4}, P_{i-4} < P_{i-3}$ ,

$P_{i-3} < P_{i-2}, P_{i-2} < P_{i-1}, P_{i-1} < P_i$  有 3 个以上成立。其后面的 5 个点中有 3 个以上的点在分离方向上小于前一个点,则称  $P_i$  为极大点。

**定义 5** 极小点:运动轨迹中的一个数据点  $P_i$ , 如果其前面的 5 个点中有 3 个以上的点在分离方向上小于前一个点,即不等式  $P_{i-4} < P_{i-5}, P_{i-3} < P_{i-4}, P_{i-2} < P_{i-3}, P_{i-1} < P_{i-2}, P_i < P_{i-1}$  有 3 个以上成立。其后面的 5 个点中有 3 个以上的点在分离方向上大于前一个点,则称  $P_i$  为极小点。



(a)分离前的轨迹



(b)分离后的轨迹

图 2 下颌运动轨迹分离

### 3.3 测量

这是辅助医生详细分析运动轨迹从而进行诊断和研究的功能。给出一种方便的手段,使医生随时测量运动轨迹上的一些度量关系,如距离,角度等。

### 3.4 显示

这是辅助医生详细观察运动轨迹从而进行诊断和研究的功能。包括放大,缩小,移动等。这样,医生可以方便地观察运动轨迹的细节。

## 4 口腔下颌运动的三维真实感显示

为了使该系统能同时应用于教学,使学生不仅抽象地看到下颌运动轨迹,还能形象地观察到下颌真实的运动情况,我们建立了下颌骨的三维模型,并与运动轨迹结合,真实显示下颌根据实测运动轨迹进行运动的情况。

### 4.1 口腔下颌骨三维造型

针对一个标准模型,采用传统的 CAD 曲面造型的方法,通过测量模型的多个截面的数据,生成截面曲线,由这些截面曲线生成曲面。最后将曲面离散成小平面对,以加快显示速度。

在造型过程中,我们采用了传统的曲面模型。但为了实时显示下颌骨的真实感运动,最后的表示采用了平面模型。

通过检查轨迹中的数据点的属性,得到一组极大点和极小点。由极大点和极小点之间的数据点确定一个周期。

(2)合并,根据经验,给出分离方向的一个阈值,对分离后在分离方向上小于阈值的运动周期进行合并。通常这些较小的分离段是由于此段的局部数据变化过于复杂而被当成一个运动周期分离。这一不合理分离通过合并通常可以解决得很好(见图 2)。

### 4.2 三维鼠标的应用

三维鼠标的优点在于其可以同时控制三个平移,三个旋转六个自由度,使用户方便地从各个位置和各个角度观察物体。本系统使用了三维鼠标控制物体的三维显示。

### 4.3 空间运动求解

下颌运动可以近似地看成是一个三维刚体运动(下颌骨在运动时的变形很小可以忽略)。仪器可以测量包括两个髁突点和切点的下颌骨上的多达 61 个位置点的运动轨迹。但两个髁突点和切点是最重要的。将这些运动轨迹看成是这些点在 1 个三维刚体运动下的结果。但是,由于测量时测量仪器及受试者面部的对称性等因素,以及测量误差和下颌骨在运动时的微小的变形,直接从这些运动轨迹决定的变换不是刚体运动,包括一些非刚体运动,如缩小放大等。所以,我们采用最小二乘法,求出一个最佳的刚体运动。

这里我们可以将一个三维刚体分解成一个空间的旋转和平移。设空间一点  $P$  的坐标为  $P = (x, y, z)^T$ , 变换后的坐标为  $P' = (x', y', z')^T$ , 则用矩阵形式表示为

$$P' = MP + D \quad (1)$$

这里  $M$  为一个正交矩阵,  $D$  为一个三维平移向量。

从理论上,口腔下颌骨运动轨迹的每一步运动都应当存在一个正交矩阵  $M$  和三维平移向量  $D$  满足公式(1)。即下颌骨上的每一个点满足公式(1)。所以所测量的包括两个髁突点和一个切点的多个位置

点  $P_i = (x, y, z)^T$  和运动后的点的坐标  $P'_i = (x'_i, y'_i, z'_i)^T (i=1, 2, \dots, n)$ 。实际测量时可以测量多达 61 个点)满足公式(1)。但是由于测量误差往往不能满足公式(1)。这里我们所要解决的问题是如何找到一个刚体变换,即如何决定一个正交矩阵  $M$  和三维平移向量  $D$ ,使其变换后的点与测量点的误差最小。这里我们采用最小平方和作为标准。即使  $f = \sum \|P'_i - P_i\|^2 = \sum [(x'_i - x_i)^2 + (y'_i - y_i)^2 + (z'_i - z_i)^2]$  达到最小时得到正交矩阵  $T$  和三维平移向量  $D$ 。这里  $P'_i = TP_i + D$ ,  $\sum$  表示  $i$  从 1 到  $n$  求和。

**命题 1** 上述极小值问题,等价于如下问题:  
 $f = \sum \|Tu_i - v_i\|^2$ , 找到一个正交矩阵  $T$  使得  $f$  达到极小值。这里  $u_i = P_i - \bar{P}$ ,  $v_i = P'_i - \bar{P}'$ ,  $\bar{P} = (\sum P_i)/n$ ,  $\bar{P}' = (\sum P'_i)/n$ ,  $\sum$  表示  $i$  从 1 到  $n$  求和。

**证明:**

$$f = \sum \|P'_i - P_i\|^2 = \sum (P'_i - P_i)^T (P'_i - P_i) = \sum (TP_i + D - P_i)^T + (TP_i + D - P_i) \quad (2)$$

令  $D = [d_1, d_2, d_3]^T$ , 由  $\frac{\partial f}{\partial d_1} = 0, \frac{\partial f}{\partial d_2} = 0, \frac{\partial f}{\partial d_3} = 0$ ,

$$\text{得到: } D = -T \frac{\sum P_i}{n} + \frac{\sum P'_i}{n} \quad (3)$$

代入公式(2)得到结论。

通过数值计算得到正交矩阵  $T$ 。代入公式(3), 得到平移向量  $D$ 。

对于我们的问题,仅依靠两个髁突点和一个切点这三个点求刚体变换,可以得到精确的公式解。

**命题 2** 在二维平面上的两组从原点出发的两组向量  $u_i = [x_i, y_i], v_i = [x'_i, y'_i] (i=1, 2, \dots, n)$ , 能够

找到一个旋转变换,  $T = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$ ,

$\theta = \arctan\left(\frac{\sum(x_i y'_i - x'_i y_i)}{\sum(x_i x'_i - y_i y'_i)}\right)$ , 使  $f = \sum \|Tu_i - v_i\|^2$  达到极小值。

**证明:**

$$f = \sum [x_i, y_i] \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \end{bmatrix},$$

$$\text{令 } \frac{\partial f}{\partial \theta} = \sum [x_i, y_i] \begin{bmatrix} -\sin(\theta) & \cos(\theta) \\ -\cos(\theta) & -\sin(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \end{bmatrix} = 0$$

得到:

$$\sum(x_i x'_i + y_i y'_i) [-\sin(\theta)] + \sum(x_i y'_i - x'_i y_i) \cos(\theta) = 0,$$

所以  $\tan(\theta) = \frac{\sum(x_i y'_i - x'_i y_i)}{\sum(x_i x'_i - y_i y'_i)}$  从而得到证明。

在我们的问题中,两个髁突点和切点与它们的中心之差得到的 3 个向量  $u_1, u_2, u_3$  一定共面,记所

在平面为  $P$ 。运动后 3 点与它们的中心之差得到的三个向量  $v_1, v_2, v_3$  也一定共面,记所在平面为  $Q$ 。但这两个平面不一定是一个平面,所以,首先,求一个旋转变换,使得平面  $P$  变换成平面  $Q$ 。实际上只要求一个旋转变换  $T_1$  将  $P$  的法矢变成  $Q$  的法矢即可。这容易做到。以两个法矢叉乘得到的矢量为轴,旋转  $P$  的法矢与  $Q$  的法矢的夹角的角度得到的旋转矩阵即为  $T_1$ 。对  $P$  平面上的 3 个向量  $u_1, u_2, u_3$  进行  $T_1$  变换,得到的 3 个向量  $u'_1, u'_2, u'_3$  在  $Q$  平面上,应用命题 1, 得到正交变换矩阵。从而得到最佳刚体变换。

## 5 结论

(1) 下颌运动轨迹描记仪一般每次要描记多个运动周期的运动轨迹,传统的下颌运动轨迹描记仪不能对多个周期进行分离,多个周期轨迹重叠显示在一起,测量和分析时只能靠目测与经验来确定属于同一个运动周期的轨迹点,这往往造成一个周期的点与另一个周期的点混用,从而造成误差和错误。本系统通过对轨迹的分离很好的解决了这个问题。应用本系统以来,明显感到较以前方便、准确、省时。

(2) 传统的下颌运动轨迹描记仪只能以三个平面显示下颌运动轨迹,不能从空间上整体观察运动轨迹。本系统能进行运动轨迹的三维空间显示,更能准确了解轨迹特征。

(3) 本系统可对轨迹放大、移动,并可测量轨迹上的任意度量关系,能观察运动轨迹的细节,有助于疾病的诊断。

(4) 下颌运动教学是口腔生理教学中较难的部分,学生通常不能理解下颌运动轨迹描记仪记录的运动轨迹的意义。本系统建立了口腔下颌骨三维模型,能真实显示下颌运动,通过三维鼠标的控制能从各个角度观察,并能在轨迹和三维模型间方便切换。应用本系统以来,学生对下颌运动的理解明显深刻和迅速。

## 参考文献

- 1 Yatabe M. et al. Movements of the Mandibular Condyle Kinematic Center during Jaw Opening and Closing. *Journal of Dental Research*. 1997, 76(2), 714~719.
- 2 Peck C C, et al. The Variability of Condylar Point Pathways in Open-close Jaw Movements. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 1997, 77(4), 394~404.

- 3 Proeschet P, et al. Mandibular Movement recorded with Six Degrees of Freedom by Supersonic runtime Measurement. *Advances in Dental Research*. 1993,7(2),235.
- 4 冯海兰等. 前伸髁道与切道的关系. *中华口腔医学杂志*,1994,29(1),6~9.
- 5 唐荣锡,汪嘉业,彭群生. 计算机图形学教程. 北京:科学出版社,1994.

**冯海兰** 教授,博士生导师. 北京医科大学口腔医学院副院长,修复科主任. 主要研究方向为口腔咀嚼生理及修复.



**戴国忠** 研究员,博士生导师. 主要研究方向为人机交互,计算机图形学.



**武仲科** 1965年生,博士,副研究员. 主要研究方向为几何造型,非流形模型,物理造型,计算机图形学.



**侯振刚** 1972年生,北京医科大学口腔医学院修复科硕士研究生. 主要研究方向为口腔咀嚼生理及修复.

**李平** 北京医科大学口腔医学院修复科硕士.

## A Processing and Displaying System of Mankind's Mandibular Movement

Wu Zhongke<sup>1</sup>, Feng Heilan<sup>2</sup>, Dai Guozhong<sup>1</sup>

(1. Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Hou Zhengang<sup>2</sup>, Li Ping<sup>2</sup>

(2. Department of Prosthodontics, School of Stomatology, Beijing Medical University, Beijing 100081)

**Abstract** The paper introduces a processing and displaying system of mankind's mandibular movement. It includes gaining data of mandibular movement by a tracing recorder, data processing, and data displaying. Data processing includes calibrating, separating. Data displaying includes zooming, moving and measuring. A 3D model of mankind's mandibular is built in our system, therefore, a realistic mandibular movement can be gained. These functions all assist medical doctors to diagnose. Certainly the system is helpful for the education and researching of mandibular movement.

**Keywords** Mandibular movement, Geometric transformation, Computer graphics

**小启:**由于工作疏忽,1998年第9期第741页,将刘富强与傅慧生的照片相互排错位置,谨向两位作者及广大读者致歉。

本刊编辑部