

# 激光与光电子学进展

## 基于形态特征提取的中医齿痕舌客观化研究

杨佳欣<sup>1\*\*</sup>, 韩东<sup>2</sup>, 董新明<sup>3</sup>, 唐瑞弦<sup>4</sup>, 徐向阳<sup>4</sup>, 罗静静<sup>5,6</sup>, 周鹏<sup>1,4,6\*</sup>

<sup>1</sup>天津大学医学工程与转化医学研究院, 天津 300072;

<sup>2</sup>临沂市第三人民医院, 山东 临沂 276004;

<sup>3</sup>天津康复疗养中心, 天津 300191;

<sup>4</sup>天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;

<sup>5</sup>复旦大学工程与应用技术研究院, 上海 200043;

<sup>6</sup>季华实验室, 广东 佛山 528200

**摘要** 针对目前中医齿痕舌诊断缺乏客观化和量化指标的问题, 提出齿痕舌多指标客观化判别检测方法, 以实现辅助中医临床对齿痕舌的综合性检测。首先对所采集到的舌象图片提取感兴趣的齿痕区域, 并进行区域二值化预处理; 然后使用 Graham 扫描法提取齿痕凹陷特征并通过支持向量机算法对齿痕有无进行分类判别; 对于齿痕数量, 通过改进的道格拉斯-普克算法拟合齿痕边缘曲线, 将曲线满足条件的极小值个数作为齿痕个数; 最后结合齿痕数量与齿痕深度对齿痕程度进行判别。该算法对齿痕有无的判别正确率为 80.86%, 对齿痕数量的检测正确率为 80.00%, 对齿痕程度的检测正确率为 89.63%。实验结果表明, 该算法能较好地实现齿痕舌的综合检测, 并提供相应客观化参数辅助中医临床诊疗。

**关键词** 图像处理; 齿痕舌; Graham 扫描法; 道格拉斯-普克算法; 支持向量机

中图分类号 TP391.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1117001

## Objectification of Tooth-Marked Tongue in Chinese Medicine Based on Morphological Feature Extraction

Yang Jiaxin<sup>1\*\*</sup>, Han Dong<sup>2</sup>, Dong Xinming<sup>3</sup>, Tang Ruixian<sup>4</sup>, Xu Xiangyang<sup>4</sup>,

Luo Jingjing<sup>5,6</sup>, Zhou Peng<sup>1,4,6\*</sup>

<sup>1</sup>Academy of Medical Engineering and Translational Medicine,  
Tianjin University, Tianjin 300072, China;

<sup>2</sup>Linyi Third People's Hospital, Linyi 276004, Shandong, China;

<sup>3</sup>Tianjin Rehabilitation Center, Tianjin 300191, China;

<sup>4</sup>School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering,  
Tianjin University, Tianjin 300072, China;

<sup>5</sup>Academy for Engineering and Technology, Fudan University, Shanghai 200043, China;

<sup>6</sup>Ji Hua Laboratory, Foshan 528200, Guangdong, China

**Abstract** Objectified and quantified indicators in the diagnosis of tooth-marked tongue in traditional Chinese medicine (TCM) are lacking. Thus, an algorithm for identifying and detecting multiple objectified indicators of tooth-

收稿日期: 2021-08-04; 修回日期: 2021-08-27; 录用日期: 2021-09-10

基金项目: 国家自然科学基金地区联合项目(U1913216)、广东省重点领域科研计划季华实验室独立资助项目(X190051TB190)、上海市市级重大专项“国际人类表型组季华(一期)”(2017SHZDZX01)

通信作者: \*zpzp@tju.edu.cn; \*\*1561579689@qq.com

marked tongue was proposed to aid the clinical comprehensive detection of tooth-marked tongue in TCM. The regions of interest of the tooth marks were extracted from the obtained tongue image, and a region binarization pretreatment was performed. The Graham scan method was used to extract the characteristics of the tooth marks, and the support vector machine algorithm was used to classify and discriminate the presence or absence of tooth marks. The improved Douglas-Peucker algorithm was used to fit the edge curve of the tooth marks, and the minimum number of curves satisfying the conditions was set as the number of tooth marks. Finally, the degree of tooth marks was determined by combining the number and depth of tooth marks. The algorithm has a correct rate of 80.86% in judging the presence or absence of tooth marks, 80.00% in detecting the number of tooth marks, and 89.63% in detecting the degree of tooth marks. Experimental results show that the proposed algorithm can realize the comprehensive detection of tooth-marked tongue and provide the corresponding objective parameters to assist the clinical diagnosis and treatment of TCM.

**Key words** image processing; tooth-marked tongue; Graham scanning method; Douglas - Peucker algorithm; support vector machine

## 1 引言

舌诊是传统中医“望、闻、问、切”诊断体系当中“望诊”的重要组成部分。早在公元前3~5世纪《内经》中就已经有查舌辩证的记载。但是传统中医舌诊受医生个人经验和主观因素的影响,存在误判率较高,评判标准不一等缺点。而关于舌诊的中医理论十分庞杂,也限制了传统舌诊的发展<sup>[1]</sup>。

随着中医药现代化发展,利用信息技术探索舌诊指标已经得到广泛而深入的研究<sup>[2]</sup>,其中图像处理技术由于其在西医学图像处理中的广泛应用,对于中医图像的处理有重要的参考意义<sup>[3]</sup>。图像处理技术作为一种标准客观化的研究方法,可以通过对舌象图片进行分析和相应的处理,得到客观且准确的舌色、苔色、舌形等舌象信息结果。目前对于舌象的研究成果主要集中在舌色和苔色上<sup>[4]</sup>,然而中医舌诊当中舌形同样也蕴含着大量的人体健康信息。《辨舌指南》中说:“辨舌欲知脏病,当先视其舌形”,所以对于舌形信息的提取也同样重要。齿痕舌是中医舌诊舌象中舌形的一种,常见于水肿、贫血、慢性肾疾病患者,齿痕舌人群体质常表现为“脾虚湿盛,气血两虚”。所以齿痕舌对于一些疾病特别是脾脏疾病的诊断具有一定的临床意义<sup>[5]</sup>。

目前对齿痕舌的研究多集中于齿痕舌图像的分割,对齿痕有无和程度的判别多是通过齿痕数量来衡量。钟少丹等<sup>[6]</sup>通过使用基于凹点检测的齿痕舌识别方法,提取齿痕舌与外围凸包之间的间隙,通过阈值确定齿痕间隙,将最终的间隙数量作为齿痕个数,并通过齿痕个数对齿痕程度进行衡量。朱穆朗玛等<sup>[7]</sup>则是将齿痕舌边缘曲线通过道格拉斯-

普克(DP)算法提取关键顶点,删除冗余顶点,将最后拟合曲线的波峰点个数作为齿痕个数。现有的方法直接通过舌体形态对齿痕舌边缘进行检测,因此对齿痕印记明显但不直接呈现于舌体边缘的齿痕舌检测效果较差,也导致齿痕数量的检测不够准确。而且李敏<sup>[8]</sup>指出病理性齿痕舌研究不仅需要对齿痕有无进行判别,还需要对齿痕舌的程度进行辨别,对齿痕舌程度的判别是对齿痕数量、齿痕的宽度和深度信息的综合检测。因此对齿痕舌的综合检测需要提取更多的有效特征。在这一背景下,本文结合传统中医文献和数字图像处理技术,通过对齿痕舌的齿痕边缘进行一系列形态特征提取,可以实现对齿痕有无、齿痕数量和齿痕程度的综合检测。

## 2 图像处理

### 2.1 图像处理过程

数字图像处理技术是中医舌面象客观化检测中的关键环节。本文提出的齿痕舌综合检测算法的图像处理部分包括:1)图像预处理,包括对舌体图像的分割和对舌象感兴趣区域即舌体齿痕边缘的提取;2)图像特征提取,包括对舌体齿痕边缘的凸包缺陷特征提取和边缘曲线的特征提取。舌体图像经过图像预处理后,通过基于Graham扫描法的凸包缺陷分析对齿痕有无进行判别,判别为齿痕舌之后再对边缘曲线进行压缩和特征提取,得到齿痕的数量和深度,最后对齿痕程度进行判别并输出结果。算法流程图如图1所示。

### 2.2 图像预处理

本文所有舌图像均来自天中依脉公司云端服务器的标准光源下的舌面象图片,整体受外界光线

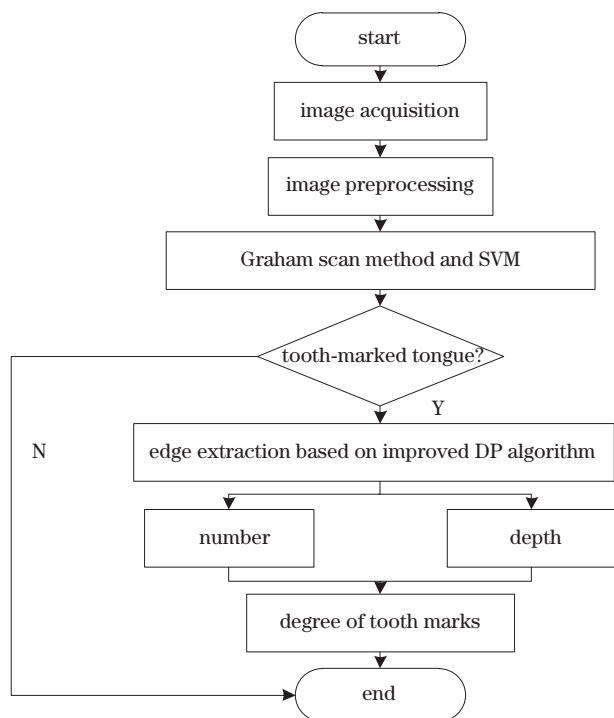


图 1 齿痕舌分析算法功能流程图

Fig. 1 Function flow chart of tooth-marked tongue analysis algorithm

的影响较小。舌体图像的预处理主要分为三步：

1) 将舌体从面象图片中分割。首先对人脸图像进行基于 MTCNN 网络<sup>[9]</sup>的舌象检测算法,对舌体进行定位后使用 OpenCV 库中的 Grabcut 图像分割算法<sup>[10]</sup>对舌体分割,得到背景为纯黑色的分割后

的舌体图像[图 2(a)]。

2) 将齿痕区域粗提取。首先将舌体图像进行灰度化和高斯滤波<sup>[11]</sup>,然后将舌体图像裁剪为包含舌体的最小矩形[图 2(b)],因为正常成年人牙齿数量为 28~32 颗,口腔下排的牙齿数量为 14~16 颗,基本呈半圆状包围舌体,所以牙齿的宽度约为舌宽度的 0.12,为了得到舌体边缘存在齿痕的区域,以最小矩形  $R_{min}$  宽度大小的 0.12 为单位,对图像逐行遍历。根据齿痕区域灰度值与正常舌体灰度值的差异进行齿痕区域粗提取[图 2(c)],提取的齿痕边缘区域满足图像精度的要求。

3) 齿痕区域二值化。将原始图像转换到 HSV 颜色空间<sup>[12]</sup>,提取 V 通道分量,然后再转换为灰度空间。对图像对比度进行调整,增强齿痕阴影与舌体的对比度。将二值化阈值设置为整幅图像灰度值的平均值,

$$\sigma_s = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n G(i, j)}{mn}, \quad (1)$$

式中:  $\sigma_s$  是二值化的阈值;  $G(i, j)$  是坐标为  $(i, j)$  像素点的灰度值;  $m$  和  $n$  是图像的高度和宽度。

接着对二值化舌象[图 2(d)]进行开闭运算,去除齿痕区域内部较小的连通域和孤立的像素点<sup>[13]</sup>。开闭运算之后的舌象[图 2(e)]内部存在孔洞,这会对其后的齿痕舌分析产生干扰,因此进一步对图 2(e)进行轮廓查找并填充[图 2(f)]。

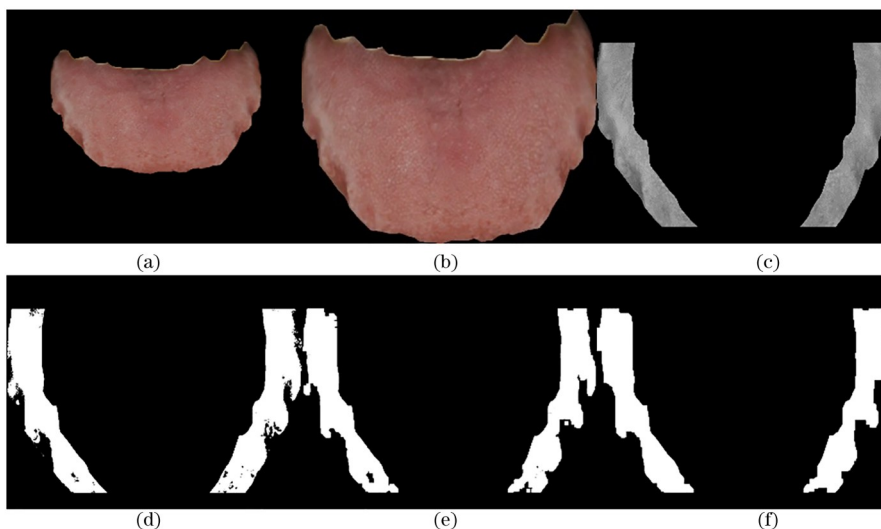


图 2 齿痕舌图像预处理过程。(a)分割以后的舌体图像;(b)包含舌体的最小矩形图;(c)齿痕部分提取图像;

(d)齿痕区域二值化;(e)开闭运算以后的图像;(f)轮廓填充以后的图像

Fig. 2 Preprocessing process of tooth-marked tongue image. (a) Tongue image after segmentation; (b) smallest rectangular containing tongue; (c) tooth mark part extraction image; (d) tooth mark region binarization; (e) image after opening and closing operation; (f) image after contour filling

### 3 基于 Graham 扫描法的齿痕舌判别算法

凸包是一种常见的对物体的轮廓进行分析的几何学方法,可以通过构造凸包的方法对齿痕舌的形态进行分析。Graham 扫描法是通过轮廓上的一个点,对所有轮廓点进行遍历查找的一种凸包构成方法,在 C++ 环境下具体实现流程如下<sup>[14]</sup>。

1) 初始化设置。输入所有的轮廓点,然后将左下角的轮廓点作为起始点  $P_0$ ,然后按照逆时针方向,对所有的点进行编号,分别为  $P_0, P_1, P_2, \dots, P_n$ 。

2) 构建栈,并在最开始将  $P_0, P_1, P_2$  压入栈中。

3) 将  $P_i$  (第一次循环为  $P_2$ )、 $P_{i+1}$  和  $P_{i-1}$  构成  $\angle P_{i-1}P_iP_{i+1}$ 。

4) 判断  $\angle P_{i-1}P_iP_{i+1}$  的方向和大小,如果  $\angle P_{i-1}P_iP_{i+1}$  的方向向右,或者大小为  $0^\circ$ ,则将  $P_{i+1}$  压入栈中;如果  $\angle P_{i-1}P_iP_{i+1}$  的方向向左,则将  $P_i$  出栈,压入  $P_{i+1}$  作为新的  $P_i$ ,重复进行步骤 3 和步骤 4。

5) 判断  $P_{i+1}$  是否为结束的点  $P_n$ ,如果是,则算法结束;如果不是,将  $P_{i+1}$  作为新的  $P_i$ ,返回步骤 3 继续进行算法。

对预处理以后的舌象[图 2(f)]进行轮廓遍历,对每一个轮廓通过 Graham 扫描法提取凸包,并对所得到的凸包进行凸包缺陷分析<sup>[15]</sup>,可以得到这一轮廓对应凸包的第  $n$  个凹陷的起始点坐标  $(x_n, y_n)$ 、终点坐标  $(x_{n+1}, y_{n+1})$ 、凹陷距离凸包最远的点  $(x'_n, y'_n)$  和凹陷到最远点  $(x'_n, y'_n)$  的近似距离  $D_{dp}$ 。通过凹陷的这些特征结合齿痕区域的大小对可能是齿痕区域的凹陷进行初步筛选,以去除不符合齿痕条件的凹陷,

$$\begin{cases} D_{dp} > 1 \\ 3 < |y_{n+1} - y_n| < R_{minh} \cdot 0.6 \\ x_n < x' < x_{n+1} \parallel x_{n+1} < x' < x_n \\ y_n < y' < y_{n+1} \parallel y_{n+1} < y' < y_n \end{cases}, \quad (2)$$

式中:  $R_{min}$  指包含舌体的最小矩形[图 2(b)],并用  $h$  和  $w$  表示矩形的高度和宽度。

满足式(2)时的凹陷被认为是可能的齿痕区域,并将符合条件的凹陷设置属性集  $B_s = [X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6]$ ,其中:

$$X_1 = \frac{D}{D_{dp}}, \quad (3)$$

$$X_2 = \frac{D}{R_{minh}}, \quad (4)$$

$$X_3 = \frac{D}{R_{minw} \cdot 0.12}, \quad (5)$$

$$X_4 = \frac{S_{xor}}{S_\Delta}, \quad (6)$$

$$X_5 = \frac{100 \cdot D \cdot D_{dp}}{R_{minh} \cdot R_{minw}}, \quad (7)$$

$$X_6 = \begin{cases} 1, & \Delta y > 0, \Delta x > 0, \Delta y > \Delta x \\ 2, & \Delta y > 0, \Delta x < 0, \Delta y > |\Delta x| \\ 3, & \Delta y > 0, \Delta x < 0, \Delta y \leq |\Delta x| \\ 4, & \Delta y < 0, \Delta x < 0, |\Delta y| < |\Delta x| \\ 5, & \Delta y > 0, \Delta x > 0, |\Delta y| \geq |\Delta x| \\ 6, & \Delta y > 0, \Delta x > 0, |\Delta y| > \Delta x \\ 7, & \Delta y > 0, \Delta x > 0, |\Delta y| \leq \Delta x \end{cases}, \quad (8)$$

式中:  $D = \sqrt{(x_n - x_{n+1})^2 + (y_n - y_{n+1})^2}$ ;  $S_\Delta$  指  $(x_n, y_n)$ 、 $(x'_n, y'_n)$  和  $(x_{n+1}, y_{n+1})$  三点围成的三角形面积;  $S_{xor}$  指这个三角形与舌边缘轮廓[图 2(f)]进行异或运算后的图形面积;  $\Delta x = x'_n - \frac{x_n + x_{n+1}}{2}$ ;  
 $\Delta y = y'_n - \frac{y_n + y_{n+1}}{2}$ 。

选择 208 张齿痕舌图片的凹陷和 204 张非齿痕舌的边缘作为训练集,将计算得到的基本属性集  $B_s$  输入支持向量机(SVM)中得到训练模型。通过执行训练好的模型判别舌象边缘的凹陷是否属于齿痕,当舌象判断为齿痕舌后,做后续的齿痕舌分析。

### 4 基于改进的 DP 算法提取齿痕区域边缘特征

#### 4.1 DP 算法

DP 算法是一种广泛应用于数据压缩和地理测绘行业的经典抽稀算法,既可以达到精简数据减少运算量的目的,又可以在此过程中尽可能保留曲线的几何形状。DP 算法的实现过程如下<sup>[16]</sup>: 1) 将曲线的首尾端点连成一条直线; 2) 计算曲线上所有的点到这条直线的距离; 3) 选取到直线距离最大的点与阈值进行比较,如果大于阈值,则记录该点,否则就舍弃两端点之间所有的点; 4) 将保留的点作为分段点,对每一段曲线再进行 DP 抽稀算法。

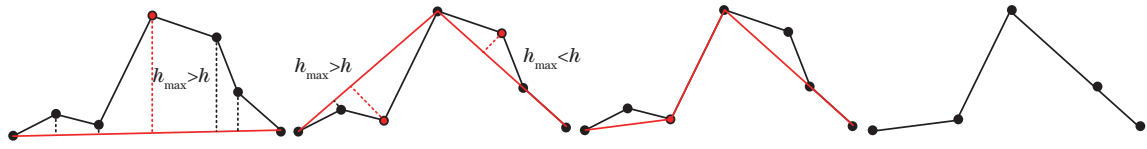


图 3 DP 算法实现流程的简化示意图

Fig. 3 Simplified schematic diagram of DP algorithm implementation process

对压缩效果的评价指标有线段空间偏移、面积偏差和压缩比,其中面积偏差对面积区域数据是非常重要的指标<sup>[17]</sup>。由于本文是对舌体边缘齿痕区域进行分析,所以选择面积偏差作为衡量数据压缩效果的评价指标。面积偏差指的是压缩前的曲线  $F_s, \dots, F_t$  与压缩以后的线段  $L$  组成的封闭面积的大小,面积偏差  $E_A(L)$  的计算公式为

$$E_A(L) = \text{Area}[(F_s, F_{s+1}, \dots, F_t), L] \quad (9)$$

为了便于比较不同的数据压缩算法的压缩效果,计算不同数据压缩算法的面积偏差与压缩前的曲线首尾相连构成图形的面积的比值  $R_s$ ,作为相对面积偏差,对数据压缩的效果进行量化分析:

$$R_s = \frac{E_A(L)}{\text{Area}(F_s, F_{s+1}, \dots, F_t, F_s)} \quad (10)$$

#### 4.2 齿痕区域边缘提取与特征分析

为了进一步分析齿痕舌的形态特征,通过对齿痕舌边缘进行曲线拟合提取齿痕的数量和深度信息。将二值化以后的齿痕舌边缘图片[图 2(f)]作为研究对象,为了得到齿痕舌边缘齿痕部分厚度变化情况,将水平方向非零像素点个数视为齿痕舌边缘具体齿痕厚度。由于齿痕边缘是一个连续半包围结构,所以用来保存舌左和舌右的齿痕厚度数据的数组长度为 2 倍的舌象有效区域长度(图 4)。

根据采集到的厚度数据作曲线图可以大致反映齿痕舌边缘齿痕区域厚度的变化情况,但是如果直接对图线进行齿痕数量分析,则由于舌体切割导致舌体边缘不光滑,以及舌体本身边缘不平整产生较多毛刺,对分析齿痕产生干扰。因此采用 DP 算法对齿痕部分边缘曲线进行压缩,以去除冗余的点,同时保留曲线上关键的可以反映齿痕区域凹陷的点,而由于 DP 算法本身存在较大的面积偏差<sup>[17]</sup>,所以只通过阈值对曲线上的点进行保留会导致部分关键点的缺失。

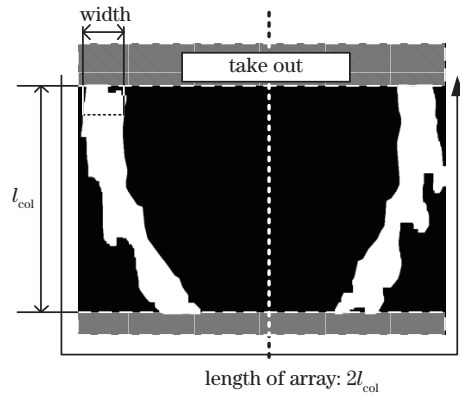


图 4 齿痕舌边缘齿痕厚度数组的建立过程

Fig. 4 Establishment process of tooth mark thickness array of scallop tongue edge

为了保留部分被删去点的细节,可以在曲线上的点到直线的最大距离小于阈值时,将该段曲线上的点通过最小二乘法进行拟合,而不是简单删去,通过放松对端点的精度,提升曲线整体的压缩精度<sup>[18]</sup>。

传统的最小二乘法是通过离差平方和达到最小的准则来确定的,可以做到点比较“均匀”地分布在拟合直线的两边。为了能够进一步提升曲线拟合的精度,本文提出基于垂线段总和最小的最小二乘法改进的 DP 算法(VDLS-DP)。

首先假定最小回归直线为

$$y = ax + b \quad (11)$$

然后将所有的样本点  $(x_i, y_i) (i = 1, 2, \dots, n)$  对回归直线作垂线段,并将这些垂线段的平方总和代替最小二乘法中的离差平方和。定义函数  $S(a, b)$  为垂线段距离的平方和:

$$S(a, b) = \sum_{i=1}^n \frac{(ax_i - y_i + b)^2}{a^2 + 1} \quad (12)$$

为了使  $S(a, b)$  可以取最小值,求  $S(a, b)$  关于  $a, b$  的偏导数并令偏导数等于 0:

$$\frac{\partial S(a, b)}{\partial a} = \sum_{i=1}^n \frac{2x_i(ax_i - y_i + b)(a^2 + 1) - 2a(ax_i - y_i + b)^2}{a^2 + 1} = 0, \quad (13)$$

$$\frac{\partial S(a, b)}{\partial b} = \sum_{i=1}^n \frac{2(ax_i - y_i + b)}{a^2 + 1} = 0. \quad (14)$$

由式(14)可知:

$$b = \bar{y} - a\bar{x}. \quad (15)$$

联立式(13)和(15)即可求得:

$$a = \frac{-(\bar{x}\bar{y} - \overline{xy})}{\overline{x^2} - \bar{x}^2 - \overline{xy} + \bar{y}^2}. \quad (16)$$

最后通过式(15)求出  $b$ , 得到该段数据的回归直线。

将改进后的基于垂线段总和最小的最小二乘法对 DP 算法过程中最大距离小于阈值的曲线段上的点进行拟合。

计算经过 VDLS-DP 算法压缩以后的曲线的极小值点与左右两边数据点构成的面积, 如果面积大于齿痕面积阈值  $S_0$  则认为这一极小值点为齿痕凹陷点, 将满足条件的极小值点个数作为齿痕的数量  $T_{\text{num}}$ 。

参考任玉杰等<sup>[19]</sup>提出的齿痕舌分类标准, 将齿痕舌分为三类: 轻度齿痕舌、中度齿痕舌和重度齿痕舌。选择 234 张齿痕深度较浅的齿痕舌和 207 张齿痕深度较深的齿痕舌作为训练集, 将压缩后的齿痕边缘厚度数据的均值和方差作为齿痕深度的特征构建特征向量集, 送入 SVM 中构建训练模型, 用来判断齿痕深浅。

将齿痕部分 [图 2(f)] 的面积  $S_T$  与舌边缘 [图 2(c)] 的面积  $S_E$  之比定义为齿痕的可见性指数  $R_{TE}$ , 以对齿痕程度进行量化,  $R_{TE}$  的值越大, 表示舌的齿痕程度越深。

$$R_{TE} = 1 - \frac{S_T}{S_E}. \quad (15)$$

根据任玉杰等<sup>[19]</sup>和李敏<sup>[8]</sup>提出的齿痕舌的分类方法结合中医师的指导, 齿痕数小于等于 4 且齿痕浅的为轻度齿痕舌, 齿痕数大于 6 且齿痕深的为重度齿痕舌, 其余状况均为中度齿痕舌。

## 5 实验结果与分析

实验环境: 实验中所有的图片都是通过天中依脉公司 YM-III 型智能中医四诊仪和四诊平台 V0.1.0 采集得到, 图片数据来源为天津某三甲医院, 采集到的舌面象图片尺寸为 1728 pixel × 2592 pixel, 并由 2 名中医师对采集到的舌象图片进行齿痕舌的判别, 以及齿痕个数、齿痕程度的判别。为了算法的硬件实现, 所有程序均在 Visual Studio

2015 环境下编写, 使用 OpenCV 库函数, 并将算法封装为动态链接库供前端调用执行。

### 5.1 齿痕有无判别结果与分析

实验的测试集为舌诊仪采集的舌象图片共 277 张, 其中齿痕舌图片有 163 张, 非齿痕舌图片 114 张。得到的统计结果如表 1 所示。

表 1 齿痕判别结果

| Item         | Tooth-marked tongue | Non tooth-marked tongue | Total |
|--------------|---------------------|-------------------------|-------|
| Correct      | 135                 | 89                      | 224   |
| Incorrect    | 28                  | 25                      | 53    |
| Accuracy / % | 82.82               | 78.07                   | 80.86 |

实验结果表明: 本文所提对齿痕有无的判别算法是有效的, 但是仍然存在误判的情况, 尤其是将非齿痕舌误判为齿痕舌的情况较多。通过分析发生误判的图片, 对齿痕舌的漏检主要集中在齿痕没有明显分界的齿痕舌中, 这是由于本文判别算法主要是针对齿痕在舌体上的阴影进行判别, 所以对齿痕程度较浅而且齿痕无明显分界的齿痕舌误判率高; 对非齿痕舌的误判主要集中在由于舌体卷曲而产生阴影的非齿痕舌中, 判别算法将阴影误判为齿痕导致正确率较低。

### 5.2 齿痕数量检测结果与分析

对判别为齿痕舌的舌象分别使用传统的 DP 算法和本文提出的 VDLS-DP 算法对齿痕舌齿痕区域的边缘厚度曲线进行压缩处理, 得到的结果如图 5 所示。

分别计算经过 DP 算法和 VDLS-DP 算法压缩后的曲线与原数据曲线之间的相对面积偏差  $R_s$ , 对数据压缩效果进行量化分析。实验样本为四诊仪采集且判断为有齿痕的舌象图片 135 张, 得到的统计结果如表 2 所示。

通过分析表 2 可知, VDLS-DP 算法与常规的 DP 算法相比, 具有更小的相对面积偏差, 所以经过 VDLS-DP 算法压缩后得到的曲线能在整体上更好地反映原始数据的细节, 对齿痕的分析和检测会更加精确。由分析可知, 传统的 DP 算法更加适用于对庞大的数据进行粗糙简化和简单压缩的场景, 如与地理信息系统相关的一些领域与行业; 本文提出的 VDLS-DP 算法更加适合数据量偏小且对实验结果要求较为精确的场景。

然后分别使用文献[6]中提到的基于凹点检测

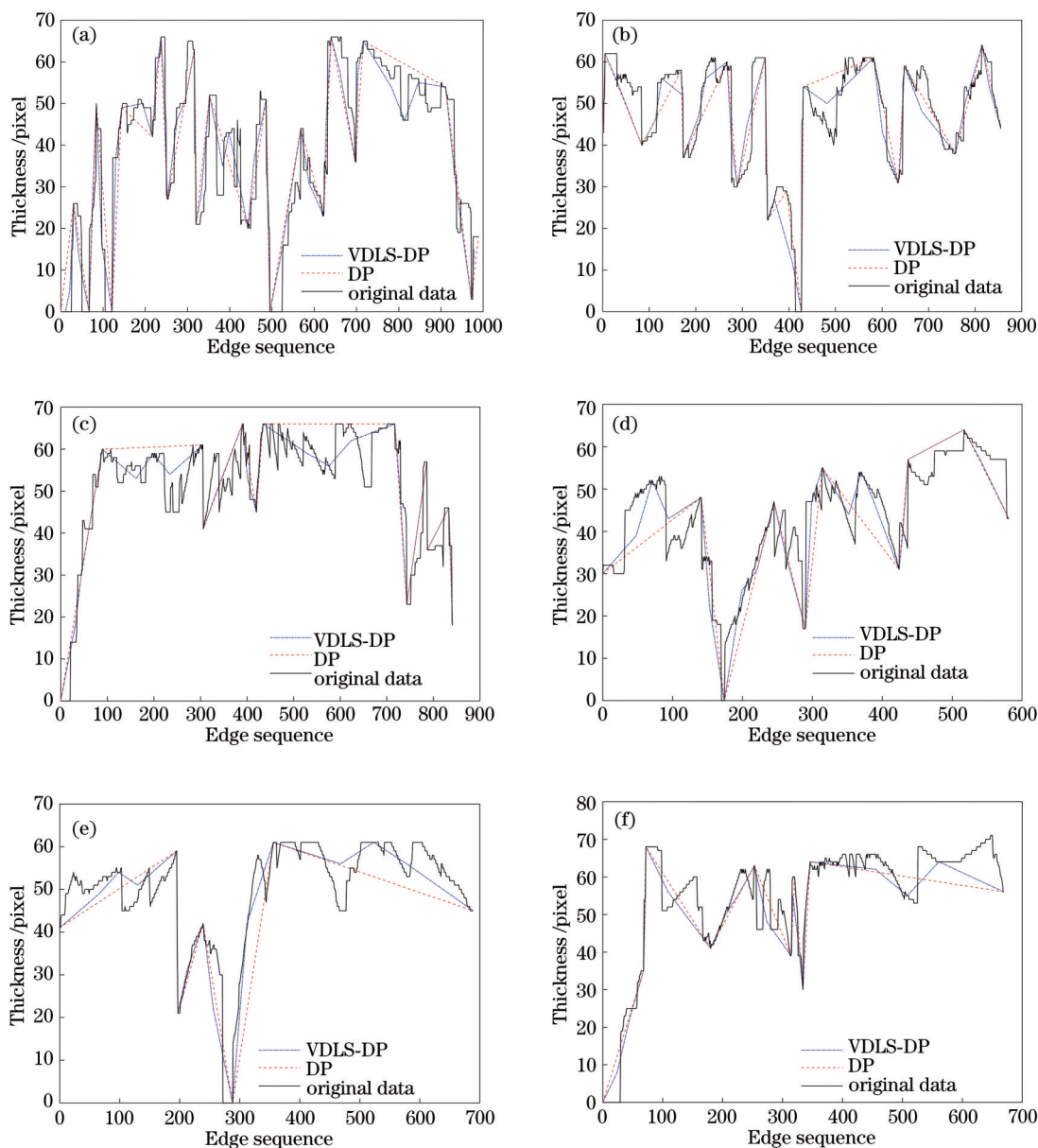


图 5 DP 算法和 VDLS-DP 算法对原始数据的压缩效果。(a)(b) 重度齿痕舌; (c)(d) 中度齿痕舌; (e)(f) 轻度齿痕舌  
 Fig 5 Compression effect of DP algorithm and VDLS-DP algorithm on original data. (a)(b) Severe tooth-marked tongue; (c)(d) moderate tooth-marked tongue; (e)(f) mild tooth-marked tongue

表 2 DP 算法和 VDLS-DP 算法的相对面积偏差

Table 2 Relative area deviation of DP algorithm and VDLS-DP algorithm

| Algorithm type | $R_s / \%$ |
|----------------|------------|
| DP             | 11.07      |
| VDLS-DP        | 8.65       |

的齿痕识别方法和文献[7]中基于 DP 算法的齿痕特征识别方法对齿痕舌的齿痕数量进行检测,并与本文提出的基于 VDLS-DP 算法的齿痕数量检测方法的检测结果进行对比。得到统计结果如表 3 所示。

实验结果表明:本文所提齿痕数量检测算法相

表 3 齿痕数量检测结果

Table 3 Performance of tooth marks number detection

| Algorithm type | Incorrect | Total | Accuracy /% |
|----------------|-----------|-------|-------------|
| Ref. [6]       | 71        |       | 45.19       |
| DP             | 41        | 135   | 69.63       |
| VDLS-DP        | 27        |       | 80.00       |

比于其他两种算法是比较有效的。因为其他两种算法直接对舌体边缘进行齿痕检测,完全基于舌体的形态,但是很多齿痕舌尤其轻度齿痕舌的表现形式为牙齿压迫在舌体上形成的齿痕印记,并没有呈现于舌体形态,所以这两种算法对轻度齿痕舌的数

量检测不理想。本文算法对齿痕数量的检测误差主要是由于齿痕数量检测是通过非零像素点个数来判断的,对舌体分割部分算法的精确度要求比较高。通过分析检测效果比较差的图片发现,大部分都是舌体分割效果不好导致。

### 5.3 齿痕程度检测结果与分析

实验的样本为四诊仪采集且判断为有齿痕的舌象图片 135 张,根据实验得到的齿痕数量  $T_{num}$  和

由 SVM 分类模型判别得到的齿痕深浅对齿痕程度进行判别,得到统计结果如表 4 所示。

实验结果表明:本文所提齿痕程度判断方法在判断轻度齿痕舌和重度齿痕舌时较为准确,对中度齿痕舌的判断效果欠佳。在实验过程中发现,舌体边缘偏红的图像以及舌体分割效果不理想的图像容易对齿痕深度的判别造成较大干扰,进而影响最后的齿痕程度判别。

表 4 齿痕程度检测结果

Table 4 Test results of tooth marks

| Tooth mark degree | Amount | Incorrect       |        | Accuracy / % |
|-------------------|--------|-----------------|--------|--------------|
|                   |        | Error type      | Amount |              |
| Mild              | 93     | Mild→moderate   | 2      | 94.62        |
|                   |        | Mild→severe     | 3      |              |
| Moderate          | 27     | Moderate→mild   | 4      | 74.07        |
|                   |        | Moderate→severe | 3      |              |
| Severe            | 15     | Severe→mild     | 0      | 86.67        |
|                   |        | Severe→moderate | 2      |              |
| Total             | 135    |                 | 14     | 89.63        |

## 6 结 论

本文提出一种基于齿痕边缘形态特征提取的齿痕舌综合检测算法,该算法首先对齿痕边缘区域进行提取,然后对边缘区域进行凸包缺陷分析和边缘曲线分析,得到一系列相关参数,实现对齿痕舌的综合检测,并对齿痕程度进行量化表示。本文算法与现有的齿痕舌算法相比,能更好识别齿痕不直接呈现于舌体形态的齿痕舌图像,在实际运行中具有较高的正确率。目前该算法已经落地到仪器并在医院进行临床应用和数据采集,对齿痕舌的检测取得了较好的效果。未来将进一步优化舌体分割部分的算法,并结合深度学习和迁移学习的相关知识对现有的分类模型做进一步改进。本文所提齿痕舌综合检测算法可以辅助临床医师对中医齿痕舌进行诊断,为齿痕舌相关疾病的中医客观化研究提供一定的参考,也为未来齿痕舌以及其他中医证候与中医体质的相关研究提供帮助。

### 参 考 文 献

[1] Hu M C, Lan K C, Fang W C, et al. Automated tongue diagnosis on the smartphone and its applications [J]. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2019, 174: 51-64.

[2] 马旭翔, 李勇枝, 许家佗. 舌诊信息化技术在证候诊

断及疗效评价中的应用[J]. *中国中医基础医学杂志*, 2018, 24(12): 1716-1719.

Ma X X, Li Y Z, Xu J T. Application of information technology in tongue diagnosis in syndrome diagnosis and therapeutic evaluation[J]. *Chinese Journal of Basic Medicine in Traditional Chinese Medicine*, 2018, 24(12): 1716-1719.

[3] 王晓洒, 王峰, 王宏武, 等. 图像处理在中医望诊中的应用[J]. *电脑知识与技术*, 2019, 15(22): 212-213, 221.

Wang X S, Wang F, Wang H W, et al. Application of image processing in traditional Chinese medicine [J]. *Computer Knowledge and Technology*, 2019, 15 (22): 212-213, 221.

[4] Oji T, Namiki T, Nakaguchi T, et al. Study of factors involved in tongue color diagnosis by kampo medical practitioners using the Farnsworth-Munsell 100 hue test and tongue color images[J]. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2014, 2014: 783102.

[5] 刘文兰. 中医望诊与舌诊彩色图解[M]. 北京: 化学工业出版社, 2018.

Liu W L. Color illustration of inspection and tongue diagnosis of traditional Chinese medicine[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2018.

[6] 钟少丹, 谢铮桂, 蔡群英. 齿痕舌识别方法的研究[J]. *韩山师范学院学报*, 2008, 29(6): 34-38.



- Zhong S D, Xie Z G, Cai Q Y. Resarches on tooth-marked tongue recognition method[J]. Journal of Hanshan Normal University, 2008, 29(6): 34-38.
- [7] 朱穆朗玛, 陆萍, 夏春明, 等. 基于道格拉斯-普克法提取 55 例齿痕舌图像特征研究[J]. 中华中医药学刊, 2014, 32(9): 2138-2140.
- Zhumu L M, Lu P, Xia C M, et al. Research on Douglas-Peucker method in feature extraction from 55 cases of tooth-marked tongue images[J]. Chinese Archives of Traditional Chinese Medicine, 2014, 32(9): 2138-2140.
- [8] 李敏. 病理性齿痕舌分布规律的临床研究[J]. 中国中医药咨讯, 2011, 3(20): 162-163.
- Li M. Clinical study on the distribution of tongue of pathological tooth marks[J]. Journal of China Traditional Chinese Medicine Information, 2011, 3(20): 162-163.
- [9] 苏寒松, 刘腾腾, 刘高华, 等. 基于神经网络的学生行为检测算法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(22): 221016.
- Su H S, Liu T T, Liu G H, et al. Algorithm for student behavior detection based on neural network[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(22): 221016.
- [10] 韦玉科, 范鹏, 曾贵. 改进的 GrabCut 方法在舌诊系统中的应用[J]. 传感器与微系统, 2014, 33(10): 157-160.
- Wei Y K, Fan P, Zeng G. Application of improved GrabCut method in tongue diagnosis system[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2014, 33(10): 157-160.
- [11] 张璐瑶, 汪莉, 包璇, 等. 基于局部灰度阈值的舌象裂纹检测方法[J]. 电脑知识与技术, 2017, 13(29): 163-165.
- Zhang L Y, Wang L, Bao X, et al. A fissure detection method for tongue image based on local gray threshold[J]. Computer Knowledge and Technology, 2017, 13(29): 163-165.
- [12] 张红颖, 赵晋东. HSV 空间的 RetinexNet 低照度图像增强算法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(20): 201504.
- Zhang H Y, Zhao J D. RetinexNet low illumination image enhancement algorithm in HSV space[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(20): 201504.
- [13] 万真真, 李春雪, 刘芳, 等. 嗜酸性粒细胞胃肠炎病理切片的计算机辅助诊断[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(20): 201701.
- Wan Z Z, Li C X, Liu F, et al. Computer-aided diagnosis of pathological section for eosinophilic gastroenteritis[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(20): 201701.
- [14] 杨松, 张显云, 杜宁, 等. 基于凸包 Graham 扫描法的多系统融合精密单点定位快速选星算法[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(2): 181-186.
- Yang S, Zhang X Y, Du N, et al. A fast satellite selection algorithm for multi-GNSS PPP based on convex hull with Graham's scan[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2018, 38(2): 181-186.
- [15] 高晨, 张亚军. 基于凸包算法的指尖识别方法[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2017, 44(2): 70-75.
- Gao C, Zhang Y J. Fingertip recognition based on a convex hull algorithm[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition), 2017, 44(2): 70-75.
- [16] 王笑天, 吕海洋. 基于第一特征点的道格拉斯-普克压缩算法[J]. 软件导刊, 2016, 15(11): 68-70.
- Wang X T, Lü H Y. Douglas-poke compression algorithm based on the first feature point[J]. Software Guide, 2016, 15(11): 68-70.
- [17] 米学军, 盛广铭, 张婧, 等. GIS 中面积偏差控制下的矢量数据压缩算法[J]. 地理科学, 2012, 32(10): 1236-1240.
- Mi X J, Sheng G M, Zhang J, et al. A new algorithm of vector data compression based on the tolerance of area error in GIS[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(10): 1236-1240.
- [18] 杨云, 孙群, 朱长青. 曲线数据压缩的总体最小二乘算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2008, 35(5): 946-950.
- Yang Y, Sun Q, Zhu C Q. Polyline data compression using total least squares[J]. Journal of Xidian University, 2008, 35(5): 946-950.
- [19] 任玉杰, 梁嵘, 张莹, 等. 体检人群的齿痕舌与中医体质的相关性研究[J]. 世界科学技术(中医药现代化), 2012, 14(6): 2283-2289.
- Ren Y J, Liang R, Zhang Y, et al. Correlational research between tooth-marked tongue and TCM constitution in the health inspection people[J]. World Science and Technology (Modernization of Traditional Chinese Medicine and Materia Medica), 2012, 14(6): 2283-2289.