舌面彩色三维点云的舌体分割及舌裂纹提取

王 鹏[1],杨文超[1],孙长库[1],郭世珍[2]

(1. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室,天津 300072;
2. 天津中医药大学 中医工程学院,天津 300193)

摘 要:随着舌诊现代化的进一步发展,合理地利用舌面彩色三维点云数据成为中医诊疗各类疾病并获取客观量化信息的关键环节。通过将现代三维点云处理技术与传统中医诊断经验进行有效融合,提出了基于扩展快速点特征颜色直方图(Fast Point Feature & Color Histogram,FPFCH)特征值的欧式聚类舌体分割算法及基于法线区域分割的舌裂纹提取算法。FPFCH 特征值由扩展快速点特征直方图(Fast Point Feature Histogram,FPFH)分量和色调(Hue,H)分量组成,作为欧式聚类分割后舌体点云的判别条件。基于法线区域分割即通过对法线夹角阈值进行判别,提取舌裂纹点云。经过大量实验可知,上述算法能够有效地完成舌体分割和舌裂纹提取,为舌诊客观化研究提供了技术支持。

关键词:三维点云处理; 舌体分割; FPFCH 特征值; 舌裂纹提取; 舌诊客观化
中图分类号:TP274.2 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201746.S117004

Tongue segmentation and tongue crack extraction of tongue 3D color point cloud

Wang Peng[1], Yang Wenchao[1], Sun Changku[1], Guo Shizhen[2]

(1. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. School of Chinese Medicine Engineering, Tianjin University of Traditional Chinese Medicine, Tianjin 300193, China)

Abstract: With the further development of modern tongue diagnosis, reasonable use of tongue 3D color point cloud data has become a key step in TCM diagnosis and treatment of various diseases and obtaining the objective and quantitative information. By combining modern 3D point cloud processing technology with traditional TCM diagnosis experience, an algorithm for the Euclidean cluster segmentation of tongue based on the Fast Point Feature & Color Histogram (FPFCH) eigenvalue and the region segmentation based on normal of tongue crack extraction was proposed. The FPFCH eigenvalues consisted of the extended Fast Point Feature Histogram (FPFH) component and the Hue (H) color component as the discriminant condition of the tongue point cloud after the Euclidean cluster segmentation. The area was segmented by judging the threshold of the normal line angle and the point cloud of the tongue crack was extracted. A large number of experiments show that the algorithm can effectively complete the tongue segmentation and tongue crack extraction, which provides technical support for the research of object diagnosis of the tongue.

Key words: 3D point cloud processing; tongue segmentation; FPFCH eigenvalue; tongue crack extraction; objectification of tongue diagnosis

收稿日期:2017-06-14; **修订日期**:2017-07-19

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划(2012BAI25B05)

作者简介:王鹏(1982-),男,副教授,博士,主要从事激光及光电检测方面的研究。Email:wang_peng@tju.edu.cn

0 引 言

中医学是我国特色传统文化的结晶，舌诊是中医诊断病情的核心环节，中医根据获取的舌面特征判断患者的生理功能和病理变化,因此,舌诊在中医理论体系中占有举足轻重的地位[1]。传统的中医舌诊不可避免的要受到中医个人经验判断以及病患所处环境等条件的制约,具有一定的不确定性。随着现代计算机技术的高速发展，国内外的众多科研机构相继投身于舌诊客观化、定量化、标准化的研究。目前,舌面特征分析的主要方法分为两类,包括早期的舌面特征测定法和近期的计算机图像处理法。其中,舌面特征测定法[2],如比色板、舌荧光光谱分析、分光测色等,它们主要针对于舌色的区分,并且只能检测舌面局部的颜色信息，不能提供相应的信息分析功能。计算机图像分析法[3]主要采用数字图像处理技术和模式识别，通过对相机采集的舌图进行图像处理来提取相关的舌面信息，基于二维舌图的舌体分割算法主要分为四类,即区域分割技术、边缘检测技术、Snake 算法和特定理论工具分割[4];舌裂纹提取主要是基于区域的线侦测方法[5]。上述方法在某种意义上提高了中医舌诊的准确性和客观性。

但是,二维舌图并不包含舌体必要的三维数据,如舌体的表面形貌、舌裂纹的具体尺寸等,不能对舌面特征进行量化的表达[6]。因此,通过舌面彩色三维点云数据进行舌面特征的分析处理，能够为中医诊断提供具体的量化依据。初始舌面彩色三维点云数据通过激光扫描彩色三维舌诊仪获取，舌诊仪系统由一个彩色 CCD 摄像机、两个线激光器、一个 LED 环形光源和一台高速精密电动平移台等组成。其中采用基于成像光线空间追踪[7]的方法进行摄像机和光平面的标定,白光 LED 环形光源为整个系统提供接近日光光谱的照明。系统分两步获取舌面彩色三维点云数据,首先,打开 LED 环形光源,在扫描测量的初始位置,由彩色 CCD 摄像机摄取舌面的彩色图像,用于后续的颜色渲染;其次,开启激光器,关闭 LED 环形光源,结合电动平移台的上下移动,计算舌面的三维信息，采用颜色渲染技术从彩色图像中获取舌面点云的颜色信息并将其与对应的空间坐标相匹配,完成舌面彩色三维数据$(x,y,z)-(R,G,B)$的获取,整个操作过程用时 6 s 左右且需要避免舌体的剧烈抖动。FPFH[8]作为点云聚类特征识别的常用算法,能够对点云的整体形态轮廓进行系统的特征描述,但是某些不同物体的点云聚类在扩展 FPFH 的特征值上可能差别不大,因此,文中将与点云形态特征相关的扩展 FPFH 分量和与颜色相关的色调 H 分量相结合,构成了一种新的点云特征描述子 FPFCH,以更好的对不同的点云聚类进行区分。为了对获取的舌面彩色三维点云数据实现高效地、自动地分析处理,文中提出了一种基于 FPFCH 特征值的欧式聚类舌体分割算法及基于法线区域分割的舌裂纹提取算法。

1 基于 FPFCH 特征值的欧式聚类舌体分割

在舌面彩色三维点云数据的采集过程中，虽然不断进行硬件设备和测量环境的改善，以便获取准确的测量结果，但是采集的数据中不可避免的存在嘴唇、脸部等杂散数据。因此,将舌体点云数据从采集的初始点云数据中分割出来是进行舌裂纹提取的首要任务，舌裂纹提取的准确性也将会受到舌体分割结果的影响。图 1 所示为采集的初始舌面彩色三维点云数据。根据初始舌面彩色三维点云数据分布的特点,文中采用基于 FPFCH 特征值的欧式聚类分割算法进行舌体分割，该算法充分利用舌体点云与其他杂散点云在距离上的差异，对采集的初始点云进行聚类,再根据舌体与嘴唇、脸部等区域点云聚类的 FPFCH 特征值的不同，提取舌体部分的点云数据,完成舌体区域的分割。

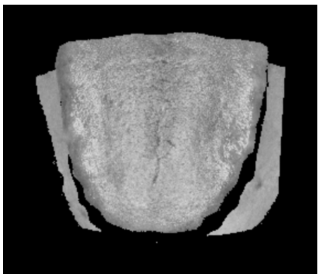


图 1 初始舌面彩色三维点云数据的显示

Fig.1 Display of the initial 3D color point cloud data of tongue

基于欧式聚类分割[9]是一种常用的点云分割方法,具有较快的运算速度并且易于实现,算法的实质就是将设定的距离阈值内的点云聚合为一个新的整体，算法将欧式距离作为判断点云之间远近关系的

准则,其计算方法如公式(1)所示:

$$\Delta L=\sqrt{\sum_{i=0}^{n}(p_i-q_i)^2} \tag{1}$$

式中:ΔL 为三维空间中两个点之间的欧式距离;$p_i, q_i \in P$,P 为需要进行欧氏聚类分割的三维点云数据集。基于欧式聚类分割算法的基本原理是:从三维点云集 P 中任意选择一点 p_i 作为聚类样本点,以设置的欧氏距离阈值 L 为半径,搜索 p_i 点的邻域点集合 P_i^k,之后将邻域点集合 P_i^k 中的点作为聚类样本点继续搜索,若没有新的点云加入,则将之前被搜索过的点云合并为一个聚类,之后设置没有被搜索过的点云中的任意一点作为新的聚类样本点进行上述同样操作,直到点云中所有的点处理完毕,形成多个点云聚类。欧式聚类分割效果的好坏主要取决于设置的距离阈值,通过对舌体点云与脸部等杂散点云的距离分析,设置阈值 L=1 mm 可以准确的完成点云聚类。

在完成点云分割后,通过 FPFCH 的点云特征描述子对舌体点云与杂散点云进行区分,FPFCH 作为点云特征的表示方式可以广泛地应用于彩色点云聚类的判别中。FPFCH 特征描述子由包含扩展 FPFH 的表征点云形状的分量和色调 H 的统计分量两部分组成。

其中,扩展 FPFH 是点特征直方图[10](Point Feature Histogram,PFH) 的一种简化形式,PFH 表示的是点云中每一点和该点的邻域点构成的点对以及它们的估计法线之间的相互作用关系,该算法计算量大,复杂度高,且最终结果并非为针对全局的特征描述;而扩展 FPFH 则是利用整个点云聚类进行特征计算,算法将点云的聚类中心与点云表面其他所有点之间构成的的点对作为计算单元,具有较低的复杂度,并提供了点云目标识别的全局特征描述。

图 2 为扩展 FPFH 分量的计算示意图,其中,三维点云数据的聚类中心为 c 点,在 c 点上定义一个固定的局部坐标系,如公式(2)所示:

$$\begin{cases} u=n_c \\ v=u\times\dfrac{(p_kc)}{\|p_kc\|_2} \\ w=u\times v \end{cases} \tag{2}$$

除 c 点外点云聚类中的第 k 个点记为 p_k,且该点在点云表面的单位法向量记为 n_k,计算法线 n_c 和 n_k 之间的偏差,并将夹角转化为 uvw 坐标系下的角度分量,如公式(3)所示:

$$\begin{cases} \alpha=\arccos(v\cdot n_k) \\ \phi=\arccos\left(u\cdot\dfrac{p_kc}{\|p_kc\|_2}\right) \\ \theta=\arctan(w\cdot n_k, u\cdot n_k) \end{cases} \tag{3}$$

将计算得到的聚类中心 c 和物体表面其他所有点之间的特征参数(α,ϕ,θ)称为简化的点特征直方图[8](Simple Point Feature Histogram,SPFH)。之后,使用表面其他所有点的 SPFH 值来计算聚类中心 c 的扩展 FPFH,如公式(4)所示:

$$\mathrm{FPFH}(c)=\mathrm{SPFH}(c)+\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\frac{1}{\omega_k}\cdot\mathrm{SPFH}(p_k) \tag{4}$$

式中:权重 ω_k 表示聚类中心 c 和物体表面其他所有点 p_k 之间的距离。扩展 FPFH 将三个特征值 α,ϕ,θ 平均分割为 45 个参数区间,将 α,ϕ,θ 的特征直方图分别计算然后合并为一个 135 元素的特征向量。

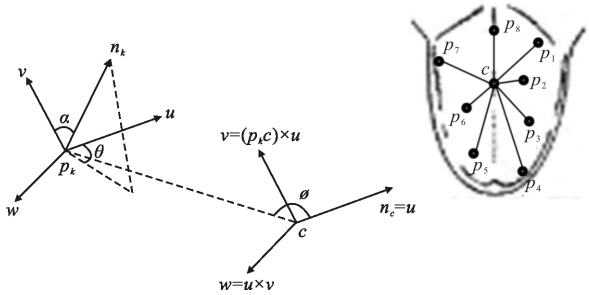


图 2 扩展 FPFH 分量的计算示意图

Fig.2 Diagram of extended FPFH component calculation

色调 H 的统计分量表示的是点云聚类在色调 H 空间的统计直方图,HSV 空间相较于 RGB 空间能更好的体现人对颜色的认知和判断能力,也能更明显的区别舌体点云与其它杂散点云在颜色特征上的差异。首先将点云颜色特征的 RGB 空间转换为 HSV 空间,之后再对色调 H 的统计直方图进行计算,如公式(5)所示:

$$H(h)=\frac{n_h+n_{h+1}}{N}, h=0,2,\cdots,L-1 \tag{5}$$

式中:h 代表点云色调 H 分量的特征取值;L 是 H 分量特征取值的范围,由于色调 H 是角度分量,取值范围为 0°~359°,此处设置 L 的值为 359;N 是点云总数;n_h 是点云中特征值为 h 的点云的个数;n_h+n_{h+1} 代表相邻色调特征值的点云个数和,目的是缩短特征

值的取值范围并减少后续特征值相似度的计算量。

在 FPFCH 特征直方图中,横坐标(0,135]范围内是扩展 FPFH 的表征点云形状的分量,(135,315]范围内是色调 H 颜色空间的统计分量,根据公式(4),(5)得到 FPFCH 特征直方图的表达式,如公式(6)所示:

$$\mathrm{FPCFH}=\begin{cases}\mathrm{FPFH}(c) & (0,135]\\ \mathrm{H}(c) & (135,315]\end{cases} \tag{6}$$

图 3 是从四组不同的初始舌面点云中人工直接提取的四组舌体点云数据和四组脸部杂散点云数据的 FPFCH 特征值在横坐标(0,315]上的曲线。图中,不同的舌体点云数据的扩展 FPFH 的分量和色调 H 的颜色统计分量是相似的,因此在该区间内不同的舌体点云具有相似的 FPFCH 特征曲线,且不受舌体位姿的影响。而四组舌体点云和四组脸部杂散点云在坐标(0,135]范围内虽然具有不同的扩展 FPFH 特征值,但是特征值的分布具有一定的相似性,而对于坐标(135,315]范围内色调 H 的特征值,舌体点云和脸部杂散点云无论在特征值的大小或者分布上均差异较大,所以采用 FPFCH 特征值能更好地对舌体点云和脸部杂散点云进行区分。

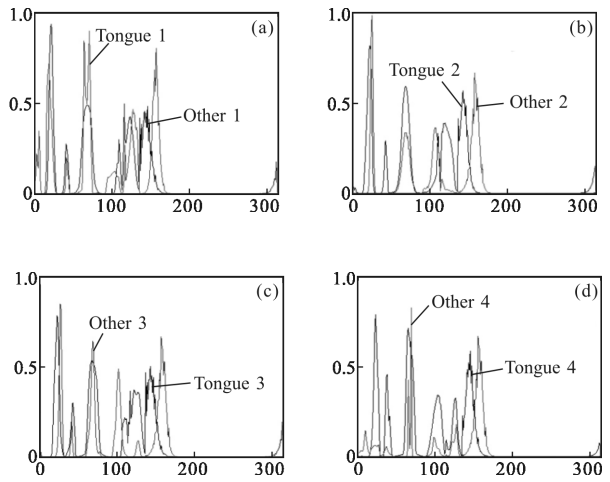


图 3 不同舌体点云和脸部杂散点云的 FPFCH 特征直方图曲线

Fig.3 FPFCH curves of different tongue point clouds and face spurious point clouds

必须建立舌体点云 FPFCH 特征值的标准值才能区分聚类后的点云是否为舌体点云,为了保证舌体点云提取的准确性,采用人工法对 50 组舌体点云数据进行舌体分割,并求取各个舌体的 FPFCH 特征值,将求得的特征值的平均值作为舌体 FPFCH 的标准值,如图 4 所示。

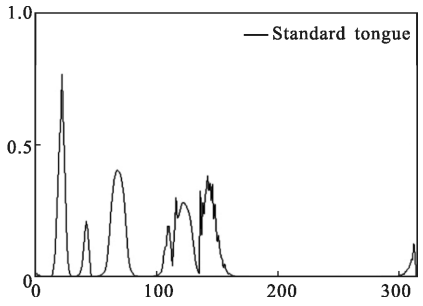


图 4 标准舌体点云 FPFCH 特征直方图曲线

Fig.4 FPFCH curves of standard tongue point cloud

通过直方图欧氏距离的相似性度量法计算不同点云聚类的 FPFCH 特征值与舌体标准 FPFCH 特征值的相似度,计算方法如公式(7)所示:

$$D(S,M)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(1-\frac{|s_i-m_i|}{\max(s_i,m_i)}\right) \tag{7}$$

式中:s_i 和 m_i 分别为归一化后的 FPFCH 特征直方图参数;D 为直方图的相似度。那么,通过比较点云聚类与标准舌体相似度的大小,可以判断该点云聚类是否为舌体点云,并将其从初始点云中提取出来。基于 FPFCH 特征值的欧氏聚类分割算法的具体步骤如下:

Input:初始三维点云数据 P;

Output:舌体三维点云数据 O;

Step1:对输入的点云数据 P 创建 kd-tree,并设置一个空的聚类 C 和样本点云序列 Q;

Step2:将 P 中的任意一点 p_i 作为聚类中心添加至样本点云序列 Q 中,以 p_i 为圆心,设置的距离阈值 L 为半径,搜索该范围内的邻域点集合 P_i^k,检测 P_i^k 中的点是否经过上述半径搜索处理,并将没有被处理的点添加至 Q 中继续进行邻域点搜索。若 Q 中的数据都经过处理,则将 Q 赋予聚类 C 并将其清空。之后在未被处理的点云中任选一点作为聚类样本点并重复上述操作,直到点云数据 P 被分割为多个点云聚类 p_i;

Step3:根据公式(6)计算分割得到的每个点云聚类 P_i 的 FPFCH 特征值参数,并根据公式(7)计算每个点云聚类与标准舌体特征值相似度的大小;

Step4:对计算得到的相似度进行排序,相似度最大的点云聚类 P_i 即为舌体的三维点云数据 O。

从图 1、图 5 可见,采用基于 FPFCH 特征值的欧式聚类算法可以有效地剔除杂散点云，完成舌体分割，且与基于 FPFH 特征值的舌体分割相比具有更高的准确性,如图 6 所示,当舌体点云与脸部杂散点云在 FPFH 特征值上相差不大时，脸部杂散点云与标准舌体的 FPFH 特征值相似度更高,可能会出现提取错误的情况。因此,只有采用基于 FPFCH 特征值的欧式聚类算法才能够保证正确的分割结果。

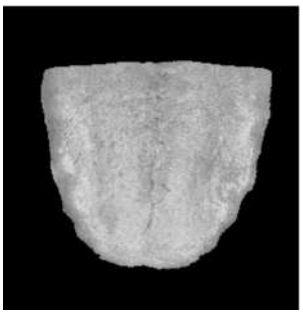
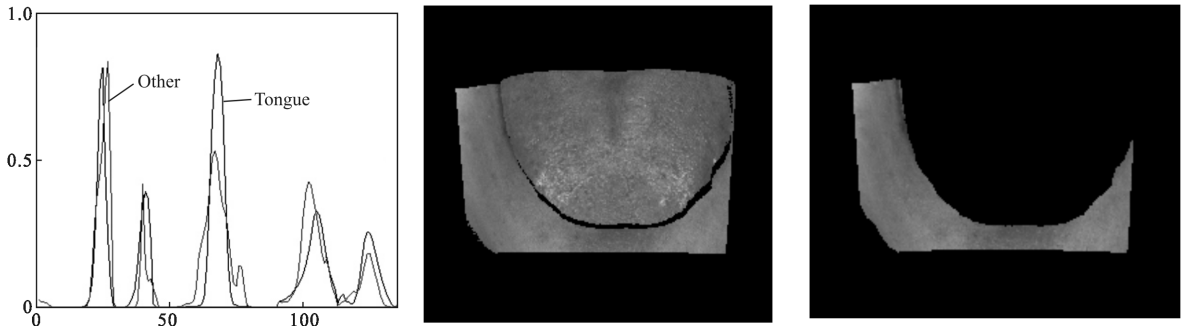


图 5 舌体彩色三维点云数据的显示

Fig.5 Display of the 3D color point cloud data of tongue



(a) 舌体点云和脸部杂散点云的 FPFH 特征直方图曲线

(b) 初始舌面彩色三维点云数据

(c) 基于 FPFH 特征值分割

(a) FPFH curves of tongue point clouds and face spurious point clouds

(b) Initial 3D color point cloud data of tongue

(c) Point cloud data segmentation based on FPFH

图 6 基于 FPFH 特征值的欧式聚类舌体分割的失败结果示例

Fig.6 An example of the failure of tongue Euclidean cluster segmentation based on FPFH

2 基于法线区域分割的舌裂纹提取

在进行舌裂纹点云提取之前,首先需要对舌体点云进行平滑。由于提取的舌体点云通常包括几万个数据点,且舌面的曲率变化较为复杂,舌面上的特征极不规则，为了提高拟合精度，保留舌面上的细微特征,文中采用滑动最小二乘法[11](Moving Least-Square, MLS)进行点云拟合。其中,决定拟合精度的权函数采用高斯权函数,如公式(8)所示：

$$w(x-x_i)=e^{-\frac{(x-x_i)^2}{h^2}} \tag{8}$$

式中:h 为反映邻域点间期望距离的固定参数,通过改变 h 的大小，可以调整在局部域内的点云平滑效果。具体来说，较小的 h 值会使高斯权函数衰减更快,拟合结果更能保留点云的局部特征;较大的 h 值会使点云拟合更具全局性，但会忽略点云表面的尖锐、震荡等特征。因此,通过大量实验,为了充分保留舌裂纹特征点云,应将 h 值设置在 1~1.2 范围内。

由于舌裂纹主要分布于舌中区域，且舌边点云曲率较大、杂散点较多,为了不影响舌裂纹的提取,需要将舌边点云部分进行滤除,根据中医学规定,舌中区域约占舌体总宽度的一半，通过计算得到舌体点云数据的宽度范围$[x_{min},x_{max}]$,提取$[(x_{max}-x_{min})/4,3(x_{max}-x_{min})/4]$范围内的点云数据作为舌中区域；对处理后的点云建立 kd-tree,并确定 K 邻域范围,根据主成分分析法,对构造 K 邻域的点云数据的法向量以及曲率值进行计算[12],根据计算结果,进行点云分割。算法的具体步骤如下：

Input:舌体三维点云数据 O;

Output:舌裂纹三维点云数据 I;

Step1:设置空的种子点序列 Q,将曲率最小的点作为初始种子点，并将其加入到序列 Q 中，设定法线夹角阈值 T_N 以及曲率阈值 K_N,计算邻域点 j 与当前种子点的法线夹角 T_j,若 $T_j<T_N$,则将邻域点 j 添加到当前区域，将曲率值小于 K_N 的邻域点加入序列

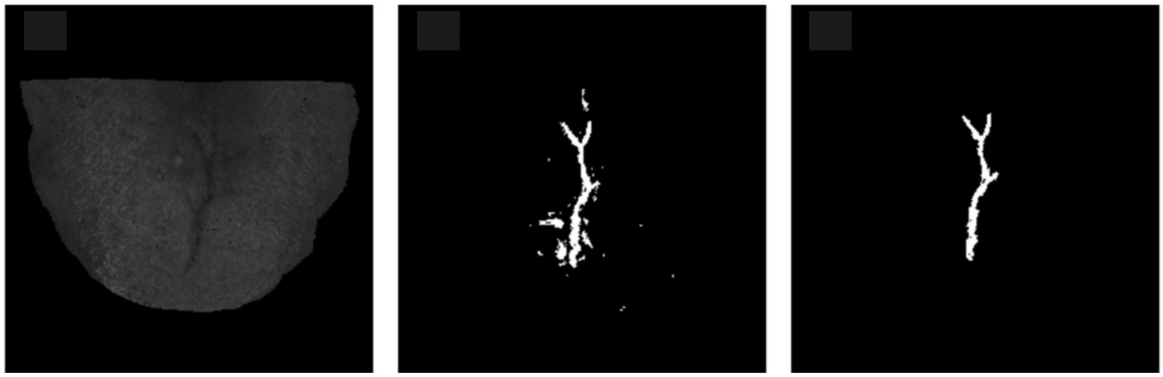
Q,删除当前种子点,迭代执行上述步骤,直到所有点云属于不同区域;

Step2:剔除舌面上舌苔、舌质等平滑部分的大量点云,若舌体点云总数为 m,设置点云个数的阈值参数 $M=m/2$,统计每个聚类的点云个数,将点云个数大于 M 的聚类剔除;

Step3:保留的点云为舌裂纹点云和其他小部分杂散点云,通过上述欧氏聚类分割法对保留点云进行腐蚀和膨胀,设置较小的距离阈值 L_1 进行点云分割,通过先验知识剔除点云个数较少的聚类;再设置较大的距离阈值 L_2,再次进行点云分割并获取新的点云聚类。若只剩一个点云聚类,则该聚类即为舌裂纹点云 I;若分割后还有多个点云聚类,转 Step4;

Step4:统计每个聚类的点云个数 n 和聚类中每个点的曲率值 k_i,根据公式 $\bar{k}=\sum_{i=1}^{n}|k_i|/n$ 计算每个聚类的平均曲率,设置曲率阈值 K_c,若聚类的平均曲率 $\bar{k}>K_c$,则该点云聚类为舌裂纹点云 I。

从图 7 可见,对具有舌裂纹特征的舌体彩色三维点云数据,采用文中提出的基于法线区域分割的算法可以准确地提取舌裂纹特征点云。与通过二维舌图提取舌裂纹相比,采用上述舌裂纹提取算法,能够获取舌裂纹的三维数据,更有利于计算裂纹长度、深度等量化指标,且二维舌图需要人工调控保证舌裂纹提取效果,与文中的提取算法相比略显繁琐。



(a) 舌体彩色三维点云数据
(a) 3D color point cloud data of tongue

(b) 基于法线夹角阈值分割后的点云数据
(b) Segmentation of point cloud data by distinguishing the normal angle threshold

(c) 腐蚀和膨胀后的点云数据
(c) Corrosion and expansion of point cloud data

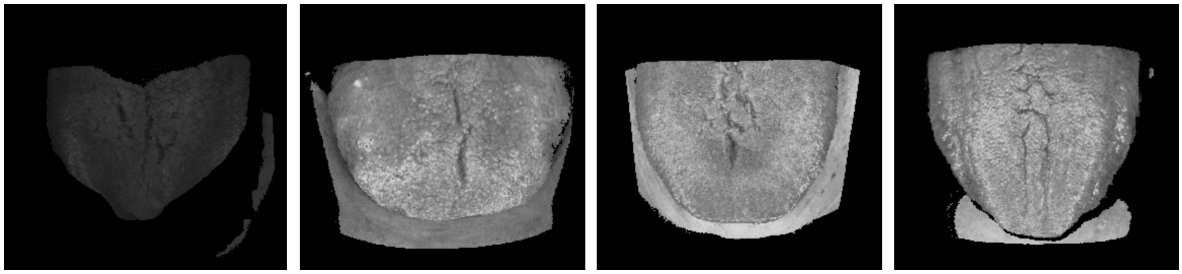
图 7 基于法线区域分割的舌裂纹提取结果

Fig.7 Normal region segmentation of tongue crack extraction results

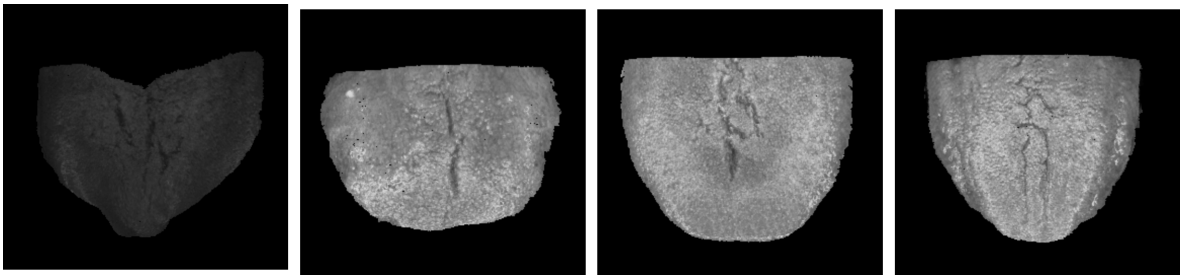
3 实验结果和分析

文中的实验数据是由 200 组采集的舌面三维点云数据组成,图 8 所示为四组具有舌裂纹特征的点云数据进行舌体分割并提取舌裂纹点云的主要过程的示意图,所有采集的舌面彩色三维点云数据均来自于天津中医药大学附属医院。

将采用人工法和文中提出算法提取的舌体点云和舌裂纹点云在 x,y,z 三轴上的点云距离进行比较,由于人工法对点云的提取会受到人为因素的影响,因此将三轴点云距离相差 1 mm 内的提取结果作为正确提取。从表 1 可以看出,使用文中提出的基于 FPFCH 特征值的欧式聚类分割算法对这 200 组初始舌面彩色三维点云数据进行舌体分割,获取舌体点

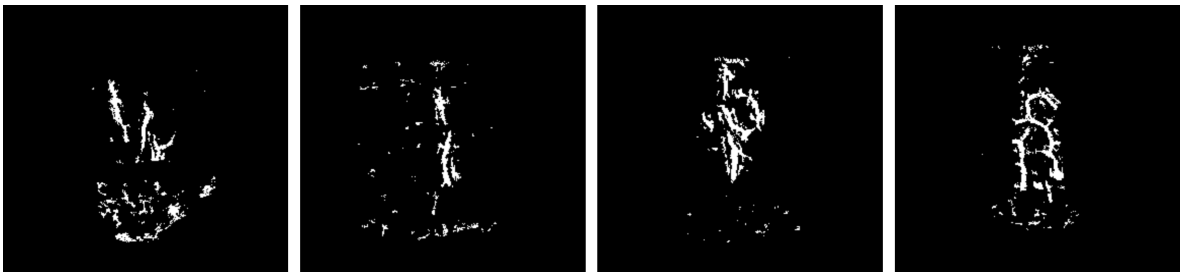


(a) 初始舌面彩色三维点云数据
(a) Initial 3D color point cloud data of tongue



(b)基于 FPFCH 特征值的欧式聚类分割后的舌体三维点云数据

(b) 3D point cloud data of the tongue after segmentation of Euclidean cluster based on FPFCH eigenvalue



(c) 基于法线夹角阈值分割后的舌面三维点云数据

(c) 3D point cloud data of tongue segmentation by distinguishing the normal angle threshold

(d) 舌裂纹三维点云数据

(d) 3D point cloud data of tongue crack

图 8 舌体分割及舌裂纹提取的分步结果示例

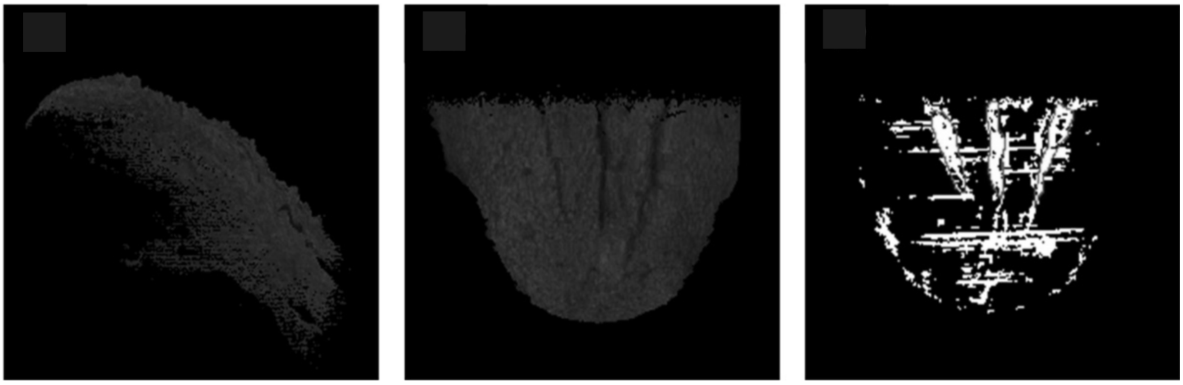
Fig.8 Examples of the results of tongue segmentation and tongue crack extraction

云数据的正确分割比例为 100%。采用基于法线区域分割的方法对包含舌裂纹特征的 91 组舌体点云进行舌裂纹提取，获取舌裂纹三维点云数据的正取提取比例为 89%，如图 9(a)所示，被测人员在采集初始舌面点云的过程中舌体可能出现剧烈抖动状况，导致舌体点云出现大幅度的波动，结合图 9(b)、(c)，算法虽然能够提取出舌裂纹特征点云，但会受到大量杂散点云的影响。而采用二维舌图的图像处理方式，舌体分割的正确比例约为 95%，舌裂纹提取的正确比例约为 80%，由此可见，采用文中的舌面彩色三维点云处理算法可以更为准确地完成舌体分割和舌裂纹提取，且最终能够获得舌裂纹的三维点云数据。

表 1 舌体分割和舌裂纹提取的结果统计表

Tab.1 Statistics of tongue segmentation and crack extraction results

	Processed point cloud number /group	Correctly processed point cloud number /group	Correct detection proportion
Tongue segmentation	200	200	100%
Tongue crack extraction	91	81	89%



(a) 舌体彩色三维点云数据(侧面)
(a) 3D color point cloud data of tongue(side)

(b) 舌体彩色三维点云数据(正面)
(b) 3D color point cloud data of tongue(front)

(c) 基于法线夹角阈值分割后的点云数据
(c) 3D point cloud data segmentation by distinguishing the normal angle threshold

图 9 舌裂纹提取失败结果示例

Fig.9 Examples of the failure of tongue crack extraction

4 结 论

文中首先将舌体点云与脸部、嘴唇等杂散点云进行欧式聚类分割，再通过分割后的点云聚类与标准舌体点云在 FPFCH 特征值上的相似度大小对舌体点云进行提取；然后通过法线夹角阈值判别剔除舌苔、舌质等平滑点云，再通过欧式聚类分割法进行点云的腐蚀和膨胀，最终提取出舌裂纹三维点云数据。实验结果表明，进一步提高舌面初始点云的采集速度有利于舌体点云的数据处理，文中提出的算法为舌面彩色三维点云的数据处理提供了较为可靠的技术支持，舌体分割、舌裂纹提取只是舌面彩色三维数据研究的开端，在提取出舌裂纹点云数据后还要进一步进行舌裂纹长度、深度等相关尺寸的计算，再结合瘀斑、点刺以及舌面的颜色信息等舌面特征，才能够为中医舌诊提供更可靠的量化依据，促进中医舌诊进一步向客观化迈进。

参考文献：

[1] Cai Yiheng, Zhang Linlin, Sheng Nan. 3D reconstruction of tongue surface based on photometric stereo method [J]. ***Journal of Electronics & Information Technology***, 2015, 37 (11): 2565-2570. (in Chinese)

[2] Shen Lansun, Cai Yiheng, Liu Changjiang. Recent advances in TCM tongue manifestation information acquisition and analysis[J]. ***World Science and Technology/Modernization of Traditional Chinese Medicine and Material Medical***, 2007, 9(5): 97-101. (in Chinese)

[3] Qi Zhen, Xu Jiatuo, Zhang Zhifeng. Progress in clinical application of tongue inspection objectivity based on digital image processing technique[J]. ***China Journal of Traditional Chinese Medicine and Pharmacy***, 2015 (8): 2849-2851. (in Chinese)

[4] Pang B, Zhang D, Wang K. The bi-elliptical deformable contour and its application to automated tongue segmentation in Chinese medicine [J]. ***IEEE Transactions on Medical Imaging***, 2005, 24(8): 946.

[5] Liu L L, Zhang D. Extracting tongue cracks using the wide line detector [C]//International Conference on Medical Biometrics. Springer-Verlag, 2008: 49-56.

[6] Lv H J, Cai Y H, Guo S. 3D reconstruction of tongue surface based on photometric stereo [C]//ICSP2012 Proceedings, 2012: 1668-1671.

[7] Wang Peng, Shi Ruize, Zhong Xiaofeng. 3D scanning measurement system based on double-line projection and the line-plane constraint [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2017, 46(4): 0427001. (in Chinese)

[8] Zhao T, Li H, Cai Q, et al. Point cloud segmentation based on FPFH features [C]//Proceedings of 2016 Chinese Intelligent Systems Conference, 2016, 405: 978-981.

[9] Rusu R B. Semantic 3D object maps for everyday manipulation in human living environments [J]. ***KI - Künstliche Intelligenz***, 2010, 24(4): 345-348.

[10] Rusu R B, Blodow N, Beetz M. Fast point feature histograms (FPFH) for 3D registration[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2009: 1848-1853.

[11] Wu Yingchun, Cao Yiping, Xiao Yanshan. On-line three-dimensional inspection using randomly phase-shifting fringe based on least-square iteration [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2014, 22(5): 1347-1353. (in Chinese)

[12] Yuan Xiaocui, Wu Lushen, Chen Huawei. Normal estimation of scattered point cloud with sharp feature [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2016, 34(10): 2581-2588. (in Chinese)