

牙齿三维模型牙龈线计算方法及应用

江小辉¹, 黎万波¹, 吴重军², 刘 杰³

(1.上海理工大学机械工程学院, 上海 200093;

2.东华大学机械工程学院, 上海 201620;

3.上海普利生机电科技有限公司, 上海 201615)

✉Jiangxh@usst.edu.cn; liwanbo2020@163.com; wcjunm@dhu.edu.cn; jason@prismmlab.com



摘 要: 针对隐形牙套切割路径数据难以获取的问题, 提出了一套从牙齿三维模型上提取牙龈线的方法。首先, 利用平均曲率作为判断指标从整体牙齿模型中分离出牙龈区域部分。其次, 运用特征区域细化理论框架处理牙龈区域得到牙龈线。基于该方法, 结合Qt(跨平台程序开发库)实现了理论程序化和可视化界面, 通过大量的模型提取实验证明了该方法的有效性。最后, 将牙龈线数据应用于工业机器人实现了隐形牙套自动化切割, 与人工切割实验对比, 自动化切割的隐形牙套质量稳定, 形状更接近牙龈轮廓, 符合加工要求, 并且切割效率提升了50%, 说明该牙龈线提取方法具有可行性和高效性。

关键词: 隐形牙套; 牙齿模型; 平均曲率; 自动化; 工业机器人

中图分类号: TP29 **文献标识码:** A

Calculation Method and Application of Gingival Line for 3D Dental Model

JIANG Xiaohui¹, LI Wanbo¹, WU Chongjun², LIU Jie³

(1. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China;

2. School of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China;

3. Prismmlab China Ltd., Shanghai 201615, China)

✉Jiangxh@usst.edu.cn; liwanbo2020@163.com; wcjunm@dhu.edu.cn; jason@prismmlab.com

Abstract: Aiming at the difficulty in obtaining the cutting path data of invisible braces, this paper proposes a set of methods for extracting gingival line from 3D dental model. Firstly, the gingival area is separated from the overall dental model with the mean curvature being a judgment indicator. Secondly, the theoretical framework of feature area refinement is used to process the gingival area to obtain the gingival line. Based on this method, the theoretical programming and visual interface are realized in combination with Qt (a cross-platform program development library). The effectiveness of this method is proved by a large number of model extraction experiments. Finally, gingival line data is applied to industrial robots to achieve automatic cutting of the invisible braces. Compared with manual cutting experiments, the invisible braces of automatic cutting is stable in quality, and the shape is closer to the gingival contour, which meets the processing requirements. The cutting efficiency has increased by 50%, proving the feasibility and efficiency of the proposed gingival line extraction method.

Keywords: invisible braces; dental model; mean curvature; automation; industrial robot

1 引言(Introduction)

隐形牙套矫治技术是20世纪90年代出现的一种牙齿正畸技术, 其凭借外形美观、方便摘戴、易清理等优势逐渐取代了金属牙套在牙齿矫治领域的主流地位^[1]。随着该技术的发展, 市场对隐形牙套的需求量随之上升。实现隐形牙套的自

动化加工能有效提升隐形牙套加工效率, 但其中的难点在于获取驱动加工的数据。

数据获取分为两个部分, 特征区域的识别和细化。牙齿三维模型特征识别领域主要有基于曲面的最小曲率的方法^[2]和基于B样条曲线轮廓拟合算法的方法^[3]等。特征区域细化领域

主要有通过形态学算子提取特征线的方法^[4]、基于快速移动分水岭算法的方法^[5]以及基于活动轮廓模型的方法^[6]。这些方法虽然能识别出特征曲线,但是需要设置阈值,导致难以实现自动化。

结合隐形牙套的加工需求和相关领域的研究现状,本文提出了一种基于曲率场的牙龈线自动提取方法。该方法克服了曲率阈值设置的困难,为牙龈线数据自动化应用提供了基础支撑。

2 牙龈线计算方法(Calculation method of gingival line)

2.1 特征区域识别

经典微分定义中,平均曲率的几何意义主要是描述曲面的弯曲度。根据微分几何中平均曲率流形,曲面中某一点 M_i 的平均曲率的值可由公式(1)计算:

$$2k_H n = \lim_{diam(A) \rightarrow 0} \frac{\nabla A}{A} \quad (1)$$

其中, k_H 为点 M_i 处的平均曲率; n 为点 M_i 处的单位法矢量; A 表示点 M_i 周围的无限小区域; $diam(A)$ 表示区域 A 的直径; ∇ 表示关于点 M_i 的梯度算子。

本文提出的牙齿正畸三维模型以STL格式储存,采用公式(1)的离散形式计算模型的平均曲率,如公式(2)所示^[7]:

$$k_H(M_i) = \frac{1}{4A_{mix}} \sum_{j \in N(i)} (\cos \alpha_{ij} + \cos \beta_{ij})(M_i - M_j) \cdot n_i \quad (2)$$

其中, $k_H(M_i)$ 表示顶点 M_i 处的平均曲率; A_{mix} 表示该顶点处的混合面积; $N(i)$ 表示该顶点的一邻域内的所有顶点构成的集合; α_{ij} 、 β_{ij} 分别表示顶点 M_i 、 M_j 连线的对角,如图1所示; n_i 表示该顶点的单位法矢量。

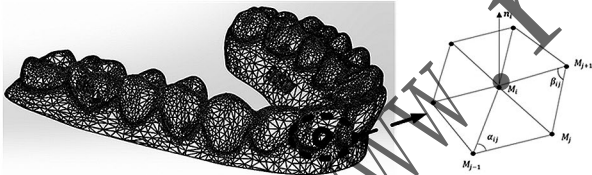


图1 顶点 M_i 的一邻域示意图

Fig.1 Diagram of the one-neighborhood domain of vertex M_i

计算得到各顶点的平均曲率值后进行归一化处理,处理方法如下。

统计模型中每个顶点的平均曲率值,记录其中的最大值 H_{max} 和最小值 H_{min} 。利用公式(3)对所有的平均曲率值进行归一化处理:

$$\begin{cases} H = \frac{H}{H_{max}} & (H > 0) \\ H = -\frac{H}{H_{min}} & (H < 0) \end{cases} \quad (3)$$

进行平均曲率值归一化处理后,通过自动设置平均曲率阈值 h (自动设置方法见“2.2”部分)将牙齿与牙龈交界的区域从整个牙齿正畸模型上过滤出来作为后续处理的特征区域。

2.2 特征区域细化方法

本部分旨在将牙龈与牙齿融合区域进行细化处理,得到

单顶点宽度的牙龈曲线。本文考虑到牙齿正畸模型的结构特点和隐形牙套的切割精度要求,提出了一种基于图形分割的牙龈融合区域细化方法,实现步骤如下。

(1)计算牙齿模型参考点坐标,记作点 $C(X_C, Y_C, Z_C)$,参考点坐标计算方法如公式(4)所示:

$$\begin{cases} X_C = (X_{max} + X_{min}) \cdot 0.5 \\ Y_C = (Y_{max} + Y_{min}) \cdot 0.5 \\ Z_C = (Z_{max} + Z_{min}) \cdot 0.5 \end{cases} \quad (4)$$

其中, X_{max} , X_{min} , Y_{max} , Y_{min} , Z_{max} , Z_{min} 分别是模型在各个坐标轴方向上的最大坐标值和最小坐标值。

(2)将识别出的特征点区域构成的点云图和点 C 投影到 $X-Y$ 平面,以点 C 为起点作射线将特征区域按角度等 n 分成 $360/n$ 个区域。考虑到隐形牙套的加工精度要求,实验时采用的角度值为0.5,共将模型分为720个区域。因为牙齿模型是一个扇形,所以会在某些区域内没有特征点。对区域进行分类,分为包含特征点的有效区域和空白的无效区域。有效区域进行步骤(3),无效区域不做后续处理。

(3)文中在实现细化方法时创建了如下数据结构用于储存每个区域内的特征点信息。

Struct Pointdata

```
{
    dis_max; //特征点到参考点的最大距离
    dis_min; //特征点到参考点的最小距离
    index_max; //最远距离特征点在原始点集中的索引
    index_min; //最近距离特征点在原始点集中的索引
    pd; //所有特征点在原始点集中的索引
}
```

逐个计算每个区域内的所有特征点到参考点 C 的距离 L ,将对应的信息录入数据结构的对应元素中,计算公式如公式(5)所示。文中将牙龈中靠近参考点的一侧叫作内牙龈线,远离参考点的一侧叫作外牙龈线。

$$L = \sqrt{(X_v - X_c)^2 + (Y_v - Y_c)^2} \quad (5)$$

(4)定义外侧牙龈线点集set_out,根据set_out中的元素个数判断是否建立起点。假设当前区域 I 是起始区域,将区域 I 中已经记录的最远距离点的信息取出传给set_out作为第一个元素,即起点。

定义牙龈线组成点:如图2所示,假设当前区域序号为 K , V_x 是区域 K 距离参考点最远点。 V_2 是区域 $(K-2)$ 提取的外侧牙龈线特征点。 V_1 是区域 $(K-1)$ 提取的外侧牙龈线特征点。

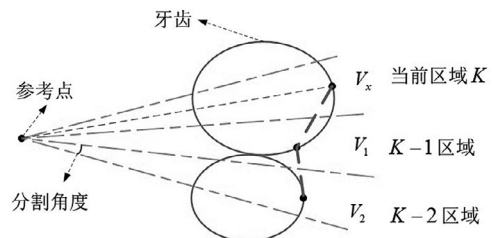


图2 特征点判断原理

Fig.2 Principle of feature points determination

组成点第一判断条件如公式(6)所示:

$$\begin{cases} |V_1 V_2| = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2} \\ |V_1 V_x| = \sqrt{(X_x - X_1)^2 + (Y_x - Y_1)^2} \\ |V_1 V_2| \& |V_1 V_x| < \mu \end{cases} \quad (6)$$

其中, μ 是牙龈线特征点间距参数。

参数 μ 的几何意义是避免从连续区域得到的牙龈线组成点出现小范围聚集, 导致牙龈曲线局部失真。改变 μ 值, 可以控制牙龈线组成点趋于每个区域的中间位置, 得到更接近实际轮廓的牙龈线。

如果第一判断条件成立, 则区域 K 中的 V_i 是牙龈线组成点, 否则进入第二判断条件。 V_p 是区域 K 中的任意特征点:

$$\begin{cases} |V_1 V_p| = \sqrt{(X_p - X_1)^2 + (Y_p - Y_1)^2} \\ \theta = a \tan 2((V_1 - V_2) \times (V_p - V_1), (V_1 - V_2) \cdot (V_p - V_1)) \\ \text{if } |\theta| < \delta, \delta = |\theta| \end{cases} \quad (7)$$

其中, $\times$ 表示向量叉乘运算, $\cdot$ 表示向量点乘运算, δ 是牙龈线特征点角度参数, 初始值为 $\pi/3$ 。 $a \tan 2$ 函数的计算方法如公式(8)所示:

$$a \tan 2(y, x) = \arg\left(\frac{y}{x}\right) - \pi \quad (8)$$

δ 的几何意义是控制从连续区域中取得组成点位置的变化幅度, δ 值在细化的过程中是自适应该取当前的最小值。

如果区域 K 中的顶点满足第二判断条件, 则是牙龈线组成点。运用以上两个判断条件逐个判断每个有效区域, 得出完整的外牙龈线。同理, 再对内牙龈线有效区域进行处理, 得出完整的内侧牙龈线。

2.3 牙龈线结果修正

观察提取的牙龈线结果可知, 牙龈线的 X - Y 平面投影图在某些牙齿与牙齿连接的部分呈现出锯齿形和矩形的干扰区域。为了提升结果的精度, 研究人员在本部分中设计了结果修正方法。

(1) 将提取得到的牙龈线向牙齿正畸模型参考坐标系的 X - Y 平面投影, 得到所有牙龈线组成点在 X - Y 平面的坐标。以牙龈线的 x 坐标变化特征为界限, 将整个牙龈线的投影分为4段。第1段: 从起点至 $x=0$; 第2段: 从 $x=0$ 至 $x_{\max}$; 第3段: 从 $x_{\max}$ 至 $x=0$; 第4段: 从 $x=0$ 至终点, 分段情况如图3(a)所示。根据牙龈线的分段投影可以得到每段曲线中的干扰区域主要呈现两种锯齿形状, 文中将其命名为三角形锯齿和矩形锯齿, 两种锯齿形状如图3(b)所示。

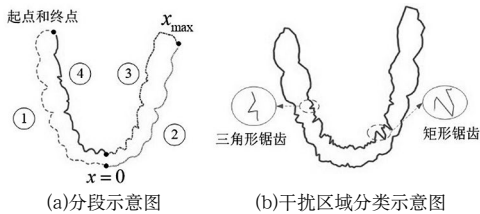


图3 牙龈线特征图

Fig.3 Feature diagram of the gingival lines

(2) 根据牙龈曲线的变化情况, 可以通过 x 坐标值的变化情况确定曲线中干扰区域的位置。曲线一共分为4段, 每段中干扰区域 x 的坐标变化情况不同。以第1段为例, 变化情况如下: x

坐标值呈现先减小后增大到0的总体变化趋势, 其中干扰区域的 x 坐标呈现突然增大再减小的趋势。类似于第1段, 其余3段中的干扰区域都表现出与总体变化趋势不一致的特征。以此作为判断标准, 可以从每段曲线中定位干扰区域点的位置。根据上述得到每段曲线中干扰区域的特征, 可以定位干扰点在整体牙龈线中的位置。根据得到的点的位置逐个去除异常点。根据上述方案逻辑编写牙龈线修正程序。

(3) 去除每一段曲线中满足各自判断条件的干扰点, 得到的曲线按原有的顺序合并成一条曲线。由于去除了锯齿干扰点后可能会导致某些区域的特征点缺失, 所以利用闭合三次B样条曲线算法对牙龈线进行插值拟合^[8]。修正后的牙龈线点集作为型值点集 $\{N_i\}$, 利用型值点和控制点的关系求解B样条曲线的控制点集 $\{D_i\}$ 。型值点和控制点的关系^[9]如公式(9)所示。

$$\frac{(D_{i-1} + 4D_i + D_{i+1})}{6} = N_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

牙龈曲线是闭合曲线, 补充条件 $D_0 = D_n$, $D_{n+1} = D_1$; 将关系式转为矩阵如公式(10)所示。

$$\begin{bmatrix} 1 & 4 & 1 & \dots & 1 \\ & 1 & 4 & 1 & \dots \\ & & \dots & \dots & \dots \\ & & & 1 & 4 & 1 \\ & & & & 1 & 4 \\ & & & & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_0 \\ D_1 \\ \dots \\ D_{n-3} \\ D_{n-2} \\ D_{n-1} \end{bmatrix} = 6 \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ \dots \\ N_{n-2} \\ N_{n-1} \\ N_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

根据方程个数和未知数个数的关系, 判断方程有唯一解, 将牙龈线组成点构成的点集输入方程, 可求出B样条曲线的控制点集 $\{D_i\}$ 。

得到控制点集 $\{D_i\}$ 后进行插值拟合, B样条曲线的拟合方程如公式(11)所示:

$$D(t) = \sum_{i=1}^n D_i F_{i,k}(t) \quad (11)$$

其中, D_i 是B样条曲线的控制点, $F_{i,k}(t)$ 是 k 阶B样条曲线的基函数。

前3阶对应的基函数如公式(12)所示^[10]:

$$\begin{cases} F_{0,3}(t) = \frac{1}{6}(1-t)^3 \\ F_{1,3}(t) = \frac{1}{6}(3t^2 - 6t + 4) \\ F_{2,3}(t) = \frac{1}{6}(-3t^2 + 3t^2 + 3t + 1) \\ F_{3,3}(t) = \frac{1}{6}t^3 \end{cases} \quad (12)$$

代入基函数得拟合方程 $D(t)$ 如公式(13)所示:

$$D(t) = D_0 \cdot F_{0,3}(t) + D_1 \cdot F_{1,3}(t) + D_2 \cdot F_{2,3}(t) + D_3 \cdot F_{3,3}(t) \quad (13)$$

运用拟合方程 $D(t)$ 对牙龈线进行插值拟合, 假设相邻的两个点之间插入 u 个点, 则拟合方程变量增量 Δt 计算方式如公式(14)所示:

$$\Delta t = \frac{1}{u} \quad (14)$$

以 x 坐标插值为例, 两个点之间插入的值为 $(x_1, x_2, \dots, x_{u-1}, x_u)$, 其表达式如公式(15)所示:

$$\begin{cases} x_1 = D(0) \\ x_2 = D(\Delta t) \\ \vdots \\ x_{u-1} = D((u-1)\Delta t) \\ x_u = D(1) \end{cases} \quad (15)$$

同理, 可对y坐标和z坐标进行插值, 最终得到的插值结果就是本文的牙龈融合区域识别提取的牙龈线特征点集。

3 程序实现过程(Implementation process of the program)

3.1 牙龈线提取流程

如图4所示, 对应牙龈线提取方法理论三个部分, 其实现过程也分为三个部分, 分别是牙龈融合区域识别、牙龈融合区域细化和牙龈线结果修正。

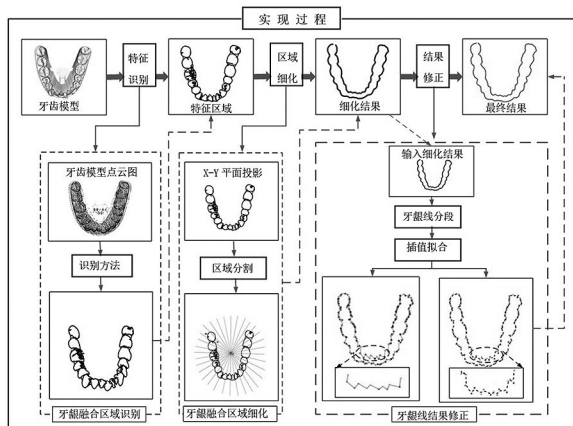


图4 牙龈线提取方法实现流程概述图

Fig.4 Overview diagram of the implementation process of the gingival lines extraction method

3.2 软件运行逻辑设计

为了便于程序设计, 本文将方法实现过程分为两大模块, 分别是特征识别模块和特征处理模块。特征识别模块是利用平均曲率识别牙龈融合区域的过程, 特征处理模块是将融合区域细化并修正的过程。两个模块运行逻辑关系和运行方式如图5所示。

因为每个有效区域会贡献两个分别属于内外牙龈线的特征点, 所以理论上得到的牙龈线组成点的个数是有效区域数量的2倍。经过细化过程得到的牙龈线的组成点数量作为平均区域阈值h设置是否合理的评价标准, 通过程序判断是否提取成功。将细化结果与阈值h的设置过程结合, 实现了平均曲率阈值h的自动化设置。

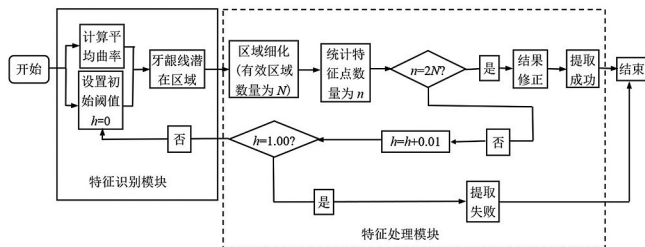


图5 软件运行逻辑关系设计图

Fig.5 Design diagram of the logical relationship of software operation

3.3 可视化界面设计

研究过程中开发了基于QT的程序界面, 利用OpenGL库作为软件的三维渲染工具, 如图6所示。用户可以利用程序界面导入模型、提取牙龈线、查看提取结果和保存提取数据。

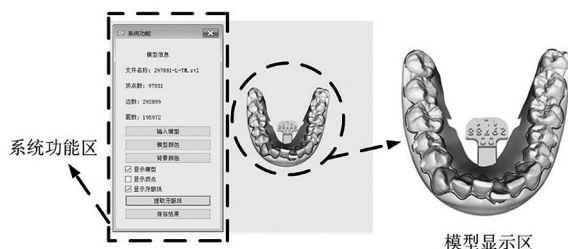


图6 提取程序可视化界面

Fig.6 Visual interface of the extraction program

4 实验和结果(Experiments and results)

4.1 不同畸形类型牙齿模型提取实验

实验使用了160个来自牙齿畸形病患的牙齿模型, 验证该方法的有效性和准确性, 实验结果如图7所示。这些牙齿模型包含上颌和下颌的几种主要的牙齿畸形类别, 分别是牙齿拥挤、牙齿稀疏、下牙包覆、牙齿缺失、颌骨异常、牙齿排列异常^[11]。

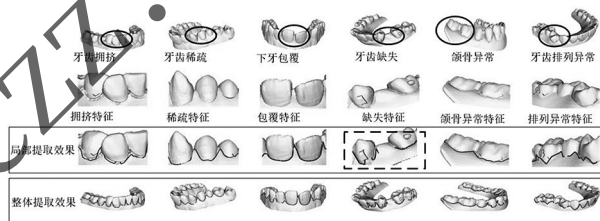


图7 六种畸形类别牙齿模型提取结果

Fig.7 Extraction results of dental models for six malformation categories

从图7中可以看出, 该方法针对几种主要的牙齿畸形类别模型的牙龈线提取都是有效的, 通过软件操作即可得到牙龈线的组成点坐标, 但是对于缺牙类型模型得不到理想的提取结果, 如图7中的虚线框内所示。

4.2 修正方法有效性测试

为了验证文中提出的修正方法的有效性, 本节选择5个模型的牙龈线提取结果进行修正测试。分别将每个实验对象输入结果修正程序进行修正处理, 统计修正结果如图8所示。

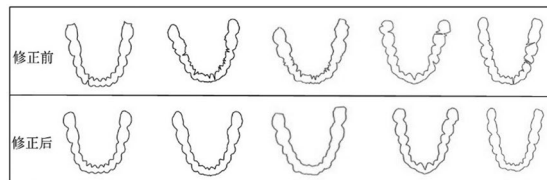


图8 牙龈线修正结果前后对比

Fig.8 Comparison of gingival lines before and after correction

通过对比分析, 证明了修正方法的有效性, 明显去除了干扰区域, 比修正前的牙龈曲线更接近真实的牙轮廓。

4.3 隐形牙套切割路径规划

利用本文所提牙龈线提取方法从牙齿三维模型上获取牙龈线的组成点 $p_i(x_i, y_i, z_i, b_x, b_y, b_z)$ 。其中, (x_i, y_i, z_i) 表示 p_i 的坐

标, (b_x, b_y, b_z) 表示 p 的点法矢量。经过样条曲线插值拟合以及结果修正后, 得到可用于驱动隐形牙套自动化切割的刀位点数据。实验采用 ABB_IRB1200_7_0.7 型机器人夹持牙齿三维模型, 固定高速电主轴的加工方式, 加工场景如图9所示。

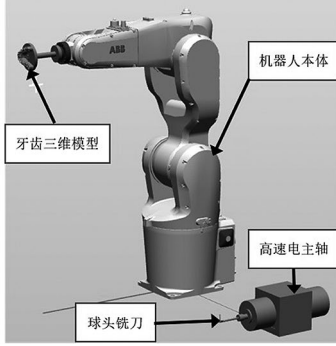


图9 虚拟加工场景

Fig.9 Virtual machining scenario

对于六轴机器人, 需要刀位点数据以及刀位点姿态确定机器人的运动。如图10所示, 取刀具中心点为原点 O_A , 刀具轴线方向为单位法矢量 a , 刀具前进方向为单位法矢量 o , 单位法矢量 n 同时与 a 和 o 垂直。设刀位点的前进方向向量为 $v(v_x, v_y, v_z)$, 相邻两点的坐标值分别为 $p_1(x_1, y_1, z_1)$, $p_2(x_2, y_2, z_2)$ 。可得向量 $u(u_x, u_y, u_z)$ 和向量 $v(v_x, v_y, v_z)$ 计算方式如公式(16)所示。

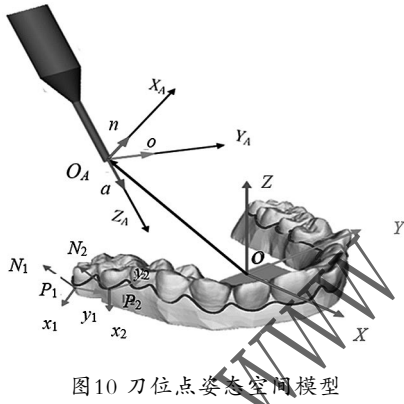


图10 刀位点姿态空间模型

Fig.10 Spatial model of knife points posture

$$\begin{cases} u_x = -b_x, u_y = -b_y, u_z = -b_z \\ v(v_x, v_y, v_z) = (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1) \end{cases} \quad (16)$$

向量叉乘可得 $c(c_x, c_y, c_z)$, 如公式(17)所示:

$$c = u \times v = (u_y v_z - u_z v_y) i + (u_z b_x - u_x v_z) j + (u_x v_y - u_y v_x) k \quad (17)$$

得到向量 c 后进行单位化, 可得姿态数据。通过公式(18)计算求得姿态矩阵, 可得刀具路径数据:

$$\begin{cases} n_x = \frac{v_x}{|v|}, n_y = \frac{v_y}{|v|}, n_z = \frac{v_z}{|v|} \\ o_x = \frac{c_x}{|c|}, o_y = \frac{c_y}{|c|}, o_z = \frac{c_z}{|c|} \\ a_x = \frac{u_x}{|u|}, a_y = \frac{u_y}{|u|}, a_z = \frac{u_z}{|u|} \end{cases} \quad (18)$$

4.4 隐形牙套加工实验

4.4.1 隐形牙套加工仿真实验

仿真实验分为两步, 分别是利用Matlab机器人工具箱进

行可行性仿真和利用RobotStudio进行切割场景仿真。首先基于表1的参数建立机器人运动学模型如图11所示, 然后导入上述计算得到的刀位点姿态数据, 结合机器人工具解函数进行仿真。

表1 Denavit-Hartenberg参数表

Tab.1 Denavit-Hartenberg parameter table

连杆序号	关节距离/mm	连杆长度/mm	连杆扭角/rad	关节转角/rad
1	399	0	$-\pi/2$	θ_1
2	0	350	π	θ_2
3	0	42	$\pi/2$	θ_3
4	351	0	$-\pi/2$	θ_4
5	0	0	$\pi/2$	θ_5
6	82	0	0	θ_6

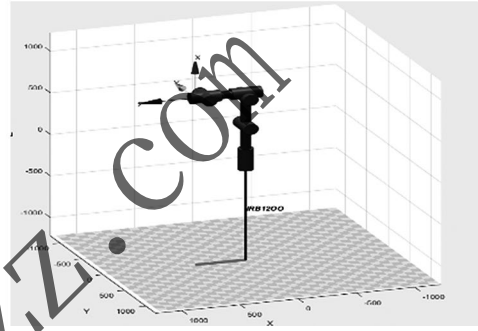


图11 Matlab机器人仿真模型

Fig.11 Matlab robot simulation model

利用Matlab检测过刀具路径的可行性后, 在RobotStudio中建立隐形牙套的加工场景, 如图9所示, 将刀具姿态数据编译成ABB机器人的执行代码导入RobotStudio机器人虚拟控制系统中, 生成加工轨迹, 如图12所示。

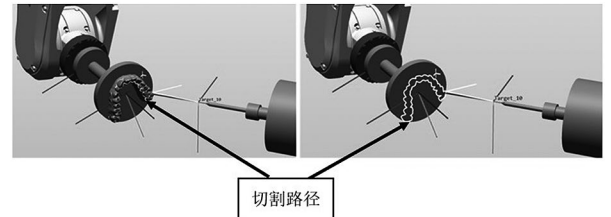


图12 RobotStudio仿真切割实验

Fig.12 RobotStudio simulation cutting experiment

从仿真结果可知, 加工轨迹是沿着模型的牙龈线形状运动, 仿真结果符合预期。

4.4.2 隐形牙套切割实验

根据虚拟加工场景规划实际加工场景, 如图13所示。

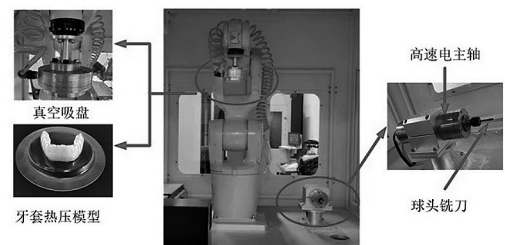


图13 隐形牙套自动化加工场景

Fig.13 Automated processing scenario for invisible braces

实验中采用的主轴转速为20 000 r/min，球头铣刀直径的参数为 $R1 \cdot 4 \cdot D4 \cdot 50L \cdot 2F$ ，机器人的运行速度为100%、50%，分别如图14和图15所示，实验过程中以某熟练工人手工切割隐形牙套作为对照，实验结果如图16所示。

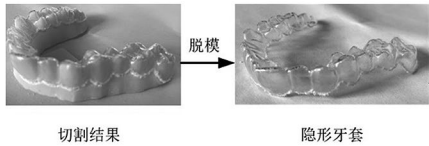


图14 100%的速度切割结果
Fig.14 The result of 100% speed cutting

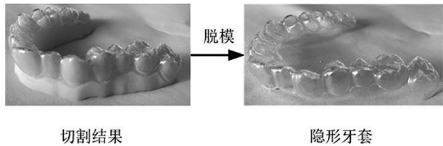


图15 50%的速度切割结果
Fig.15 The result of 50% speed cutting

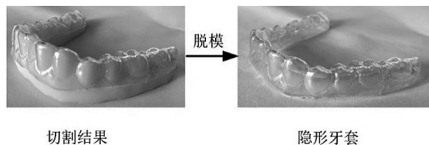


图16 人工切割结果
Fig.16 The result of manual cutting

利用本文的提取方法计算牙龈线数据，用于机器人路径规划，实现了自动化切割取代人工切割，并且得到的隐形牙套形状符合牙龈轮廓，说明该牙龈线提取方法的可行性。如图14所示，在机器人运行速度为100%的情况下，加工时间最短，但隐形牙套的脱模边界粗糙且有毛刺。如图15所示，在机器人运行速度为50%时，脱模边界光滑，牙套边界无毛刺。如图16所示，人工切割路径只能沿直线切割，后期需要修形得到牙龈轮廓。相对于人工切割，基于牙龈线数据的自动化切割能直接得到符合患者牙龈轮廓的牙套，并且在运行速度为50%时，隐形牙套的加工质量较好，而采用人工切割方式的切割质量不稳定。如表2所示，以机器人运行速度为50%为例，隐形牙套的自动化加工比人工加工提升效率约50%。同时，自动化切割能得到近似牙龈轮廓的牙套形状，提升了用户的牙套佩戴体验。

表2 不同加工方式耗时对比

Tab.2 Comparison of time consumption between different processing methods

加工方式	机器人速度为100%	机器人速度为50%	人工切割
加工时间/s	31	60	约120

5 结论(Conclusion)

针对隐形牙套的加工效率低、工艺烦琐等问题，本文提出了一套从获取数据到指导加工的隐形牙套自动化加工方法，得出的结论如下。

(1)文中提出了一种基于图形分割的特征区域细化方法，结合曲率特征实现了自动提取牙龈线数据。针对牙龈线数据设计了修正方法，提升了牙龈线提取方法应用的稳定性。

(2)基于Qt开发平台设计了牙龈线可视化界面并编写了牙

龈线提取程序。利用不同类型的牙齿模型在该程序中进行提取实验，验证了牙龈线提取方法的可行性。

(3)将程序提取的牙龈线数据用于隐形牙套切割实验，实现了隐形牙套的自动化切割工艺流程。相对于人工切割，在保证切割质量的前提下，本文所提方法提升效率约为50%，为后续探究工艺参数对切割质量的影响提供了理论及实践基础。

参考文献(References)

[1] GALAN L, BARCIA J, PLASENCIA E. A systematic review of the accuracy and efficiency of dental movements with Invisalign[J]. The Korean Journal of Orthodontics, 2019, 49(3):140-149.

[2] YUAN T R, LIAO W H, DAI N, et al. Single-tooth modeling for 3D dental model[J]. International Journal of Biomedical Imaging, 2010, 20(10):13-27.

[3] WU X L, GAO H, HEO H, et al. Improved B-Spline Contour Fitting Using Genetic Algorithm for the Segmentation of Dental Computerized Tomography Image Sequences[J]. Journal of Imaging Science and Technology, 2007, 51(4):328-336.

[4] WU K, CHEN L, LI J, et al. Tooth segmentation on dental meshes using morphologic skeleton[J]. Computers & graphics, 2014, 38:199-211.

[5] KUMAR Y, JANARDAN R, LARSON B. Automatic feature identification in dental meshes[J]. Computer-Aided Design and Applications, 2012, 9(6):747-769.

[6] CHEN H, JAIN A K. Tooth contour extraction for matching dental radiographs[C]// KITTLER J, PETROU M, NIXON M. International Conference on Pattern Recognition. Piscataway: IEEE, 2004, 3:522-525.

[7] MEYER N, DESBRUN M, SCHRODER P, et al. Discrete differential-geometry operators for triangulated 2-manifolds[C]// HEGE H C, POLTHIER K, POLTHIER K. International Workshop on Visualization and Mathematics. Berlin: SPRINGER-VERLAG BERLIN, 2003:35-57.

[8] ZHANG W J, GAO S P, ZHANG S J, et al. Modification algorithm of cubic b-spline curve interpolation[C]// FANG Y, XIN Y. ACSR-Advances in Computer Science Research. Pairs, ATLANTIS PRESS, 2017, 71:507-512.

[9] 王家润, 聂芸, 任菲, 等. 闭合B样条曲线控制点的快速求解算法及应用[J]. 计算机工程与设计, 2011, 32(4):1374-1378.

[10] CHUNG K L, YAN W M. A fast algorithm for cubic B-spline curve fitting[J]. Computers & Graphics, 1994, 18(3):327-334.

[11] JAHANIMOGHADAM F. Dental anomalies: an update[J]. Advances in Human Biology, 2016, 6(3):112-118.

作者简介:

江小辉(1986-), 男, 博士, 教授. 研究领域: 高性能制造工艺与装备.

黎万波(1998-), 男, 硕士生. 研究领域: 智能制造技术.

吴重军(1988-), 男, 博士, 副教授. 研究领域: 智能装备优化设计.

刘杰(1989-), 男, 硕士, 工程师. 研究领域: 3D打印技术.